

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ИГОРЯ СИКОРСКОГО»

В.С. МАЙБОРОДА, И.В. СЛОБОДЯНЮК, Д.Ю. ДЖУЛИЙ

**МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ
СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

Киев
КПИ им. Игоря Сикорского
2017

УДК 621.923

Рекомендовано Ученым советом Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (протокол № 11 от 04 декабря 2017 г.)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Ковалев Виктор Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор,
Донбасская государственная машиностроительная академия

Саленко Александр Фёдорович, д-р техн. наук, профессор,
Кременчугский национальный университет имени Михаила
Остроградского

В.С. Майборода, И.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулий

Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы.
- (рос. мов). Житомир.: ПП «Рута», 2017. – 272 с.
ISBN 978-617-581-336-2

Рассмотрены основные положения эффективной магнитно-абразивной обработки деталей на установках с большим рабочим зазором. Представлен анализ особенностей поведения и формирования магнитно-абразивного инструмента, предложены эффективные пути воздействия на его свойства при обработке деталей сложной пространственной формы. Установлено влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки на установках с кольцевым расположением рабочей зоны на показатели качества деталей сложной формы, таких как осевой и концевой режущий инструмент, твердосплавные многогранные неперетачиваемые пластины, лопатки газотурбинных двигателей. Показано целесообразность использования разработанного метода магнитно-абразивной обработки на финишных этапах изготовления деталей с целью повышения их эксплуатационных характеристик. Для специалистов по механической обработке, преподавателей, аспирантов и студентов технических специальностей.

Ил. 180. Табл. 26

ISBN 978-617-581-336-2

© Майборода В.С., 2017
© Слободянюк И.В., 2017
© Джулий Д.Ю., 2017
© КПИ им. Игоря Сикорского
© ПП «Рута», 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
<i>Раздел 1</i> ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА (МАИ) В БОЛЬШИХ РАБОЧИХ ЗАЗОРАХ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ (МАО)	9
1.1 Анализ условий взаимодействия между частицами МАИ при МАО в больших рабочих зазорах	9
1.2 Магнитно-абразивные порошки, которые используются для формирования МАИ при МАО в больших рабочих зазорах	12
1.3 Экспериментальный станок для МАО деталей сложной формы типа кольцевая ванна с большим рабочим зазором	19
1.4 Градиент магнитного поля в кольцевых рабочих зонах	22
1.5 Перераспределение плотности МАИ по длине рабочей зоны	25
1.6 Особенности формирования структурных элементов МАИ в рабочей зоне кольцевого типа	29
1.7 Анализ динамических процессов, происходящих в МАИ при МАО в рабочем зазоре кольцевого типа	31
1.7.1 Зоны возмущений в МАИ, который формируется при МАО в рабочем зазоре кольцевого типа	31
1.7.2 Анализ характера смещения макрообъемов МАИ в уплотненной зоне в процессе МАО	38
1.7.3 Структурно-кинетическая модель МАИ в рабочей зоне кольцевого типа	50
1.8 Обеспечение равномерного МАО длинномерных деталей на установках с кольцевым расположением рабочей зоны	55
1.8.1 Влияние степени заполнения рабочих зон МАП на процесс формирования МАИ	55
1.8.2 Определение рациональных углов базирования длинномерных деталей на установках с кольцевым расположением рабочей зоны	59
1.8.3 Использование специальных формообразующих МАИ элементов при МАО на установках с кольцевым расположением рабочей зоны	61
1.8.4 Особенности изменения полирующе-упрочняющей способности МАИ при МАО в большом рабочем зазоре кольцевого типа	74

Раздел 2 МАО КОНЦЕВОГО И ОСЕВОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА МАГНИТНО-АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ СО СТАБИЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ КОЛЬЦЕВОГО ТИПА	82
2.1 Магнитно-абразивная обработка разверток на установке типа кольцевая ванна	84
2.2 Магнитно-абразивная обработка сверл	90
2.3 Влияние условий МАО на показатели качества сверл из быстрорежущей стали после их переточки	103
2.4 Магнитно-абразивная обработка быстрорежущих сверл с ионно-плазменными покрытиями	107
2.5 Использование МАО, как предварительной и промежуточной операций при диффузионном насыщении поверхностного слоя химико-термическим методом	113
2.6 Магнитно-абразивная обработка концевых фрез	124
2.7 Влияние условий магнитно-абразивной обработки на показатели качества твердосплавных фрез	129
2.8 Влияние условий магнитно-абразивной обработки на показатели качества метчиков из быстрорежущей стали	133
Раздел 3 МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА МНОГОГРАННЫХ НЕПЕРЕТАЧИВАЕМЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ КОЛЬЦЕВОГО ТИПА	136
3.1 Влияние кинематики и динамики процесса МАО на качество МНТП	137
3.2 Методика расчета кинематических параметров МАО МНТП в условиях больших магнитных зазоров кольцевого типа	144
3.3 Определение составляющих скоростей взаимодействия рабочих элементов МНТП с МАИ при МАО в условиях больших магнитных зазоров кольцевого типа	148
3.4 Интегральная оценка интенсивности обработки вдоль режущей кромки МНТП при МАО в условиях больших магнитных зазоров кольцевого типа	151
3.5 Влияние МАО на микрогеометрию рабочих поверхностей, радиус и форму округления режущих кромок МНТП	155
3.5.1 Формирование радиуса округления и формы округления режущих кромок пластин при МАО	156
3.5.2 Влияние МАО на шероховатость рабочих поверхностей МНТП	179

3.6 Влияние метода МАО на твердость поверхностного слоя рабочих элементов МНТП	184
3.7 Влияние МАО на прочность и сопротивление разрушению МНТП	196
3.8 Влияние МАО на повышение стойкости МНТП	201
Раздел 4 МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	207
4.1 Экспериментальная установка для магнитно-абразивной обработки лопаток ГТД	207
4.2 Технологическое обеспечение качества геометрических параметров рабочих кромок лопаток ГТД	215
4.3 Влияние магнитно-абразивной обработки на состояние поверхности и физико-механические характеристики поверхностного слоя лопаток ГТД	223
4.3.1 Влияние условий процесса МАО на формирование технологических остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток ГТД	224
4.3.2 Влияние наследственности обработки на состояние поверхности и физико-механические свойства поверхностного слоя лопаток компрессоров ГТД	230
4.3.3 Оптимизация технологических параметров МАО для обеспечения заданных свойств поверхности и поверхностного слоя лопаток при обработке в кольцевой ванне	234
4.4 Применение МАО для восстановления эксплуатационных характеристик лопаток компрессоров ГТД при ремонте	240
4.5 Влияния наследственности обработки поверхности ремонтируемых лопаток с последующим нанесением тонкослойных покрытий на их эксплуатационные характеристики	246
4.6 Применение МАО для финишной обработки лопаток компрессоров изготовленных из титановых сплавов	249
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	256
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	257

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эффективность магнитно-абразивной обработки (МАО) в значительной мере определяется соотношением двух технологических факторов, которые взаимосвязаны:

- величиной давления порошкового магнитно-абразивного инструмента (МАИ) на поверхность обрабатываемых деталей, которая существенно зависит от величины магнитной индукции в рабочих зазорах станков, их конструкции, динамики процесса обработки;

- скоростью относительного перемещения частиц порошкового МАИ и обрабатываемой поверхности.

При этом в процессе МАО, с целью обеспечения равномерной и производительной обработки, указанные факторы, для любого участка обрабатываемой поверхности каждой конкретной детали, должны обеспечивать близкую по величине эффективность.

Увеличение сил магнитного поля в рабочих зонах магнитных зазоров обеспечивает формирование МАИ повышенной жесткости, которая приводит к росту давления со стороны отдельных объемов МАИ на поверхность деталей. Однако, при этом снижается возможность инструмента нивелировать относительно обрабатываемой поверхности, то есть осуществлять равномерное силовое воздействие на каждый элементарный участок детали, особенно в случаях обработки деталей сложной пространственной формы.

Увеличение скорости перемещения деталей относительно магнитно-абразивного порошка (МАП), фиксированного магнитным полем, обеспечивает рост динамической составляющей со стороны МАИ на обрабатываемую поверхность. Это, в свою очередь, приводит к активному переформированию МАИ и образованию в нем специфических уплотненных зон. Максимальная фиксация МАИ в рабочих зазорах реализуется при обработке деталей простой формы – тела вращения, плоскости, когда возможно использование магнитных зазоров малой ширины, создавая в них достаточно «большие» магнитные поля – 1 – 1,2 Тл. Обработка деталей сложной формы, представителями которых являются лопатки газотурбинных двигателей (ГТД), режущий инструмент, детали спецарматуры, как правило, реализуется в условиях магнитных зазоров большой ширины – когда расстояние от полюсного наконечника до обрабатываемой поверхности значительно превосходит (в 10 и более раз) средний размер частиц порошкового МАИ. Для таких условий МАО, в особенности при обработке изделий изготовленных из диа- и парамагнитных материалов, достижение высоких значений магнитной

индукции связано с существенными техническими сложностями и значительными энергетическими затратами. Реализация эффективного процесса МАО деталей сложной пространственной формы во многом определяется кинематикой и динамикой процесса обработки – обеспечением сложной траектории перемещения обрабатываемых деталей в зонах обработки, соответствующими скоростями обработки, использованием порошковых материалов со специальными реологическими, абразивными и полирующими свойствами. При этом наиболее приемлемой схемой обработки, позволяющей избежать нежелательных явлений, связанных с выносом и разбрасыванием порошковой массы за пределы рабочей зоны, является схема типа «кольцевая ванна». Для такой схемы МАО, при использовании магнитных зазоров значительной ширины, наиболее существенными факторами, определяющими эффективность процесса, являются скорость относительного перемещения обрабатываемой детали и МАИ, а также траектория движения деталей в зонах обработки. Магнитное поле при этом удерживает и формирует в рабочем состоянии в зонах обработки порошковый МАИ. Для этой цели достаточным является использование слабых магнитных полей, когда величина магнитной индукции в рабочих зонах не превышает 0,3 – 0,4 Тл.

Исследования процесса МАО деталей различной геометрической формы в условиях больших магнитных зазоров, анализ условий формирования МАП в процессе обработки в МАИ, выполненные в последние годы позволили сформулировать основные требования к процессу, необходимые для обеспечения эффективной обработки:

- обеспечение равномерного прижима элементов МАИ к обрабатываемым поверхностям силами магнитного происхождения или за счет динамических факторов, которые определяются характером перемещения деталей в рабочих зонах установок и станков для МАО. То есть, наличие нормальной составляющей усилий прижима частиц магнитного абразива к обрабатываемой поверхности для обеспечения упруго-пластического деформирования микронеровностей поверхности и тонкого поверхностного слоя;

- наличие достаточной и равномерно распределенной относительно обрабатываемых поверхностей тангенциальной составляющей скорости относительного движения элементов МАИ и поверхностей деталей для обеспечения условий активного пластического деформирования, микрорезания и скобления поверхностного слоя;

- способность МАИ к стабильному:

а) переформированию, перемешиванию и восстановлению рабочей формы,

б) обеспечению равномерного движения относительно поверхностей обрабатываемых деталей, без образования «застойных», «теневых» зон возле поверхности деталей,

в) отсутствие или нивелирование процессов, приводящих к выбрасыванию или вытеснению порошка из зоны активной обработки и обеспечение равномерного прогнозируемого его распределения по рабочему объему.

Варьирование указанными факторами позволяет в широком диапазоне решать конкретные технологические задачи, связанные с формированием микрогеометрии поверхности деталей, отдельных ее элементов, физико-механических свойств поверхностного слоя на разных этапах как изготовления, так и восстановления работоспособности деталей.

Раздел 1

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА (МАИ) В БОЛЬШИХ РАБОЧИХ ЗАЗОРАХ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ (МАО)

При разработке высокоэффективного процесса МАО особое внимание необходимо уделять процессам, связанным с условиями формирования магнитно-абразивного инструмента на протяжении всего технологического цикла обработки, особенностями его структурообразования и движения отдельных групп частиц. Ранее было показано [81], что при МАО в условиях больших рабочих зазоров взаимодействие отдельных элементов обрабатываемой поверхности с магнитно-абразивным порошком, сформированным в магнитно-абразивный инструмент целесообразно рассматривать не как единичные акты контактирования отдельных частиц порошка с обрабатываемыми поверхностями деталей, а как процесс взаимодействия отдельных квазистабильных образований из частиц порошка – представительских объемов – с деталью. При этом необходимо учитывать градиент магнитного поля, которое обеспечивает определенное, достаточно стабильное формирование устойчивых структурных образований в МАИ.

1.1 Анализ условий взаимодействия между частицами МАИ при МАО в больших рабочих зазорах

Выполним комплексный анализ явлений, которые могут возникать в МАИ при МАО, по характеру изменения энергии МАИ, как интегральной величины, которая описывает общее состояние порошкового инструмента.

Рассмотрим величину магнитной энергии W некоторого удаленного объема магнитно-абразивного порошка U – представительского объема в магнитном поле в большом рабочем магнитном зазоре при условии возможности его определенного структурообразования:

$$W = \iiint_U \frac{\vec{B}^2}{2\mu\mu_0} dV \quad (1.1)$$

где \vec{B} – вектор магнитной индукции в рабочем зазоре; V – скорость МАО; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, μ – относительная магнитная проницаемость МАИ.

Скорость изменения магнитной энергии можно представить в виде:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = (\mu\mu_0)^{-1} \iiint_U \vec{B} \left(\text{rot}(\vec{V} \times \vec{B}) + \eta \vec{\nabla}^2 \vec{B} \right) \cdot d\vec{V} \quad (1.2)$$

где $\eta = \frac{1}{\mu\mu_0\sigma}$, σ – проводимость среды магнитно-абразивного порошка в рабочей зоне.

Первый член уравнения (1.2) с учетом уравнений электромагнитного поля – уравнений Максвелла можно записать как:

$$\begin{aligned} (\mu\mu_0)^{-1} \iiint_U \vec{B} (\text{rot}(\vec{V} \times \vec{B})) \cdot d\vec{V} &= \mu_e^{-1} \iiint_U \text{div}[\vec{V} \times \vec{B} \times \vec{B}] \cdot d\vec{V} + \\ &\iiint_U (\vec{V} \times \vec{B} \text{rot} \vec{B}) \cdot d\vec{V} = - \iiint_U (\vec{j} \times \vec{B}) \cdot d\vec{V} \end{aligned} \quad (1.3)$$

где $\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B})$ – плотность электрического тока в МАИ, \vec{E} – вектор напряженности электрического поля, возникающего в МАИ при МАО, который показывает уменьшение магнитной энергии МАИ в случае работы выполняемой пондеромоторной силой $\vec{j} \times \vec{B}$. С физической точки зрения величина пондеромоторной силы объясняется через максвелловские напряжения:

$$\vec{j} \times \vec{B} = -\text{grad} \frac{B^2}{2\mu\mu_0} + (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} = -\text{grad} \frac{B^2}{2\mu\mu_0} + \text{div} \frac{\vec{B} \cdot \vec{B}}{\mu\mu_0} \quad (1.4)$$

Это значит, что пондеромоторная сила $\vec{j} \times \vec{B}$ эквивалентная гидродинамическому давлению $\frac{B^2}{2\mu\mu_0}$, создаваемому магнитной индукцией в рабочих зонах и удельным натяжением цепочек зерен порошка $\frac{B^2}{\mu\mu_0}$ вдоль магнитных силовых линий. Растяжение цепочек зерен порошка, сформированных магнитным полем в процессе обработки повышает магнитную энергию МАИ.

Пондеромоторная сила действует перпендикулярно к магнитному полю и не приводит к прямому действия на особенности движения частиц параллельно магнитному полю. Ее действие разное

за природой – когда силовые линии «вмороженны» в среду, то есть двигаются вместе с представительскими объемами магнитно-абразивного инструмента и когда они свободно проходят через среду магнитно-абразивного порошка, оставаясь в неизменном состоянии при изменении его положения.

Анализ указанных выше результатов поведения порошкового МАИ в больших магнитных зазорах при незначительных магнитных полях показал, что если предположить, что линии магнитного поля почти «вмороженные» в МАИ, то есть имеют возможность двигаться без значительных изменений вместе с отдельными макрообъемами инструмента, то механические силы наиболее просто можно выразить через максвеловские напряжения и их действие будет перпендикулярно к действию силовых магнитных линий вследствие следующих причин:

1. Из-за бокового давления пучок силовых линий будет сопротивляться любым усилиям по боковому растяжению или сжатию цепочек зерен МАИ;

2. Из-за продольного натяжения силовые линии трансформируются в направлении сокращения, насколько позволяет сопротивление сжатию со стороны среды МАИ;

3. Из первых двух причин, если силовые линии отклонены от положения равновесия, возникает обратная сила, которая вызывает колебания около положения равновесия, что может привести к «псевдооживлению» МАИ.

В отдельных случаях большие магнитные напряжения могут привести к неустойчивости, при развитии которой порошковая среда, которая формирует МАИ должна «разбрасываться» магнитным полем. Возможность возникновения таких напряжений технически связано с использованием значительных величин магнитной индукции в рабочих зонах – больше 1 Тл, которые можно создать в магнитных зазорах незначительной величины до 2 – 2,5 мм. Подобный эффект невозможности проведения МАО из-за «разбрасывания» порошка отметил Ю.М. Барон в [3] при полировании со скоростью большей 2,5 м/с и величине B в рабочих зонах в пределах 1 Тл.

Выполненный анализ показывает, что на процесс МАО значительное влияние будет оказывать величина и градиент магнитного поля в рабочих зонах, скорость и траектория движения обрабатываемых деталей в среде магнитно-абразивного порошка и непосредственно свойства порошка.

Поэтому необходимо иметь достаточно полную информацию о вышеуказанных факторах.

1.2 Магнитно-абразивные порошки, которые используются для формирования МАИ при МАО в больших рабочих зазорах

Производительность и качество магнитно-абразивной обработки в значительной степени зависит от корректного выбора магнитно-абразивного порошка и его эксплуатационных характеристик. А именно – формы и размеров частиц порошка [3, 81, 98, 114], состава и структуры магнитно-абразивных порошковых материалов (МAM), которые определяют микротвердость, прочность зерен порошка и отдельных его компонентов, устойчивость к разрушению и износу [81, 98], особенностей взаимодействия МАИ с обрабатываемыми поверхностями, реологических свойств порошковой среды [6, 98] в магнитном поле.

В последнее время для МАО используют порошковые материалы, которые условно разделяют на несколько групп, а именно: механические смеси магнитных и абразивных частиц, порошковые материалы, полученные методами порошковой металлургии – так называемые керметные и плакированные порошки, порошки полученные путем диспергирования расплавов с последующей их классификацией и размолотом. Исследования выполнены с применением указанных выше групп порошков показали, что схемы МАО и условия, в которых выполняется обработка, являются определяющими при их выборе.

Известно два типа схем процесса МАО:

- Схемы, используемые для обработки изделий простой геометрической формы из ферромагнитных материалов, при которых используют магнитные зазоры малых размеров с повышенными значениями магнитной индукции в рабочих зонах – от 0,5 до 1 Тл. Для указанных схем определяющим фактором эффективности МАО является величина магнитной индукции, которая определяет степень прижима частиц МАИ к обрабатываемым поверхностям.

- Схемы для обработки изделий сложной пространственной формы, особенно из пара- и диамагнитных материалов. Ее целесообразно выполнять на станках с большими магнитными зазорами, в условиях, когда определяющими факторами эффективного МАО является скорость и траектория движения обрабатываемых деталей – динамический фактор, который обеспечивает прижим частиц МAM к обрабатываемым поверхностям.

Разница в схемах обработки определяет различия в требованиях к свойствам порошковых МАМ. Если для схем с малыми рабочими зонами прочность зерен порошка не является критической, то для условий их эксплуатации при «динамической» нагрузке – при использовании на установках с большими магнитными зонами при незначительной магнитной индукции в зоне обработки (до 0,4 Тл) – является одной из определяющих. Поэтому целесообразным является использование порошковых материалов, полученных методом диспергирования расплава [81, 98, 114] с повышенной прочностью зерен.

Выбор магнитно-абразивного порошка для конкретной схемы обработки и обрабатываемого материала является достаточно сложной проблемой, связанной с отсутствием полной информации об эффективности работы существующих порошков в разных условиях и большом количестве свойств, определяющих их эксплуатационные характеристики.

Особенно это касается информации об абразивной и полирующей способности магнитно-абразивных порошков, которая существенно зависит от геометрических и микрогеометрических характеристик отдельных частиц порошковых МАМ, которые используются для формирования МАИ. Именно эти характеристики будут определять область и эффективность использования тех или иных типов порошков, условий их контактного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью, способностью к обновлению режущих кромок (РК) отдельных частиц – проворачивания частиц в составе МАИ, что связано и зависит от степени их неравноосности, разветвленности внешней поверхности, характеристик внутреннего трения в МАИ [76]. Величина РК отдельных частиц будет определять вероятные условия контакта с обрабатываемой поверхностью [69, 120].

В зависимости от способов получения порошков с применением методов диспергирования расплавов, условно их можно поделить на два типа по форме частиц:

- осколочные, полученные в результате размола предварительно гранулированных из расплавов систем Fe-Si-Ti-C, Fe-Si-C материалов, имеющих практически беспористую структуру, их примерами являются: Полимам-Т, Ферромап, дробь чугуна колотая – ДЧК (ДЧК_н – полученная в результате размола предварительно гранулированных материалов, ДЧК_{б/у}, которая предварительно использовалась на установках струйно-абразивной обработки с последующей магнитной сепарацией) (рис. 1.1);

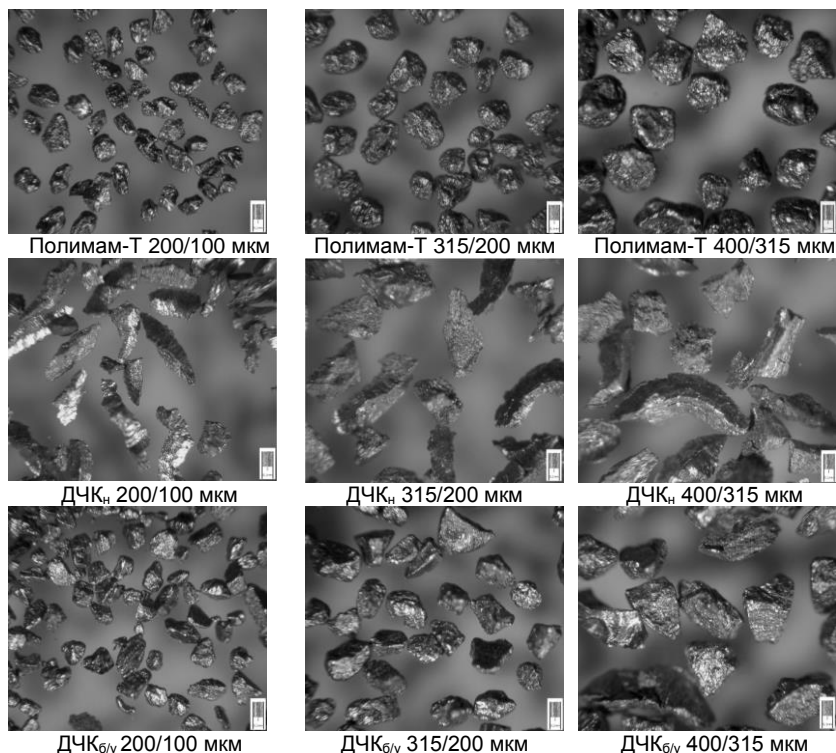


Рис. 1.1. Внешний вид осколочных частиц МАП

- округлые, полученные в результате распыления расплавов системы Fe-Si-C, Fe-C-Si-Al с применением жидкости или газа без последующего размол. К ним относятся ПР Р6М5, Полимам-М_{сф} (частицы имеют округлую форму) и Царамам (рис. 1.2). В отдельных случаях используют порошки Полимам-М после механического размол, которые по своим свойствам практически идентичны по составу и свойствам с порошком ДЧК, который относится к осколочным.

Все частицы имеют неправильную геометрическую форму (рис. 1.1 и рис. 1.2). Разница в форме частиц порошков одного состава или происхождения определяется способом получения, дополнительной обработкой, методом сепарации и другими факторами. Независимо от способа получения порошка, каждое отдельное зерно имеет на своей поверхности режущие элементы – кромки, которые характеризуются соответствующими микрогеометрическими характеристиками. В процессе

МАО используют порошковые материалы с достаточно широким фракционным составом от 100/63 до 1000/630 мкм, для получения различных качественных показателей обрабатываемых поверхностей [76].

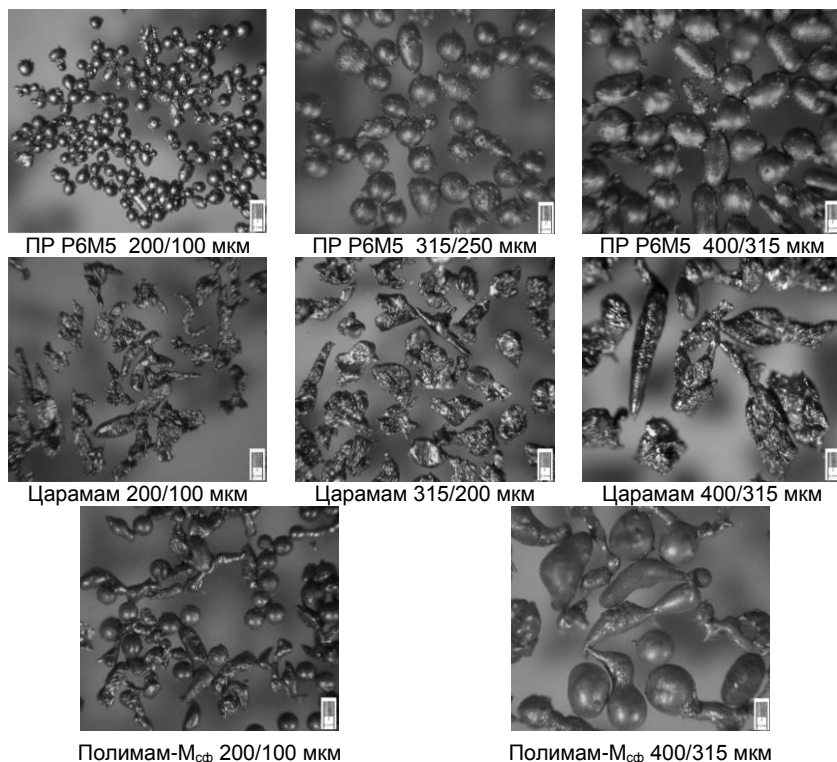


Рис. 1.2. Внешний вид округлых частиц МАП

Исследование геометрических и микрогеометрических характеристик МАП, а именно радиусов округления РК – $r_{кз}$ и коэффициентов неравноосности – k_f выполняли с помощью микроскопического анализа монослоя частиц различных МАП на инструментальном микроскопе УИМ-2М с последующей статистической обработкой полученных результатов. Схема измерения приведена на рис. 1.3. Учитывая специфику процесса МАО и условий формирования частиц МАП силами магнитного поля в МАИ, при макроанализе порошков контролировали максимальный размер проекции каждой отдельной

частицы в слое и размер этой проекции в перпендикулярном направлении по методике, описанной в [76]. Измеряли не менее 100 частиц каждого типа и размера зерен порошка и определяли отношение длины – b к ширине – a коэффициент неравноосности – $k_f = \frac{b}{a}$, характеризующий форму и удлинение зерен.



Рис. 1.3. Схема измерения параметров частиц МАП

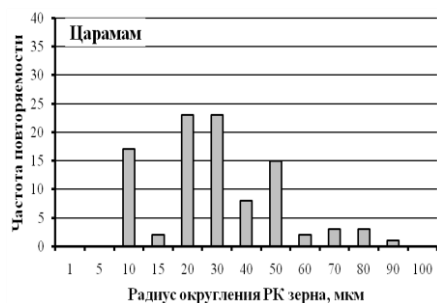
Результаты измерений приведены в табл. 1.1. Полученные результаты по определению степени неравноосности частиц МАП позволяют разделить их на:

- равноосные с коэффициентом неравноосности $k_f \leq 1,6$ – порошки типа Полимам-Т, ДЧК_{б/у} и ПР Р6М5;
- неравноосные $k_f > 1,6$ – порошки типа ДЧК_н, Царамам, Полимам-М_{сф}.

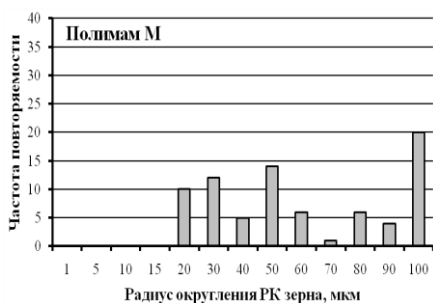
Таблица 1.1

Значения коэффициентов неравноосности частичек МАП – k_f

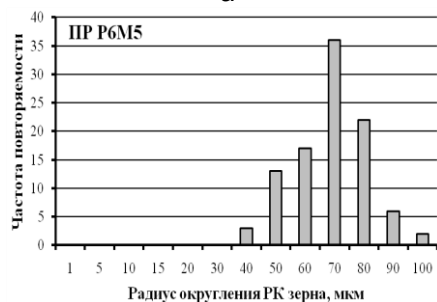
Тип порошка	Фракция, мкм	k_f	Стандартное отклонение
Полимам-Т	200/100	1,52	0,36
	315/200	1,41	0,37
	400/315	1,29	0,2
ДЧК _{б/у}	200/100	1,42	0,27
	315/200	1,48	0,35
	400/315	1,57	0,43
ПР Р6М5	200/100	1,1	0,2
	315/200	1,2	0,4
	400/315	1,4	0,54
ДЧК _н	200/100	2,88	1,22
	315/200	3,05	1,1
	400/315	2,96	1,7
Царамам	200/100	2,65	1,28
	315/200	2,13	0,89
	400/315	2,88	1,62
Полимам-М _{сф}	200/100	1,79	1,22
	400/315	2,07	1,01



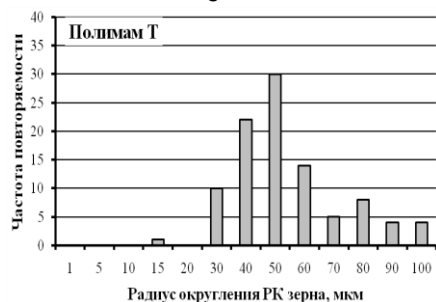
а



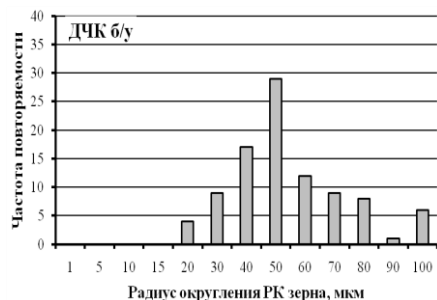
б



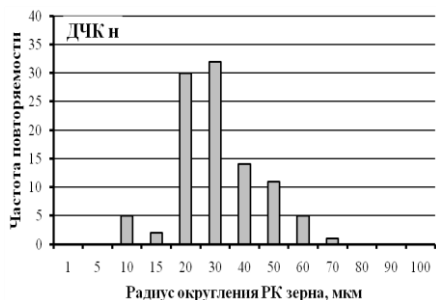
в



г



д



е

Рис. 1.4. Распределение величин радиусов округления РК на зернах магнитно-абразивных порошков с: а, б – округлой неравноосной; в – округлой равноосной; г, д – осколочной равноосной, е – осколочной неравноосной формой частиц

Для всех типов порошков с различными размерами от 200/100 мкм до 400/315 мкм рассчитанные значения статистических характеристик изменения радиусов округления РК приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Статистические характеристики изменения радиусов округления РК частиц МАП

Тип порошка	Фракция, мкм	Среднее значение $r_{кз}$, мкм	Ексцес	Асиметрия	Мода	Стандартное отклонение	Дисперсия
Полимам-Т	200/100	48,61	0,16	0,81	32,78	19,44	377,82
	315/200	65,69	3,60	1,22	49,17	19,40	376,39
	400/315	101,54	0,78	0,97	106,54	39,45	1556,21
ДЧК _н	200/100	26,52	0,65	1,06	24,59	12,89	166,19
	315/200	38,73	0,58	0,95	24,59	18,66	348,26
	400/315	45,46	0,94	0,96	32,78	18,19	330,82
ДЧК _{б/у}	200/100	52,26	2,79	1,42	40,98	25,41	645,81
	315/200	74,50	0,96	0,79	57,37	29,47	868,30
	400/315	63,17	-0,48	0,48	49,17	28,29	800,12
Царамам	200/100	28,30	3,39	1,63	24,59	19,89	395,48
	315/200	37,44	3,19	1,46	16,39	21,59	466,42
	400/315	60,21	1,92	1,39	32,78	35,76	1278,86
ПР Р6М5	200/100	63,65	0,45	-0,27	65,56	12,48	155,87
	315/200	125,95	1,41	-1,38	131,12	24,77	613,34
	400/315	137,82	-0,54	-0,11	131,13	33,69	1135,43
Полимам-М _{сф}	200/100	66,36	-1,59	-0,14	106,54	33,88	1147,61
	400/315	115,19	-0,89	0,44	73,76	55,41	3070,20

Установлено, что с увеличением размера фракции от 200/100 мкм до 400/315 мкм радиусы округления РК частиц возрастают от 24 мкм до 138 мкм соответственно. Такое изменение связано с особенностями изготовления порошков, их составом и свойствами. В результате анализа значений величины эксцесса установлено, что зерна порошков, в которых он отличается от нуля и имеет положительные значения, кривая нормального распределения имеет более высокую и острую вершину, в отличие от распределения с отрицательными значениями эксцесса.

Величина стандартного отклонения для порошков с округлой формой зерен возрастает с увеличением фракции от 200/100 мкм до 315/400 мкм, а для осколочных типов МАП остается практически неизменной.

Полученные результаты по изменению радиуса округления режущих кромок порошка с размером зерен от 200/100 до 315/400 мкм определяются условиями изготовления, дальнейшим процессом сепарации и классификации МАП.

Полученные характеристики макро- и микрогеометрических размеров частиц позволяют по методике, приведенной в [69] прогнозировать и корректировать условия МАО для обеспечения преимущественного диспергирования материала с поверхности обрабатываемых деталей или осуществлять преимущественное пластическое деформирование поверхностного слоя в процессе обработки. Так по результатам анализа величины $r_{кз}$ и k_f частиц МАП можно рекомендовать для формирования МАИ деталей МАП с округлой формой, для обеспечения повышенной полирующей и упрочняющей способности за счет выглаживания обрабатываемой поверхности, что в меньшей степени будет реализоваться при использовании порошков с осколочной формой частиц, которые выполняют преимущественное микрорезание и диспергирование материала с поверхности деталей.

Помимо указанных выше характеристик порошковых МАМ необходимым является анализ поведения порошковой среды сформированной магнитным полем в МАИ в рабочих зонах станка в процессе МАО, так как именно магнитное поле выполняет роль виртуальной связки при формировании МАИ.

1.3 Экспериментальный станок для МАО деталей сложной формы типа кольцевая ванна с большим рабочим зазором

Схема МАО с большой магнитной рабочей зоной кольцевого типа применяется для обработки разнотипного режущего инструмента (РИ), лопаток ГТД и других цилиндрических и сложнопрофильных деталей. Указанная схема реализована на опытно-промышленном вертикально фрезерном станке типа ОЦ – Ижевск. Экспериментальные исследования как формирование МАИ со стабильными свойствами в кольцевых рабочих зонах, так и влияние технологических параметров процесса МАО на показатели качества РИ проводили на установке, которая изображена на рис. 1.5.

Технологическая наладка к вертикально-фрезерному станку состоит из магнитной системы (1), установленной на неподвижном горизонтальном

рабочем столе и универсальной головки (4), которая крепится к шпинделю станка, который имеет возможность двигаться в вертикальном направлении. Ось шпинделя совпадает с вертикальной осью магнитной системы. Магнитная система состоит из разветвленного, симметричного магнитопровода с коаксиально расположенными полюсными наконечниками (9), которые образуют между полюсами кольцевую рабочую зону (2), которая заполняется МАП, который под действием магнитного поля формируется в процессе обработки в МАИ (10). Средний диаметр кольцевой рабочей зоны равен 200 мм, ее высота – 30 мм, ширина – 35 мм. Такая конструкция дает возможность обрабатывать детали различной пространственной формы и в широких пределах их размеров. Магнитная индукция в свободном от МАП межполюсном пространстве может регулироваться варьироваться в пределах 0,02 – 0,5 Тл, что достаточно для используемой схемы МАО. Станок обеспечивает возможность вращения шпинделя с реверсом в диапазон частот вращения 0 – 800 об/мин при плавном ее регулировании.

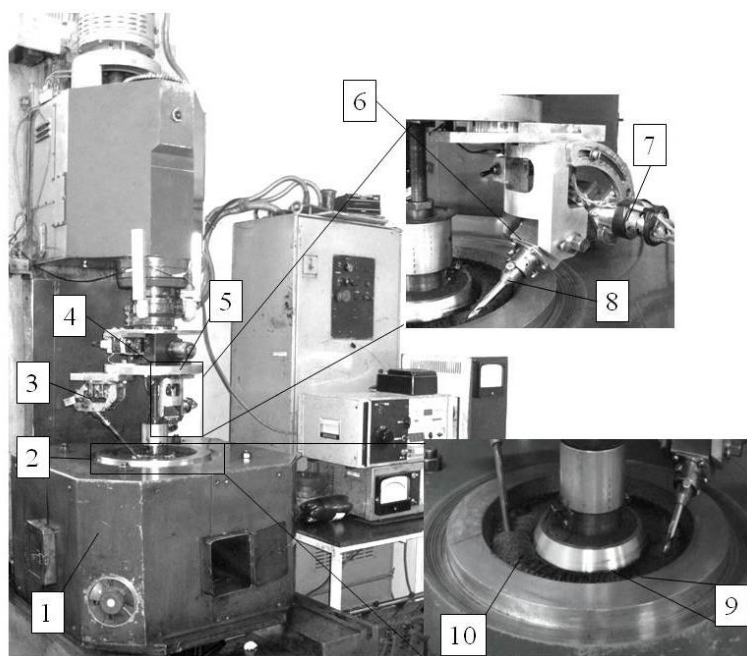


Рис. 1.5. Экспериментальный стенд для МАО с кольцевым расположением рабочей зоны

Для обработки как опытных образцов, так и режущего и РИ используется универсальная головка, которая устанавливается в шпинделе станка таким образом, чтобы ее вертикальная ось совпадала с осью магнитной системы и шпинделя станка, и представляет собой базовую плиту (5) на которой с одной стороны закрепляется с возможностью поворота вокруг вертикальной оси в диапазоне углов $q = 0 - 90^\circ$ устройство с минिशпинделем (6), в котором установлена оправка с деталью (8). Оправка с деталью может свободно вращаться вокруг собственной оси и оси минिशпинделя. Минिशпиндель соединен с двигателем постоянного тока (7) через редуктор, которые обеспечивают возможность вращения детали с реверсом вокруг собственной оси с регулируемой угловой скоростью в диапазоне $0 - 800$ об/мин. Кроме того устройство с минिशпинделем обеспечивает возможность базирования обрабатываемой детали, по отношению к плоскости кольцевого магнитного зазора под углами в диапазоне $p = 0 - 90^\circ$. Дополнительно на плите, радиально с установленным минिशпинделем, располагается второй сменный минिशпиндель упрощенной конструкции (3), который не предусматривает вращения детали вокруг собственной оси, имеет возможность управляемого поворота вокруг вертикальной оси и используется для установки в нем дополнительного формообразующего МАИ элемента. Основной и дополнительный минिशпиндели имеют возможность располагаться под разными углами по отношению к касательной к средней линии кольцевой ванны.

При МАО обрабатываемая деталь, закрепленная на оправке, может вращаться вокруг оси кольцевой ванны вместе с универсальной головкой и вокруг собственной оси. Обработку можно выполнять при различных режимах – в условиях «натекания» и «стекания» ферромагнитной среды с поверхностей деталей (рис. 1.6).

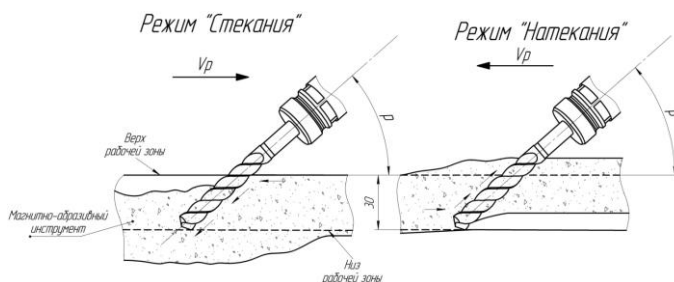


Рис.1.6. Схематическое расположение деталей при МАО в режиме «стекания» и «натекания» на установке с кольцевым расположением рабочей зоны

1.4 Градиент магнитного поля в кольцевых рабочих зонах

Магнитное поле выполняет роль виртуальной связки при формировании частиц МАП в рабочий магнитно-абразивный инструмент. Именно поэтому важным является определение характера его распространения по объему рабочей зоны и влияния на процессы переформирования МАИ.

Определение величины магнитной индукции – B выполняли с помощью милитеслометра Ф 4355 с датчиком Холла. Измерения выполняли не менее трех раз в рабочей зоне станка не заполненной МАП и за ее пределами, по схеме изображенной на рис. 1.7 при различных значениях напряженности магнитного поля – H , которую рассчитывали как:

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{B}{\mu_r \cdot \mu_0} \quad (1.5)$$

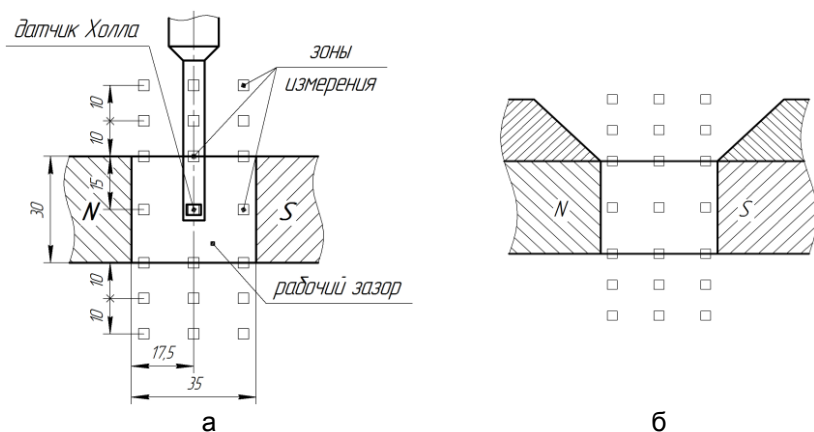


Рис. 1.7. Схема измерения магнитной индукции: а – без накладок, б – с накладками

Характерные топограммы изменения величины B в поперечном сечении рабочей зоны при величине H равной 143,2 кА/м и 198,9 кА/м представлено на рис. 1.8 а и рис. 1.8 в.

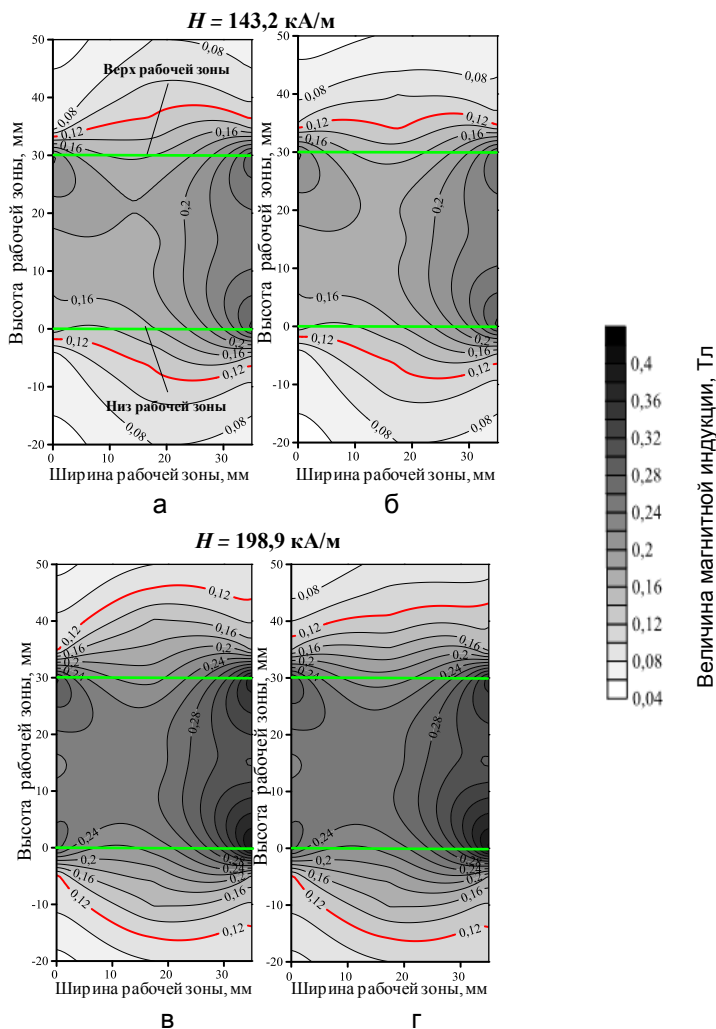


Рис. 1.8. Топограммы распространения величины B по высоте рабочей зоны станка не заполненной МАП:
а, в – без накладок; б, г – с накладками

Показано, что у поверхности полюсных наконечников происходит концентрация магнитного потока. Установлено негативное явление, такое как распространение магнитного поля за пределы рабочей зоны на расстояние

20 мм. Так что в процессе МАО происходит скопление МАП на поверхностях полюсных наконечников и образования разреженного МАИ в средней части рабочей зоны, а также разбрасывание или вытеснения его. Данную проблему можно частично устранить за счет изменения конструктивных параметров рабочей зоны. Для этого на верхней части рабочей зоны установлены диамагнитные накладки высотой 20 мм.

Зоны измерения градиента магнитного поля в рабочем зазоре с накладками изображено на рис. 1.7 б, а результаты измерения (при аналогичных условиях) – на рис. 1.8 б и рис. 1.8 г.

Наличие диамагнитных накладок на верхней части рабочей зоны ограничивает распространение магнитного поля за ее пределы, а также в процессе МАО в режиме «натекания» предотвращает разбрасывания ферроабразивной среды и способствует возвращению вытесненных объемов МАП в зону активной обработки. Для этого наклон боковых поверхностей диамагнитных накладок выполнен под углом 45°.

Для визуализации процесса контактного взаимодействия частиц МАИ с поверхностями образцов выполнено МАО в течение 10 – 15 с порошком округлой формы с размером частиц 1 мм. Деталь располагали параллельно оси кольцевой ванны в средней части рабочего зазора. На рис. 1.9 а представлен внешний вид контрольного образца, где изображены характер образования микронеровностей на полированной плоской поверхности после цикла МАО. Анализ особенностей движения частиц порошка внутри рабочей зоны проявляется в процессе МАО по характеру расположения следов микронеровностей, сформировавшиеся на полированной плоской поверхности образцов (рис. 1.9 б).

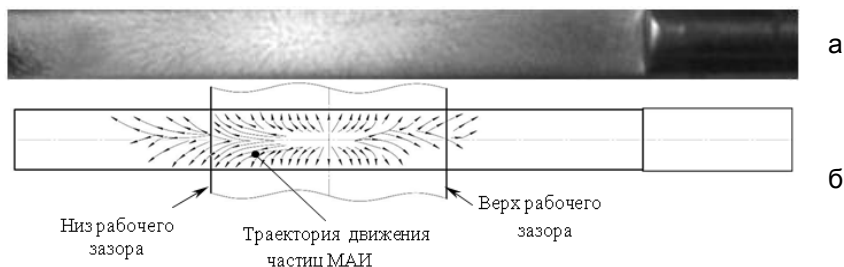


Рис. 1.9. Внешний вид контрольной поверхности образца после МАО – а и схематическое представление движения частичек МАИ в процессе обработки – б

Полученные данные свидетельствуют о том, что перераспределение МАИ, а также движение частиц порошка в рабочей зоне рис. 1.9 реализуется по направлению к зонам с повышенной магнитной индукцией (рис. 1.8) и согласуется с характером натекания потока на неподвижную поверхность – наличием застойной [12, 95, 96] – «мертвой» зоны и характера движения в рабочих зонах ферроабразивной среды [3, 53].

Важно указать на то, что при МАО в больших рабочих зазорах при их кольцевом расположении имеет место активное перемещение МАП по их высоте. Подобный эффект был отмечен и при использовании в процессе МАО рабочих зон с переменным по высоте средним диаметром кольцевой ванны [71, 141]. Кроме этого подобное движение порошка приводит и к негативным последствиям, связанным с тем фактом, что в средней части по высоте рабочих зон интенсивность обработки снижается в случае вертикального расположения детали. Характер движения МАИ по обрабатываемой поверхности зависит от формы частиц МАП и его реологических характеристик. Поэтому необходимо определение плотности МАИ, который формируется в процессе МАО в рабочих зонах кольцевого типа перед обрабатываемыми деталями.

1.5 Перераспределение плотности МАИ по длине рабочей зоны станка

Для оценки перераспределения плотности МАИ в различных участках рабочей зоны перед движущейся деталью, использовали метод фиксации МАИ в рабочем состоянии [3, 53, 76] и последующее вырезания контрольных объемов зафиксированной порошковой среды в определенной зоне. Степень уплотнения МАИ перед поверхностью перемещаемого изделия в зоне обработки будет зависеть от градиента магнитного поля в рабочем зазоре (рис. 1.8), наличия «мертвых» зон и от скорости МАО. Выполнены измерения плотности МАИ перед вертикально расположенными стержневыми образцами. Характер изменения уплотнения МАИ вдоль кольцевой ванны при различных значениях H в рабочих зонах, в зависимости от расстояния до обрабатываемой поверхности, приведены на рис. 1.10.

Уплотненная зона, формирующаяся перед обрабатываемой деталью, является результатом одновременного действия магнитных сил, удерживающих и структурирующих МАИ в квазистабильное состояние в виде конусообразных столбиков и веретенообразных формирований в рабочей зоне, и сил, возникающих при движении детали.

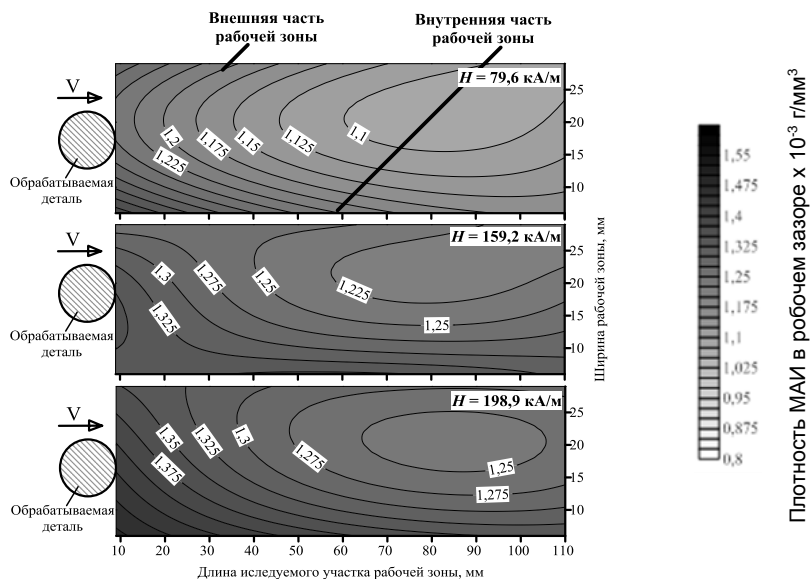


Рис. 1.10. Плотность МАИ по ширине рабочей зоны вдоль кольцевой ванны при разных значениях напряженности магнитного поля H

Наличие уплотненной зоны обеспечивает активный прижим МАП к обрабатываемой поверхности детали, а характеристики уплотненной зоны и силы, с которыми МАП взаимодействует с поверхностью и определяются максвелловским тензором напряжений, формирующимися в МАИ в различных зонах магнитных зазоров – пропорциональны квадрату величины магнитной индукции и линейно зависят от плотности МАИ. Полученные данные являются подтверждением экспериментальных и теоретических результатов, приведенных в [53, 76].

Изменение степени относительного уплотнения МАИ– $\rho_{\text{отн.}}$ в различных зонах магнитных зазоров, перед движущимися деталями при различной величине H , определяется как $\rho_{\text{отн.}} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$, где ρ – плотность МАИ (рис 1.10), $\rho_0 = m/V$ – насыпная плотность порошка. Результаты расчетов представлены на рис. 1.11.

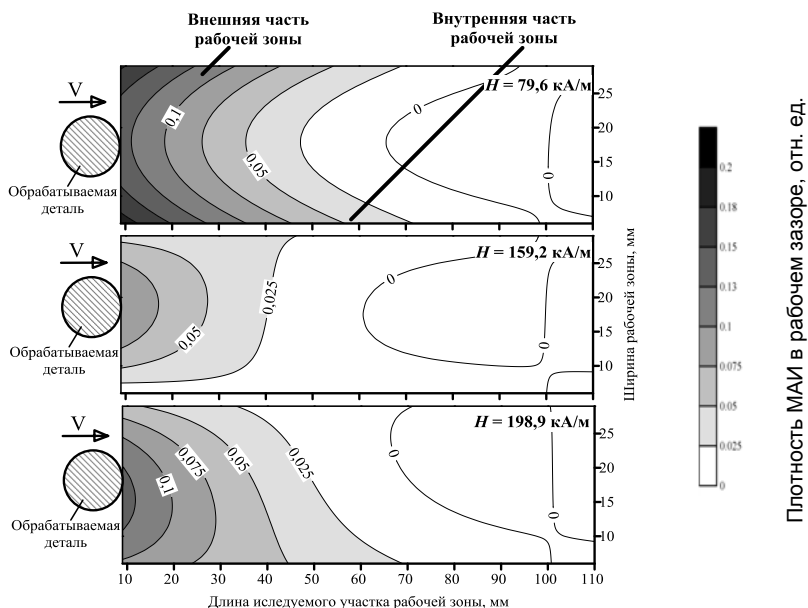


Рис. 1.11. Изменение степени относительного уплотнения МАИ по ширине рабочих зон вдоль кольцевой ванны при разных значениях напряженности магнитного поля H

Анализ результатов представленных на рис. 1.11 показывает, что при $H = 79,6 \text{ кА/м}$ в рабочей зоне станка при перемещении обрабатываемых деталей вдоль кольцевой ванны происходит преимущественное смещение макроформирований МАП к полюсным наконечникам – в зоны с повышенной концентрацией магнитного поля (рис. 1.8). При этом имеет место рост жесткости конусообразных столбиков.

Для определения характера изменения величины магнитной индукции перед обрабатываемой деталью, которая была расположена параллельно оси кольцевой ванны, по длине рабочей зоны заполненной порошком Полимам-Т зернистостью 200/100 мкм после цикла МАО выполняли измерения B по схеме представленной на рис. 1.12, при напряженности магнитного поля в рабочей зоне станка – 159,2 кА/м. Результаты измерения представлены в виде топограммы по ширине и длине рабочей зоны на рис. 1.13.

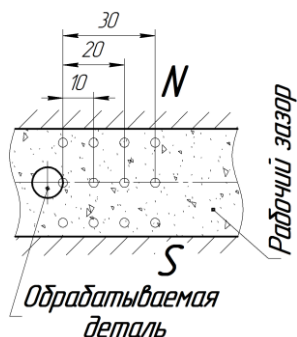


Рис. 1.12. Зоны измерения магнитной индукции по длине рабочего зазора

Установлено, что величина магнитной индукции в заполненном порошком магнитном зазоре увеличивается практически в 2 раза по сравнению с незаполненным и составляет 0,32 Тл. На расстоянии 10 мм и 20 мм от обрабатываемой поверхности величина магнитной индукции в зазоре снижается до 0,28 Тл. Однако максимумы наблюдаются возле краев полюсных наконечников. На расстоянии 30 мм величина выравнивается и составляет такое же значение, как и на начальном этапе (рис. 1.13 а).

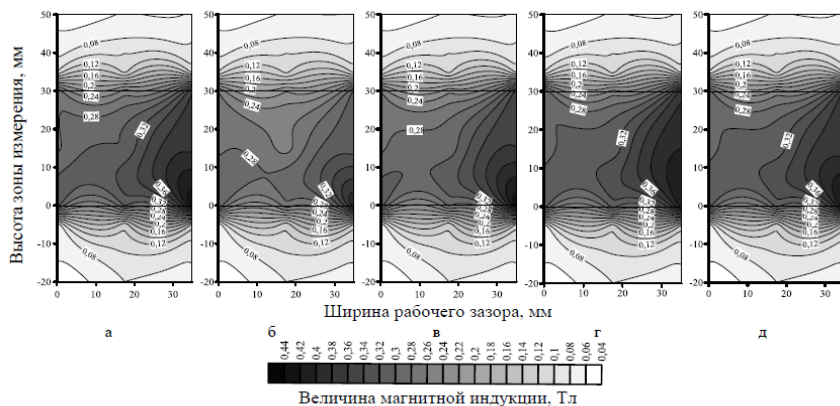


Рис. 1.13. Значения магнитной индукции в рабочем зазоре, заполненном порошком Полимам-Т (200/100 мкм) — а при наличии парамагнитной цилиндрической детали диаметром 10 мм; на расстоянии б — 0 мм; в — 10 мм; г — 20 мм; д — 30 мм от нее

Определены изменения градиента магнитной индукции, как и особенности перераспределения МАИ перед двигающейся деталью, позволяют утверждать, что веретенообразные формирования в структуре МАИ не устойчивы и легко разрушаются. Часть разрушенных объемов принимает участие в процессе формирования конусообразных столбиков и образует в зазоре между поверхностью детали и полюсным наконечником зону «заклинивания», действие которой идентично зонам заклинивания при МАО в условиях «малых» рабочих зазоров [3, 106]. При $H = 79,3 - 198,9$ кА/м имеет место образование квазистабильных веретенообразных формирований, происходит устойчивый и активный контакт представительных объемов МАИ с фронтальной поверхностью деталей. В сочетании с динамической составляющей сил обеспечивается активный наклеп поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Поэтому важным является исследование и анализ особенностей формирования структурных элементов МАИ в рабочей зоне кольцевого типа при различных условиях МАО.

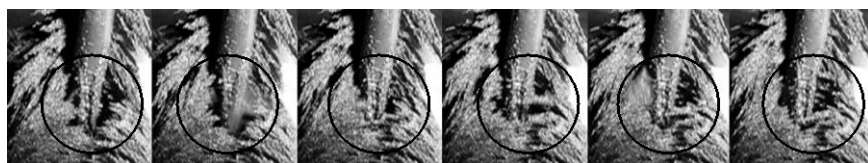
1.6 Особенности формирования структурных элементов МАИ в рабочей зоне кольцевого типа

С помощью скоростной видеосъемки зафиксировано этапы перемещения макрообъемов МАИ в рабочих зонах станка при МАО перед (рис. 1.14) и за (рис. 1.15) деталью. Показано, что перед деталью формируется и перемещается определенная зона, которая имеет повышенную плотность, характер изменения которой приведен на рис. 1.10 и рис. 1.11. Поведение МАИ в указанной зоне требует детального исследования.



Рис. 1.14. Этапы движения структурных элементов МАИ при МАО перед обрабатываемой деталью

За обрабатываемыми деталями, независимо от их размера, происходит образование свободной от порошка области, которая не успевает заполняться – не восстанавливается целостность МАИ, так как недостаточные объемы порошка под действием магнитного поля возвращается в пределы рабочего зазора. Аналогичные явления были описаны при обтекании порошковой средой пластины без учета действия магнитного поля [32, 105]. В условиях действия магнитного поля конусообразные столбики достраиваются только в верхней и нижней по высоте частях магнитного зазора, зонах с повышенной величиной B , а средняя часть остается незаполненной.



а – Ø4 мм



б – Ø8 мм

Рис. 1.15. Этапы движения структурных элементов МАИ за обрабатываемыми деталями разных диаметров

Это объясняется тем, что порошковая среда, которая вытесняется за пределы межполюсного пространства в результате взаимодействия с обрабатываемой поверхностью под действием магнитных сил, огибая деталь втягиваются в рабочую зону (рис. 1.15) и располагается в зоне вблизи полюсных наконечников, в которых имеет место повышение величины B (рис. 1.8). При этом втянутые макрообъемы порошка не смещаются в среднюю по высоте часть магнитного зазора, что приводит к существенному снижению степени заполнения рабочей зоны МАП и как следствие снижает интенсивность обработки. Аналогичные эффекты зафиксировано в работах [53, 54] в условиях малых рабочих зазоров, что приводит к неравномерной обработке поверхностей деталей.

1.7. Анализ динамических процессов, происходящих в МАИ при МАО в рабочих зазорах кольцевого типа

При МАО в условиях больших магнитных зазоров кольцевого типа одним из важнейших параметров, от которого зависит эффективность обработки, является динамический фактор. Поэтому определение кинетических условий взаимодействия МАИ и обрабатываемых поверхностей является важным для целенаправленного управления свойствами МАИ и для прогнозирования процесса МАО. Необходимым является исследование особенностей формирования и переформирования зон уплотненного МАИ перед обрабатываемой деталью при различных условиях МАО.

1.7.1 Зоны возмущений в МАИ, который формируется при МАО в рабочем зазоре кольцевого типа

Для исследования процессов уплотнения и переформирования МАИ (рис. 1.14) и отдельных его элементов в условиях замкнутой рабочей зоны кольцевого типа выполнен модельный эксперимент по обработке цилиндрических образцов диаметрами 4, 10, 16 и 20 мм, изготовленных из немагнитных материалов (сплавы Д16Т, ВТ 3-1, Х18Н10Т).

На первом этапе выполняли МАО с применением равноосного ($k_f = 1,52$) МАП зернистостью 200/100 мкм осколочной формы – Полимам-Т. Напряженность магнитного поля в рабочих зазорах варьировалась в диапазоне от 79,6 до 198,9 кА/м, а скорость перемещение деталей от 0,01 до 4 м/с. Исследование выполняли при вертикальном расположении деталей параллельно оси кольцевой ванны.

Для контроля характера формирования, распространения и перемещения уплотненной зоны, образующейся перед движущейся деталью в процессе МАО, использовали метод флажков, расположенных в МАП до начала процесса обработки в направлении перпендикулярном вектору движения детали на расстоянии 3,5 мм друг от друга, и вдоль кольцевой зоны на расстоянии 10 мм. Контроль распространения уплотненного фронта образующегося в МАИ при МАО, выполняли с помощью скоростной видеосъемки, по начальному моменту отклонения отдельных флажков или от исходного, или от вертикального положения.

При минимальной скорости перемещения деталей 0,01 м/с при $H = 159,2$ кА/м, что соответствует $B = 0,2$ Тл в свободном от МАП рабочем зазоре, характер изменения положения флажков перед движущимися

образцами различных диаметров представлен на фотографиях, полученных в процессе МАО (рис. 1.16).

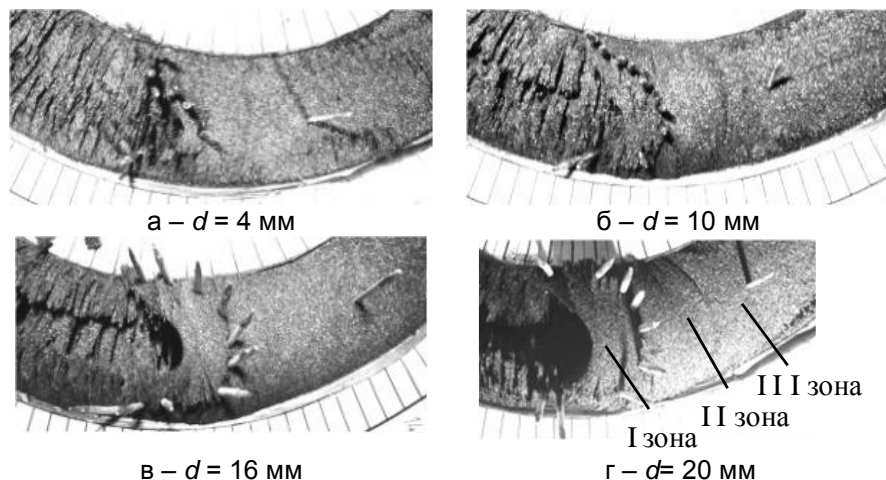


Рис. 1.16. Изменение положения флажков перед цилиндрическими образцами разных диаметров

Анализ полученных изображений позволяет идентифицировать в МАИ, который формируется перед движущимися образцами, три зоны связанные с перестройкой предварительно сформированного МАП в рабочих зазорах кольцевого типа.

Первая зона – часть МАИ, расположенная в непосредственной близости от обрабатываемой поверхности детали. В данной зоне реализуется активный контакт отдельных формирований МАИ с деталью и непосредственно процесс активной обработки. Именно для этой зоны характерно наибольшее уплотнение, возникающее в МАИ (рис. 1.10 и рис. 1.11).

Вторая зона, расположенная перед первой, имеет незначительное уплотнение порошкового инструмента. Особенностью поведения порошка в данной зоне является частичное его вытеснение из области магнитных зазоров и наличие сформированной вдоль магнитных линий регулярной структуры МАИ [91].

Третья зона – зона предварительного переформирования, в которой не установлено существенного уплотнения МАИ, но имеет место процесс перестройки и начального движения групп частиц порошковой среды. Подобный процесс связан с распространением в порошковой среде волны

возмущения, источником которой является фронтальная поверхность обрабатываемой детали, которая активно взаимодействует с МАИ при движении детали. По результатам измерения координат положения флажков, в рабочей зоне заполненной порошковой средой, на этапе прохождения центра образца через линию их исходного положения на начальном этапе обработки выполнен детальный анализ первой наиболее уплотненной зоны в МАИ. Характерное изменение положения флажков, полученных в результате измерения их смещений на примере МАО деталей диаметром 10 мм, представлены на рис. 1.16, а схематическое представление на рис. 1.17.

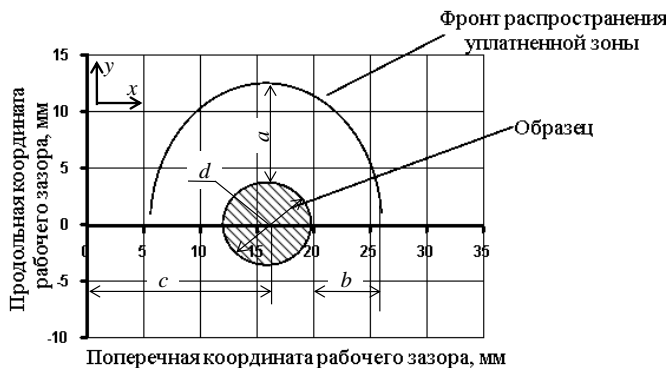


Рис. 1.17. Характер распространения уплотненной зоны в МАИ при МАО вертикально расположенных цилиндрических деталей диаметром 10 мм

Для образцов, различных диаметров, аналитическое представление фронта распространения первой зоны – участка наиболее активной обработки поверхности образцов, в которой реализуются условия обеспечения эффективного МАО для случая, когда начало координат по оси X расположено на поверхности внутреннего полюсного наконечника кольцевой ванны, а по оси Y – совпадает с центром обрабатываемой детали, может быть получено методом аппроксимации данных измерений. Полученное уравнение имеет вид (1.6):

$$\frac{y^2}{(d/2+a)^2} + \frac{(x-c)^2}{(d/2+b)^2} = 1 \quad (1.6)$$

где y – координата смещения положения флажка от начального положения в направлении движения обрабатываемых деталей вдоль

рабочей зоны; x – координата смещения положения флажка от начального положения в направлении перпендикулярном движению обрабатываемых деталей вдоль рабочей зоны – поперек рабочей зоны; d – диаметр обрабатываемой детали; c – координата расположения центра детали от края поверхности внутреннего полюсного наконечника; a – максимальная величина распространения фронта волны возмущения МАИ в направлении движения детали вдоль оси Y в первой зоне; b – полуширина фронта волны возмущения по оси X , при условии, что $Y = 0$.

Значения коэффициентов a , b , c для различных диаметров обрабатываемых деталей приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Значения коэффициентов a , b , c для разных диаметров обрабатываемых деталей

d , мм	a , мм	b , мм	c , мм
4	4	5,07	18,5
8	3,7	4,53	16,6
16	10,5	5,25	18,1
20	14,46	7,41	16,5

Переддвигающейся деталью стержневого типа формируется наиболее плотная зона в виде цилиндра с поперечным сечением в виде полуэллипса, у которого коэффициент a равен максимальной длине уплотненного эллиптического фронта, а коэффициент b определяет ширину эллипса в направлении перпендикулярном вектору движения. Величины определенных параметров a и b в первой наиболее уплотненной зоне в МАИ должны коррелировать с соответствующими нормальной и тангенциальной составляющими скорости относительного перемещения МАИ и обрабатываемой поверхности [88], и требуют дальнейшего анализа.

Ранее установлено, что для первой зоны характерный степень относительного уплотнения МАИ, составляет не менее 0,1 – 0,2 (рис. 1.11). Характер изменения расстояния между обрабатываемой поверхностью и распространением фронта в первой уплотненной зоне позволяет предположить, что разная интенсивность процесса обработки будет практически линейно зависеть от ее величины. Это подтверждается результатами изменения давления МАИ на обрабатываемую поверхность в процессе МАО представленными в работах [3, 107]. Для условий обработки в больших рабочих зазорах можно считать, что коэффициент a будет характеризовать преимущественно динамическую составляющую сил возникающих при уплотнении порошка в рабочем зазоре, а коэффициент b – силы, которые определяются магнитным полем, прижимающим частицы

МАИ к поверхности и активизирующим процессы трибоконтакта. Соотношение сил магнитного и динамического происхождения, может быть охарактеризовано числом магнитного давления – R_H [20, 76], которое при малой скорости движения в рабочем зазоре шириной 35 мм меняется от 0,5 до 0,73, уменьшаясь с увеличением диаметра обрабатываемого образца. Это свидетельствует о том, что даже при малых скоростях движения деталей при МАО в больших рабочих зонах в условиях слабых магнитных полей (магнитной индукции в рабочих зонах до 0,25 Тл) преимущественное влияние оказывают силы динамического происхождения, которые определяются скоростью и траекторией перемещения изделий.

Как отмечается выше, а также в предыдущих исследованиях [39, 55] существенное влияние на эффективность МАО имеет тип, форма и размеры частиц МАП, который используется для формирования МАИ. Для оценки влияния указанных параметров, а также влияния величины напряженности магнитного поля в рабочей зоне были проанализированы характер переформирования МАИ в первой зоне, непосредственно формирующейся перед обрабатываемой деталью. Дополнительно исследовали МАИ, который сформирован из равноосного осколочного порошка Полимам-Т 630/400 мкм, неравноосного округлого – Церамам 630/400 мкм и Полимам-М 400/315 мкм.

На втором этапе выполняли МАО цилиндрических образцов диаметром 4, 10 и 16 мм при величине напряженности магнитного поля 79,6, 159,2 и 198,9 кА/м, что соответствует величине магнитной индукции в свободных от порошка рабочих зонах – 0,1, 0,2 и 0,25 Тл. Скорость перемещения исследуемых образцов аналогичная скорости при использовании порошка Полимам-Т 200/100 мкм. После измерения смещения контрольных флажков, статистической обработки полученных результатов установлен характер распространения фронта волны возмущения в МАИ вдоль оси Y в первой зоне и полуширина фронта волны возмущения по оси X при условии, что $Y = 0$ (рис. 1.17), результаты измерения приведены в табл. 1.4.

Анализ полученных результатов показал, что наибольшая величина распространения фронта возмущения в направлении движения деталей свойственно МАИ, который сформирован из осколочного равноосного порошка Полимам-Т 630/400 мкм, а наименьшая – при использовании неравноосных округлых порошков. Размер указанной зоны будет косвенно влиять на характер и величину нормальной составляющей силы давления МАИ на обрабатываемую поверхность, и определять как степень наклепа

обрабатываемых поверхностей, так и формирование остаточных напряжений в поверхностном слое.

Таблица 1.4

Значения коэффициентов a и b

Тип порошка	Фракция, мкм	d , мм	H , кА/м	a , мм	b , мм
Полимам-Т	630/400	10	79,6	10,36	7,4
			159,2	7	7,3
			198,9	6,3	7,4
		4	159,2	4	5,5
		16		9,5	6,14
	200/100	10	79,6	5,4	5
			159,2	3,7	4,53
			198,9	3,4	3,45
		4	159,2	4	5,1
		16		10,5	5,25
Полимам-М	400/315	10	79,6	1,2	8,13
			159,2	2	9,29
			198,9	2,4	9,43
		4	159,2	3	8,54
		16		8	8,7
Царамам	630/400	10	79,6	2,7	7,4
			159,2	2,7	7,4
			198,9	2,5	7,4
		4	159,2	2,6	7,13
		16		2,75	6,14

При формировании МАИ из неравноосных порошков распространение фронта возмущений меньше в 2 – 5 раз, что свидетельствует о том, что структурные элементы, веретено- и конусообразные образования, имеют повышенную величину тангенциальных сдвигающих напряжений в МАИ, что подтверждается данными приведенными в [76] по величине сдвигающих напряжений в паре МАИ – МАИ и МАИ – обрабатываемая поверхность. Наличие указанных эффектов поведения структурных элементов при МАО деталей в условиях больших магнитных зазоров кольцевого типа объясняет как характер диспергирования материала с поверхностей изделий при обработке, так и механизм упрочнения обрабатываемых поверхностей [20, 76, 97].

Влияние величины напряженности магнитного поля в рабочей зоне на распространение фронта возмущения и степень распространения этих

возмущений в направлении перпендикулярном к движению деталей свидетельствует о том, что в исследуемом диапазоне H имеются значительные возможности по управлению как величиной a , так и b (рис. 1.17), путем изменения H в рабочих зазорах, а значит и величиной касательных и тангенциальных усилий, упрочняющими и полирующими свойствами МАИ.

Величина распространения возмущения в МАИ в направлении движения во второй зоне, в которой величина относительного уплотнения меньше 0,1, при обработке образцов различных диаметров практически одинакова и составляет 16 – 17 мм. Именно в этой зоне начинается процесс вытеснения феррообразной среды с межполюсного пространства рабочих зон, в области с меньшей величиной напряженности магнитного поля. Третья зона, в которой распространяется возмущение в МАИ от движущейся детали, и начинается предварительное переформирования МАИ, по своим размерам близка к размерам второй зоны. Размеры второй и третьей зон будут во многом зависеть от напряженности магнитного поля и скорости перемещения образцов, то есть от соотношения сил магнитного и динамического происхождения.

Контроль распространения возмущения в порошковой среде в процессе обработки (рис. 1.18) выполняли до момента отклонения или смещения флажков, что определяется по результатам фиксации процесса, выполненного с помощью скоростной видеосъемки при напряженности магнитного поля в зонах обработки 79,6 и 198,9 кА/м и при различных мгновенно измеренных скоростях движения образцов.

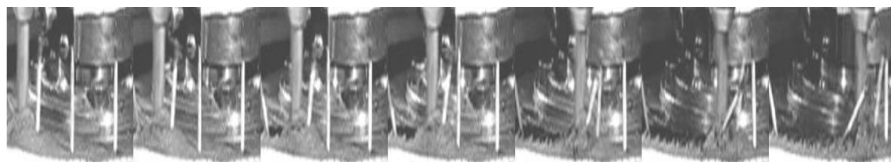


Рис. 1.18. Распространение возмущений в МАИ

Установлено, что величина максимального фронта распространения возмущений в МАИ, которая соответствует концу третьей зоны, при малых величинах магнитных полей ($H = 79,6$ кА/м) с увеличением скорости обработки в диапазоне 0,5 – 3,5 м/с растет практически линейно, тогда как при $H = 198,9$ кА/м при скоростях больших 1,8 – 2 м/с имеет место уменьшение протяженности зоны возмущений (рис. 1.19).

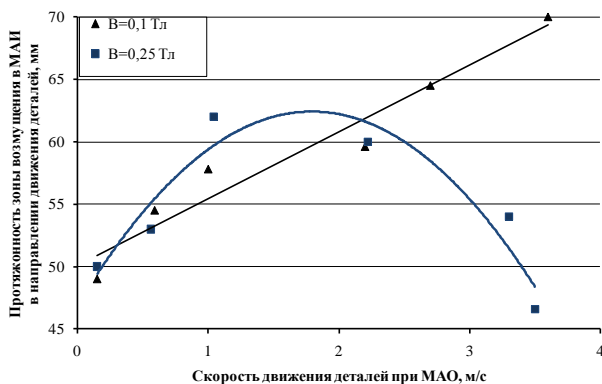


Рис. 1.19. Изменение протяженности зон возмущений в МАИ в зависимости от скорости движения деталей в процессе МАО при разных величинах напряженности магнитного поля

Приведенные данные в определенной степени является подтверждением механизма образования МАИ, описанного выше, а именно перераспределения относительной плотности МАИ перед движущейся деталью. Дополнительно отметим, что полученные результаты могут быть связаны либо с действием отраженных от обрабатываемой поверхности волн возмущений и стабилизации структуры МАИ в направлении действия магнитного поля, или результатом действия пондеромоторных сил, которые способствуют демпфированию возмущений в МАИ [76], или с эффектом разрушения веретенообразных формирований под действием динамических сил – их разрывом, при условии превышения предельных скоростей обработки [91, 113]. Уточнение механизма взаимодействия поверхности обрабатываемых деталей с МАИ требует проведения дополнительных исследований с полным анализом поля возмущений в порошковой среде перед движущейся деталью.

1.7.2 Анализ характера смещения макрообъемов МАИ в уплотненной зоне в процессе МАО

Исследование уплотненной зоны формирующейся в МАИ перед движущейся деталью, выполняли при МАО немагнитных образцов, расположенных параллельно оси кольцевой ванны, порошком Полимам-Т зернистостью 200/100 мкм, при напряженности магнитного поля в рабочей зоне H – 79,6, 159,2 и 198,9 кА/м. Использовали цилиндрические стержневые, консольно-закрепленные образцы диаметром d – 4, 10 и

16 мм. Для анализа поля смещений в МАИ перед обрабатываемой деталью использовали метод контрольных флажков. Характер расположения которых перед началом цикла обработки в контрольной зоне представлен на рис. 1.20 а. Скорость обработки деталей не превышала 0,5 м/с. Использовали метод мгновенной остановки обрабатываемой детали в контрольной зоне на уровне первого ряда флажков.

Характерное изменение положения флажков перед движущейся деталью после ее остановки и удаления из зоны обработки представлена на примере МАО цилиндрического стержня диаметром 10 мм при $H = 159,2$ кА/м (рис. 1.20 б).

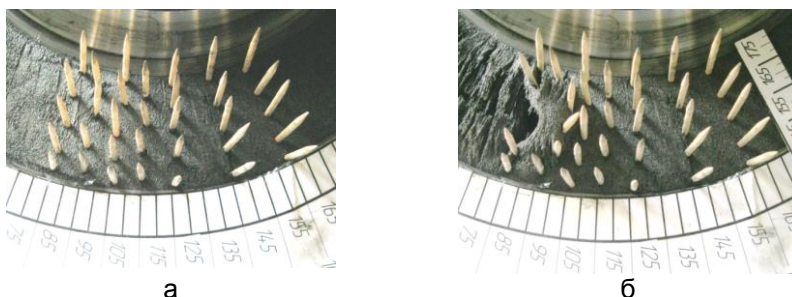


Рис. 1.20. Расположение флажков в МАИ: а – перед началом МАО, б – после остановки детали

Контроль смещения флажков, а значит и отдельных макрообъемов порошка в массе МАИ выполняли, с учетом масштабных коэффициентов, не менее трех раз по фотографиям (рис. 1.20 б) различных независимых исследований, выполненных в идентичных условиях.

На первом этапе анализировали влияние напряженности магнитного поля в зонах обработки на характер распространения фронта возмущений в МАИ при обработке деталей $d = 10$ мм с использованием различных типов МАП. Полученные результаты представлены на рис. 1.21.

Анализ полученных результатов показывает, что с ростом величины H в рабочей зоне до 159,2 кА/м поле смещений макрообъемов порошка в МАИ перед двигающейся деталью меняется слабо. В указанном диапазоне напряженности магнитного поля наблюдается максимум смещение отдельных макрообъемов, которые расположены в центральной части рабочих зазоров. Причем данный максимум располагается на расстоянии порядка 10 мм от обрабатываемых поверхностей. Это может быть объяснено тем фактом, что в указанной зоне перед обрабатываемой поверхностью веретенообразные формирования уплотняются, но не

испытывают существенной деформации – не растягиваются и не принимают участия в достройке конусообразных столбиков, формируя при этом повышенную плотность МАИ. Такое их поведение подтверждает механизм структурообразования инструмента и его взаимодействия с обрабатываемой поверхностью детали, предложенный в [91], а также приведенный выше.

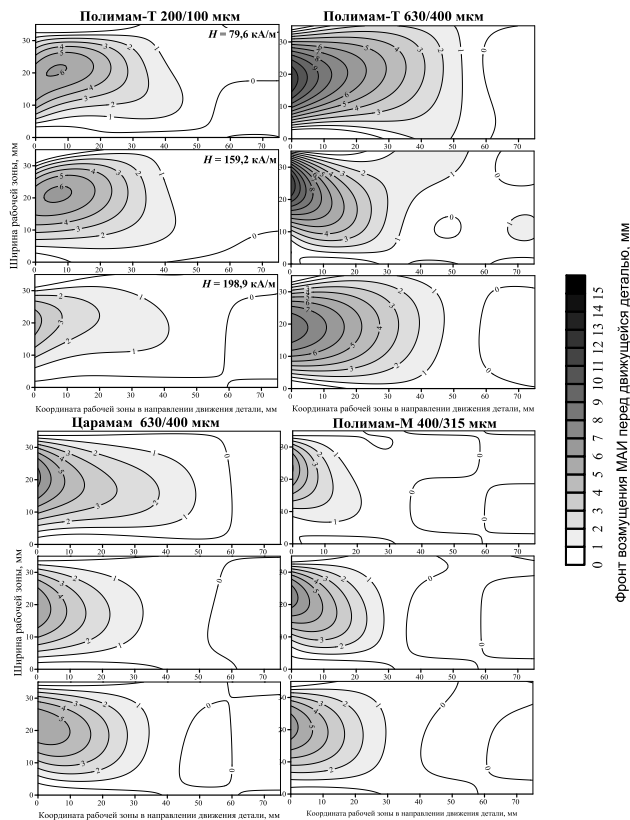


Рис. 1.21. Характер распространения фронта возмущений в МАИ при МАО цилиндрических образцов диаметром 10 мм

Установлено, что при величине $H = 159,2$ кА/м имеет место некоторое расширение фронта возмущений. Это связано с тем, что отдаленные от обрабатываемой поверхности макрообъемы порошка в МАИ (на расстоянии более 20 мм) смещаются к полюсным наконечникам –

к зонам с повышенной магнитной индукцией (рис. 1.8). При $H = 198,9$ кА/м протяженность фронта распространения возмущений резко снижается – в 2 и более раза, что связано, прежде всего, с повышением жесткости МАИ, обусловленного силами магнитного поля, условиями разрыва веретенообразных формирований и достройкой конусообразных столбиков, которые располагаются своими основаниями на полюсных наконечниках или на малоподвижной «мертвой» зоне. Отметим, что явление образования «мертвой» зоны было также зафиксировано при обтекании плоской лопатки в свободно насыпанной порошковой среде [32,105].

На втором этапе анализировали характер смещения макрообъемов порошка в МАИ переддвигающимися деталями различных диаметров. Характерный вид поля смещений в МАИ сформированного из МАП Полимам-Т зернистостью 200/100 мкм при МАО деталей различных размеров представлены на рис. 1.22.

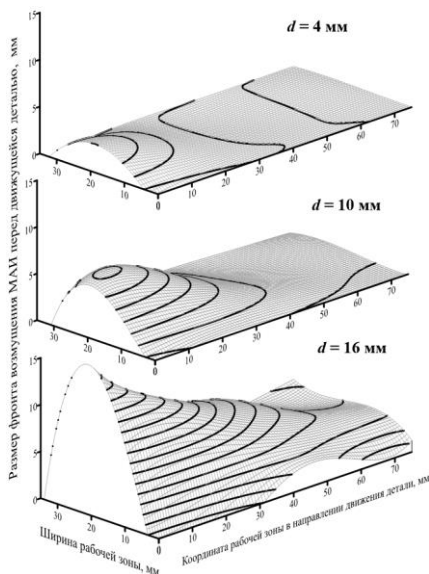


Рис. 1.22. Характер распространения фронта возмущений в МАИ при МАО цилиндрических образцов разных диаметров при $H = 159,2$ кА/м

Установлено, что с увеличением диаметра обрабатываемых деталей фронт и величина области активного смещения макрообъемов порошка резко возрастает. Это связано прежде всего с тем, что уплотнение,

возникающее в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности (на примере деталей диаметром 16 мм), инициирует возмущения практически во всем объеме веретенообразных и конусообразных формирований, сформированных магнитным полем в МАИ, то есть начинает активно двигаться весь объем порошка перед деталью. При этом в процесс движения включается и «мертвая» зона, расположенная непосредственно на поверхностях полюсных наконечников. В средней части рабочих зазоров из структурных элементов МАИ образуется устойчивый квазистабильный объем, разрушение которого в процессе МАО маловероятно. Данный объем активно вытесняется из зоны обработки, частично оседает на нерабочих участках полюсных наконечников, приводит к уменьшению плотности МАИ и снижает при этом эффективность процесса обработки. Также снижается подвижность зерен и представительских объемов МАИ, то есть порошок перемешивается с недостаточной активностью, плохо нивелирует относительно обрабатываемых поверхностей, а значит, слабо реализуется одно из условий обеспечения эффективного процесса МАО [92].

Особенности образования уплотненной зоны в МАИ переддвигающейся деталью при МАО в рабочей зоне кольцевого типа, а также управление силами нормального давления на обрабатываемую поверхность невозможно без информации о специфике процесса формирования и переформирования такой зоны. Подобную информацию можно получить из анализа величины сдвигов отдельных макрообъемов МАИ в зоне обработки.

Полученные поверхности сдвигов для МАИ, сформированных из разных типов МАП (рис. 1.21) аппроксимированы полиномами вида (1.7).

$$\psi(L, N) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^3 a_{ij} \cdot L^i \cdot N^j \quad (1.7)$$

где L – координата рабочей зоны в направлении движения детали, N – ширина рабочей зоны, a_{ij} – коэффициенты полинома для функции $\psi(L, N)$.

Значения коэффициентов a_{ij} в (1.7) и среднеквадратичной ошибки аппроксимации – Δ приведены в таблице 1.5 и 1.6 для разных типов МАП и условий МАО. По полученным аналитическим полиномам (1.7) были рассчитаны величины сдвигов порошковой среды в МАИ как:

$$S = \int_0^N \int_0^L \psi(L, N) dL dN \quad (1.8)$$

Таблица 1.5

Значение коэффициентов a_j и среднеквадратичной ошибки аппроксимации

Тип порошка		Полымам-Т 200/100 мкм					Полымам-Т 630/400 мкм				
$d, \text{мм}$		4	10	16	4	10	16	4	10	16	159,2
$H, \text{кА/м}$		159,2	79,6	159,2	198,9	159,2	159,2	79,6	159,2	198,9	159,2
Коэффициенты, a_j	a_{00}	-1,90	-3,41	-1,26	-0,24	-4,35	-1,93	-4,54	1,17	3,53	$5,2 \cdot 10^{-1}$
	a_{01}	0,5	1,17	0,42	$7,84 \cdot 10^{-2}$	1,36	0,66	1,73	$-6,87 \cdot 10^{-1}$	$-5,13 \cdot 10^{-1}$	$2,79 \cdot 10^{-2}$
	a_{02}	$-1,1 \cdot 10^{-3}$	$-4,06 \cdot 10^{-2}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$9,72 \cdot 10^{-3}$	$-2,14 \cdot 10^{-2}$	$-4,44 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-1}$	$9,71 \cdot 10^{-3}$
	a_{03}	$-7,97 \cdot 10^{-5}$	$2,42 \cdot 10^{-4}$	$8,03 \cdot 10^{-4}$	$-9,12 \cdot 10^{-4}$	$-1,35 \cdot 10^{-3}$	$9,87 \cdot 10^{-5}$	$-8,54 \cdot 10^{-5}$	$-2,57 \cdot 10^{-3}$	$-2,11 \cdot 10^{-3}$	$-2,8 \cdot 10^{-3}$
	a_{10}	0,18	$4,29 \cdot 10^{-1}$	$1,73 \cdot 10^{-1}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$	$-6,59 \cdot 10^{-1}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$-4,77 \cdot 10^{-1}$	$-2,94 \cdot 10^{-1}$	$-3,76 \cdot 10^{-2}$
	a_{11}	$-4,02 \cdot 10^{-2}$	$-1,83 \cdot 10^{-1}$	$-4,71 \cdot 10^{-2}$	$-1,73 \cdot 10^{-2}$	$2,52 \cdot 10^{-1}$	$-6,41 \cdot 10^{-2}$	$5,21 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-1}$	$1,35 \cdot 10^{-1}$	$7,54 \cdot 10^{-2}$
	a_{12}	$1,93 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$3,36 \cdot 10^{-3}$	$-6,42 \cdot 10^{-4}$	$-2,05 \cdot 10^{-2}$	$2,18 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$-1,8 \cdot 10^{-2}$	$-1,1 \cdot 10^{-2}$	$-1,07 \cdot 10^{-2}$
	a_{13}	$-2,31 \cdot 10^{-3}$	$-2,59 \cdot 10^{-4}$	$-5 \cdot 10^{-5}$	$4,32 \cdot 10^{-5}$	$4,05 \cdot 10^{-4}$	$-9,25 \cdot 10^{-6}$	$1,31 \cdot 10^{-5}$	$3,29 \cdot 10^{-4}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$	$2,63 \cdot 10^{-4}$
	a_{20}	$-5,89 \cdot 10^{-3}$	$-1,92 \cdot 10^{-2}$	$-6,08 \cdot 10^{-3}$	$-2,69 \cdot 10^{-3}$	$5,16 \cdot 10^{-2}$	$-5,44 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$2,78 \cdot 10^{-2}$	$8,99 \cdot 10^{-3}$	$4,39 \cdot 10^{-3}$
	a_{21}	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$9,37 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^{-3}$	$-1,63 \cdot 10^{-2}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$	$-3,1 \cdot 10^{-4}$	$-1,22 \cdot 10^{-2}$	$-4,29 \cdot 10^{-3}$	$-2,44 \cdot 10^{-3}$
	a_{22}	$-9,48 \cdot 10^{-5}$	$-7,67 \cdot 10^{-4}$	$-2,23 \cdot 10^{-3}$	$-3,97 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$-6,91 \cdot 10^{-5}$	$3,89 \cdot 10^{-5}$	$8,22 \cdot 10^{-4}$	$3,64 \cdot 10^{-4}$	$3,16 \cdot 10^{-4}$
	a_{23}	$1,74 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-3}$	$4,63 \cdot 10^{-4}$	$-4,4 \cdot 10^{-7}$	$-2,15 \cdot 10^{-5}$	$1,79 \cdot 10^{-7}$	$-1,37 \cdot 10^{-6}$	$-1,37 \cdot 10^{-6}$	$-7,25 \cdot 10^{-6}$	$-7,76 \cdot 10^{-6}$
	a_{30}	$8,17 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$	$7,56 \cdot 10^{-5}$	$6,92 \cdot 10^{-5}$	$-1,03 \cdot 10^{-3}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$-2,95 \cdot 10^{-4}$	$-5,18 \cdot 10^{-4}$	$-1,12 \cdot 10^{-4}$	$-8,84 \cdot 10^{-5}$
	a_{31}	$-1,62 \cdot 10^{-5}$	$-1,75 \cdot 10^{-4}$	$-3,87 \cdot 10^{-4}$	$-3,45 \cdot 10^{-5}$	$3,07 \cdot 10^{-4}$	$-2,8 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-5}$	$2,16 \cdot 10^{-4}$	$5,62 \cdot 10^{-5}$	$2,63 \cdot 10^{-5}$
	a_{32}	$1,69 \cdot 10^{-6}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-6}$	$-2,15 \cdot 10^{-5}$	$8,92 \cdot 10^{-7}$	$-1,51 \cdot 10^{-6}$	$-1,39 \cdot 10^{-5}$	$-4,92 \cdot 10^{-6}$	$-3,61 \cdot 10^{-6}$
	a_{33}	$-3,54 \cdot 10^{-8}$	$-2,92 \cdot 10^{-7}$	$-9,2 \cdot 10^{-8}$	$-3,4 \cdot 10^{-9}$	$3,91 \cdot 10^{-7}$	$-5,75 \cdot 10^{-10}$	$3,48 \cdot 10^{-8}$	$2,23 \cdot 10^{-7}$	$9,96 \cdot 10^{-8}$	$9,13 \cdot 10^{-8}$
	a_{40}	$-4,04 \cdot 10^{-7}$	$-1,93 \cdot 10^{-6}$	$-3,01 \cdot 10^{-7}$	$-4,84 \cdot 10^{-7}$	$6,29 \cdot 10^{-6}$	$-2,86 \cdot 10^{-7}$	$1,93 \cdot 10^{-7}$	$3,04 \cdot 10^{-6}$	$4,92 \cdot 10^{-7}$	$4,79 \cdot 10^{-7}$
	a_{41}	$7,76 \cdot 10^{-8}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$	$2,16 \cdot 10^{-7}$	$2,29 \cdot 10^{-7}$	$-1,82 \cdot 10^{-6}$	$1,25 \cdot 10^{-7}$	$-1,62 \cdot 10^{-7}$	$-1,23 \cdot 10^{-6}$	$-2,61 \cdot 10^{-7}$	$-9,37 \cdot 10^{-8}$
	a_{42}	$-9,81 \cdot 10^{-9}$	$-8,69 \cdot 10^{-8}$	$-2,55 \cdot 10^{-8}$	$-9,07 \cdot 10^{-9}$	$1,26 \cdot 10^{-7}$	$-4,09 \cdot 10^{-9}$	$1,14 \cdot 10^{-8}$	$7,73 \cdot 10^{-8}$	$2,34 \cdot 10^{-8}$	$1,42 \cdot 10^{-8}$
	a_{43}	$2,19 \cdot 10^{-10}$	$1,75 \cdot 10^{-9}$	$5,43 \cdot 10^{-10}$	$4,96 \cdot 10^{-11}$	$-2,3 \cdot 10^{-9}$	$-5,18 \cdot 10^{-12}$	$-2,45 \cdot 10^{-10}$	$-1,22 \cdot 10^{-9}$	$-4,8 \cdot 10^{-10}$	$-3,72 \cdot 10^{-10}$
Δ		$1,19 \cdot 10^{-3}$	$2,58 \cdot 10^{-2}$	$2,81 \cdot 10^{-1}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$4,97 \cdot 10^{-2}$	$8,49 \cdot 10^{-3}$	$4,09 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-2}$	$1,48 \cdot 10^{-1}$	$4,97 \cdot 10^{-1}$

Таблица 1.6

Значение коэффициентов a_j и среднеквадратичной ошибки аппроксимации

Тип порошка		Полымам-М 400/315 мкм					Парамам 630/400 мкм				
$d, \text{мм}$		4	10	16	4	10	16	4	10	16	159,2
$H, \text{кА/м}$		159,2	79,6	159,2	198,9	159,2	159,2	79,6	159,2	198,9	159,2
Коэффициенты, a_j	a_{00}	-3,24	$5,24 \cdot 10^{-1}$	$-3,07 \cdot 10^{-1}$	$-7,17 \cdot 10^{-1}$	-2,42	-1,28	-1,11	-1,28	-1,38	-3,63
	a_{01}	$9,51 \cdot 10^{-1}$	$-3,36 \cdot 10^{-1}$	$-1,36 \cdot 10^{-1}$	$3,11 \cdot 10^{-1}$	1,8	$6,04 \cdot 10^{-1}$	$4,96 \cdot 10^{-1}$	$6,48 \cdot 10^{-1}$	$3,24 \cdot 10^{-1}$	1,28
	a_{02}	$-3,91 \cdot 10^{-3}$	$5,89 \cdot 10^{-3}$	$5,82 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$-4,03 \cdot 10^{-3}$	$-1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$-8,65 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$-2,94 \cdot 10^{-3}$
	a_{03}	$4,03 \cdot 10^{-4}$	$-1,47 \cdot 10^{-3}$	$-1,62 \cdot 10^{-3}$	$-8,34 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-4}$	$7,19 \cdot 10^{-5}$	$-7,21 \cdot 10^{-4}$	$-2,84 \cdot 10^{-4}$	$-7,08 \cdot 10^{-4}$	$-1,92 \cdot 10^{-4}$
	a_{10}	$4,89 \cdot 10^{-1}$	$-2,19 \cdot 10^{-1}$	$-3,17 \cdot 10^{-1}$	$-1,04 \cdot 10^{-1}$	$-2,71 \cdot 10^{-1}$	$3,59 \cdot 10^{-2}$	$-1,41 \cdot 10^{-1}$	$-2,69 \cdot 10^{-2}$	$-2,2 \cdot 10^{-2}$	$3,31 \cdot 10^{-1}$
	a_{11}	$-1,16 \cdot 10^{-1}$	$1,08 \cdot 10^{-1}$	$1,54 \cdot 10^{-1}$	$4,68 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$-2,17 \cdot 10^{-2}$	$2,34 \cdot 10^{-2}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$4,72 \cdot 10^{-2}$	$-8,89 \cdot 10^{-2}$
	a_{12}	$4,76 \cdot 10^{-3}$	$-1,01 \cdot 10^{-2}$	$-1,22 \cdot 10^{-2}$	$-4,72 \cdot 10^{-3}$	$-2,69 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$-3,32 \cdot 10^{-3}$	$-1,67 \cdot 10^{-3}$	$-3,65 \cdot 10^{-3}$	$3,95 \cdot 10^{-3}$
	a_{13}	$-5,09 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$8,14 \cdot 10^{-5}$	$4,88 \cdot 10^{-5}$	$6,59 \cdot 10^{-5}$	$-4,43 \cdot 10^{-5}$
	a_{20}	$-2,16 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,02 \cdot 10^{-2}$	$8,97 \cdot 10^{-3}$	$2,27 \cdot 10^{-2}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$4,09 \cdot 10^{-3}$	$2,94 \cdot 10^{-3}$	$-8,42 \cdot 10^{-3}$
	a_{21}	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$-5,52 \cdot 10^{-3}$	$-8,81 \cdot 10^{-3}$	$-3,5 \cdot 10^{-3}$	$-3,41 \cdot 10^{-3}$	$-4,11 \cdot 10^{-4}$	$-1,04 \cdot 10^{-3}$	$-1,24 \cdot 10^{-3}$	$-3,14 \cdot 10^{-3}$	$2,88 \cdot 10^{-3}$
	a_{22}	$-1,89 \cdot 10^{-4}$	$4,51 \cdot 10^{-4}$	$5,86 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-4}$	$2,16 \cdot 10^{-4}$	$5,15 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$-1,98 \cdot 10^{-4}$
	a_{23}	$2,07 \cdot 10^{-6}$	$8,85 \cdot 10^{-6}$	$-1,03 \cdot 10^{-5}$	$-4,33 \cdot 10^{-6}$	$-3,72 \cdot 10^{-6}$	$-1,61 \cdot 10^{-6}$	$-2,53 \cdot 10^{-6}$	$-2,17 \cdot 10^{-6}$	$-2,28 \cdot 10^{-6}$	$3,51 \cdot 10^{-6}$
	a_{30}	$3,58 \cdot 10^{-4}$	$-2,17 \cdot 10^{-4}$	$-3,84 \cdot 10^{-4}$	$-1,88 \cdot 10^{-4}$	$-4,59 \cdot 10^{-4}$	$-5,47 \cdot 10^{-5}$	$-1,25 \cdot 10^{-4}$	$-8,53 \cdot 10^{-5}$	$-6,63 \cdot 10^{-5}$	$7,46 \cdot 10^{-5}$
	a_{31}	$-7,21 \cdot 10^{-5}$	$9,65 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$6,86 \cdot 10^{-5}$	$7,36 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$9,5 \cdot 10^{-6}$	$2,61 \cdot 10^{-5}$	$5,71 \cdot 10^{-5}$	$-4,13 \cdot 10^{-5}$
	a_{32}	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$-7,47 \cdot 10^{-6}$	$-1 \cdot 10^{-5}$	$-4,17 \cdot 10^{-6}$	$-4,12 \cdot 10^{-6}$	$-1,37 \cdot 10^{-6}$	$-1,24 \cdot 10^{-6}$	$-1,91 \cdot 10^{-6}$	$-2,78 \cdot 10^{-6}$	$3,66 \cdot 10^{-6}$
	a_{33}	$-3,3 \cdot 10^{-8}$	$1,42 \cdot 10^{-7}$	$1,68 \cdot 10^{-7}$	$6,99 \cdot 10^{-8}$	$6,27 \cdot 10^{-8}$	$2,47 \cdot 10^{-8}$	$3,12 \cdot 10^{-8}$	$3,57 \cdot 10^{-8}$	$3,29 \cdot 10^{-8}$	$-7,47 \cdot 10^{-8}$
	a_{40}	$-1,99 \cdot 10^{-6}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$2,28 \cdot 10^{-6}$	$1,17 \cdot 10^{-6}$	$2,78 \cdot 10^{-6}$	$3,99 \cdot 10^{-7}$	$6,52 \cdot 10^{-7}$	$5,11 \cdot 10^{-7}$	$4,08 \cdot 10^{-7}$	$-1,74 \cdot 10^{-7}$
	a_{41}	$3,86 \cdot 10^{-7}$	$-5,46 \cdot 10^{-7}$	$-9,31 \cdot 10^{-7}$	$-4,09 \cdot 10^{-7}$	$-4,42 \cdot 10^{-7}$	$-1,46 \cdot 10^{-7}$	$-1,44 \cdot 10^{-8}$	$-1,54 \cdot 10^{-7}$	$-3,23 \cdot 10^{-7}$	$2,09 \cdot 10^{-7}$
	a_{42}	$-1,59 \cdot 10^{-8}$	$4,11 \cdot 10^{-8}$	$5,63 \cdot 10^{-8}$	$2,37 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$9,35 \cdot 10^{-9}$	$4,56 \cdot 10^{-9}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$	$1,51 \cdot 10^{-8}$	$-2,18 \cdot 10^{-8}$
	a_{43}	$1,79 \cdot 10^{-10}$	$-7,71 \cdot 10^{-10}$	$-9,2 \cdot 10^{-10}$	$-3,83 \cdot 10^{-10}$	$-3,49 \cdot 10^{-10}$	$-1,55 \cdot 10^{-10}$	$-1,36 \cdot 10^{-10}$	$-1,95 \cdot 10^{-10}$	$-1,67 \cdot 10^{-10}$	$4,76 \cdot 10^{-10}$
Δ		$8,27 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$	$4,88 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$2,36 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-2}$	$2,73 \cdot 10^{-2}$

Значение величины площади возмущений в МАИ в плоскости кольцевой ванны перед движущейся деталью в процессе обработки

деталей различных размеров в рабочем кольцевом зазоре шириной 35 мм при различных условиях МАО различными порошками приведены в таблице 1.7. Анализ полученных результатов расчетов и измерений показал, что если с увеличением размера обрабатываемых деталей имеет место монотонное возрастание объема переформированного в процессе МАО магнитно-абразивного порошка перед деталью, то рост магнитной индукции в рабочей зоне не является причиной для подобного роста величины фронта возмущений.

Таблица 1.7
Величина площади фронта возмущений в МАИ перед движущейся деталью

Тип порошка	Фракция, мкм	H , кА/м	d , мм	Величина площади фронта возмущений в МАИ, мм ²
Полимам-Т	200/100	79,6	10	1568
		159,6		1671
		198,9		1227
		159,6	4	622
			16	2861
	630/400	79,6	10	2016
		159,6		1881
		198,9		1801
		159,6	4	441
			16	2842
Церамам	630/400	79,6	10	1500
		159,6		1080
		198,9		1123
		159,6	4	540
			16	2319
Полимам-М	400/315	79,6	10	653
		159,6		1044
		198,9		1034
		159,6	4	360
			16	2006

Установлено, что если для МАИ, сформированного из равноосных осколочных порошковых материалов, имеет место уменьшение величины фронта возмущений перед деталью при напряженности магнитного поля H в рабочей зоне 198,9 кА/м, в то время как для порошков с округлой формой частиц наименьшее количество порошка, которое смещается, имеет место при $H = 159,6$ кА/м. Такое аномальное изменение величины зоны возмущений может быть объяснено исключительно особенностями

структурирования МАИ при МАО в исследуемом диапазоне напряженностей магнитного поля в зонах обработки. Образование в МАИ в процессе МАО квазистабильных формирований с явной анизотропией свойств определяет как характер демпфирования возмущений в МАИ перед деталью в направлении ее движения, так и способность к расширению фронта сдвигов в МАИ в перпендикулярном направлении – по направлению к полюсным наконечникам, так и характер распределения нормальных и тангенциальных составляющих сил, действующих на обрабатываемую поверхность. Оценить соотношение нормальной составляющей указанных сил, возникающих в МАИ к тангенциальной, по всему объему порошка, который уплотняется перед двигающейся деталью можно по величине f – отношению максимального смещения к полуширине фронта смещений на разном удалении от обрабатываемой поверхности [91, 120]. Данное соотношение будет показывать, на сколько нормальная составляющая давления для различных МАП преобладает над тангенциальной, а с физической точки зрения – характеризовать способность демпфировать ударную волну в МАИ, создаваемую двигающейся деталью. Эта способность будет зависеть в процессе МАО от специфики структурирования МАИ, его плотности, намагниченности отдельных структурных объемов, габаритов и магнитных свойств обрабатываемых деталей, ширины зон обработки и вероятности нахождения обрабатываемых поверхностей вблизи полюсных наконечников – области рабочих зазоров, где возможно скопление малоподвижных объемов МАИ.

При аналитическом описании особенностей переформирования отдельных макрообъемов порошковой среды в МАИ перед двигающейся деталью целесообразно оценить характер распространения фронта возмущений по параметру f . Выше показано, что фронт возмущений в МАИ вблизи обрабатываемой поверхности хорошо описывается уравнением эллипса (1.6), а сам параметр f это фактически отношение его полуосей [120].

Анализ экспериментальных результатов, приведенных на рис. 1.21 и рис. 1.22, позволил установить функциональную связь между величиной параметра f и расстоянием от обрабатываемой поверхности – в направлении перемещения деталей при МАО в рабочей зоне кольцевого типа. Характерный вид полученных зависимостей для порошков, которые использовали в исследованиях при обработке деталей указанных выше размеров, при различных значениях магнитных индукций в рабочих зазорах при МАО представлено на рис. 1.23.

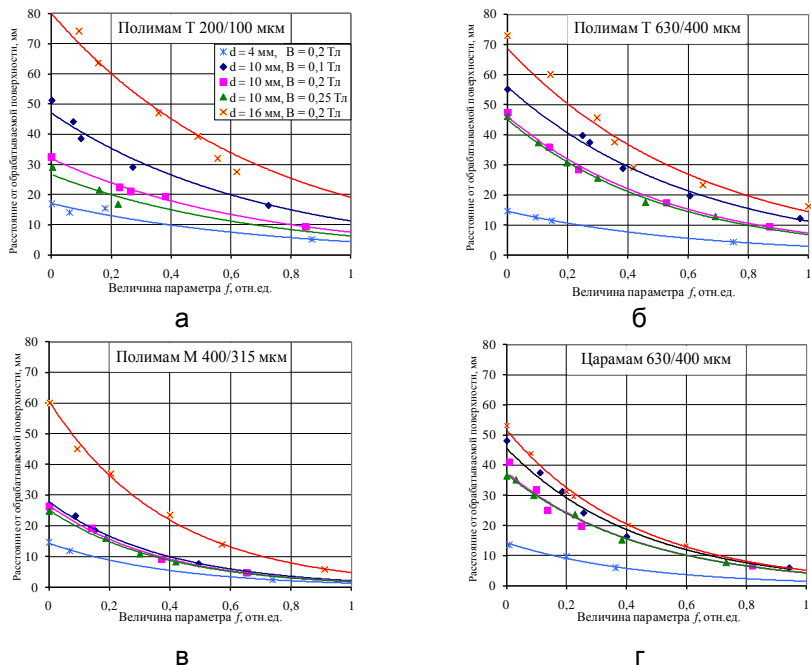


Рис 1.23. Зависимости изменения величины распространения фронта возмущений в МАИ в плоскости кольцевой ванны

Полученные кривые с достаточной точностью могут быть аппроксимированы экспоненциальными функциями вида (1.9):

$$L = L_0 \cdot e^{(\delta \cdot f)} \quad (1.9)$$

где L_0 – расстояние до обрабатываемой поверхности детали, на которой смещение отдельных макрообъемов порошка в МАИ отсутствуют, L – расстояние до обрабатываемой поверхности детали, которая является источником возмущений в МАИ в процессе МАО в направлении ее движения, δ – коэффициент, характеризующий процесс затухания возмущений в МАИ, вызванных в порошковой среде движением деталей (приведен в таблице 1.8).

Анализ полученных результатов (рис. 1.21, рис. 1.22, табл. 1.8) показал, что для равноосных осколочных порошков большее расстояние, на которое распространяются возмущения в МАИ перед движущейся деталью – L_0 характерно для случая использования порошковых ферроабразивов с

большим размером зерен, что связано, прежде всего, с большей способностью этих порошков к намагничиванию и повышенной величиной μ_r МАИ [76]. Величина L_0 , определенная для различных МАП и различных значений напряженности магнитного поля, хорошо коррелирует с параметром μ_r при МАО деталей диаметром 4 и 10 мм.

Таблица 1.8

Значения коэффициентов L_0 и δ

Тип порошка	Фракция, мкм	H , кА/м	d , мм	L_0	δ
Полимам-Т	200/100	79,6	10	47,02	1,43
		159,6		31,91	1,45
		198,9		26,63	1,44
		159,6	4	17,1	1,37
			16	80,1	1,44
	630/400	79,6	10	55,92	1,6
		159,6		46,04	1,84
		198,9		45,08	1,89
		159,6	4	14,6	1,6
			16	68,68	1,57
Царамам	630/400	79,6	10	45,57	2,24
		159,6		37,6	2,19
		198,9		36,99	2,16
		159,6	4	14,23	2,27
			16	51,65	2,31
Полимам-М	400/315	79,6	10	27,87	2,58
		159,6		26,72	2,69
		198,9		25,21	2,66
		159,6	4	14,3	2,41
			16	60,71	2,55

При МАО деталей диаметром 16 мм указанная корреляция отсутствует. Это объясняется тем, что при обработке деталей диаметром 4 и 10 мм в процессе их движения в порошковой среде, сформированной магнитным полем в МАИ, фронт распространения возмущений активно не взаимодействует с малоподвижными объемами порошка вблизи поверхностей полюсных наконечников – так называемой «мертвой» зоной [53, 91, 120], и связан преимущественно с удлинением и последующим разрушением квазистабильных конусообразных столбиков и веретенообразных формирований в МАИ.

МАО образцов диаметром 16 мм вызывает в МАИ возмущения, приводящие к смещению основ конусообразных столбиков относительно поверхности полюсных наконечников. При этом создаются условия, которые по своему действию аналогичны механизмам образования зон заклинивания при МАО в условиях малых рабочих зазоров [4, 53, 100, 107]. Образование зон заклинивания нарушает «регулярную» структуру в МАИ и приводит к аномальному росту нормального давления МАИ на поверхность детали вблизи полюсных наконечников. В результате такого всплеска давления происходит нарушение оптимального соотношения между нормальными и тангенциальными составляющими сил [88, 154], что является причиной возможного шаржирования порошка в поверхность детали, образование «комет» на обрабатываемой поверхности [3, 106, 107].

Максимальная величина распространения фронта возмущений в МАИ будет зависеть от степени неравноосности частиц МАП и способности к растяжению веретенообразных и конусообразных квазистабильных формирований без их разрыва и разрушения и нивелирования относительно обрабатываемой поверхности. Подобная способность к формированию структурных элементов МАИ достаточно хорошо коррелирует с коэффициентом δ и характеризует способность МАИ демпфировать возмущения без нарушения регулярной структуры. Полученные значения показывают, что для неравноосных порошков величина δ не менее чем в 1,5 раза выше, чем для равноосных, а значит и существенно выше демпфирующая способность МАИ, его способность сохранять регулярную структуру, форму и свойства в процессе МАО, что подтверждает предыдущие результаты по распространению возмущений в первой зоне. Это объясняется преимущественным влиянием магнитного поля, которое выполняет роль, связанную с «армированием» МАИ. Отметим, что такие результаты существенно расширяют и объясняют данные получены при формировании МАИ из смесей равноосных и неравноосных порошков [61] и открывают широкие возможности по формированию в «больших» рабочих зонах стабильного и высокопроизводительного МАИ для МАО сложнопрофильных деталей.

Величина нормальной составляющей силы давления МАИ на обрабатываемую поверхность с учетом скорости движения деталей будет в значительной степени зависеть от массы порошковой среды, уплотняемой деталью при обработке и может, с некоторой степенью точности, определяться по формуле (1.10):

$$F_n = \frac{m \cdot V^2}{R_e} \quad (1.10)$$

где V – линейная скорость движения детали в МАИ, m – масса порошковой среды, которая находится в уплотненной зоне, R_e – средний радиус кольцевой рабочей зоны.

Для определения массы порошковой среды, активно взаимодействующей с обрабатываемой поверхностью можно воспользоваться аппроксимирующими полиномами изменения плотности МАИ – $\rho(N, L)$, переддвигающейся деталью. Тогда масса может быть определена как (1.11):

$$m = S \cdot h \cdot \rho(N, L) = S \cdot h \cdot \int_0^N \sum_{k=0}^2 \sum_{l=0}^2 b_{kl} \cdot N^l \cdot L^k dL dN \quad (1.11)$$

где h – высота рабочей зоны, b_{kl} – коэффициенты полинома для функции $\rho(N, L)$ (таблица 1.9).

Таблица 1.9

Значение коэффициентов b_{kl} и среднеквадратичной ошибки аппроксимации Δ

Тип порошка		Полимам-Т 200/100 мкм		
d , мм		10		
H , кА/м		79,6	159,2	198,9
Коэффициенты, b_{kl}	b_{00}	1,59	1,19	1,52
	b_{01}	-0,029	$2,47 \cdot 10^{-2}$	$-1 \cdot 10^{-3}$
	b_{02}	$7,14 \cdot 10^{-4}$	$-7,83 \cdot 10^{-4}$	$-1,42 \cdot 10^{-4}$
	b_{10}	$-4,68 \cdot 10^{-3}$	$8,46 \cdot 10^{-3}$	$-2,08 \cdot 10^{-5}$
	b_{11}	$-3,68 \cdot 10^{-5}$	$-1,41 \cdot 10^{-3}$	$-6,04 \cdot 10^{-4}$
	b_{12}	$1,61 \cdot 10^{-6}$	$3,92 \cdot 10^{-5}$	$1,83 \cdot 10^{-5}$
	b_{20}	$1,17 \cdot 10^{-5}$	$-6,31 \cdot 10^{-5}$	$-6,6 \cdot 10^{-6}$
	b_{21}	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$4,12 \cdot 10^{-6}$
	b_{22}	$-6,23 \cdot 10^{-8}$	$-2,84 \cdot 10^{-7}$	$-1,19 \cdot 10^{-7}$
Δ		$1,3 \cdot 10^{-3}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$

Выполнены расчеты на примере МАИ, сформированного из МАП Полимам-Т зернистостью 200/100 мкм при H – 79,6 кА/м и 159,2 кА/м, полученные в [120] показали, что величина массы порошка, который переформируется и уплотняется перед деталью практически не меняется и составляет для данных условий МАО, величину порядка 120 г. При $H = 198,9$ кА/м, активно взаимодействующая с деталью масса порошка, снижается практически в два раза. Такая разница в массах порошка в уплотненной зоне переддвигающейся деталью связана с тем, что при $H > 198,9$ кА/м происходит смещение порошка в малоподвижную область с повышенной величиной магнитной индукции вблизи полюсных

наконечников – в «мертвую» зону. При этом снижается нормальная составляющая давления на деталь и будет расти тангенциальная, что возникает в результате проявления эффекта заклинивания МАП в пространстве между полюсным наконечником и обрабатываемой поверхностью деталей. Полученные результаты экспериментального и теоретического анализа поведения ферроабразивной среды при МАО деталей в условиях больших магнитных зазоров позволили выполнить уточнение модели формирования МАИ предложенной в [76].

1.7.3 Структурно-кинетическая модель МАИ в рабочей зоне кольцевого типа

При МАО в условиях больших магнитных зазоров преобладающее влияние имеют динамические составляющие силы взаимодействия МАИ с обрабатываемыми поверхностями, поэтому магнитные силы, сила притяжения, инерционная, центробежная не учитывается в данном случае. На полюсных наконечниках формируется «мертвая» зона, которая не принимает активного участия в процессе. При обработке цилиндрических деталей малого диаметра линейная скорость на их поверхности при вращении детали вокруг собственной оси намного меньше скорости перемещения детали вдоль рабочей зоны, поэтому этой составляющей тоже пренебрегаем. На рис. 1.24 изображен характер распределения сил, действующих на поверхность детали со стороны МАИ и схема переформирования МАИ при движении вертикально расположенного образца цилиндрической формы.

В процессе МАО на деталь действует суммарная динамическая сила взаимодействия МАИ с каждой точкой обрабатываемой поверхности F_v , равная сумме нормальной и тангенциальной составляющих. В точке 1 максимальную величину имеет нормальная сила взаимодействия F_n , которая вызывает разрыв формирований МАИ в контактирующей с ней точке, а тангенциальная F_t практически равна нулю, при этом порошок начинает огибать деталь и постепенно соотношение сил меняется – тангенциальная увеличивается, а нормальная уменьшается, как это показано для точки 2. В точке 1 происходит ударное взаимодействие, реализуется максимальный наклеп. Постепенно величина нормальной составляющей силы уменьшается до нуля в точке 3, в которой тангенциальная составляющая будет максимальной и будет реализовываться преимущественное фрикционное взаимодействие формирований МАИ с участками обрабатываемой поверхности. Прижим зерен к поверхности происходит за счет магнитной силы и частично сил «заклинивания» между

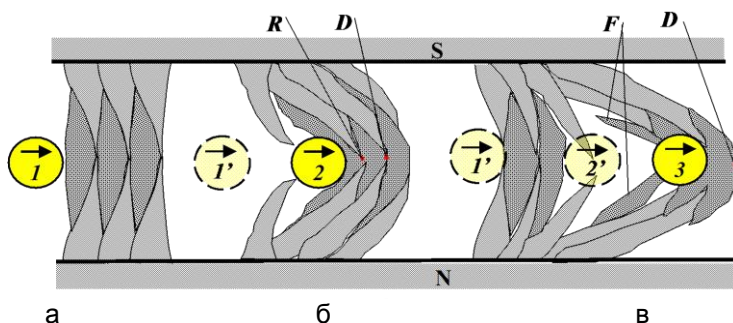


Рис. 1.25. Схематическое представление этапов взаимодействия деталей со структурными элементами МАИ

Точка R (рис. 1.25 б) соответствует моменту «разрыва» контактирующих, противоположно расположенных конусообразных столбиков и объединению смежно расположенных веретенообразных формирований. Точка F (рис. 1.25 в) соответствует моменту отрыва растянутых объемов веретенообразных уплотнений и конусообразных столбиков, которые «обтекают» поверхность и в дальнейшем принимают участие в восстановлении структуры МАИ. Положения 2 и 3 характерно формирование за деталью разреженной зоны, практически свободной от ферроабразивной порошковой среды – «теневого» зоны, в которой процесс МАО практически отсутствует, особенно для деталей из пара- и диамагнитных материалов [20, 76, 113].

Предложенное схематическое изображение кинетических особенностей взаимодействия МАИ с поверхностью обрабатываемых деталей на станках с кольцевым расположением магнитных зазоров позволило выполнить уточнения формализованной модели МАИ предложенной в [66, 81] и впервые представить кинетическую модель поведения ферроабразивной среды при МАО. По результатам непосредственных измерений подтверждено, что в процессе МАО МАИ взаимодействует с обрабатываемыми поверхностями деталей, перемещаемых в нем не отдельными зернами, а их группами, которые представляют собой конусообразные столбики, расположенные своими основаниями на поверхности полюсных наконечников, и веретенообразными формированиями, расположенными в средней по ширине части рабочих зон. При этом обеспечивается формирование практически сплошного порошкового инструмента, у которого «виртуальной» связкой является магнитное поле. С целью подтверждения и уточнения предложенной модели особенностей переформирования МАИ при МАО реальных деталей в рабочей зоне шириной 35 мм выполнено визуальное наблюдение и фотографирование структурных элементов ферроабразивной среды

в рабочем состоянии. Установлено, что для указанной выше ширины рабочей зоны при обработке деталей характерным является наличие в них малоподвижных «мертвых» зон, которые располагаются на поверхности полюсных наконечников (рис. 1.26). Дополнительно был проведен полный анализ всех структурных элементов МАИ и определены их характерные размеры.

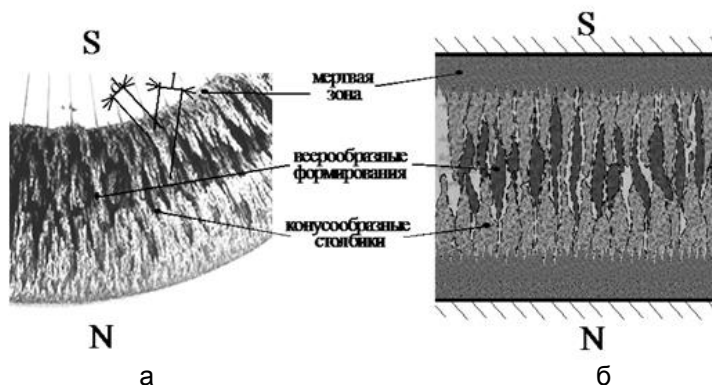


Рис. 1.26. Внешний вид МАИ в рабочем состоянии в зоне обработки – а и его структурно-схематическое представление – б

После статистической обработки результатов измерений установлено, что независимо от размеров обрабатываемых деталей, от скорости МАО и от величины H в зонах обработки средняя длина столбиков составляет 11,5 – 12 мм, а их диаметр 3 – 3,5 мм, что коррелирует с ранее полученными в [81, 113] результатами. Анализ предыдущих исследований приведенных в [3, 68, 76, 81, 83], основанный на измерении слепков МАИ показал, что указанные размеры практически не изменяются для магнитных зазоров шириной до 20 мм. Следует отметить, что более детальный анализ структуры МАИ, которая формируется при МАО в рабочих зонах кольцевого типа шириной 35 мм позволяет установить наличие в них дополнительных «мертвых» зон – зон порошка, расположенных на полюсных наконечниках, которые находятся в малоподвижном состоянии и не принимают активного участия в процессе обработки. Ширина малоподвижных «мертвых» зон составляет 5 – 6 мм. По-видимому, их величина в МАИ, зависит от габаритов обрабатываемых деталей, ширины рабочих магнитных зазоров, и с их увеличением возрастает.

Анализ выполненных исследований динамических процессов, происходящих в МАИ при обработке деталей на станках с кольцевым расположением рабочей зоны показал, что характер распространения

возмущений в МАИ существенно зависит от типа МАП, который используется для его формирования в процессе обработки, а именно от геометрических размеров зерен и, особенно, от значения степени неравноосности частиц порошков с различным фракционным составом в диапазоне размеров от 100 до 400 мкм.

Ранее показано и экспериментально подтверждено, что в процессе МАО поверхности обрабатываемых деталей инициируют в ферроабразивной порошковой среде возмущения, которые состоят из трех зон, которые непосредственно принимают участие в формировании структурных элементов МАИ. Идентифицировано влияние напряженности магнитного поля и габаритных размеров обрабатываемых деталей на условия переформирования МАИ в рабочей зоне кольцевого типа. Исследовано влияние габаритов обрабатываемых деталей на особенности распространения активной области возмущения, идентифицирован и исследован процесс вытеснения части порошка за пределы рабочей зоны, в результате чего имеет место снижение жесткости МАИ и эффективности процесса МАО. Проанализировано кинетику формирования и переформирования МАИ в условиях больших рабочих зон и слабых магнитных полей. Разработана структурно-кинетическая модель МАИ, которая является развитием ранее полученных результатов и позволяет обоснованно и целенаправленно решать проблему повышения эффективности процесса МАО деталей сложной пространственной формы путем управления механизмом формирования МАИ.

В дальнейшем будет приведена экспериментальная проверка полученных результатов при обработанные длинномерных деталей, так как при МАО таких деталей на станках с кольцевым расположением рабочей зоны возникают наибольшие сложности.

Важной задачей, которую приходится решать при МАО консольно-расположенных длинномерных деталей является проблема связанная с вытеснением МАП за пределы рабочей зоны в нерабочее пространство с пониженной величиной магнитной индукции, в зону, где отсутствуют формообразующие МАИ элементы – полюсные наконечники, где практически невозможно контролировать как свойства МАИ, так и непосредственно сам процесс МАО.

1.8 Обеспечение равномерного МАО длинномерных деталей на установках с кольцевым расположением рабочей зоны

Решение проблемы создания стабильного по эксплуатационным свойствам МАИ на протяжении всего цикла МАО изделий позволит сделать существенный шаг при разработке эффективного процесса обработки на станках с кольцевым расположением магнитных зазоров. При этом достижение поставленной задачи не должно приводить к усложнению технологического цикла, а должно быть универсальным и существенно не зависеть от формы детали и кинематики процесса ее обработки. Если при МАО ферромагнитных изделий частичное решение данной проблемы было осуществлено за счет использования магнитной зоны определенной формы в поперечном сечении [137, 141], что позволяет активизировать процесс перемешивания МАП за счет динамических и магнитных сил, то при обработке пара- и диамагнитных изделий формирование стабильного МАИ затруднено. Прежде всего, необходимо иметь полную информацию о том, как влияет степень заполнения рабочей зоны МАП на производительность, эффективность, равномерность и стабильность обработки изделий. Определить целесообразность использования дополнительных восстанавливающих и формообразующих МАИ элементов, четко установить особенности их базирования при МАО в рабочей зоне станка, определить эффективность, производительность и возможность равномерной обработки реальных деталей типа осевой и концевой РИ. Важным фактором является – определение оптимальных геометрических размеров восстанавливающих элементов и их конструкции с учетом процессов, происходящих при переформировании МАИ, исследования влияния специальной конструкции восстанавливающих элементов как на характер распределения магнитного потока в рабочих зонах станка, так и на равномерность и стабильность обработки с обеспечением заданных параметров качества обрабатываемых деталей.

1.8.1 Влияние степени заполнения рабочей зоны МАП на процесс формирования МАИ

Было исследовано влияние степени заполнения рабочей зоны МАП на равномерность и производительность процесса МАО длинномерных изделий. Ранние выполненные работы в этом направлении или касались процесса МАО в малых рабочих зазорах [43, 52, 56], или были обусловлены анализом распределения

магнитного поля в зонах обработки [58, 81, 123] и сил магнитного происхождения без учета динамики процесса МАО реальных деталей. Исследования проводили на примере образцов изготовленных из слабомагнитной нержавеющей стали марки Х18Н10Т с исходной шероховатостью поверхности $Ra = 0,7$ мкм, с длиной контрольного участка 75 мм.

Коэффициент заполнения рабочей зоны МАП – K_z варьировали в диапазоне от 0,5 до 1,25 с шагом 0,25, который определяли как:

$$K_z = \frac{m}{\rho_{\text{нас}} \cdot V_{\text{в}}} \quad (1.12)$$

где $\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность МАП, г/мм³; m – масса МАП, г; $V_{\text{в}}$ – объем рабочей зоны, мм³.

МАО выполняли на установке изображенной на рис. 1.5 при следующих технологических условиях: скорость движения образцов вдоль кольцевой ванны – 3 м/с, напряженность магнитного поля в рабочей зоне, не заполненной МАП $H = 183,12$ кА/м, время обработки – 60 с, порошок Полиам-Т зернистостью 200/160 мкм, в качестве СОТС использовали Асфол, обработку выполняли в режиме «стекания» МАИ с обрабатываемых поверхностей – когда происходит вытеснение МАИ в нижнюю часть магнитного зазора и за его пределы (рис. 1.6), как показано на рис. 1.27, угол базирования образцов по отношению к плоскости кольцевой ванны – ρ изменялся от 35° до 65° с шагом 10°.

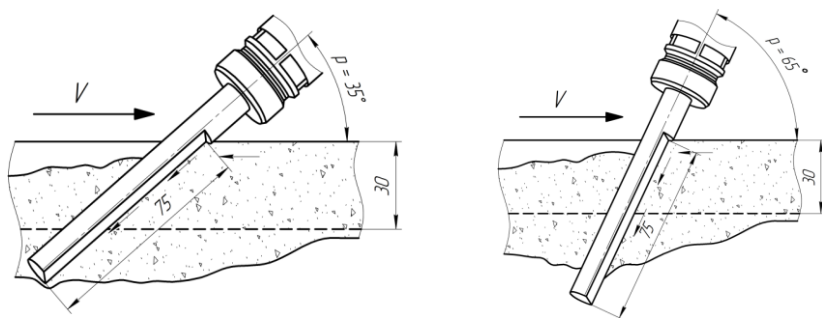


Рис. 1.27. Схема расположения обрабатываемых деталей в рабочей зоне при МАО в режиме «стекания»

Шероховатость поверхности измерялась до и после МАО методом ошупывания на профилограф-профилометре 252. В процессе выполнения экспериментальных исследований контролировали величину шероховатости Ra по всей длине рабочей

поверхности образца. Во время измерения детали устанавливались на координатном столе (рис. 1.28 а), с помощью которого выполняли перемещения. Шероховатость рабочей поверхности измерялась на длине 65,5 мм, по четырем параллельным линиям на ширине 9 мм. Схема базирования и измерения изображена на рис. 1.28 б.

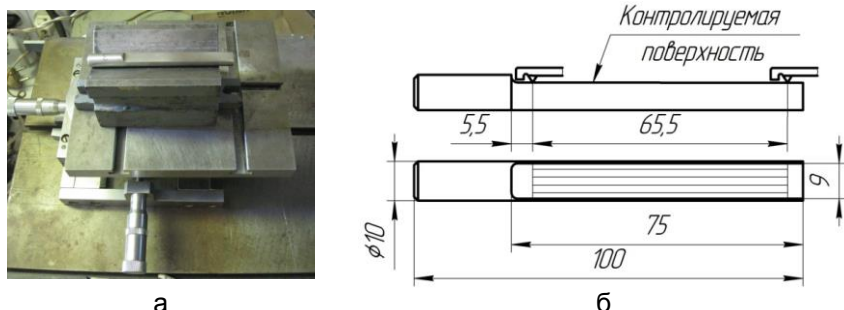


Рис. 1.28. Измерение шероховатости поверхности обрабатываемых деталей: а – общий вид; б – схема измерения

Характер изменения параметра R_a вдоль оси обрабатываемых деталей после МАО при различных углах базирования в зависимости от величины K_z в зоне обработки представлена на рис. 1.29. В верхней части над каждой из топограммы указана зона межполюсного пространства, в которой располагается обрабатываемая деталь. Показано, что наиболее активно процесс обработки плоской поверхности деталей реализуется не в межполюсном пространстве, а под ним – в области, куда вытесняется основная масса МАИ при МАО. При наклонном базировании деталей относительно плоскости кольцевой ванны под углом $\rho = 35^\circ - 45^\circ$ в процессе МАО происходит равномерное изменение R_a . Следует отметить, что при угле базирования деталей $\rho = 35^\circ$ происходит лучшее изменение шероховатости плоской поверхности деталей при $K_z = 0,5 - 0,7$, в то время при $\rho \geq 45^\circ$ K_z должен быть больше 1. Подобное различие в особенностях процесса МАО объясняется тем фактом, что в первом случае в рабочей зоне при малых значениях $K_z < 0,7$ осуществляется частичное восстановление формы МАИ силами магнитно-динамического происхождения, возникающими между отдельными группами ферроабразивной среды. При $K_z > 1$ – формируется малоподвижный МАИ с повышенной плотностью в областях концентрации магнитного потока (рис. 1.8) – зоны так называемого «заклинивания» [55] с низкой подвижностью и повышенной полирующей способностью.

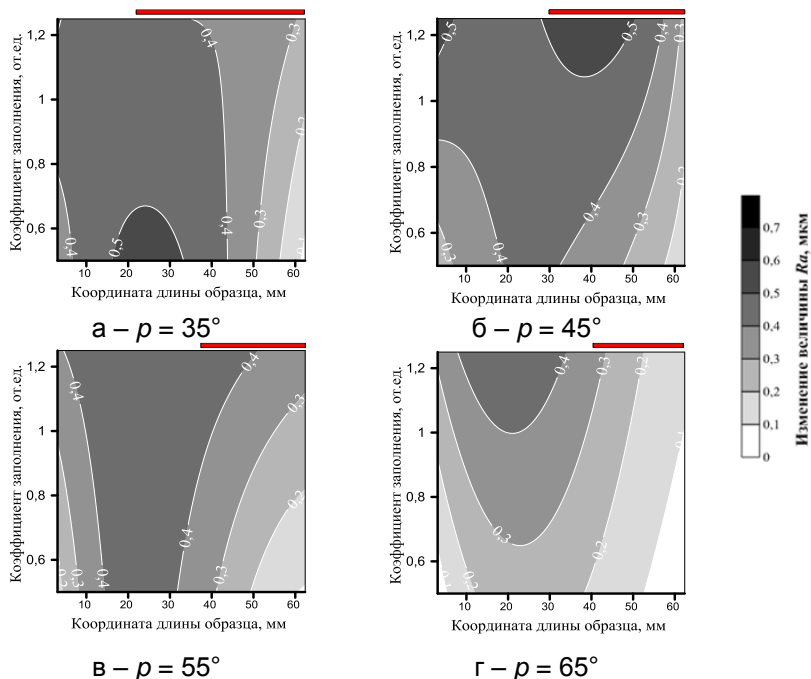


Рис. 1.29. Топограммы функций изменения величины параметра Ra после МАО при разных углах базирования деталей по отношению к плоскости кольцевой ванны в зависимости от координаты по длине детали и величины Kz (ноль отсчета координаты длины образца совпадает с краем консоли детали)

Анализ зависимостей изменения шероховатости поверхности вдоль оси обрабатываемых деталей, расположенных в процессе МАО под разными углами к плоскости кольцевой ванны при фиксированных значениях величины Kz (рис. 1.30), позволил выделить наиболее рациональные условия их базирования, при которых обеспечиваются лучшие условия для полирования. Показано, что наиболее рациональной величиной заполнения рабочей зоны МАП является $Kz = 0,75 - 0,8$. Это объясняется тем, что именно при указанной степени заполнения сформированный МАИ активно движется в зоне обработки, менее активно происходит его вытеснение в нерабочие зоны, весь объем принимает активное участие в обработке и не задерживается на нерабочих поверхностях магнитной системы станка.

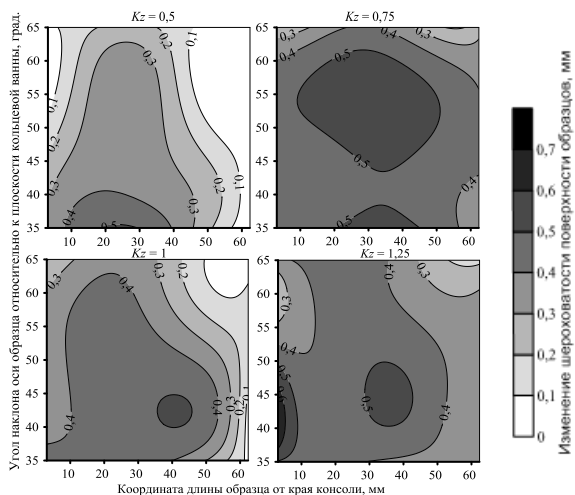


Рис. 1.30. Топограммы функций изменения параметра Ra после МАО в зависимости от координаты длины и угла наклона оси образцов по отношению к плоскости кольцевой ванны при разных значениях величины Kz (ноль отсчета координаты длины образцов совпадает с краем консоли детали)

1.8.2 Определение рациональных углов базирования длинномерных деталей на установках с кольцевым расположением рабочей зоны

Выполненные модельные эксперименты по МАО длинномерных образцов на станке с кольцевым расположением рабочей зоны показали, что обработку таких деталей целесообразно выполнять при их наклонном расположении в рабочей зоне. Показано, что в процессе МАО основная масса порошковой среды вытесняется за пределы магнитного зазора, чем обуславливает высокую интенсивность обработки в этой зоне. Однако по полученным результатам нельзя контролировать равномерность обработки в пределах рабочей зоны.

Для всестороннего изучения условий МАО длинномерных деталей выполняли исследования на модельных образцах, изготовленных из различных материалов: сплав титана ВТ3-1 с исходной шероховатостью поверхности $Ra = 1$ мкм, сплав латуни ЛС 69 – $Ra = 1,85$ мкм, инструментальная закаленная сталь У9А – $Ra = 0,63$ мкм и нержавеющая сталь X18H10T – $Ra = 0,54$ мкм. МАО выполняли при идентичных условиях, которые представлены в разделе 1.8.1. После обработки контролировали изменение

шероховатости поверхности по длине деталей, результаты представлены на рис. 1.31.

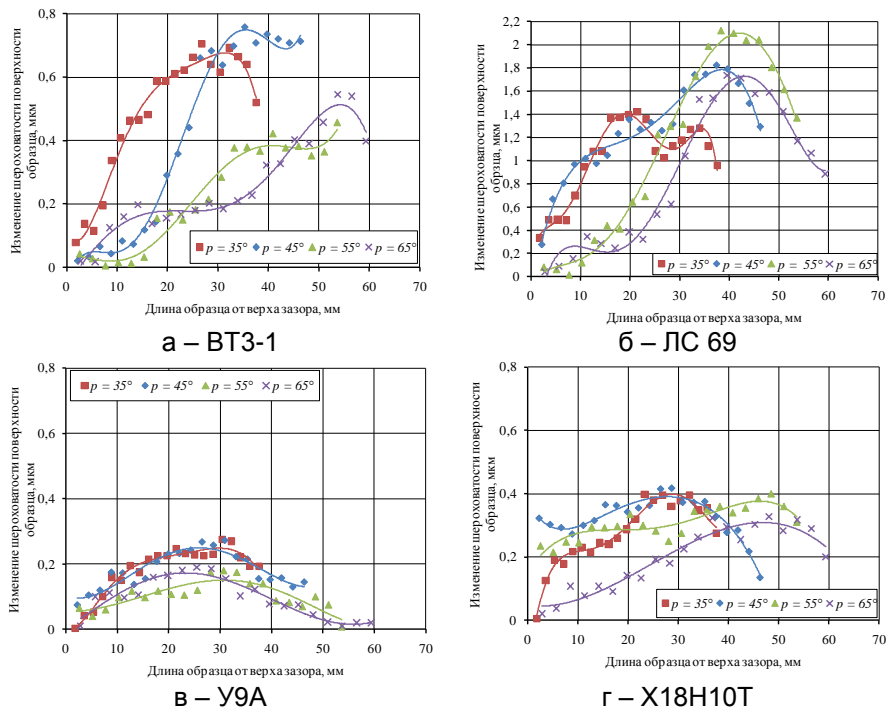


Рис. 1.31. Изменение шероховатости поверхности образцов изготовленных из разных материалов при разных углах базирования деталей в рабочей зоне при МАО

Установлено, что наиболее активно процесс МАО происходит на краю образцов – в нижней части рабочей зоны и за ее пределами, в той зоне, в которую вытесняется основная масса МАИ в процессе обработки. При этом лучшие результаты по изменению шероховатости происходят при углах базирования p равных 35° и 45° . Лучшее данные по уменьшению параметра шероховатости Ra получены при МАО с использованием МАП Полимам-Т зернистостью 200/100 мкм образцов, изготовленных из диамагнитных материалов – латуни и титана. При этом для латуни, подобные результаты получены при углах базирования образцов по отношению к вектору главного движения $50^\circ - 60^\circ$, для титанового сплава и углеродистой стали – $35^\circ - 45^\circ$ и для слабомагнитных образцов из нержавеющей стали – 45° . При МАО образцов изготовленных из ферромагнитных

материалов активный процесс обработки проходит в нижней части рабочей зоны, в то время как для других исследуемых материалов за его пределами.

Показано, что процесс МАО длинномерных деталей целесообразно выполнять при их наклонном расположении относительно плоскости рабочей зоны. Однако это лишь частично решает проблему позонной обработки и формирования МАИ с прогнозируемыми, стабильными свойствами в пределах рабочей зоны станка.

1.8.3 Использование специальных формообразующих МАИ элементов при МАО на установках с кольцевым расположением рабочей зоны

Специфика обработки длинномерных деталей связана с активным переформированием МАИ в процессе МАО, что проявляется, в ряде случаев, в его вытеснении или в верхнюю, или в нижнюю часть, и за пределы магнитной зоны – в области с пониженной магнитной индукцией, где величина магнитных сил недостаточна для формирования необходимой плотности и жесткости МАИ. Следовательно, не обеспечивается выполнение первого условия эффективного МАО – равномерного прижима элементов МАИ к обрабатываемым поверхностям. Наиболее активно процесс вытеснения порошка имеет место при обработке деталей, изготовленных из диа- и парамагнитных материалов. При этом достаточно сложной задачей является прогнозирование условий и результатов МАО деталей по высоте зон обработки. Поэтому процесс является сложно-контролируемым и зависит от различных параметров: величины коэффициента заполнения рабочих зон, скорости обработки, условий базирования деталей, свойств МАП и др.

Решение данной проблемы – обеспечение равномерной, контролируемой и позонной обработки по высоте рабочих зон может быть достигнуто путем использования дополнительных устройств в виде контртел, которые выполняют роль элементов, способствующих формированию необходимых свойств МАИ за счет принудительного перемещения вытесненной порошковой среды в зону активной обработки – в межполюсное пространство рабочей зоны станка.

В [20] при обработке образцов, имитирующих процесс МАО осевого РИ, при условии, что тангенциальная составляющая скорости обработки близка к оптимальной, и при этом учитываются реологические свойства МАИ [81] – при их наклонном базировании по отношению к вектору основного движения – вращение вокруг оси

кольцевой ванны, теоретически было обосновано и экспериментально подтверждено наличие процесса «вытеснения» основной массы МАИ из рабочего пространства магнитной зоны, как в условиях обработки в режиме «натекания», так и «стекания», которые являются почти зеркальным отражением друг друга в пределах рабочей зоны. Так что, возможно предположить, что при MAO длинномерных деталей на установках с кольцевым расположением рабочей зоны, необходимо их базировать таким образом, чтобы одна деталь обрабатывалась в режиме «стекания», а другая в то же время в режиме «натекания». То есть такое встречное базирование позволит возвращать вытесненный МАП в пределы рабочей зоны, формируя при этом по ее высоте МАИ со стабильной плотностью и жесткостью. Приведены в [20, 33] отдельные результаты подтверждают целесообразность такого подхода к формированию стабильного МАИ, но не позволяют четко определить рациональные диапазоны углов наклона восстанавливающих элементов, их размеров, формы и конструкции.

С целью определения диапазона рационального расположения деталей в зоне обработки при их встречном базировании на станках типа кольцевая ванна в процессе MAO на формирование МАИ выполнена серия экспериментальных исследований в условиях аналогичных выше описанным по обработке деталей изготовленных из нержавеющей стали X18H10T с исходной шероховатостью поверхности $Ra = 0,54$ мкм. В рабочей зоне станка установлено парамагнитную деталь – восстанавливающий стержневой элемент (ВСЭ), имитирующий встречное базирование с обрабатываемой деталью. Поперечные размеры аналогичные обрабатываемой детали, а длина выбрана таким образом, чтобы обеспечивалась полное взаимодействие с вытесненным при MAO МАИ. Схема обработки с использованием ВСЭ приведена на рис. 1.32. При MAO угол базирования ВСЭ относительно плоскости кольцевой ванны – β варьировали в диапазоне от 35° до 65° , с шагом 10° .

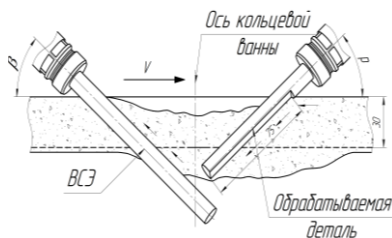


Рис. 1.32. Схема MAO деталей с использованием ВСЭ

После MAO контролировали изменение шероховатости поверхности по длине обрабатываемых деталей (рис. 1.28). Результаты изменения параметра Ra при использовании в схеме MAO ВСЭ, при фиксированных углах базирования деталей – ρ приведены на рис. 1.33, а при фиксированных углах базирования ВСЭ в виде топограммы функций на рис. 1.34. Показано, что наибольшее значение величины $\Delta Ra = Ra_{\text{кон}} - Ra_{\text{нач}}$ которое в ряде случаев достигает 0,3 – 0,4 мкм имеет место при углах базирования ВСЭ $\beta = 35^\circ - 55^\circ$. При указанных углах обеспечиваются активное перемещение МАП в пределы рабочей зоны, реализуются лучшие условия для формирования МАИ с заданными заранее свойствами, повышается его абразивная и полирующая способности. В результате чего обеспечивается равномерная обработка по длине контрольных образцов. Наиболее интенсивный и равномерный процесс полирования реализуется при углах $\rho = 35^\circ - 45^\circ$ и $\beta = 35^\circ - 55^\circ$.

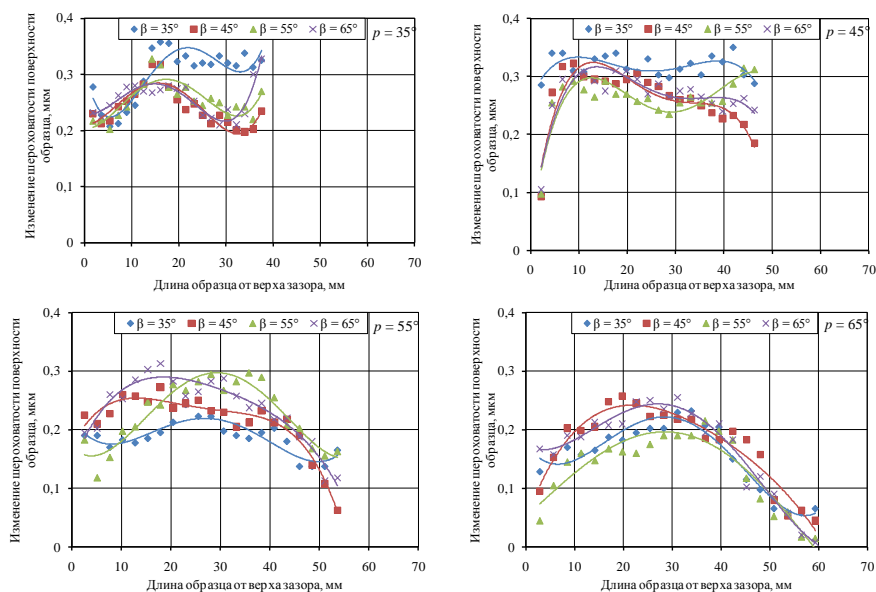


Рис. 1.33. Изменение величины ΔRa деталей изготовленных из стали X18H10T после MAO с использованием ВСЭ при разных углах базирования в рабочей зоне ρ и β соответственно

Анализ полученных результатов с учетом данных, приведенных на рис. 1.31 г показывает, что рациональным углом базирования ВСЭ будет угол, при котором обеспечивается равномерная по длине деталей обработка с максимальной величиной уменьшения

шероховатости поверхности. При этом происходит перемещение зоны активной обработки из области расположенной в нижней части рабочего зазора и за его пределами в межполюсное пространство – область с повышенной величиной магнитной индукции.

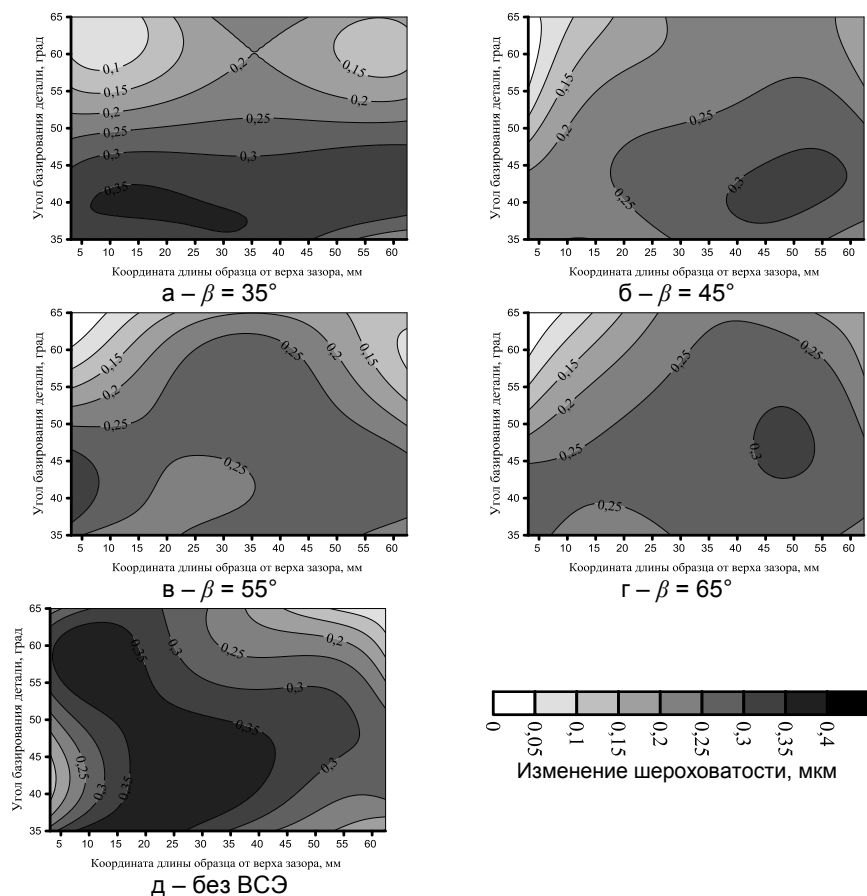
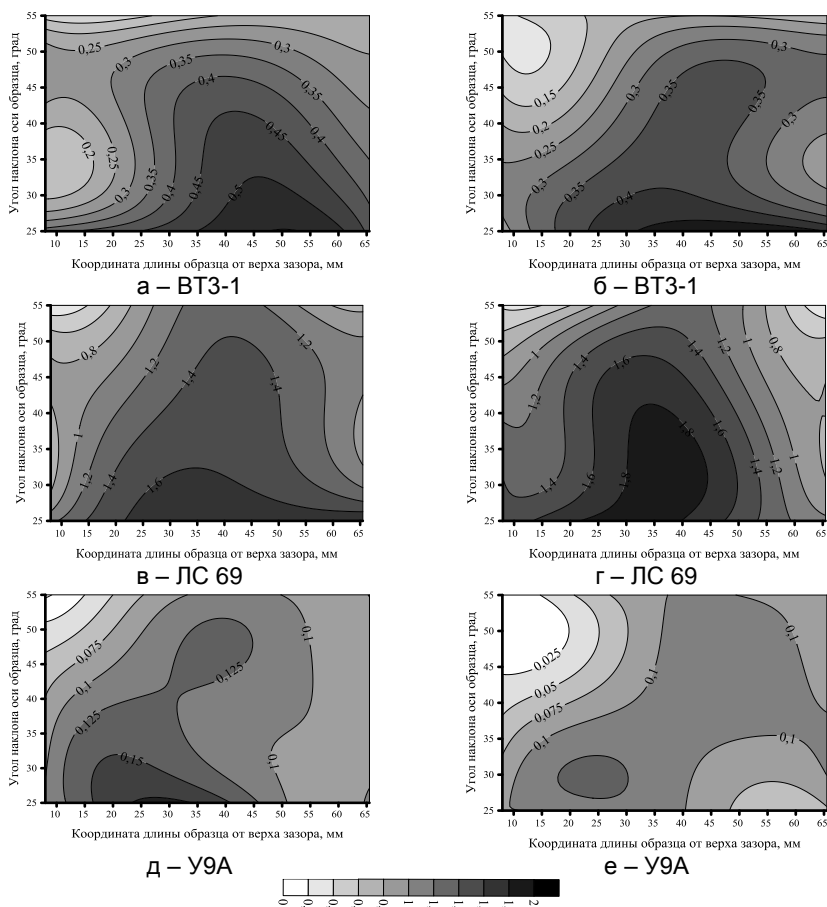


Рис. 1.34. Изменение величины ΔRa деталей, изготовленных из стали Х18Н10Т после МАО в зависимости от координаты их длины и углов базирования для разных p и β

Важно отметить, что активно обрабатывается часть деталей, которая находится вблизи места крепления. Подобное управление полирующей способностью МАИ по высоте рабочей зоны позволяет выполнять прогнозируемую, позонную обработку длиномерных консольно-закрепленных деталей, таких как осевой и концевой РИ,

лопатки ГТД с высотой пера значительно превышающей высоту рабочей зоны. При MAO с использованием ВСЭ образцов изготовленных из BT3-1, У9А и ЛС 69 получено аналогичные результаты (рис. 1.35).



Изменение шероховатости поверхности образцов, мкм

Рис. 1.35. Изменение шероховатости поверхности образцов изготовленных из разных материалов после MAO в зависимости от длины и угла наклона деталей по отношению к плоскости кольцевой ванны при разных углах базирования ВСЭ: а, в, д – 40°; б, г, е – 60°

Важно отметить, что при использовании ВСЭ в процессе обработки длинномерных деталей расширяется область, в которой формируется МАИ с повышенной полирующей способностью в 2 и более раз. Особенно характерным такой процесс является для

деталей, изготовленных из немагнитных материалов, а интенсивность обработки остается практически неизменной.

Одним из определяющих факторов обеспечения контролируемой позонной обработки длинномерных деталей при МАО являются размеры ВСЭ. Выполнена серия экспериментальных исследований по использованию прямолинейных ВСЭ, изготовленных из немагнитных материалов диаметром: 4, 10, 16 и 20 мм. Процесс МАО выполняли в условиях идентичных, вышеуказанным на образцах, изготовленных из стали X18H10T. По результатам предыдущих исследований были выбраны рациональные углы базирования равные для детали и ВСЭ 40°. Результаты изменения шероховатости поверхности представлены на рис. 1.36.

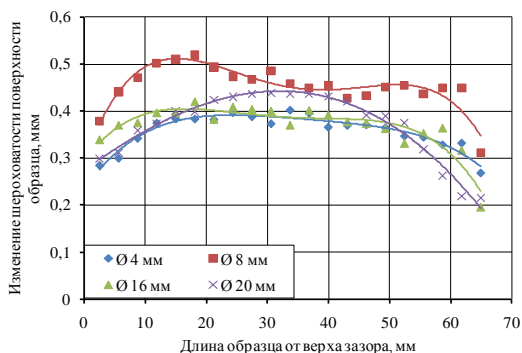


Рис. 1.36.
Изменение
шероховатости
поверхности
образцов
изготовленных из
стали X18H10T при
МАО и
использованием
ВСЭ разных
диаметров

Установлено, что наилучшие результаты по изменению шероховатости поверхности по длине обрабатываемых образцов с $\Delta Ra = 0,5$ мкм полученные при МАО с использованием ВСЭ диаметром 8 мм (рис. 1.36). Объяснение подобного факта связано с особенностями структурирования МАП в МАИ в процессе МАО.

Предыдущие исследования процессов формирования МАИ при МАО длинномерных деталей в условиях кольцевой рабочей зоны существенно зависят от градиента распределения магнитного поля в зонах обработки. Целенаправленное изменение характера распределения магнитного потока при МАО с целью изменения условий формирования МАИ возможно за счет использования ВСЭ состоящих из чередующихся ферромагнитных и немагнитных участков, расположенных вдоль оси. При этом для оценки

полирующей способности МАИ в различных зонах магнитных зон, целесообразно использовать отношение (1.13) рассчитанное после 60 с обработки при заданной скорости.

$$\Delta Ra_{\text{отн}} = \frac{Ra_{\text{исх}} - Ra_{\text{кон}}}{Ra_{\text{кон}}} \quad (1.13)$$

Использование указанного критерия в определенной степени позволяет учесть качество и состояние микрогеометрии поверхности до проведения MAO и в дальнейшем оперировать относительными величинами, характеризующими возможность изменения величины Ra .

Процесс MAO выполняли в условиях, описанных выше. Исследование относительного изменения шероховатости обрабатываемых поверхностей выполнены на специально подготовленных образцах из стали X18H10T, с исходной шероховатостью поверхности $Ra = 0,6 - 0,65$ мкм. На первом этапе исследований обработку выполняли в режиме «стекания» с использованием немагнитного ВСЭ и ВСЭ специальной конструкции с магнитными вставками (рис. 1.37) различной длины – 10 мм, 20 мм, которые располагали в верхней части кольцевой рабочей зоны, диаметром 10 мм. Угол наклона детали $\rho = 65^\circ$, ВСЭ – $\beta = 50^\circ$. На втором этапе обработку выполняли в режиме «стекания» с использованием немагнитного ВСЭ и ВСЭ специальной конструкции с магнитными вставками длиной 10 мм, 20 мм, 30 мм и 45 мм. Угол наклона детали $\rho = 65^\circ$, ВСЭ – $\beta = 40^\circ$. На третьем этапе обработки выполняли в режимах «стекания» и «натекания» без ВСЭ, с использованием немагнитного ВСЭ и ВСЭ специальной конструкции с магнитными вставками длиной 10 мм, 20 мм, 30 мм и 45 мм. Угол наклона детали $\rho = 45^\circ$, ВСЭ – $\beta = 40^\circ$.

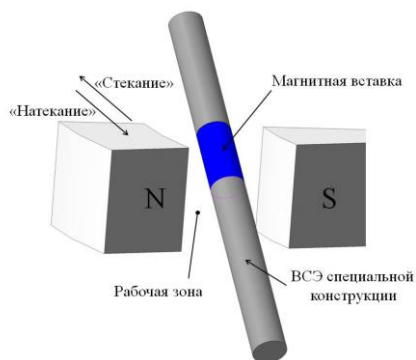
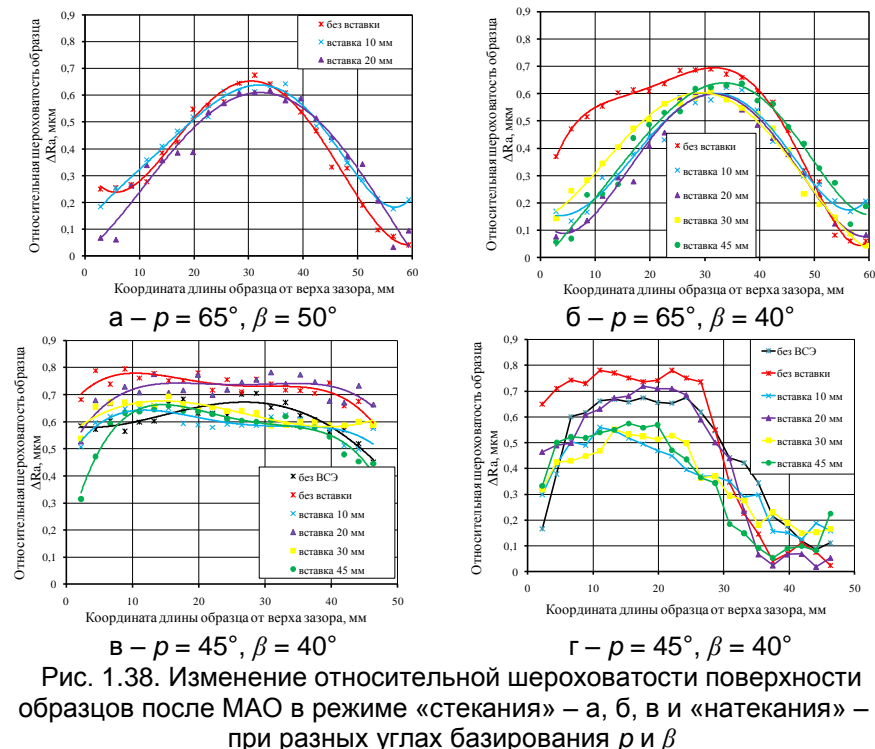


Рис. 1.37. Схематическое расположение ВСЭ специальной конструкции в кольцевой рабочей зоне станка

По результатам исследований построены графики относительного изменения шероховатости поверхности обрабатываемых деталей при различных углах базирования их и ВСЭ различной конструкции при MAO в режимах «стекания» и «натекания» (рис 1.38).



Как показано на рис. 1.38 а (MAO в режиме «стекания») активный процесс обработки выполняется в нижней части рабочей зоны и за ее пределами. Это связано с тем, что угол трения в паре обрабатываемая деталь – МАИ недостаточен для обеспечения равномерной обработки по длине детали. На рис. 1.38 б лучшая шероховатость поверхности по всей длине детали, которая находится в пределах рабочей зоны получена при MAO с использованием немагнитного ВСЭ. ВСЭ специальной конструкции с магнитными вставки снижают качество обрабатываемых поверхностей в верхней части рабочей зоны, это связано с магнитной составляющей силы формирования МАИ. При углах базирования длиномерных деталей и ВСЭ различной конструкции под углами 45° и 40° соответственно,

выполняется равномерная обработка по всей длине детали, не только в рабочей зоне, но и за ее пределами. Такие углы соответствуют углу трения в паре обрабатываемая деталь – МАИ, и являются рациональными, как показано выше. При МАО без использования ВСЭ лучшая полирующая способность МАИ в зоне за пределами рабочего зазора. Как показано на рис. 1.38 в и г использование немагнитного ВСЭ и ВСЭ специальной конструкции с магнитной вставкой 20 мм приводит к улучшению шероховатости поверхности на 20%. В режиме «натекания» (рис. 1.38 г), когда основная масса МАИ перемещается в верхнюю часть рабочей зоны, использование немагнитного ВСЭ показывает лучший результат.

Для объяснения полученных результатов изменения шероховатости поверхности длинномерных деталей проведены измерения величины магнитной индукции в рабочей зоне с использованием ВСЭ различной конструкции. Так как магнитное поле является одним из составляющих элементов формирования МАИ. Измерения проводили по методике приведенной в разделе 1.4 в разных точках магнитной зоны и за ее пределами. В рабочей зоне не заполненной МАП $B = 0,23$ Тл. ВСЭ различной конструкции, как немагнитный так и с магнитными вставками различной длины располагали параллельно оси кольцевой ванны по середине рабочей зоны. Результаты измерения представлены на рис. 1.39.

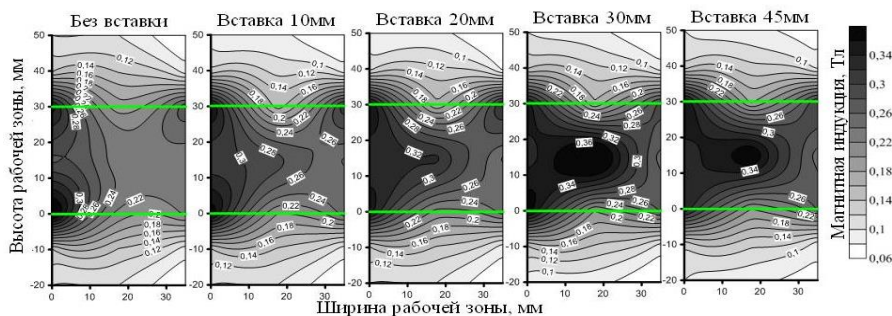


Рис. 1.39. Величина B в рабочей зоне кольцевого типа с расположенными в ней ВСЭ разных конструкций

Для выявления мест концентрации магнитного поля были построены топограммы изменения магнитной индукции в рабочей зоне станка рис. 1.40.

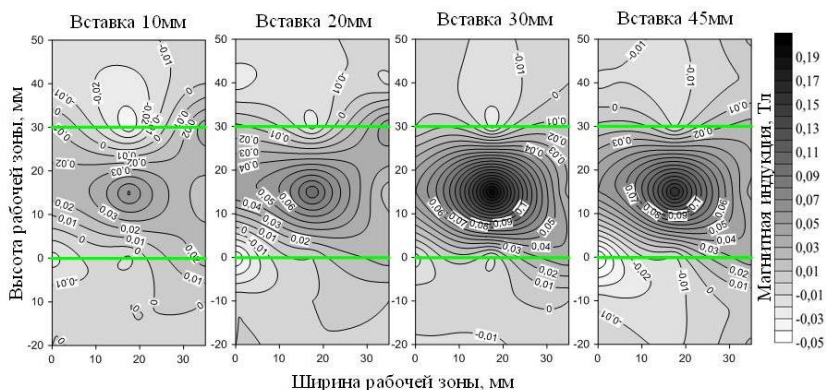


Рис. 1.40. Изменение величины B в рабочей зоне кольцевого типа с расположенными в ней ВСЭ разных конструкций

На топограммах показано, что концентрация магнитной индукции происходит в средней части рабочей зоны, в месте, где расположена магнитная вставка. Чем больше размеры вставки, тем больше концентрация магнитной индукции в пределах рабочей зоны, а не за ее пределами. В результате чего, вблизи ВСЭ специальной конструкции наблюдается скопление ферроабразивной среды, в результате чего происходит увеличение плотности и подвижности МАИ, а значит с недостаточным качеством восстанавливается его форма по длине рабочей зоны.

Экспериментально подтверждено, что процесс MAO длинномерных образцов при их консольном закреплении в рабочей зоне станка кольцевого типа, имитирующих обработку деталей типа осевой и концевой РИ, целесообразно выполнять с использованием противоположно установленного ВСЭ при угле базирования относительно плоскости кольцевой ванны $\beta = 40^\circ$. При этом угол наклона обрабатываемых деталей в рабочей зоне должен соответствовать углу трения в паре обрабатывающая деталь – МАИ, что обеспечивает наиболее равномерную обработку по длине детали.

Использование ВСЭ специальной конструкции с магнитными вставками позволяет обеспечить максимальную интенсивность MAO в заданной области рабочей зоны, определяется длиной магнитной вставки и местом ее расположения.

Для определения оптимальной формы восстанавливающих элементов результаты измерений изменения шероховатости поверхности образцов изготовленных из X18H10T (рис. 1.33) подвергали статистической обработке, после чего выполняли расчет полирующей способности МАИ в каждой зоне по высоте магнитного

зазора по критерию (1.13). Расчетные данные для различных по высоте участков рабочей зоны представлены в виде топограммы поверхностей изменения критерия $\Delta Ra_{\text{отн}}$ в зависимости от углов базирования обрабатываемых деталей по отношению к плоскости кольцевой ванны ρ и углов β базирования противоположно установленного прямолинейного ВСЭ диаметром 8 мм. Характерные топограммы поверхностей для верхней, средней, нижней частей рабочей зоны и под ней представлены на рис. 1.41. Полученные поверхности аппроксимировали полиномами вида (1.14):

$$\Delta Ra_{\text{отн}} = a_{00} + a_{01}\beta + a_{02}\beta^2 + a_{03}\beta^3 + a_{10}\rho + a_{11}\rho\beta + a_{12}\rho\beta^2 + a_{13}\rho\beta^3 + a_{20}\rho^2 + a_{21}\rho^2\beta + a_{22}\rho^2\beta^2 + a_{23}\rho^2\beta^3 + a_{30}\rho^3 + a_{31}\rho^3\beta + a_{32}\rho^3\beta^2 \quad (1.14)$$

где a_{ij} – коэффициенты аппроксимации (табл. 1.10).

Таблица 1.10

Значения коэффициентов аппроксимации a_{ij}

Коэффициенты аппроксимации	Верхняя часть рабочего зазора, 0 – 10 мм	Средняя часть рабочего зазора, 10 – 20 мм	Нижняя часть рабочего зазора, 20 – 30 мм	Под зазором, 30 – 40 мм
a_{00}	-7,727	-1,288	3,357	0,296
a_{01}	0,259	-0,094	-0,251	-0,145
a_{02}	-0,005	-17,37	$1,144 \cdot 10^{-4}$	-25,97
a_{03}	$5,803 \cdot 10^{-5}$	$6,060 \cdot 10^{-5}$	$6,671 \cdot 10^{-5}$	$8,308 \cdot 10^{-5}$
a_{10}	0,457	$7,847 \cdot 10^{-2}$	-0,178	-44,41
a_{11}	-0,009	$1,231 \cdot 10^{-2}$	$2,053 \cdot 10^{-2}$	$1,499 \cdot 10^{-2}$
a_{12}	$1,464 \cdot 10^{-4}$	-92,17	-21,49	-73,95
a_{13}	-29,26	-30,34	-33,47	-38,83
a_{20}	-0,008	-67,98	$3,977 \cdot 10^{-3}$	$6,552 \cdot 10^{-4}$
a_{21}	$6,123 \cdot 10^{-5}$	-41,72	-56,19	-46,38
a_{22}	$1,874 \cdot 10^{-7}$	$5,170 \cdot 10^{-6}$	$6,965 \cdot 10^{-6}$	$5,476 \cdot 10^{-6}$
a_{23}	$2,378 \cdot 10^{-8}$	$2,381 \cdot 10^{-8}$	$2,739 \cdot 10^{-8}$	$3,093 \cdot 10^{-8}$
a_{30}	$4,5 \cdot 10^{-5}$	-38,66	-35,33	-91,09
a_{31}	$3,805 \cdot 10^{-7}$	$3,278 \cdot 10^{-6}$	$4,130 \cdot 10^{-6}$	$3,491 \cdot 10^{-6}$
a_{32}	-29,65	-63,01	-75,71	-67,55

По полученным функциям рассчитывали диапазоны расположения максимальных значений критерия в каждой зоне, по которым была определена оптимальная форма восстанавливающего элемента. Применение таких элементов при MAO в режиме «стекания» длинномерных деталей приводят к активному переформированию МАИ по высоте рабочих зон, обеспечивает выравнивание его плотности и жесткости. В результате чего достигается равномерная обработка по длине обрабатываемых изделий.

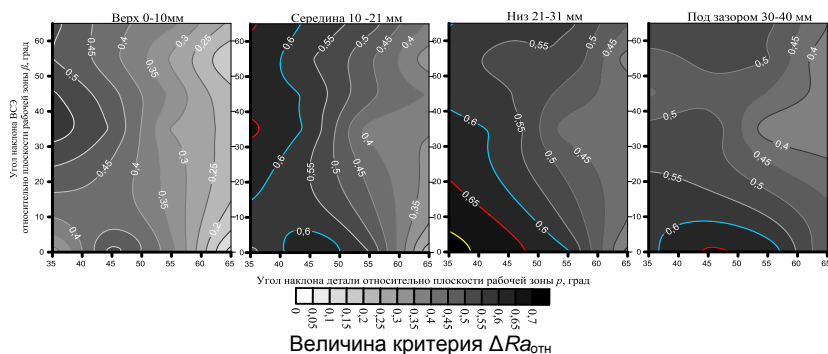


Рис. 1.41. Изменение критерия $\Delta Ra_{отн}$ в зависимости от углов ρ и β по высоте рабочей зоны при MAO деталей изготовленных из стали X18H10T

Внешний вид восстанавливающего элемента оптимальной формы, полученный по результатам расчетов, в пределах рабочей зоны кольцевого типа представлено на рис. 1.42.

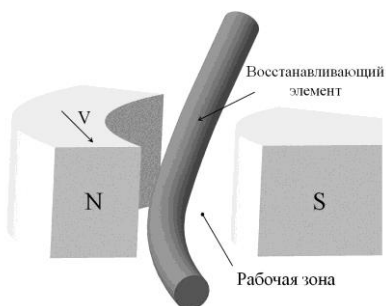


Рис. 1.42. Оптимальная форма элемента, который восстанавливает форму МАИ при MAO длинномерных деталей для условий обработки в режиме «стекания»

Для проверки эффективности использования элемента оптимальной формы проведены исследования полирующей способности МАИ на образцах, изготовленных из X18H10T.

Обработку выполняли в режиме «стекания» при углах базирования детали 35° и 45° , угол базирования ВСЭ 40° . Результаты изменения критерия $\Delta Ra_{отн}$ поверхности образцов представлены на рис. 1.43.

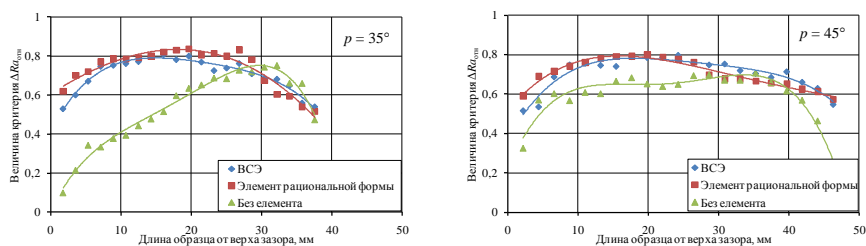


Рис. 1.43. Изменение критерия $\Delta Ra_{отн}$ образцов после MAO в режиме «стекания» при разных углах базирования деталей относительно плоскости рабочей зоны

Как показано на рис. 1.43 использования восстанавливающих элементов позволяет выполнять обработку в пределах рабочей зоны, в зоне, где формируется МАИ более плотный и жесткий.

По результатам выполненных исследований по обеспечению формирования МАИ со стабильными свойствами в течение всего технологического цикла MAO:

- определены условия MAO длинномерных деталей изготовленных как из диа-, так и с парамагнитных материалов на станках с кольцевым расположением рабочих зон за счет формирования МАИ со стабильными свойствами.

- показано, что коэффициент заполнения рабочей зоны МАП должен находиться в диапазоне $0,7 - 0,8$, что позволяет частично восстанавливать форму МАИ силами магнитно-динамического происхождения. При $Kz > 1$ – формируется малоподвижный МАИ с повышенной плотностью в областях концентрации магнитного потока, что приводит к неравномерной обработке в пределах рабочей зоны.

- установлено, что процесс MAO длинномерных деталей целесообразно выполнять при их наклонном расположении относительно плоскости рабочей зоны. Что позволяет частично решать проблему позонной обработки длинномерных деталей и формирования МАИ с прогнозируемыми свойствами по объему рабочей зоны.

- показано, что для обеспечения равномерной, контролируемой и продуктивной обработки по высоте рабочей зоны необходимо использовать дополнительные элементы в виде контртел, которые выполняют роль элементов, способствующих формированию заданных стабильных свойств МАИ, за счет принудительного

перемещения вытесненного порошка в зону активной обработки – в межполюсное пространство. Наиболее интенсивный и равномерный процесс полирования реализуется при углах базирования деталей $\rho = 35^\circ\text{--}45^\circ$ и ВСЭ $\beta = 35^\circ\text{--}55^\circ$.

- установлено, что диаметр ВСЭ должен быть в диапазоне 8 – 10 мм, для обеспечения восстановления формы МАИ в рабочей зоне станка кольцевого типа. Наличие магнитной вставки на ВСЭ, в зависимости от ее размеров и места расположения, позволяет выполнять прогнозирование эффективности обработки в соответствующей части рабочей зоны. Установлено оптимальную форму восстанавливающих элементов, которые эффективно использовать при МАО в режиме «стекания» для обеспечения восстановления формы МАИ в рабочей зоне станка кольцевого типа. Подтверждение полученных результатов требует проведения дополнительного исследования полирующе-упрочняющей способности МАИ при обработке деталей в больших рабочих зазорах.

1.8.4 Особенности изменения полирующе-упрочняющей способности МАИ при МАО в большом рабочем зазоре кольцевого типа

Исследования полирующе-упрочняющей способности МАИ, формирующегося при МАО были выполнены на цилиндрических образцах из быстрорежущей стали Р5М5, прошедших полный цикл термического упрочнения (закалка + отпуск). Диаметр образцов составлял 16 мм. Предварительно каждый образец был подвергнут тонкой токарной обработке с применением резцов из сверхтвердых материалов и разделен на 12 зон, в которых, впоследствии, выполняли измерения параметра Ra и поверхностной твердости HV . Магнитно-абразивную обработку выполняли на установке типа кольцевая ванна с шириной рабочих зазоров 35 мм (рис. 1.5). Образцы в процессе обработки располагали таким образом, чтобы продольная ось образцов была параллельна оси кольцевой ванны. Основное рабочее движение при МАО – вращение вокруг оси кольцевой ванны без вращения образцов вокруг собственной оси. При установке образцов в зоне обработки контролировали и фиксировали углы расположения указанных зон на поверхности по отношению к вектору V главного движения (рис. 1.44).

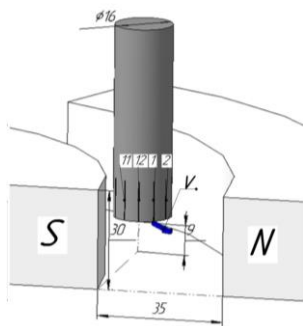


Рис. 1.44. Схема расположения образцов с контрольными зонами в магнитной рабочей зоне

Для формирования МАИ была выбрана гамма порошковых материалов, полученных методом распыления из расплавов с возможным последующим размолотом и классификацией, отличающихся размерами, формой и физико-механическими свойствами частиц [81, 98, 114]:

- равноосные осколочные порошки Полимам-Т с размером частиц 630/400 мкм и коэффициентом неравноосности $k_f = 1,51$ и 200/100 мкм с величиной $k_f = 1,59$;
- неравноосные осколочные порошки типа ДЧК, СП-17 с размером частиц 1000/630 мкм и $k_f = 2,2 - 3,1$;
- неравноосные округлые порошки типа Царамам с размером частиц 630/400 мкм $k_f = 1,9$;
- равноосные округлые порошки типа ПР Р6М5 200/100 мкм и S330 зернистостью 1000/630 мкм с величиной $k_f = 1 - 1,05$.

При выборе используемой гаммы порошковых материалов учитывали тот факт, что интегральная твердость частиц порошков ДЧК, Царамам, ПР Р6М5, S330 меньше твердости быстрорежущей стали в 1,2 – 1,8 раза, а для порошка Полимам-Т твердость абразивных фаз находится на уровне 27 – 29 ГПа, что в 2 – 2,5 раза превышает твердость быстрорежущей стали. Выбор формы и размеров частиц порошков для проведения модельных исследований был сделан на основании анализа условий возможного контактного взаимодействия элементов МАО с обрабатываемой поверхностью [43, 69, 120]. Предполагалось, что крупный округлый порошок обеспечит преимущественное упрочнение поверхностного слоя путем его пластического деформирования с отдельными актами истирания микронеровностей, в то время как осколочные частицы, имеющие малый радиус округления режущих кромок [118, 119], позволят сформировать МАИ с повышенной абразивно-полирующей способностью, обеспечивающей одновременно как микрорезание, так и упрочнение поверхности и поверхностного слоя за счет ударно-

фрикционного взаимодействия отдельных объемов МАИ с поверхностью образцов.

МАО выполняли в течение 60 с при скорости перемещения образцов вдоль кольцевой ванны $V = 3,5$ м/с, величине магнитной индукции в рабочем зазоре не заполненном МАП 0,25 Тл. Обработку выполняли как с дополнительным восстанавливающим и стабилизирующим форму и свойства МАИ стержневым элементом [119], так и без него. При обработке исследуемые образцы располагались в межполюсном рабочем пространстве станка таким образом, чтобы в первой зоне (соответствует 0° на последующих зависимостях) величина нормальной составляющей скорости относительного перемещения объемов МАИ и поверхности образца в данной зоне была максимальной (лобовая зона), а в зонах, расположенных под углами 90° и 270° по отношению к направлению движения – была максимальна тангенциальная составляющая. То есть в лобовой зоне должны формироваться условия, обеспечивающие максимальное ударное взаимодействие, способствующее наклепу поверхностного слоя, а на участках поверхности расположенных под углами близкими к 90° и 270° – условия для реализации микрорезания и истирания поверхностных микронеровностей. Характер изменения нормальной V_n и тангенциальной V_τ составляющих скорости относительного перемещения отдельных участков образцов при их движении к кольцевой ванне представлен на рис. 1.45 и может быть рассчитан по зависимостям:

$$\begin{aligned} V_n &= V \cdot \cos \alpha, \\ V_\tau &= V \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (1.15)$$

где α – угол размещения контрольных зон на образце относительно вектора главного движения – перемещение вдоль кольцевой ванны.

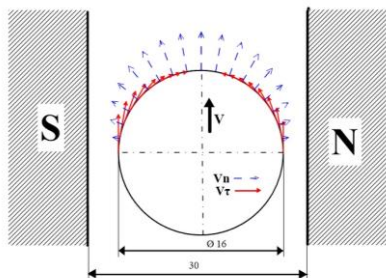


Рис. 1.45. Изменение нормальной и тангенциальной составляющих скорости относительного перемещения отдельных участков образцов в процессе МАО

Выполненные исследования изменения поверхностной твердости $\Delta HV = HV_{MAO} - HV_{исх.}$ и шероховатости поверхности $\Delta Ra = Ra_{MAO} - Ra_{исх.}$ по внешней цилиндрической поверхности на различных участках, показанных на рис. 1.44. После статистической обработки результатов измерений, полученные результаты представлены на рис. 1.46 и рис. 1.47 в виде круговых диаграмм.

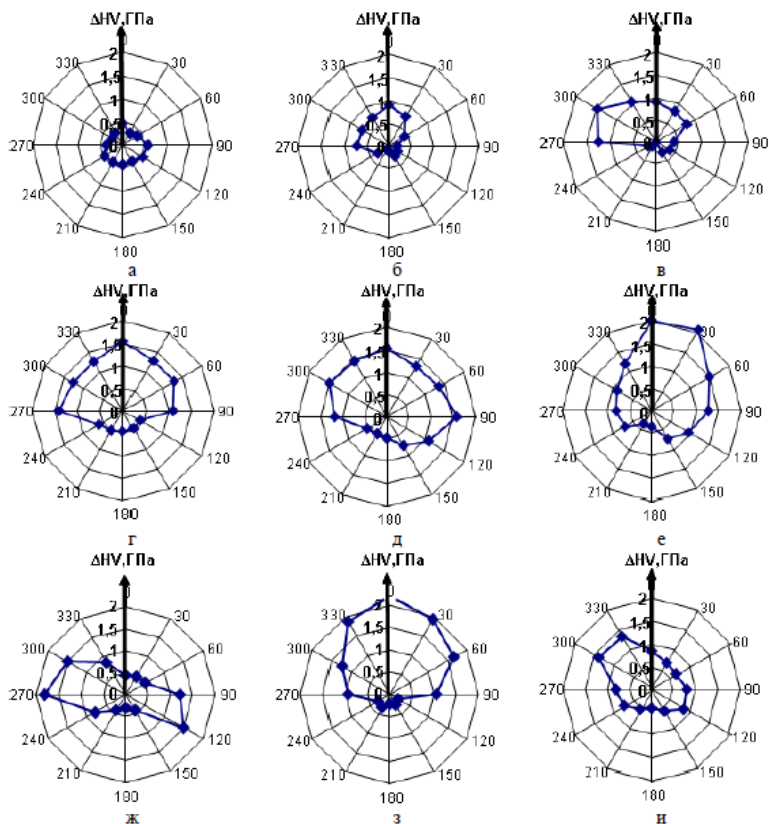


Рис. 1.46. Изменение поверхностной твердости образцов в различных зонах по внешней цилиндрической поверхности после MAO порошками:
а – Полиам-Т 630/400 мкм; б – Полиам-Т 200/100 мкм;
в – ПР Р6М5 200/100 мкм; г, ж – ДЧК 1000/630 мкм;
д, з – S330 1000/630 мкм; е, и – Церамам 630/400 мкм, с использованием
восстанавливающего стержневого элемента – а, б, в, г, д, е
и без использования восстанавливающего стержневого элемента – ж, з, и

Анализ полученных результатов показал, что улучшение шероховатости поверхности образцов после МАО, связано с процессами микрорезания, имеет место преимущественно при использовании осколочных порошков с более высокой твердостью абразивных элементов в их составе – Полимам-Т (рис. 1.47 а, б, ж) в зонах действия повышенной составляющей тангенциальной скорости относительного движения обрабатываемых поверхностей – V_r (рис. 1.45).

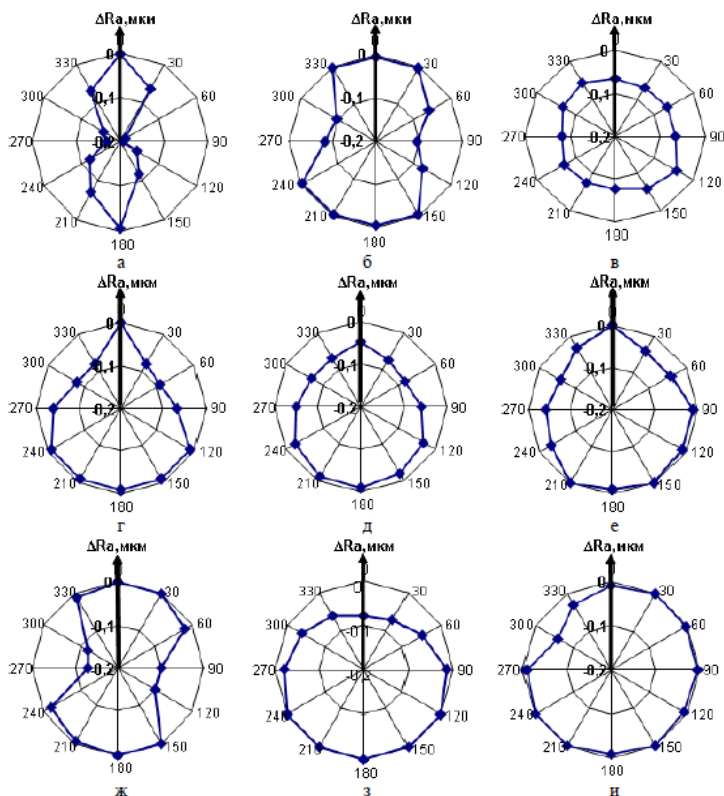


Рис. 1.47. Изменение шероховатости образцов в различных зонах по внешней цилиндрической поверхности после МАО порошками:
а – Полимам-Т 630/400 мкм; б – Полимам-Т 200/100 мкм;
в – ПР Р6М5 200/100 мкм; г, ж – ДЧК 1000/630 мкм; д,
з – S330 1000/630 мкм; е, и – Царамам 630/400 мкм, с использованием
восстанавливающего стержневого элемента – а, б, в, г, д, е
и без использования восстанавливающего стержневого элемента – ж, з, и

При использовании для формирования МАИ порошковых материалов с округлой формой частиц незначительное уменьшение параметра Ra связано с пластической деформацией выступов микронеровностей. Это подтверждается полученными результатами по росту поверхностной твердости образцов (рис. 1.46). При этом рост твердости в измеряемых зонах наиболее характерен для тех зон, в которых имеет место наибольшие микроудары частиц МАИ об обработанную поверхность, т.е. в тех зонах, где действует повышенное значение величины V_n . Важную роль при этом играет и величина округления режущих кромок частиц магнитно-абразивных порошков [118], величина пятна контакта отдельных частиц с обрабатываемой поверхностью [81]. Следует отметить наличие низкой упрочняющей способности при использовании порошков типа Полимам-Т. Подобный эффект, по-видимому, связан с тем фактом, что упрочненный в процессе МАО слой материала образцов диспергируется в процессе микрорезания.

Обеспечение повышенного упрочняющего действия в отдельных зонах поверхности образцов при использовании округлых порошковых материалов, применяемых в данных исследованиях, не ограничивается только действием повышенных нормальных составляющих скорости относительного перемещения $-V_n$, а и связано с силами давления, определяемых массой частиц и их макроформирований в составе МАИ [81]. Это подтверждается существенным ростом поверхностной твердости при использовании МАИ, сформированного из округлых порошков с размером частиц большим 400 мкм (рис. 1.46 д, е, з) по сравнению с порошком ПР Р6М5 200/100 мкм (рис. 1.46 в).

Результаты по изменению величин ΔRa и ΔHV , полученные на образцах, обработанных в идентичных условиях, но с использованием восстанавливающего стержневого элемента (ВСЭ) и без него подтвердили результаты работ, приведенных в [119]. Показано, что обработка без ВСЭ менее эффективна, что связано с тем фактом, что в отсутствие ВСЭ деталь на начальной стадии процесса МАО переформирует МАИ путем частичного вытеснения порошка из зон обработки, особенно зон, находящихся в средней части (по высоте) рабочих зазоров – области с пониженной магнитной индукцией, в зоны где магнитная индукция имеет более высокие значения – верхний и нижний край магнитных зазоров [119] и его вытеснения за пределы межполюсного пространства. Подтверждением этого является форма круговых диаграмм представленных на рис. 1.46 г – и, и рис 1.47. г – и. При этом следует отметить наличие особой формы диаграммы упрочнения образца после МАО осколочным крупнозернистым порошком ДЧК 1000/630 мкм без использования ВСЭ.

Если при использовании МАИ с крупных округлых порошков максимум по величине ΔHV расположен в зоне действия повышенных значений V_n , то при обработке порошком ДЧК он смещен в зону действия повышенных значений V_r . Это связано с тем, что в зоне с повышенной магнитной индукцией [81, 98, 114, 119] – в непосредственной близости возле поверхности полюсных наконечников активно проявляется эффект заклинивания, связанный также и с повышенным коэффициентом внутреннего трения в порошке ДЧК [81], в то время как у МАИ из округлых порошков он существенно ниже, т.е. МАИ более подвижный, легче переформировывается, обтекает обрабатываемую поверхность и не способен пакетироваться в пространстве между поверхностями деталей и полюсных наконечников. Необходимо учитывать и специфику структурирования МАИ [81, 119], которая проявляется в формировании в процессе МАО особой структуры, состоящей из конусовидных столбиков, расположенных своими основаниями на поверхности полюсных наконечников и веретенообразных формирований, объединяющих эти столбики. Учитывая, что ДЧК и Царамам – неравноосные порошки, то длина структурных формирований в МАИ из указанных порошков в 1,3 – 1,5 раза больше, чем у равноосных [81]. Кроме этого у указанных формирований значительно выше способность к растяжению без их деструкции. Равноосные порошки, особенно округлые, в процессе МАО менее склонны к устойчивому структурированию и тем самым формируют более подвижный МАИ с повышенной способностью к восстановлению рабочей формы, нивелированию относительно обрабатываемой поверхности, что позволяет проведения частичной обработки теневых зон [33, 114, 119, 120]. Использование таких порошков как Царамам, S330 для формирования МАИ из смесей порошков [66] должно обеспечить повышение упрочняющего действия процесса МАО. Подтверждение этому приведено в работах [30, 80, 81]. Для обеспечения полирующего действия МАИ его формирование целесообразно выполнять из осколочных порошков типа Ферромап или смесей, содержащих в своем составе мелкую высокотвердую составляющую, как при МАО твердых сплавов [33, 114, 152].

Результаты проведенных исследований показали, что наибольшая упрочняющая способность характерна при использовании в процессе МАО крупных округлых порошков, а полирующая – при использовании осколочных. Для подтверждения полученных результатов в условиях максимально близких к условиям обработки осевого быстрорежущего инструмента была проведена дополнительная серия экспериментов. Дополнительно

обеспечивалось вращения образцов вокруг собственной оси с частотой вращения 950 – 1000 об/мин. При этом скорость перемещения вдоль кольцевой ванны составляла 0,5 и 3,5 м/с. МАО выполняли порошками Полимам-Т 630/400 мкм и S330 1000/630 мкм. Величина магнитной индукции в рабочем зазоре была аналогичной предыдущей серии экспериментов – 0,25 Тл, время обработки – 1 минута. После обработки порошком Полимам-Т было получено улучшение параметра R_a на 40 %. Изменение скорости вращения образцов вокруг собственной оси не оказало влияния на степень наклепа поверхностного слоя образцов, которая составила 0,11. После обработки крупным округлым порошком S 330 шероховатость поверхности улучшилась на 20 – 23 %. При этом степень наклепа поверхностного слоя образцов после МАО со скоростью перемещения вдоль кольцевой ванны 3,5 м/с была практически в 2 раза выше, чем при скорости – 0,5 м/с и составила величину 0,21 против 0,12.

Подтверждение полученных результатов требует их проверки при МАО реального режущего инструмента на опытно-промышленном оборудовании.

Раздел 2

МАО КОНЦЕВОГО И ОСЕВОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА МАГНИТНО-АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ СО СТАБИЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ КОЛЬЦЕВОГО ТИПА

Эффективность МАО в значительной степени определяется соотношением двух факторов взаимно влияющих друг на друга: скоростью перемещения частиц порошкового МАИ относительно обрабатываемой поверхности и давлением МАИ на поверхность деталей. Причем, во время МАО, указанные факторы должны быть близки по величине для каждого отдельного участка поверхности.

Увеличение сил магнитного поля в рабочей зоне магнитного зазора обеспечивает формирование МАИ повышенной жесткости, что приводит к росту давления со стороны отдельных объемов МАИ на поверхность деталей. Однако при этом снижается способность инструмента нивелировать относительно обрабатываемой поверхности, то есть осуществлять равномерное силовое воздействие на каждый элементарный участок детали, особенно в случаях деталей сложной пространственной формы.

Увеличение скорости перемещения деталей относительно магнитно-абразивного порошка, фиксированного магнитным полем, обеспечивает рост динамической составляющей со стороны МАИ на обрабатываемую поверхность. Это, в свою очередь, приводит к активному переформированию МАИ и образованию в нем уплотненных зон. Максимальная фиксация МАИ в рабочих зонах реализуется при обработке деталей простой формы – тела вращения, плоскости, когда можно использовать магнитные зазоры малой ширины, создавая в них достаточно «большие» магнитные поля. Обработка деталей сложной пространственной формы, представителями которых являются осевой режущий инструмент, как правило, реализуется в магнитных зазорах большой ширины, в которых достижение больших значений магнитной индукции связано с техническими трудностями и значительными энергетическими затратами. В процессе МАО деталей с продольными или винтовыми пазами происходит заполнение объема последних ферроабразивным порошком, который, прижимаясь к поверхности пазов (особенно деталей из ферромагнитных материалов), создает теневые зоны, оставаясь при обработке в мало подвижном состоянии. Таким образом, в области пазов не выполняется одно из условий МАО – наличие достаточной скорости относительного перемещения

абразива по обрабатываемой поверхности. В результате процесс MAO осуществляется с существенной неравномерностью.

Известные способы MAO деталей типа сверл, разверток, метчиков, концевых фрез, которые реализуются на станках типа кольцевая ванная и включают вращение деталей вокруг собственной оси, оси кольцевой ванны и колебания вдоль оси деталей. Предложенные способы и устройства для их реализации [3, 136, 139, 157] не обеспечивают эффективной и равномерной обработки всех рабочих поверхностей, в особенности, поверхности стружечных канавок. При реализации подобных способов MAO не учитываются реологические характеристики МАИ, такие как характеристики внутреннего трения в порошковой среде, удерживаемой в рабочем состоянии силами магнитного поля. Именно силы трения в МАИ при MAO, особенно между слоями порошкового инструмента, являются причиной образования уплотненных зон в рабочих зазорах, теневых зон и зон заклинивания. В отдельных случаях подобные зоны могут играть положительную роль, и приводить к интенсификации процесса MAO, реализуемой при обработке деталей простых форм в малых рабочих зазорах. Отметим, что при решении задачи равномерной обработки осевого инструмента, формирование зон заклинивания, и как следствие теневых зон является нежелательным.

Было ранее показано, что при MAO деталей на станках с кольцевым расположением рабочей зоны, деталь перемещается в среде МАИ, формирует перед собой уплотненную зону из частиц ферроабразивного порошка, которая представляет собой веерообразные формирования. Образование такой уплотненной зоны, ее размеры и поведение в процессе MAO обусловлены, прежде всего:

- магнитно-реологическими свойствами магнитно-абразивных порошков, а именно геометрическими размерами и формой частиц, коэффициентами трения в парах порошок – порошок и порошок – обрабатываемая деталь, углом трения в МАИ, магнитными свойствами;

- геометрическими размерами и формой рабочих зон магнитных зазоров;

- особенностями перемещения обрабатываемых деталей в процессе MAO [85, 123].

Реализация «динамического» давления МАИ на поверхность деталей, которое определяется исключительно скоростью перемещения деталей и их траекторией в рабочих зонах магнитных зазоров, ограничено магнитно-реологическими характеристиками инструмента, когда для относительного перемещения его частиц по

поверхности необходимо соблюдение условий устойчивого взаимодействия порций порошка, находящихся в области канавок, с основным объемом МАИ. То есть необходимо создание условий достижения критических сдвиговых напряжений в массе сформированного инструмента [125].

Обеспечить необходимую относительную скорость движения частиц МАИ по обрабатываемым поверхностям деталей, особенно поверхности канавок, возможно в том случае, когда угол между касательной к поверхности канавок и вектором движения обрабатываемых поверхностей в процессе MAO будет меньше, или, в крайнем случае, равен углу трения в паре МАИ – поверхность детали. Реализовать это можно путем наклона поверхностей деталей по отношению к направлению основного движения. При этом не нужно использовать высокие значения магнитной индукции в рабочих зонах, поскольку будет реализовываться «динамическое» давление МАИ на поверхность за счет скорости движения деталей в среде магнитно-абразивного порошка.

Предыдущие исследования показали, что для достижения высокой эффективности при MAO длинномерных деталей, представителями которых являются концевой и осевой режущий инструмент целесообразно их располагать в рабочих зонах под определенными углами по отношению к вектору основного движения – перемещение вдоль оси кольцевой ванны. При этом обработку выполнять как в режиме «натекания», так и «стекания» МАИ с рабочих поверхностей, как показано на рис. 1.6 на примере MAO сверл.

Определение возможностей MAO осевого режущего инструмента выполняли на разработанной технологической наладке (рис. 1.5) к универсальной магнитно-абразивной установке типа кольцевая ванна.

2.1 Магнитно-абразивная обработка разверток на установке типа кольцевая ванна

Для определения влияния времени MAO на эффективность процесса обработки исследовали динамику изменения шероховатости передних и задних поверхностей разверток из быстрорежущей стали с одинаковой исходной шероховатостью $Ra = 0,4 - 0,41$ мкм на передней поверхности и $Ra = 0,5 - 0,52$ мкм на задней. Контролировали величину Ra в зависимости от времени MAO не менее чем на 5 развертках по передним и задним поверхностям. Погрешность измерений не превышала $0,02 - 0,04$ мкм. Обработку выполняли порошком Полимам-Т с размером частиц 200/160 мкм. Результаты исследований приведены на рис. 2.1 при вращении инструмента в режиме «натекания» и на рис. 2.2 при вращении разверток в режиме «стекания» МАИ с рабочих поверхностей.

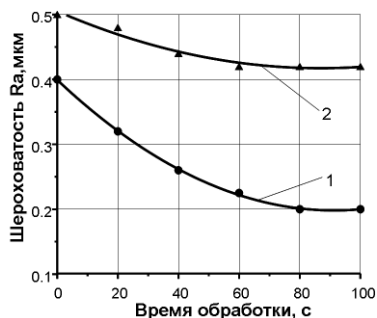


Рис. 2.1. Изменение шероховатости поверхностей разверток в зависимости от времени MAO в режиме «стекания»:

- 1 – шероховатость передней поверхности;
- 2 – шероховатость задней поверхности

На рис. 2.1 показано, что для MAO передней поверхности разверток и поверхности канавок достаточно 80 с обработки. Причем, при движения разверток по направлению к хвостовику (в режиме «стекания») обработки задних поверхностей практически не происходит. А при вращении инструмента вокруг оси кольцевой ванны по направлению к главным режущим кромкам – в режиме «натекания» для получения минимальной шероховатости поверхностей достаточно 30 – 40 с обработки (рис. 2.2).

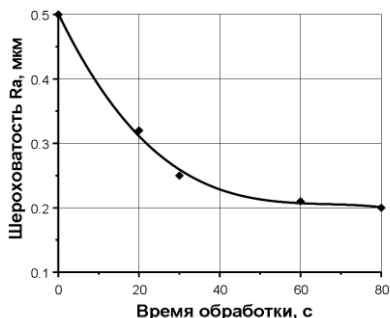


Рис. 2.2. Изменение шероховатости на задней поверхности разверток в зависимости от времени MAO в режиме «натекания»

Процесс магнитно-абразивной обработки в условиях кольцевой ванны с большим рабочим зазором заключается в одновременном действии на поверхность обрабатываемой детали, непосредственно сил магнитного поля, сил и процессов, реализующихся при взаимодействии поверхности с порошковым магнитно-абразивным инструментом – микрорезания, микроударов частиц, пластической деформации поверхностного слоя деталей. Сложное сочетание от действия различных факторов позволяет достигать определенного упрочняющего эффекта [3, 5, 40, 41, 42, 97, 107, 134].

В работе [3] показано, что в приповерхностном слое инструмента из стали Р6М5 после МАО формируются остаточные напряжения сжатия на глубине 0,5 – 1 мкм и достигают 600 – 1200 МПа в зависимости от скорости вращения и значений магнитной индукции, и не зависят от времени обработки, начиная с продолжительности МАО 30 с. Это позволяет говорить о том, что слой металла, сформированный при предварительной обработке удаляется за время меньше, чем 30 с. Дальнейшая МАО (при времени обработки более 30 с) приводит к пластической деформации поверхности зернами магнитно-абразивного порошка и по мере удаления материала создается поверхностный слой с напряжениями, которые сформированы определенными условиями МАО. Надо отметить, что независимо от знака остаточных напряжений в поверхностном слое деталей до МАО, после МАО формируются исключительно отрицательные остаточные напряжения.

Переменными параметрами при определении влияния МАО на состояние поверхностного слоя разверток изготовленных из стали Р6М5 были скорость вращения вокруг оси кольцевой ванны, время обработки и размер частиц магнитно-абразивного порошка.

Проведенный микроструктурный анализ обработанных разверток показал, что в структуре поверхностного слоя после МАО практически не наблюдается значительных первичных карбидов, а мелкодисперсные карбиды располагаются более равномерно (рис. 2.3).

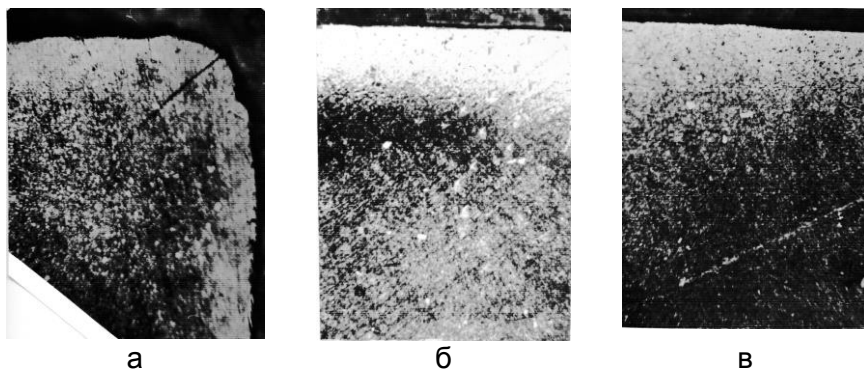


Рис. 2.3. Микроструктура упрочненного слоя после МАО:

а – скорость обработки 3,5 м/с, порошок с размером частиц 200/100 мкм, время обработки 80 с; б – скорость обработки 5,0 м/с, порошок – 630/400 мкм, время обработки 80 с; в – скорость обработки 2,0 м/с, порошок – 200/100 мкм, время обработки 40 с

Отмечены автором [3] уменьшения количества остаточного аустенита в закаленной стали Р6М5 в результате МАО, в данном случае (при обработке готового инструмента – разверток) не может играть важную роль, так как обработке подвергались образцы, прошедшие полный цикл термообработки: закалка с 1220°C и трехкратный отпуск при 560°C. Остаточный аустенит в исходной стали составлял не более 2% и ни микроструктурным, ни рентгенографическим анализом не определялся. Поэтому на основании данных, приведенных в [3] можно считать, что в поверхностной зоне и это минимальное количество остаточного аустенита доведена до нуля.

Микроструктурный анализ показал, что поверхностная зона обработанных разверток из стали Р6М5 имеет пониженную травимость. Это объясняется напряженным состоянием поверхностной зоны – главным образом созданием в ней напряжений сжатия и повышением количества тонкокодисперсных карбидов. Скорость вращения деталей в кольцевой ванне меняли от 200 об/мин до 500 об/мин. Это соответствовало линейной скорости МАО от 2 м/с до 5 м/с. Установлено, что увеличение скорости вращения при прочих равных условиях, приводит к росту толщины упрочненного поверхностного слоя (рис. 2.4).

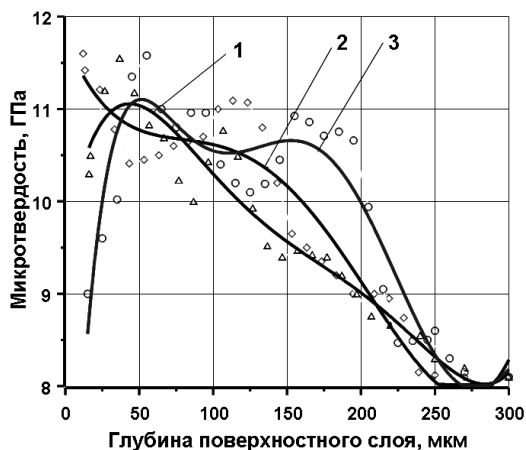


Рис. 2.4. Влияние скорости МАО на глубину и микротвердость упрочненного слоя при времени обработки 80 с, магнитной индукции 0,21 Тл, размере частиц порошка 200/100 мкм и скорости МАО: кривая 1 – 2,0 м/с, кривая 2 – 3,5 м/с, кривая 3 – 5,0 м/с

В отдельных случаях в поверхностном слое разверток после МАО оказывалась, зона с пониженной микротвердостью. Расположена эта зона на расстоянии 10 – 25 мкм от поверхности в зависимости от скорости обработки. Микроструктурных и

рентгенографических изменений в этой зоне не замечено. Это объясняется особенностями выхода на поверхность дефектов материала в процессе пластического деформирования тонкого поверхностного слоя при обработке и некоторым оттеснением мелкодисперсных карбидов вглубь материала, а также похожими явлениями, которые возникают при фрикционном взаимодействии – формировании особой подслоной зоны на расстоянии 1 – 3 мкм от поверхности с повышенной плотностью дислокаций [45].

Наиболее существенно такое снижение проявляется при повышенных скоростях обработки. Однако, надо подчеркнуть, что даже эта зона с относительно низкой микротвердостью все же имеет микротвердость на 1,5 – 2,0 ГПа выше исходной. В этом случае, достаточно большое значение имеет явление наклепа в результате микроударов и пластической деформации частицами магнитно-абразивного материала, который вызывает искажения решетки структурных составляющих, повышение концентрации дислокаций, измельчение хрупких фаз [51, 107].

На отдельных кривых микротвердости обнаружено подслоный максимум. Наибольшая микротвердость во всех случаях составляла 11,4 – 11,6 ГПа. Глубина расположения максимума почти одинакова для обработки со скоростью 2 – 4 м/с (10 – 25 мкм), и растет до 50 – 70 мкм при скорости, превышающей 4,5 м/с. Наличие пика связано с ударным воздействием частиц порошкового инструмента с поверхностью. Подобное действие частиц МАИ идентично действию микрошариков или частиц абразива при струйных видах обработки [99].

Дальнейшее изменение микротвердости по толщине упрочненного слоя происходит в соответствии с убывающей синусоидой, с образованием максимумов и минимумов. Причем, скорость увеличения или уменьшения твердости возрастает с увеличением скорости обработки. Так, если для скорости обработки до 3 м/с разница между минимальным значением микротвердости и следующим за ним максимумом составляет не более 0,3 – 0,5 ГПа, то для больших скоростей эта разница будет 1,0 – 1,5 ГПа. Такое распределение микротвердости никак не соответствует любым изменениям структуры или фазового состава быстрорежущей стали и ее нельзя отнести к погрешности измерений, которая в нашем случае не превышала 0,25 ГПа. Можно предположить, что такой характер изменения микротвердости формируется за счет одновременного действия магнитного поля и образования нескольких слоев с разными знаками напряжений и концентрацией дислокаций. Толщина упрочненной поверхностной зоны во всех случаях была на уровне 200 – 230 мкм.

Влияние размера частиц магнитно-абразивного порошка при различных скоростях МАО на распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя приведено на рис. 2.5.

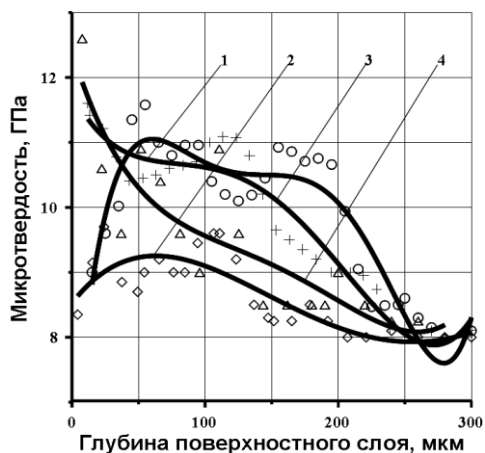


Рис. 2.5. Влияние размера частиц МАП на глубину и микротвердость упрочненного слоя при времени МАО 80 с, магнитной индукции 0,21 Тл, размере частиц порошка 200/100 мкм и скорости МАО:
 кривая 1 – 3,5 м/с,
 кривая 3 – 5 м/с;
 размере частиц порошка 630/400 мкм:
 кривая 2 – 3,5 м/с,
 кривая 4 – 5,0 м/с

Установлено, что обработка порошком с размером частиц 630/400 мкм приводит к снижению микротвердости по всей толщине поверхностного слоя и к ухудшению шероховатости обработанной поверхности по сравнению с обработкой фракцией 200/100 мкм. При больших скоростях во время обработки крупной фракцией подслоный минимум микротвердости отсутствует. По всему слою микротвердость приходит плавно. Это связано с тем, что в немономонном изменении (формировании максимумов и минимумов) микротвердости при МАО особую роль играют слои, в которых скапливается большое количество малоподвижных дислокаций. При увеличенных скоростях обработки и использовании крупного порошка сила удара частиц сдвигает эти дислокации и они распределяются более равномерно. Этим же можно объяснить и увеличение толщины упрочненной зоны почти на 50 мкм. Но в этом случае ухудшается шероховатость поверхности, а также имеет место некоторое изменение геометрии инструмента – существенное закругление и притупление главной режущей кромки.

Отметим, что закругление главной режущей кромки не всегда является нежелательным результатом. Острые кромки используют при обработке достаточно вязких материалов, таких как отожженные стали, сплавы титана, меди, алюминия, специальных сплавов. А для обработки твердых и хрупких материалов (например, чугунов) заточка инструмента предусматривает некоторое притупление режущих кромок и удаления с них вырывов, царапин, которые являются концентраторами напряжений и могут стать причиной разрушения инструмента при его эксплуатации. Таким образом, обработку с

использованием крупных фракций магнитно-абразивного порошка при больших скоростях можно рекомендовать именно для такого инструмента.

Характер влияния времени обработки на характеристики упрочненного слоя приведены на рис. 2.6. Наилучшие показатели по микротвердости поверхностного слоя разверток обеспечиваются в первые 40 с обработки. Именно за этот промежуток времени формируется минимальная шероховатость поверхности и происходит первичное упрочнение поверхностного слоя. Дальнейшее увеличение времени обработки приводит к уменьшению глубины слоя с повышенной микротвердостью и ее величины.

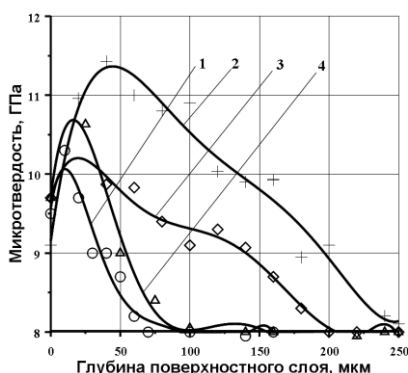


Рис. 2.6. Влияние времени MAO на глубину и микротвердость упрочненного слоя при скорости обработки 2 м/с, индукции 0,21 Тл, размере частиц МАП 200/100 мкм для времени: кривая 1 – 20 с, кривая 2 – 40 с, кривая 3 – 80 с, кривая 4 – 120 с

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что при условии получения минимальной шероховатости поверхности рабочих элементов разверток после MAO, сохранении геометрии и формировании поверхностного слоя с высокой твердостью лучшими на данном этапе исследований следует считать использование магнитно-абразивного порошка с размером частиц 200/100 мкм и скорости обработки 2 м/с в течение 40 – 60 с.

2.2 Магнитно-абразивная обработка сверл

Для обеспечения соответствующего качества РИ, особенно с учетом того, что процесс MAO происходит в объеме кольцевой ванны, необходимо определить вероятность искажения размеров сверл по их длине и каким образом возможно изменение их диаметров в различных сечениях. Особенно это важно с точки зрения обеспечения обратной конусности, наличие которой предотвращает заклинивание инструмента, особенно при сверлении глубоких отверстий.

Исследование изменения рабочих диаметров РИ проводили на сверлах из быстрорежущей стали диаметром 13 мм при МАО без использования ВСЭ порошком Полимам-Т зернистостью 200/100 мкм, угол $\rho = 50^\circ$, в различных вдоль оси сечениях – возле вершины сверла, на расстоянии 30 и 50 мм от вершины. Обработку выполняли в течении 10 мин поэтапно – продолжительность каждого этапа равна 60 с, как в режиме «натекания», так и «стекания» МАИ с обрабатываемых поверхностей.

Величину диаметров контролировали на универсальной измерительной установке Genius 3/Pilot с точностью 0,0005 мм. Установлено, что уменьшение диаметра в различных сечениях вдоль оси не превышает 0,01 мм. Причем для обработки в режиме «стекания» наибольшее уменьшение диаметра имеет место возле вершины, а в режиме «натекания» на расстоянии 30 – 50 мм от нее. Это связано с особенностями переформирования МАИ в процессе МАО. Так при МАО без использования ВСЭ происходит вытеснение массы порошка в верхнюю или нижнюю часть рабочей зоны в зависимости от режима обработки. При МАО в режиме «стекания» порошок вытесняется в нижнюю часть, а в режиме «натекания» соответственно в верхнюю. Именно в указанных зонах и происходит наиболее активный процесс МАО связанный с диспергированием материала с поверхности РИ. При использовании противоположно установленного ВСЭ (раздел 1.8.3) уменьшение диаметра сверл практически равномерное вдоль оси и не превышает 0,005 мм. Динамика уменьшения диаметров сверл в разных зонах по высоте в зависимости от времени МАО может быть представлена линейными функциями. Типичный вид зависимостей уменьшения диаметров от времени МАО приведены на рис. 2.7.

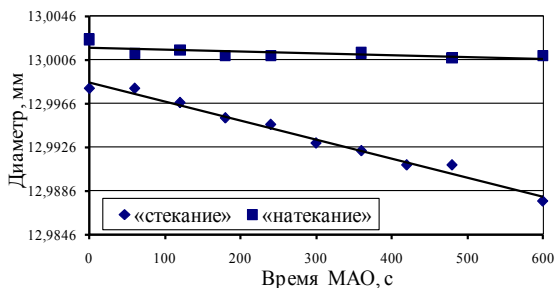


Рис. 2.7. Уменьшение диаметра сверл возле вершины в зависимости от времени МАО

Скорость уменьшения диаметра характеризуется углом наклона прямых, аппроксимированных по результатам не менее 10 экспериментальных измерений в каждом сечении. Значения скоростей изменения диаметров для различных режимов МАО («стекания», «натекания») в различных сечениях по длине сверл приведены в табл. 2.1.

Представленные расчетные результаты свидетельствуют о том, что наиболее рациональным при МАО без ВСЭ будет процесс, который воспроизводится в режиме «стекания». Контрольная обработка сверл диаметром 13 мм с использованием ВСЭ показала, что уменьшение диаметра не превышает $(1 - 5) \cdot 10^{-7}$ мм/с, и практически идентична по всей рабочей длине инструмента.

Таблица 2.1

Скорости изменения диаметра сверл при различных режимах МАО

Расстояние от вершины сверла, мм	Скорость изменения диаметров сверл, мм/с	
	«стекание»	«натекание»
0	$2 \cdot 10^{-5}$	$0,2 \cdot 10^{-5}$
30	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
50	$0,006 \cdot 10^{-5}$	$0,8 \cdot 10^{-5}$

Доказано, что МАО длинномерного РИ не вызывает критического изменения диаметров по их длине, что могло бы вызвать в процессе эксплуатации заклинивания или отклонения от допусков размеров обрабатываемых деталей.

Выполнен анализ не только изменения размеров диаметров сверл, а и размеров округления главной режущей кромки, диаметра округления места пересечения главной и вспомогательной кромок.

МАО сверл выполняли при переменных: скорости перемещения вдоль кольцевой ванны от 2 м/с до 5 м/с, размер частиц МАП – 200/100 мкм и 630/400 мкм. Общее время обработки при движении детали в режиме «натекания» – 120 с. Анализ изменения округления главной режущей кромки после МАО позволил установить, что возможно или увеличение радиуса округления главной режущей кромки – ее притупление или уменьшения радиуса округления. Подобный процесс возникает при реализации магнитно-динамических эффектов, связанных со скоростями обработки (до- и закритические) [76]. При скоростях обработки 3,5 м/с обеспечивается уменьшение радиуса округления главной режущей кромки независимо от размера частиц магнитно-абразивного порошка, который используется. Результаты исследований приведены на гистограмме (рис. 2.8). Показано, что чем мельче порошок, тем размер формируемого

радиуса меньше. Так порошок с размером частиц 200/160 мкм обеспечивает формирование радиусов округления с величиной 9,5 – 10 мкм, а с размером частиц 630/400 мкм – до 13 – 15 мкм при начальном размере радиуса 20 мкм.

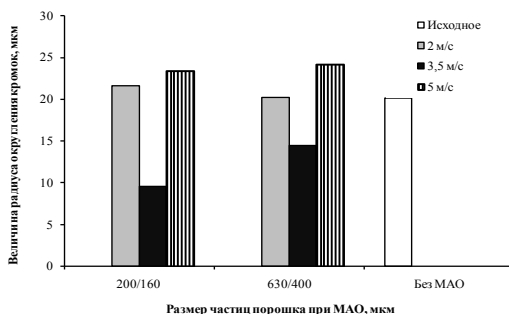


Рис. 2.8. Изменение радиуса округления главной режущей кромки сверл после MAO с разной скоростью обработки порошками с размером частиц 200/160 мкм и 630/400 мкм

При скорости 2 м/с размер радиуса округления главной режущей кромки практически не меняется, так как обработка происходит при докритических скоростях перемещения деталей в МАИ [76]. При этом главные кромки «прикрыты» уплотненными квазистабильными порциями порошка. Увеличение скорости MAO до 3 – 3,5 м/с приводит к разрушению уплотненных микрообъемов порошка.

Аналогичное поведение МАИ наблюдается и при скорости 5 м/с, а полученное некоторое увеличение радиуса округления главной режущей кромки объясняется тем, что в процессе обработки имеет место повышенный износ передней и задней поверхностей сверл, формирующих главную кромку. Если при скорости 3 м/с общая длина пути обработки (при обработке в режиме «натекания») составила 180 м, то при 5 м/с – 300 м, что в 1,7 раза больше.

При MAO с главной кромки удаляются все заусенцы и микроконцентраторы. Показательна величина отклонения от линейности линии главной кромки на микроуровне, что в 2 – 3 раза ниже в обработанных магнитно-абразивной методом сверл, чем в необработанных. Форма и профиль главной режущей кромки до и после MAO приведены на рис. 2.9.

Важно отметить и существенное снижение шероховатости поверхностей режущей части сверл после MAO до величины $Ra =$

0,18 – 0,2 мкм, при исходной шероховатости 0,35 – 0,4 мкм (рис. 2.10, 2.11). Измерение и запись профилограмм, формы кромок и их размеров выполнено на специализированном профилометре Form Talysurf 120 PC и устройстве VIDEO-CHECK IP 2003DMAN фирмы Werth Meßtechnik GmbH. Минимальная шероховатость рабочих поверхностей инструмента формируется при MAO порошком с размером частиц 200/100 мкм при скорости обработки 2 – 3 м/с.

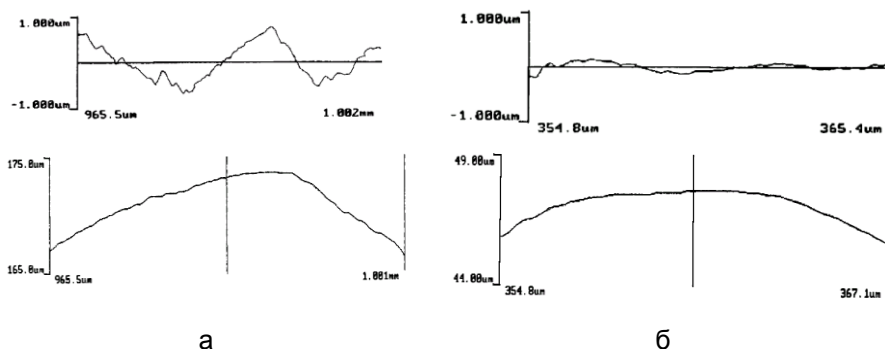


Рис.2.9. Профиль и форма главной режущей кромки: а – до MAO; б – после MAO

Величина опорной длины профиля t_p (50) составляет не менее 70% при исходной t_p (50) = 40 – 45%. Отсутствует регулярный микрорельеф поверхности, присущий для поверхностей, прошедших операцию шлифования.

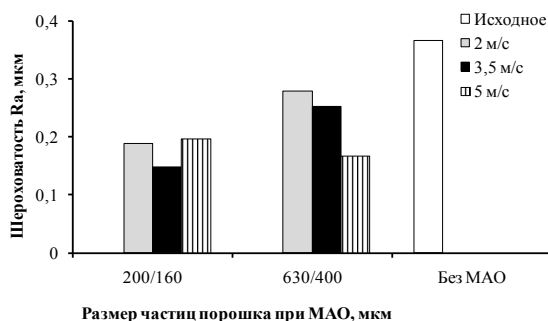


Рис. 2.10 Изменение шероховатости поверхностей сверл после MAO порошками с разным размером частиц и разной скорости обработки

В связи с тем, что процесс съема материала при MAO осуществляется путем микрорезания и истирания поверхности, то возможно притупление места пересечения главной и вспомогательной кромок сверл. Измерения диаметра округления, выполнено со стороны задней и передней режущих поверхностей сверл показали, что при MAO происходит его некоторое притупление.

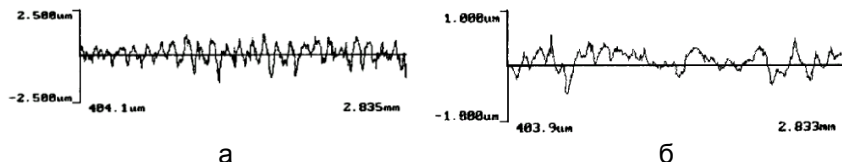


Рис. 2.11. Профилотграммы главной задней поверхности сверл вдоль режущей кромки: а – до MAO; б – после MAO

Влияние изменения величины округления от скорости обработки и размера частиц магнитно-абразивного порошка приведены на рис. 2.12. Эффект значительного округления места пересечения главной и вспомогательной режущих кромок нежелателен. Поэтому необходимо четкое определение режимов MAO инструмента, обеспечивающим только его полировку, удаление заусенцев с режущих кромок и дефектного слоя с поверхности. Анализ полученных результатов показал, что условия MAO близкие к рациональным реализуются при обработке порошками с размерами частиц не больше 200 мкм, скорости обработки вдоль кольцевой ванны – менее 2,5 м/с при обработке в режиме «стекания».

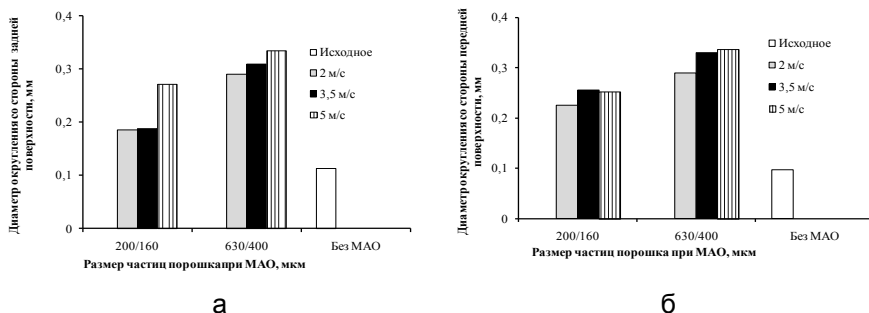


Рис. 2.12. Изменение диаметра округления места пересечения главной и вспомогательной режущих кромок сверл в зависимости от режимов MAO: а – со стороны задней поверхности; б – со стороны передней поверхности

Исследование влияния времени обработки в режиме «натекания» и «стекания» –показали, что при времени обработки в условиях «натекания» менее 30 с и обработке в условиях «стекания» – 60 – 120 с изменения величины округления режущих кромок сверл практически не происходит. Важно отметить, что для того, чтобы избежать нежелательного эффекта округления кромок сверл целесообразно использовать порошки с низкой абразивной и высокой полирующей способностью.

Результаты обработки сверл при режимах близких к оптимальным приведены в табл. 2.2. Показано, что процесс MAO осевого режущего инструмента обеспечивает не только улучшение шероховатости рабочих элементов инструмента, а и повышение эксплуатационных характеристик деталей. Кроме того, известно, что MAO положительно влияет на физико-механические характеристики поверхностного слоя обрабатываемых изделий, обеспечивая формирование в нем остаточных сжимающих напряжений [64], причем величина и глубина упрочненного слоя может в определенных пределах регулироваться за счет варьирования режимов MAO.

Таблица. 2.2

Величина диаметра округления в месте пересечения главной и вспомогательной режущих кромок после MAO при различных режимах

Обработка	Размер частиц порошка, мкм	Время MAO при обработке в режиме		Величина диаметра со стороны	
		«натекание», с	«стекание», с	задней поверхности, мм	передней поверхности, мм
Без обработки	-	-	-	0,13	0,2
MAO	200/160	80	30	0,195	0,24
MAO	200/160	120	0	0,16	0,35
MAO	200/160	80	0	0,165	0,23
MAO	100/63	80	30	0,164	0,185
MAO	100/63	120	0	0,17	0,27
MAO	100/63	80	0	0,165	0,21

Дальнейший цикл исследований по влиянию процесса MAO различными типами МАП на их качественные характеристики выполняли на сверлах диаметром 6,8 мм с исходной шероховатостью рабочих поверхностей $Ra = 0,4 - 0,45$ мкм, поверхностной твердостью $HV_{200} = 9,1 - 9,3$ ГПа, величиной радиуса округления РК 9 – 10 мкм.

МАО выполняли при следующих условиях: угол базирования сверл $\rho = 35^\circ$ по отношению к плоскости кольцевой ванны и отвечал наиболее рациональным условиям МАО, определенным в предыдущих исследованиях. Процесс МАО выполняли с использованием противоположно установленного ВСЭ под углом наклона к плоскости кольцевой ванны 40° [72, 91, 92, 142], соответствующий наиболее рациональным значениям. Время МАО составляло 180 с, причем 90 с обработки выполняли в режиме «стекания» и 90 с – в режиме «натекания». Для формирования МАИ использовали различные типы МАП: ПР Р6М5 зернистостью 200/100 мкм, Царамам 315/200 мкм, Полимам-Т 200/100 мкм и смесь Полимам-М 315/200 мкм + 5% Полимам-Т 160/100 мкм.

После МАО различными типами МАП контролировали степень наклепа на калибровочной ленточке, относительное снижение шероховатости рабочих поверхностей сверл (на задней, передней поверхностях и калибровочной ленточке) и относительное увеличение радиусов округления РК. Полученные результаты представлены на рис. 2.13.

Показано, что наибольшая полирующая способность характерна для МАИ, который сформирован из порошка Полимам-Т зернистостью 200/100 мкм и составляет 70%. При использовании других типов МАП для формирования МАИ в процессе МАО обеспечивается полирующая способность на уровне 20% за исключением МАИ, сформированного из порошка Царамам зернистостью 315/200 мкм. Лучшие показатели по упрочнению поверхностного слоя деталей проявляется при использовании порошка ПР Р6М5 с размером частиц 200/100 мкм. Приведенные результаты хорошо коррелируют с данными по определению размеров РК МАП (табл. 1.1, 1.2), которые применяют при МАО и подтверждают расчеты, приведенные в [84].

Дополнительно для сравнения процесса упрочняющей обработки сверл методом МАО в больших магнитных зазорах использовали различные типы МАП с округлой формой частиц, чугунные шарики S330 зернистостью 1200/900 мкм, твердость которых $HV = 4,5$ ГПа и ПР Р6М5 зернистостью 160/100 мкм – $HV = 6 - 7$ ГПа. Такая форма частиц порошков выбрана с целью снижения абразивной способности МАИ для предотвращения возможности искажения микрогеометрических характеристик сверл и для обеспечения повышенного влияния на показатели наклепа поверхностного слоя за счет микропластического деформирования приповерхностного слоя. Принципиальная разница не только в геометрических характеристиках порошков, но и в их твердости, которая не должна приводить к

существенному диспергированию материала с рабочими поверхностями РИ, так как исходная твердость сверл с быстрорежущей стали находилась в пределах $HV = 7,5 - 8$ ГПа.

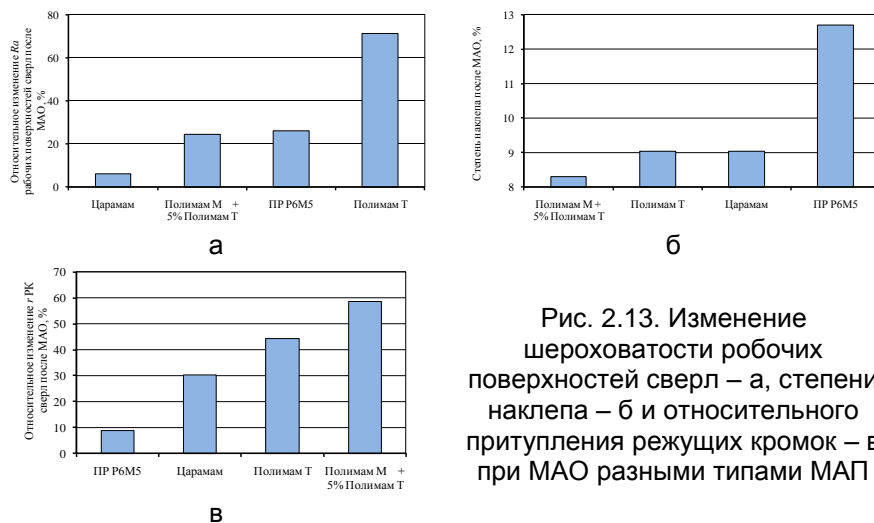


Рис. 2.13. Изменение шероховатости рабочих поверхностей сверл – а, степени наклепа – б и относительного притупления режущих кромок – в при МАО разными типами МАП

Для определения микротвердости по глубине приповерхностного слоя было подготовлено косые шлифы. Измерения проводили на пяти параллельных РК дорожках, расстояние между которыми составляло 50 мкм (рис 2.14).

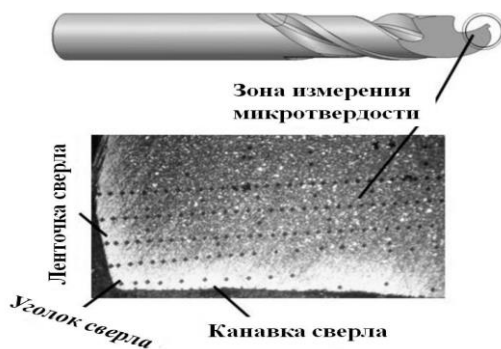


Рис. 2.14. Зоны измерения микротвердости на косом шлифе

Результаты измерений микротвердости сверл из быстрорежущей стали представлены на рис. 2.15.

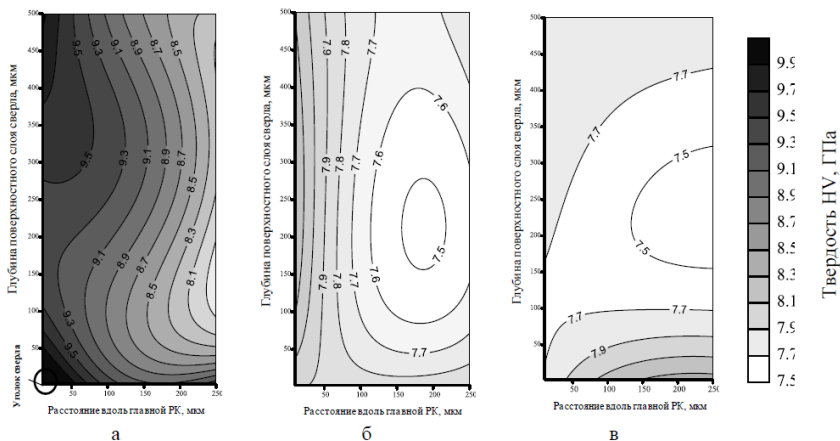


Рис. 2.15. Твердость поверхностного слоя сверл после МАО:
а – порошком S330 1200/900 мкм; б –ПР Р6М5 160/100 мкм,
в –S330 1200/900 мкм + ПР Р6М5 160/100 мкм

Поверхностное упрочнение существенно влияет на структурообразование, что приводит к соответствующему распределению микротвердости и изменению эксплуатационных свойств инструмента. В результате МАО сверл чугунными шариками S330 зернистостью 1200/900 мкм наблюдается упрочнение поверхностного слоя начиная от ленточки сверла вдоль главной РК на глубину 80 – 100 мкм, а затем происходит монотонное снижение твердости, особенно упрочняется уголок сверла между главной и вспомогательной РК.

После обработки сверл МАИ в состав, которого входит порошок ПР Р6М5 зернистостью 160/100 мкм (рис. 2.15 б) твердость поверхностного слоя частично повышается на глубину до 50 мкм, на ленточке сверла твердость больше чем на передней поверхности. Наличие более глубокого упрочненного слоя должно обеспечить большую стойкость сверл во время эксплуатации.

На рис. 2.15 в изображен результат измерения твердости на сверлах обработанных в два этапа с идентичными условиями, но разными порошками сначала S330 1200/900 мкм, а затем ПР Р6М5 160/100 мкм. В результате чего происходит снижение твердости поверхностного слоя сверл (рис. 2.16). Такое изменение твердости объясняется различными геометрическими характеристиками порошка, так как в S330 1200/900 мкм больший радиус округления РК

отдельных частиц, следовательно большая площадь контактного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью сверл, чем в ПР Р6М5 160/100 мкм.

Кроме того с ростом величины геометрических размеров абразивных зерен, а значит и массы зерен имеет место увеличение кинетической энергии взаимодействия МАИ и обрабатываемой поверхности, то есть происходит преимущественное пластическое деформирование поверхности в результате их ударного воздействия.

Изменение поверхностной твердости у сверл из быстрорежущей стали после цикла МАО в два этапа, может быть связано с процессами дефектной перестройки материала в процессе обработки. А именно изменением плотности дислокаций в приповерхностном слое обрабатываемого материала, в результате аннигиляции и выхода их на поверхность.

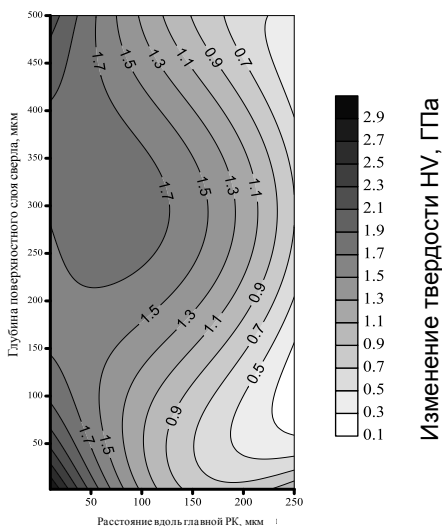


Рис. 2.16. Изменение твердости сверл после цикла МАО разными типами МАП – сперва порошком S330 1200/900 мкм, а затем ПР Р6М5 160/100 мкм

Эксплуатационные исследования сверл из быстрорежущей стали диаметром 6,8 мм обработанных магнитно-абразивной методом с использованием различных типов порошков выполняли при сквозном сверлении плиты, изготовленной из стали 45 толщиной 30 мм при частоте вращения РИ 1000 об/мин и подаче 0,1 мм/об. Определяли величину износа уголка сверл. Полученные результаты приведены на рис. 2.17.

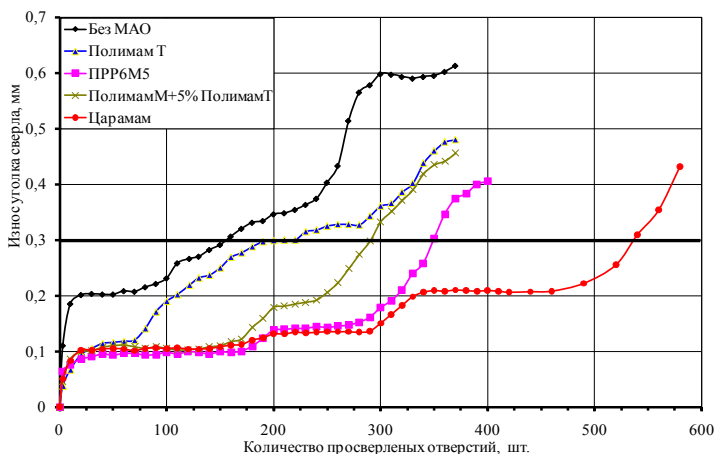


Рис. 2.17. Износ уголка сверл в зависимости от количества просверленных отверстий

Показано, что процесс приработки необработанных сверл происходит до величины износа на уголке, равной 0,2 – 0,21 мм и в дальнейшем изменяется незначительно до количества отверстий 90 – 100 шт. Величина критического износа на уголке необработанных сверл – 0,3 мм [17] формируется после сверления 160 отверстий, затем наступает этап катастрофического износа. У сверл, которые подвергались МАО на кривой износа наблюдаются две площадки стационарного износа – на уровне 0,1 – 0,12 мм и 0,2 – 0,21 мм; вторая площадка аналогичная площадке стационарного износа для необработанных сверл.

Сверла после МАО порошком Полиам-Т зернистостью 200/100 мкм достигают величины критического износа 0,3 мм после сверления 230 отверстий, смесью порошков Полиам-М 315/200 мкм + Полиам-Т 160/100 мкм – 290 отверстий, порошком ПР Р6М5 зернистостью 200/100 мкм – 350 отверстий. Наибольшая работоспособность присуща сверлам, которые обработаны методом МАО с использованием порошка Царамам зернистостью 315/200 мкм – 540 отверстий.

Наличие двух квазистационарных площадок износа, характерных для сверл после финишной МАО может быть связано с особым состоянием поверхностного слоя, который сформировался после МАО. В [76, 81] показано, что при различных условиях МАО сверл изменение распределения микротвердости в поверхностном

слое характеризуется наличием двух подслоевых максимумов, связанных с особенностями взаимодействия частиц МАИ с обрабатываемыми поверхностями, и как результат со структурными изменениями в приповерхностном слое материала, которые косвенно связаны со степенью наклепа.

Отметим, что именно глубина расположения зон с повышенной твердостью, с учетом условий сверления и параметров износа по задней поверхности сверл, соответствует участкам кривой (рис. 2.17) на площадках стационарного износа. Разница в показателях стойкости сверл вероятнее всего имеет комплексную зависимость как от особенностей взаимодействия частиц порошков различных типов с различными величинами РК (табл. 1.2) с обрабатываемыми поверхностями РИ, так и от степени наклепа и разной величины радиусов округления РК сверл полученных после МАО.

Кинетика износа задней поверхности сверл в процессе эксплуатационных исследований выполненных по методике, приведенной в [81] представлены на рис. 2.18. Показано, что процесс финишного МАО обеспечивает повышение работоспособности сверл до 3 – 3,5 раз. Причем отдельные полученные результаты по стойкости сверл, обработанных методом МАО порошками Полимам-Т зернистостью 200/100 мкм и смесью Полимам-М 315/200 мкм + 5% Полимам-Т160/100 мкм совпадают с данными, приведенными в работах [81, 146].

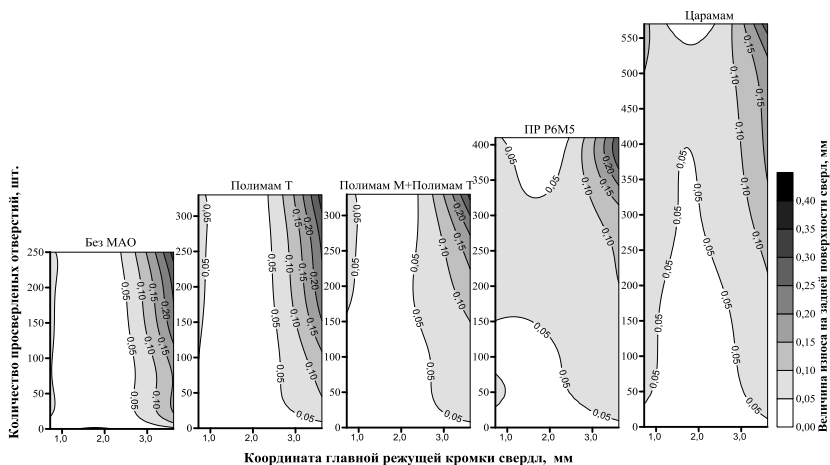


Рис. 2.18. Топограммы износа задней поверхности сверл после МАО разными типами МАП

2.3 Влияние условий МАО на показатели качества сверл из быстрорежущей стали после их переточки

Дополнительно были проведены исследования по МАО сверл после их переточки с использованием различных по форме и размерам МАП (округлых и осколькочастых) с целью обеспечения преимущественной полирующей и упрочняющей обработок. МАО выполняли порошками двух типов, полученных методом распылением из расплава – с осколькочастыми равноосными частицами – Ферромап с размером 160/63 мкм и округлыми, равноосными частицами с размером 315/200 мкм – ПР Р6М5. Величина r для частиц порошка типа Ферромап меняется в диапазоне 3 – 15 мкм, а в порошке ПР Р6М5 r составляет в среднем 70 – 100 мкм. Скорость МАО в условиях оптимальных для сверл с учетом динамики поведения МАИ и его реологических свойств [81, 93, 143] составляли 2 – 2,6 м/с. Оба порошка обеспечивают условия МАО, присущие преимущественно для упруго-пластического и пластического деформирования микронеровностей и поверхностного слоя инструмента, что подтверждает значение величины $h/r = 0,002 - 0,02$ для порошка ПР Р6М5, применяемого при МАО и для Ферромап – 0,004 – 0,07. В качестве СОТС при МАО использовали Асфол, что обеспечивает лучшие показатели по шероховатости и производительности процесса и минимальную вязкость МАИ [43], позволяет обеспечить максимальную равномерность обработки сверл, в особенности стружечных канавок. Условия базирования деталей в рабочих зонах соответствовали наиболее рациональным значениям, приведенным выше.

Процесс МАО сверл выполняли как в один этап с применением различных порошков в течение 200 с, так и в 2 этапа – сначала порошком Ферромап в течение 160 с, а затем порошком ПР Р6М5 со временем обработки 160 с. После МАО выполняли контроль шероховатости рабочих поверхностей сверл и состояние режущих кромок. Усредненные результаты изменения шероховатости рабочих поверхностей и радиусов округления режущих кромок приведены в табл. 2.3.

Анализ микропрофиля обработанных методом МАО деталей показал, что имеет место выглаженный микрорельеф поверхности без остатков острых микровыступов и микровпадин, что характерно обработке с преимущественным пластическим деформированием микронеровностей.

Была исследована стойкость обработанных методом МАО сверл. Эксплуатационные исследования выполняли при сквозном сверлении плиты толщиной 30 мм из стали 45 на обрабатывающем центре МАНО МН 600 Е в автоматическом режиме с использованием

охлаждающей среды – 5% раствор эмульсола. Скорость вращения сверл составляла 1630 об/мин, вертикальная подача составляла 0,12 мм/об.

Таблица 2.3

**Шероховатость рабочих поверхностей сверл и радиусы
округления режущих кромок**

Условия обработки	Шероховатость Ra , мкм				Радиус округления режущей кромки, мкм
	Передняя поверхность	Задняя поверхность	Ленточка сверла	Режущая кромка	
Без МАО после переточки	1,3	0,8	0,42	3,47	6,45
МАО порошком Ферромап 160/63 мкм	0,750	0,82	0,28	2	4,6
МАО порошком ПР Р6М5 315/200 мкм	1,03	0,78	0,42	2,4	6,5
МАО в 2 этапа: 1 этап порошком Ферромап, 2 этап порошком ПР Р6М5	0,48	0,76	0,35	2,02	5,4

После сверления каждых 10 отверстий выполняли контроль площадки износа на задней поверхности сверл по методике, приведенной в [81] и микроскопический визуальный контроль. Дальнейшая статистическая обработка полученных результатов позволила получить зависимость изменения величины износа задней поверхности от количества просверленных отверстий и координат режущей кромки в виде топограмм поверхностей (рис. 2.19).

Показано, что рост стойкости сверл получено при обработке порошком ПР Р6М5, который обеспечивает наибольшее упрочнение и микропластическое деформирование поверхностного слоя и микронеровностей. Разница в стойкости сверл обработанных порошком ПР Р6М5 и Ферромап связана с глубиной пластически деформированного поверхностного слоя, полученного в процессе МАО, которая прежде всего определяется, для указанных выше условий обработки, размером, формой и геометрическим характеристикам магнитно-абразивных зерен. Эту величину можно ориентировочно определить в результате решения задачи о контактом взаимодействии частиц с поверхностью и при использовании данных о величине пятен контакта МАИ с обрабатываемой поверхностью, и значению удельных сил, действующих в МАИ при МАО [81, 93, 120].

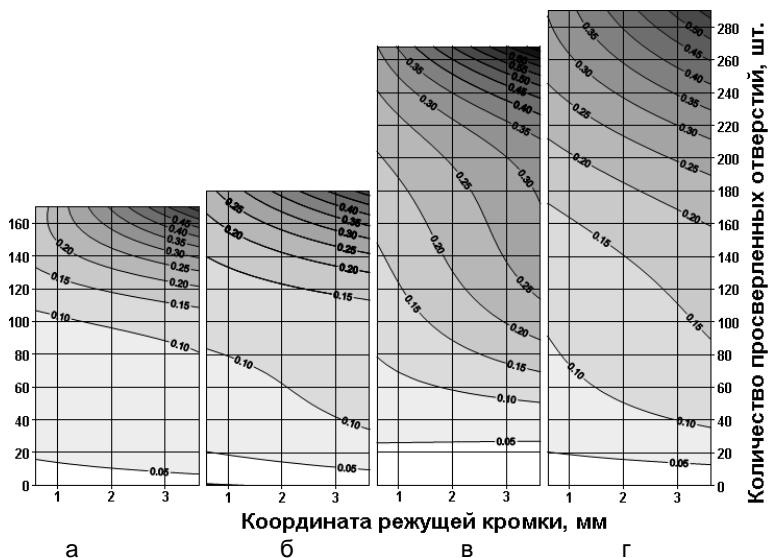


Рис. 2.19. Топограммы изменения величины износа задней поверхности сверл (мм) от количества просверленных отверстий и координаты режущей кромки: а – переточка без МАО; б – после МАО порошком Ферромап; в – после МАО в 2 этапа порошком Ферромап и порошком ПР Р6М5; г – после МАО порошком ПР Р6М5
(Начало координат режущей кромки на оси сверла)

Так при использовании порошка Ферромап максимальная интенсивность напряжений будет наблюдаться на глубине 50 – 60 мкм, а для порошка ПР Р6М5 на глубине до 10 – 15 мкм. Наличие более глубокого упрочненного слоя обеспечивает и большую стойкость сверл во время эксплуатации. Несколько меньшая стойкость сверл после МАО в два этапа с использованием порошков Ферромап, а затем ПР Р6М5 связана с тем, что на первом этапе МАО формируется пластически деформированный слой, который является препятствием для формирования более глубокого залегания упрочненной зоны формируемой на втором этапе. Отметим, что время обработки на каждом этапе при двухэтапной МАО меньше, чем при обработке за один этап. А глубина залегания и величина остаточных сжимающих напряжений существенно зависят от времени МАО [11, 81].

Во время эксплуатационных испытаний проводили микроскопический контроль состояния режущих кромок сверл. Для сверл, которые не подвергались МАО характер износа, как режущей кромки, так и передних и задних поверхностей происходит

стандартно, при отсутствии каких-либо особенностей. Внешний вид уголка сверла со стороны задней поверхности после окончания цикла эксплуатационных испытаний и потери сверлом работоспособности приведен на рис. 2.20.

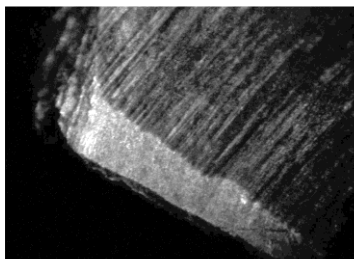
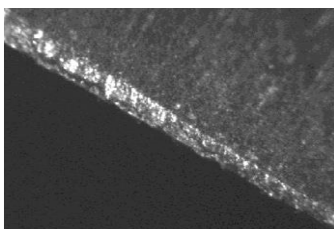
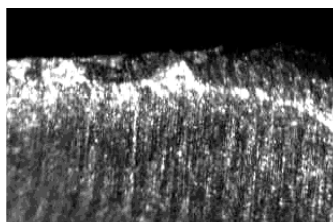


Рис. 2.20. Внешний вид уголка сверла не обработанного методом MAO со стороны задней поверхности после окончания эксплуатационных испытаний (x10)

Контроль сверл (режущих кромок) в процессе испытаний показал, что в конце эксплуатационных испытаний на режущей кромке появляется особая картина микроразрушений и износа. На сверлах, подвергавшихся MAO с использованием порошка ПР Р6М5 четко проявляются упрочненные зоны со стороны как передней, так и задней поверхностей (рис. 2.21 а), а на сверлах после MAO порошком Ферромап происходит скалывание упрочненного тонкого слоя, которое хорошо проявляется со стороны задней поверхности (рис. 2.21 б).



а



б

Рис. 2.21. Состояние режущих кромок сверл со стороны задней поверхности в процессе эксплуатационных испытаний (x10):

- а – сверло обработанное порошком ПР Р6М5;
- б – сверло обработанное порошком Ферромап (x3)

Фотографии приведены на рис. 2.21 полученные при условиях потери 80% работоспособности сверл (до величины их критического износа – 0,5 мм на уголке). Контроль внешнего вида передней поверхности сверл после MAO порошком ПР Р6М5 после окончания

эксплуатационных исследований дополнительно показал наличие типичного микрорельефа поверхности, идентичного поверхностям, получаемые при струйных способах обработки с характерными участками ударного взаимодействия округлых частиц МАИ с обрабатываемой поверхностью (рис. 2.22).

Выполненные исследования позволили четко идентифицировать процессы микрорезания и пластического деформирования микронеровностей и поверхностного слоя при МАО в условиях больших магнитных зазоров и слабых магнитных полей.

Подтверждено, что процесс МАО в указанных условиях происходит в режиме ударно-фрикционного взаимодействия МАИ и обрабатываемых поверхностей. При реализации процессов преимущественного микрорезания или микропластического деформирования обрабатываемых поверхностей существенным фактором является размер, геометрические характеристики и форма частиц магнитно-абразивных порошковых материалов.

Доказано, что МАО сверл после их переточки с применением круглых равновесных порошков обеспечивает упрочнение поверхностного слоя, снижение шероховатости рабочих поверхностей инструмента и повышения их стойкости в более чем 1,7 раза.

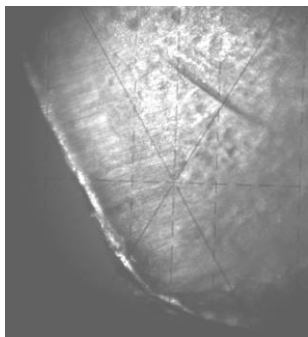


Рис. 2.22. Внешний вид передней поверхности сверла, обработанного методом МАО порошком ПР Р6М5 после цикла эксплуатационных испытаний (x20)

2.4 Магнитно-абразивная обработка быстрорежущих сверл с ионно-плазменными покрытиями

Одним из широко распространенных методов повышения работоспособности и износостойкости режущего инструмента являются методы нанесения тонких покрытий. Как правило, нанесение покрытий выполняется на завершающей стадии изготовления инструмента. При этом практически во всех случаях после нанесения покрытия ухудшается шероховатость рабочих

поверхностей инструмента, в поверхностном слое формируются растягивающие остаточные напряжения, которые являются нежелательными [15]. Целесообразность применения MAO, как финишной обработки деталей с ионно-плазменными покрытиями было показано на примере лопаток газотурбинных двигателей [81]. Поэтому исследование влияния метода MAO на эксплуатационные свойства осевого инструмента с покрытиями, нанесенными методом PVD, различных составов на примере сверл Ø6,8 мм – является актуальным.

Надо отметить, что под каждый тип покрытия использовались сверла из отдельной партии инструмента. Между собой партии не совпадали, поэтому сравнение качества покрытий друг относительно друга неправомерно.

Магнитно-абразивную обработку выполняли на установке [143] типа кольцевая ванна, на режимах, близких к оптимальным: скорость обработки 2 м/с, величина магнитной индукции – 0,2 Тл, угол наклона оси инструмента к плоскости рабочей зоне 30°, время обработки 90 – 100 с, в том числе в режиме «натекания» – 30 с. Для создания МАИ использовали порошок Полимам-Т с размером частиц 200/160 мкм, а в качестве СОТС – масло «Индустриальное».

Установлено, что после MAO предварительно покрытых сверл имеет место улучшение шероховатости поверхности с $Ra = 0,45 - 0,5$ мкм до $Ra = 0,3 - 0,35$ мкм. Причем подобное улучшение практически не зависит от типа покрытия. Размер опорной длины профиля t_p (50) повысилась с 45 – 50% до 70 – 80%. Наиболее значительное повышение t_p имело место на покрытиях CrN и TiAlN. Анализ величины округления периферии сверл после MAO покрытых деталей дал отрицательный результат – изменение радиуса округления места пересечения главной и вспомогательной режущих кромок несущественны.

Измерения поверхностной микротвердости сверл по Виккерсу (с усилием вдавливания 0,05 – 0,5 Н) с покрытием, обработанных магнитно-абразивной методом по сравнению с необработанными показали снижение величины $HV_{0,05} - HV_{0,5}$ на 0,5 – 0,8 ГПа, что может быть связано с уменьшением общей толщины слоя нанесенного покрытия при MAO.

Исследование стойкости сверл к износу выполнялись при режимах, указанных выше.

Контролировали величину износа на задней поверхности сверл. Экспериментальные результаты измерений величины износа задней поверхности в зависимости от количества просверленных отверстий приведены на поверхностях и топограммах износа на рис. 2.23 – 2.25 для сверл с указанными выше покрытиями.

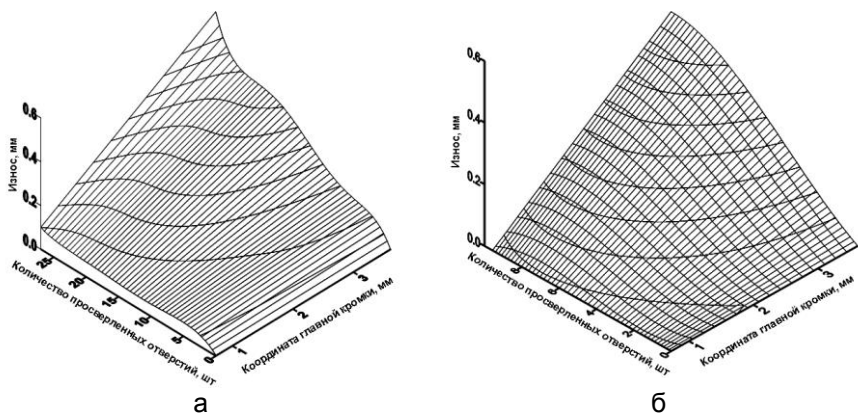


Рис. 2.23. Поверхности износа задней поверхности сверл с покрытием TiN:
а – после MAO со скоростью 2 м/с; б – без MAO в процессе
эксплуатационных испытаний

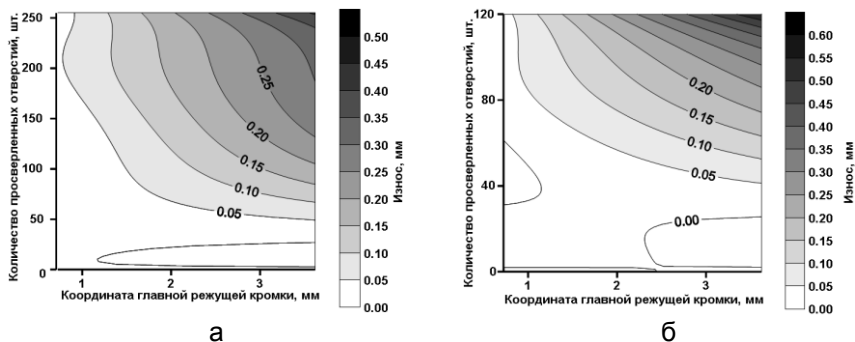


Рис. 2.24. Топограммы износа задней поверхности сверл с
покрытием TiAlN: а – после MAO со скоростью 2 м/с; б – без MAO
в процессе эксплуатационных испытаний

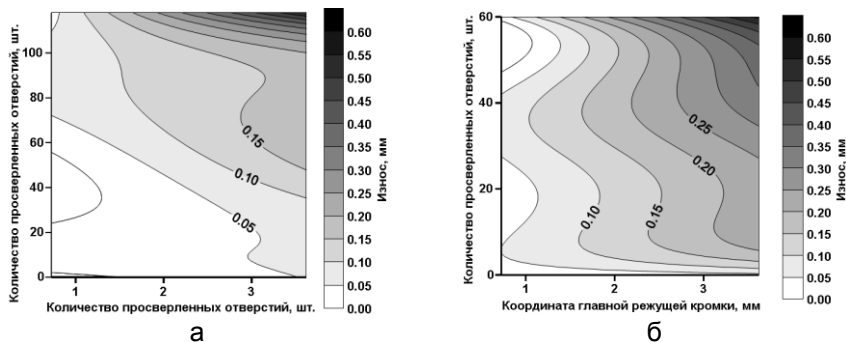
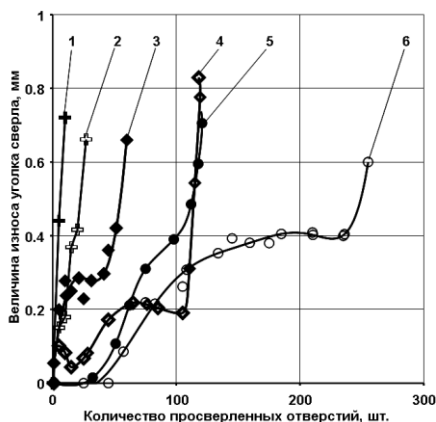


Рис. 2.25. Топограммы износа задней поверхности сверл с покрытием CrN:
а – после MAO со скоростью 2 м/с; б – без MAO
в процессе эксплуатационных испытаний

Показано, что магнитно-абразивная обработка сверл с ионно-плазменным тонким покрытием (с толщиной 3 – 5 мкм) обеспечивает повышение износостойкости деталей не менее чем в два раза. Это связано не только с улучшением характеристик шероховатости поверхности, а и благоприятным влиянием абразивной обработки в магнитном поле после нанесения покрытий на физико-механические свойства тонкого поверхностного слоя деталей [81, 120, 148] под покрытием.

Характер износа наиболее уязвимой части сверла при эксплуатации – места пересечения главной и вспомогательных режущих кромок – приведен на рис. 2.26.

В отличие от результатов, которые получены при использовании MAO перед нанесением ионно-плазменных покрытий, когда износ на периферии сверл идет по монотонно возрастающей зависимости (рис. 2.17), без явно выраженного участка стабильного износа, на исследуемых сверлах, прошедших магнитно-абразивную обработку с покрытием – участок со стабильным износом довольно типичен и аналогичен результатам, приведенным в [81]. Это позволяет предположить, что положительное влияние финишной MAO частично связано с улучшением параметров микропрофиля поверхности – величин Ra и t_p , что подтверждается экспериментальными исследованиями по влиянию MAO поверхностей на процессы их износа при трении, выполненные под руководством Е.В. Рижова [103, 104].



кривые 1, 2 – с покрытием TiN;
 кривые 3, 4 – с покрытием CrN;
 кривые 5, 6 – с покрытием TiAlN;
 кривые 1, 3, 5 – с покрытием, необработанные методом MAO;
 кривые 2, 4, 6 – с покрытиями с последующей MAO со скоростью 2 м/с, время обработки 100 с, порошком Полимам-Т с размером частиц 200/160 мкм

Рис. 2.26. Изменение величины износа уголка сверл с покрытиями разных типов в зависимости от количества просверленных отверстий

Для определения влияния размера частиц магнитно-абразивного порошка, используемого при MAO покрытых сверл на их износостойкость, было проведено дополнительную серию экспериментов с варьированием размеров частиц и времени обработки.

Сверла с покрытием TiN обрабатывали порошком с размером частиц 200/160 мкм и 100/63 мкм. Установлено, что для указанного диапазона изменения размеров частиц порошка – 200 – 63 мкм существенного влияния процесса MAO на стойкость сверл с покрытием к износу не установлено. Подтверждением того являются топограммы износа сверл на задней поверхности, которые приведены на рис. 2.27.

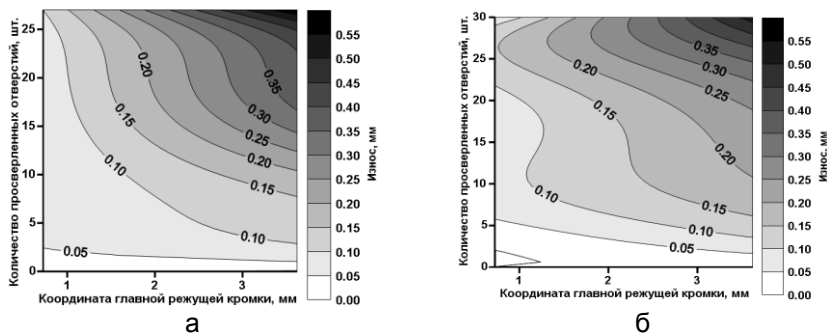


Рис. 2.27. Топограммы износа задней поверхности сверл с покрытием TiN:

а – после MAO порошком 200/160 мкм;

б – после MAO порошком 100/63 мкм

Влияние времени обработки определяли с учетом предыдущих результатов экспериментальных исследований, оно составляло 120 с, причем весь процесс обработки выполняли в условиях «стекания» порошкового инструмента с обрабатываемых поверхностей. Именно при таких условиях получены оптимальные результаты по стойкости сверл при MAO перед нанесением покрытий. Использовали сверла из одной партии, с TiN покрытием. MAO выполняли порошком 200/160 мкм. Полученные значения износа на задней поверхности приведены на рис. 2.28. Получено повышение износостойкости инструмента больше чем в 2 – 2,5 раза. Такое существенное повышение износостойкости зависит не только от микрогеометрии поверхности, а и от изменения свойств поверхностного слоя, которые возникают в процессе MAO [64, 81].

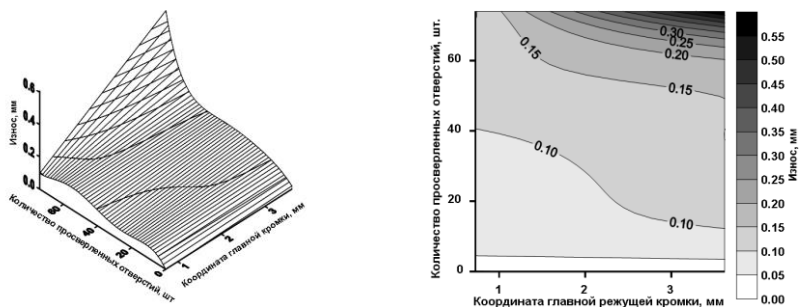


Рис. 2.28. Топограмма и поверхность износа задней поверхности сверл с покрытием TiN и последующей MAO в процессе эксплуатационных испытаний

В процессе MAO отсутствует непрерывный контакт ферроабразивных частиц с поверхностью, а сам процесс обработки близок по своему механизму взаимодействия с обрабатываемыми поверхностями при таких видах обработки, как абразивно-жидкостная, обдув микрошариками и другие. Кроме снятия материала с поверхности происходит и ударное взаимодействие отдельных зерен и их групп с поверхностью деталей. Определенные ранее средние размеры поверхностей контакта частиц МАИ с обрабатываемой поверхностью [166] позволяют провести ориентировочную оценку возможных напряжений, возникающих в поверхностном слое во время контакта частиц МАИ с деталью. Для этого необходимо определить действительные усилия, возникающие в зоне непосредственного контакта. Надо отметить, что локальные мгновенные усилия, которые возникают в зонах непосредственного контакта, могут достигать

значительных величин. Определение этих усилий связано с решением контактной задачи, которую достаточно тщательно рассмотрено в [48, 107]. В связи с тем, что значение средних размеров контакта было получено в условиях моделирования процесса МАО, проверку полученных результатов было проведено по размерам стружки, которая возникает при МАО в условиях, аналогичных условиям обработки, идентичных материалов без покрытий. В качестве материала для тестового анализа использовали образцы из немагнитного сплава – Л 68 с известными механическими свойствами. Стружка удалялась из порошка после цикла обработки методом магнитной сепарации. Результаты измерений ширины стружки, которую получено при МАО показали, что при обработке порошком 200/100 мкм имеет место величина 0,015 – 0,03 мм, а при использовании порошка с размером частиц 630/400 мкм – 0,03 – 0,035 мм. Используя приведенное в [107] соотношение было рассчитано, в пределах упругости, значение мгновенных усилий в зонах локального взаимодействия частиц МАИ с поверхностью. Величина этих усилий находится в пределах 4 – 10 Н.

Таким образом, при МАО сверл локальное, мгновенное давление на поверхности в зонах контакта частиц МАИ, с учетом действительной площади контакта, будет находиться в пределах $(3 - 10) \cdot 10^9$ Па, а наибольшая интенсивность напряжений, рассчитанная по четвертой теории прочности составляет $\sigma_{imax} = (1,86 - 6,2) \cdot 10^9$ Па, и действуют они на глубине 5 – 10 мкм. Формирование именно таких напряжений обеспечивает упрочнение слоя инструмента под покрытием, также это объясняет повышение стойкости сверл к износу. Аналогичные результаты по повышению сопротивления усталости были получены при МАО лопаток компрессоров газотурбинных двигателей с TiN покрытием [26 – 28].

Показано, что магнитно-абразивная обработка сверл с ионно-плазменными покрытиями различных составов обеспечивает существенное повышение качества инструмента, а именно улучшение параметров шероховатости рабочих элементов сверл, повышение более чем в 2 раза их износостойкости.

2.5 Использование МАО, как предварительной и промежуточной операций при диффузионном насыщении поверхностного слоя химико-термическим методом

Известно, что повышение износостойкости поверхностей рабочих элементов инструмента заключается в формировании поверхностного слоя с повышенной твердостью и стабильной

микроструктурой, отсутствующими дефектными зонами, которые возникают при изготовлении инструмента и связанные с наличием «прижегов», разрыхленных участков поверхности с растягивающими остаточными напряжениями и другое. Решение этой проблемы выполняется многими методами, а именно микропластическим деформированием поверхностного слоя, то есть формированием поверхностного слоя с остаточными сжимающими напряжениями, специальной термической обработкой, диффузным насыщением поверхностного слоя упрочняющими элементами, например, во время химико-термической обработки (ХТО), нанесением специальных износостойких покрытий. Рациональное сочетание этих методов позволяет целенаправленно влиять на физико-механические характеристики деталей и обеспечивать значительные преимущества при их эксплуатации [36, 93]. Именно управления наследственностью обработки является одним из резервов повышения надежности деталей и инструмента [38, 109, 128, 130]. Применение ХТО, а именно карбонитрации поверхностного слоя при температуре отпуска 540 – 550°C [132] обеспечивает повышение работоспособности инструмента из быстрорежущей стали не менее чем в 1,5 – 2 раза. Это достигается за счет повышения микротвердости тонкого поверхностного слоя на глубину до 30 – 40 мкм до величины 13 – 14 ГПа при твердости субстрата 8 – 9 ГПа. Такое повышение твердости связано с образованием в процессе ХТО сложных карбонитридов вблизи поверхности, а именно – на поверхностной легированной зоне ε – карбонитридной фазы типа $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{N})$, а на глубине 10 мкм было обнаружено дополнительно такие фазы, как γ – фаза типа $\text{Fe}_4(\text{C}, \text{N})$, нитрид Cr_2N , карбид $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ легированный хромом, ванадием, азотом и ε – твердый раствор [101]. Недостатками этого метода является негативное влияние ХТО на состояние микрорельефа и микрогеометрию рабочих поверхностей инструмента. После ХТО имеет место ухудшение шероховатости поверхности, наличие на поверхности разрыхленного слоя в виде оксидов и остатков рабочей среды, которая используется при ХТО.

Известно, что использование МАО, как отдельной операции для повышения работоспособности инструмента из быстрорежущей стали позволяет обеспечить рост его износостойкость в 1,3 – 1,5 раза [3, 36, 38, 93]. Такое повышение происходит за счет формирования в поверхностном слое инструмента остаточных сжимающих напряжений и существенного снижения шероховатости главной режущей кромки, передней и задней поверхностей, удалением с поверхности микрозаусенец и дефектного слоя, измельчением первичных карбидов, получением сглаженного рельефа без

микроконцентраторов напряжений. Повышение микротвердости поверхностного слоя на 2 – 3 ГПа на глубину до 150 мкм также имеет свое положительное влияние. К недостаткам метода следует отнести тот факт, что со временем имеет место некоторая (на 25 – 35%) релаксация полученных в поверхностном слое напряжений.

Целью исследований было формирование оптимальных свойств поверхности и поверхностного слоя инструмента из быстрорежущей стали при комбинированном использовании технологических операций ХТО и МАО на заключительных стадиях изготовления инструмента.

Экспериментальные исследования проводили на осевом режущем инструменте – сверлах, развертках, зенкерах и на образцах, изготовленных из стали Р6М5. Изучали характер изменения шероховатости поверхности после МАО и ХТО, поверхностную твердость и изменение микротвердости поверхностного слоя.

С учетом предыдущих исследований [93] установлено, что наиболее приемлемые результаты, при которых имеет место минимальное округление периферийных уголков сверл с одновременным уменьшением шероховатости рабочих режущих поверхностей и формированием оптимального радиуса округления главных режущих кромок инструмента, получено при МАО порошком Полимам-Т с размером частиц 200/100 мкм при скорости обработки 2 м/с и времени обработки 40 – 120 с.

Магнитно-абразивную обработку выполняли на установке типа кольцевая ванна (рис. 1.5), с магнитной индукцией в рабочей зоне 0,2 – 0,23 Тл, на протяжении 80 с.

Предварительно была исследована возможность получения реальной шероховатости поверхности после каждой отдельной операции обработки инструмента – МАО и ХТО. Для этого использовали специально изготовленные полированные образцы из стали Р6М5, с термической обработкой аналогичной той, что используется при изготовлении инструмента. Исходная шероховатость поверхности образцов после ручного полирования перед МАО и ХТО не превышала Ra 0,015 – 0,018 мкм. Это позволило исключить влияние на конечный результат предыдущей высоты микронеровностей обрабатываемой поверхности. Установлено, что МАО полированных образцов по указанным выше режимам приводит к ухудшению шероховатости до 0,06 мкм, что соответствует «истиной» шероховатости поверхности, которую можно получить с использованием указанного магнитно-абразивного материала [98]. ХТО полированной поверхности приводит к формированию шероховатости с Ra 0,33 – 0,42 мкм. Проведение МАО образцов после ХТО, то есть проведения технологического цикла полирование + ХТО + МАО или полирование + МАО + ХТО + МАО позволяет получить такую же шероховатость с Ra = 0,06 – 0,07 мкм. Вид микропрофиля поверхности после технологических операций

полирование + ХТО и полирование + ХТО + МАО (полирование + МАО + ХТО + МАО) приведен на рис. 2.29.

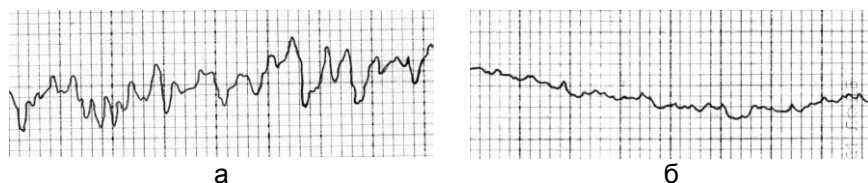


Рис. 2.29. Вид микропрофиля поверхности образцов: а – после операций полирования и ХТО; б – после технологической комбинации полирование + ХТО + МАО (полирование + МАО + ХТО + МАО); горизонтальное увеличение 200, вертикальное увеличение 10000

Проведение дополнительных технологических операций обработки – ХТО и МАО на образцах показали, что МАО приводит к снижению шероховатости до 0,06 – 0,08 мкм, а вторая ХТО к формированию микропрофиля поверхности с Ra 0,25 мкм (рис. 2.30). Анализ изменения величины Ra на разных этапах технологического цикла позволяет предположить, что имеет место изменение физических свойств поверхностного слоя, а именно его твердости. Выполненные исследования поверхностной твердости HV образцов показали рост твердости поверхности. Результаты измерений приведены в таблице 2.4.



Рис. 2.30. Изменение шероховатости образцов в зависимости от технологического цикла финишной обработки

В таблице 2.4 показано, что комбинирование магнитно-абразивной и химико-термической обработок позволяет на поверхности образцов на глубине до 3 мкм получить рост твердости на 20 – 35%. Причем наиболее значительное повышение имеет место при комбинациях МАО + ХТО и МАО + ХТО + МАО, но вторая

комбинация превосходит первую по характеристикам шероховатости поверхности. Подтверждение полученных результатов выполнено на сверлах Ø 5,8 мм, изготовленных из стали Р6АМ5. MAO сверл выполняли по режимам указанным выше.

Таблица 2.4

Поверхностная твердость образцов (*HV*) после разных комбинаций финишных технологических обработок

Комбинация технологических обработок	Поверхностная твердость <i>HV</i> , ГПа				Глубина вдавливания индентора, мкм
	Величина нагрузки на индентор, Н				
	0,5	1	1,5	2	
Без обработки	7,98	7,55	7,97	7,74	1,6 – 3,13
MAO	8,15	8,17	7,44	7,62	1,5 – 3,15
ХТО	9	9,86	9,41	9,82	1,45 – 2,78
MAO+ХТО	10,25	10,65	11,13	9,95	1,36 – 2,36
MAO+ХТО+MAO	10,04	9,65	10,43	11,3	1,37 – 2,6
MAO+ХТО+MAO+ХТО	11,08	10,4	9,4	9,9	1,31 – 2,76

Дополнительно было проведено исследование влияния времени MAO перед технологической операцией ХТО на величину поверхностной твердости по Виккерсу – *HV*, то есть отдельных элементов технологической наследственности. В [36, 93] показано, что время MAO позволяет особым образом влиять на поверхностную твердость материала, формируя специфические свойства поверхностного слоя [23] и создавая благоприятные условия для прохождения процесса диффузионного насыщения поверхности инструмента при ХТО. Кроме того, было исследовано особенности многократного использования комбинации MAO и ХТО. Использование на заключительных стадиях изготовления инструмента на первом этапе процесса ХТО с последующей MAO и повторением указанной технологической комбинации при времени MAO 80 с не позволяет получить повышения поверхностной твердости. Имеет место рост твердости до 10 – 11,6 ГПа (табл. 2.5). При использовании перед ХТО магнитно-абразивной обработки с повторением такой комбинации при идентичных условиях процессов ХТО и MAO получено рост твердости до 12,5 – 15 ГПа (табл. 2.5).

Анализ полученных результатов позволяет подтвердить факт формирования методом MAO наиболее благоприятных свойств поверхностного слоя для прохождения диффузных процессов, а именно образования «дефектного» поверхностного слоя с повышенной плотностью дислокаций. Именно такой эффект – микропластического деформирования тонкого поверхностного слоя полученного при MAO лопаток ГТД [64].

Таблица 2.5

Поверхностная твердость сверл (*HV*) после различных комбинаций процессов MAO и ХТО (время MAO – 80 с)

Комбинации технологических обработок	Поверхностная твердость <i>HV</i> , ГПа			
	Величина нагрузки на индентор, Н			
	0,5	1	1,5	2
Без обработки	8,5	8,5	8,8	9,6
ХТО	10,5	9,5	8,9	8,6
ХТО+MAO	10,5	9,6	9,9	10,1
ХТО+MAO+ХТО	9	9,6	10,1	11,6
ХТО+MAO+ХТО+MAO	10,4	10,1	10,8	11,6
Без обработки	8,5	8,9	8,2	8,3
MAO	9,7	8,8	8,3	8,1
MAO+ХТО	12	10,6	10,1	10
MAO+ХТО+MAO	9,4	10,3	10,1	10,2
MAO+ХТО+MAO+ХТО	12,5	12,1	15,7	12
MAO+ХТО+MAO+ХТО+MAO	12,6	10,1	10	9,9

Варьирование временем MAO между операциями ХТО показало, что лучшие результаты получены при времени MAO – 40 с (табл. 2.6). При этих условиях поверхностная твердость достигает 20 ГПа на глубине 0,8 – 1,8 мкм, достигает поверхностной твердости нитрида титана.

Таблица 2.6

Поверхностная твердость сверл (*HV*) после разных комбинаций технологических обработок (время MAO – 40 с)

Комбинации технологических обработок	Поверхностная твердость <i>HV</i> , ГПа			
	Величина нагрузки на индентор, Н			
	0,5	1	1,5	2
Без обработки	9,5	7,6	8,8	8,8
MAO	10	7,8	8,3	8,1
MAO+ХТО	12	10,6	10,1	10
MAO+ХТО+MAO	14	11,6	11,5	11,8
MAO+ХТО+MAO+ХТО	14,2	20,9	15,7	16
MAO+ХТО+MAO+ХТО+MAO	18,6	13,6	12,3	13,9

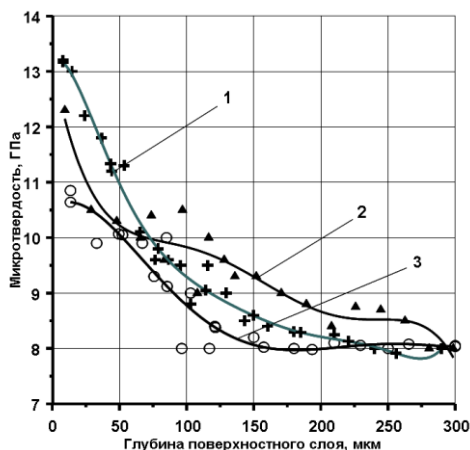
Увеличение времени MAO до 120 с перед ХТО приводит к изменению поверхностной твердости, аналогично MAO в течение 80 с. Полученные результаты являются подтверждением данных по влиянию MAO на изменение напряженного состояния поверхности, а именно формированию в поверхностном слое сжимающих

напряжений на уровне 600 – 1200 МПа [3]. Известно, что наиболее значительное повышение поверхностной твердости при MAO деталей из быстрорежущих сталей имеет место на глубине 0,5 – 1 мкм.

Установлено, что наиболее высокие значения как твердости, так и остаточных напряжений поверхностного слоя, а значит и повышенная плотность дислокаций имеют место при незначительных скоростях обработки – до 2 м/с, когда наиболее полно выполняется пластическое деформирование поверхности деталей. То есть именно MAO в течение 40 с обеспечивает оптимальную плотность дислокаций в поверхностном слое инструмента. При этом формируется и оптимальная шероховатость поверхности сверл с Ra 0,18 – 0,2 мкм. Наличие экстремального роста твердости при MAO в течение 40 с совпадает с результатами периодической смены остаточных напряжений и плотности дислокаций при абразивно-струйной обработке [99].

Для подтверждения роста плотности дислокаций на образцах со стали Р6М5 было по стандартным методикам [8, 102] проведено рентгеновский анализ напряженного состояния поверхностного слоя. Рентгеновский анализ был проведен на установке Дрон 3.0 при Fe – излучении с $U_a = 16$ кВ, $I_a = 14$ mA при регистрации дифракционных максимумов плоскости (110). Отметка угла выполнялась через $0,1^\circ$. Было определено величину плотности дислокаций для времени MAO 40, 80 и 120 с, которая составляла, соответственно, $0,57 \cdot 10^7$, $0,29 \cdot 10^7$ и $0,25 \cdot 10^7$ мм⁻². Анализ полученных результатов подтверждает факт повышения плотности дислокаций в поверхностном слое материала после MAO, что в свою очередь обеспечивает благоприятные условия для диффузии атомов углерода и азота при ХТО быстрорежущей стали.

Детальный анализ поверхностного слоя инструмента после различных комбинаций технологических операций ХТО и MAO было выполнено по характеру изменения микротвердости поверхностного слоя. На первом этапе исследовали микротвердость поверхностного слоя сверл \varnothing 5,8 мм, изготовленных из стали Р6М5 после операции ХТО без предварительной MAO и с последующей MAO и комбинацией ХТО и MAO. Установлено, что после ХТО микротвердость возрастает до 13 – 13,5 ГПа на глубине до 25 мкм. Магнитно-абразивная обработка сверл после ХТО приводит к незначительному снижению величины микротвердости на 0,9 – 1 ГПа (рис. 2.31).



кривая 1 – ХТО,
 кривая 2 – комбинация ХТО +
 МАО,
 кривая 3 – комбинация ХТО +
 МАО + ХТО

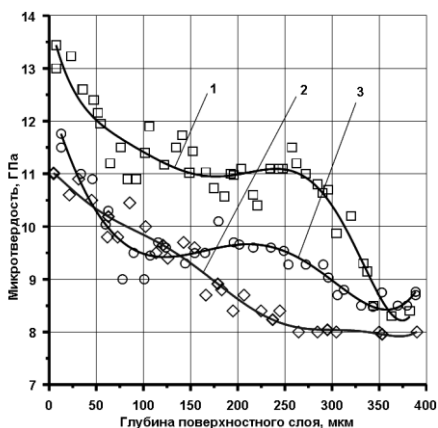
Рис. 2.31. Микротвердость поверхностного слоя сверл

Дальнейшие ХТО и МАО не приводят к существенным изменениям твердости поверхностного слоя. Такой эффект можно объяснить тем, что при использовании на первом этапе технологических обработок, которые применяют для упрочнения инструмента, процесса ХТО в поверхностном слое образуется своеобразная барьерная зона с избытком сложных карбидов, азота и углерода и их соединений с элементами материала субстрата, которые образовались в процессе диффузионного насыщения. Глубина залегания такой зоны составляет 20 – 30 мкм.

Поэтому использование после ХТО процесса МАО не приводит к ожидаемым результатам вследствие того, что МАО наиболее активно влияет на состояние поверхностного слоя на глубине до 10 мкм. По этой же причине и комбинация ХТО + МАО + ХТО не обеспечивает рост микротвердости поверхностного слоя инструмента и его эксплуатационных характеристик.

Положительное влияние МАО после ХТО проявляется только в снижении шероховатости поверхности деталей и формировании ее товарного вида.

Использование МАО, как предварительной обработки перед ХТО позволяет получить положительный эффект – рост микротвердости поверхностного слоя (рис. 2.32). Установлено, что наибольшее повышение величины микротвердости на глубине до 300 мкм проявляется при времени предыдущей МАО – $\tau = 40$ с.



продолжительность МАО:
 кривая 1 – 40 с,
 кривая 2 – 80 с,
 кривая 3 – 120 с

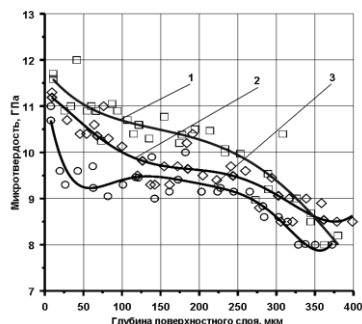
Рис. 2.32. Микротвердость поверхностного слоя сверл после операций МАО + ХТО

Полученные результаты подтверждают ранее полученные данные об оптимальной продолжительности МАО как подготовительной операции перед химико-термической обработкой.

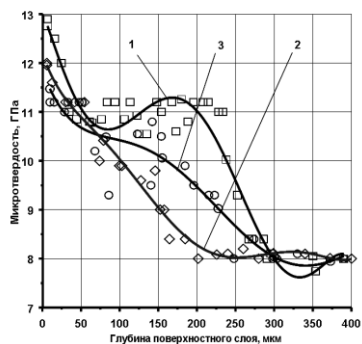
Усложнение финишного цикла обработки – проведение комбинации МАО + ХТО + МАО и МАО + ХТО + МАО + ХТО не дает существенного прироста микротвердости поверхностного слоя и роста толщины упрочненного слоя инструмента.

Результаты изменения величины поверхностной твердости при указанных выше комбинациях технологических обработок приведены на рис. 2.33.

Анализ результатов приведенных на рис. 2.32 и 2.33 показывает, что МАО после ХТО приводит к формированию зон с повышенной и постоянной микротвердостью. Наличие подобных зон может быть следствием специфического влияния предварительной МАО на процессы диффузионного насыщения поверхностного слоя инструмента при ХТО и требуют дополнительного исследования. Возможно, такая технологическая наследственность материала при использовании ХТО и МАО при указанных выше условиях обработки связана именно с формированием барьерного слоя. Для получения положительного влияния повторной МАО после комбинации МАО + ХТО необходимо применение более жестких условий МАО – при использовании магнитно-абразивных порошков с размером частиц не менее 300 – 400 мкм, повышенных скоростей перемещения инструмента в рабочих зонах и магнитной индукции в рабочих зазорах более чем 0,3 Тл.



а

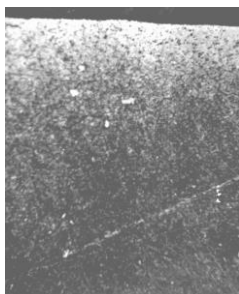


б

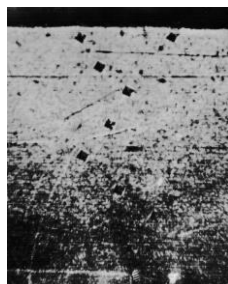
Рис. 2.33. Микротвердость поверхностного слоя сверл после операций: а – MAO + XTO + MAO; б – MAO + XTO + MAO + XTO, длительность одной операции MAO: кривая 1 – 40 с, кривая 2 – 80 с, кривая 3 – 120 с

Полученные результаты позволяют рекомендовать технологический цикл упрочнения поверхностного слоя инструмента, который состоит из комбинации MAO, XTO и вторичной MAO. Использовать более сложные комбинации технологических, упрочняющих обработок нерационально как с точки зрения энергоемкости, так и потому, что не наблюдается более или менее значительного повышения твердости упрочненного слоя.

Микроструктурный анализ показал, что диффузная зона после комбинации MAO + XTO + MAO отличается пониженной травимостью по сравнению со структурой основы (рис. 2.34). Как правило, после карбонитрации на поверхности наблюдался белый слой толщиной 5 – 7 мкм, который не травится.



а



б

Рис. 2.34. Микроструктура упрочненного слоя инструмента из стали P6M5: а – после MAO; б – после комбинаций технологических обработок MAO+XTO+MAO (x400)

Последующая магнитно-абразивная обработка приводит к исчезновению этого слоя, который частично удаляется, а частично его остатки под воздействием ударов частиц МАП проникают в материал приповерхностной зоны. Изменение условий МАО не имеет значительного влияния на структуру поверхностных слоев, но меняет толщину зоны с пониженной травимостью.

Для определения стойкости сверл к износу был проведен цикл эксплуатационных исследований при сквозном сверлении плиты из стали 45 толщиной 30 мм сверлами $\varnothing 6,8$ мм, изготовленными из быстрорежущей стали, которые прошли цикл технологических обработок МАО + ХТО + МАО. Режимы сверления аналогичные указанным выше.

Контролировали величину износа уголка в месте пересечения главной и вспомогательной режущих кромок – наиболее уязвимой части сверл во время эксплуатации. Характер износа периферии сверл на необработанных сверлах и сверлах, которые прошли цикл технологических обработок – МАО + ХТО + МАО приведены на рис. 2.35.

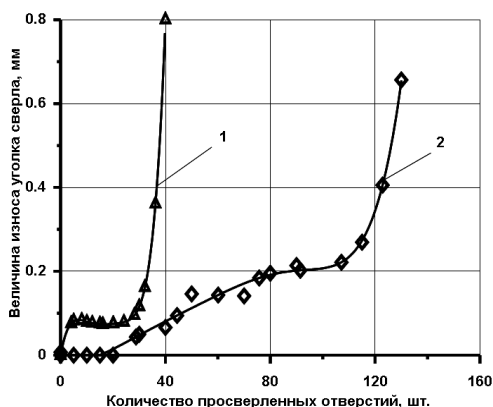


Рис. 2.35. Изменение величины износа периферии сверл в зависимости от количества просверленных отверстий: кривая 1 – сверла в исходном состоянии (без МАО и ХТО); кривая 2 – после технологической комбинации МАО + ХТО + МАО

Показано, что сверла, которые прошли комбинацию технологических обработок МАО + ХТО + МАО имеют более чем в 3 раза большую износостойкость чем необработанные. Надо отметить, что именно активный износ периферии сверл начинается при величине износа уголка 0,3 мм, что соответствует толщине упрочненного слоя после технологических комбинаций МАО и ХТО (рис. 2.33).

2.6 Магнитно-абразивная обработка концевых фрез

МАО концевых фрез изготовленных из быстрорежущей стали с длиной рабочей части 60 мм выполняли на экспериментальной установке описанной в разделе 1, в режимах «натекания», «стекания». Время обработки меняли в диапазоне от 30 до 120 с. Обработку выполняли МАП – Полимам-Т зернистостью 200/100 мкм [81], в качестве СОТС использовали – Асфол. Величина магнитной индукции в рабочей зоне составляла $B = 0,23$ Тл; угол базирования инструмента – ρ составлял 40° и 60° , угол поворота инструмента вокруг вертикальной оси – $q = 10^\circ - 15^\circ$. Для сравнения обработку выполняли как с использованием немагнитного ВСЭ (раздел 1.8) диаметром 10 мм, так и без него. Исследовали характер изменения параметра Ra вдоль оси фрез, степень наклепа поверхностного слоя, формирование радиусов округления РК.

В исходном состоянии (до МАО) параметр шероховатости Ra на рабочей поверхности цилиндрической части фрез – $0,63 - 0,7$ мкм, поверхностная твердость на задней поверхности – $HV = 7 - 7,5$ ГПа, величина радиуса округления РК – $r = 10 - 11$ мкм. Через каждые 30 с обработки контролировали изменение шероховатости рабочих поверхностей и радиуса округления РК по длине РИ в зонах вблизи точек, которые располагались в процессе МАО в нижней – вблизи точки P_1 , средний – вблизи точки P_2 и верхний – вблизи P_3 частях рабочей зоны (рис. 2.36). Характер изменения параметра шероховатости Ra вдоль оси инструмента при МАО как с использованием восстанавливающих стержневых элементов оптимальной формы, так и без них [65, 71, 90].

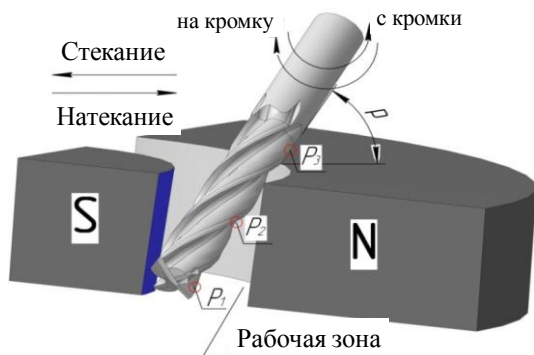


Рис. 2.36. Схема расположения осевого инструмента на примере фрезы в рабочей зоне кольцевого типа при МАО и контрольные зоны P_1, P_2, P_3

Кинетика изменения шероховатости рабочих поверхностей фрез при различных режимах МАО приведены на рис. 2.37.

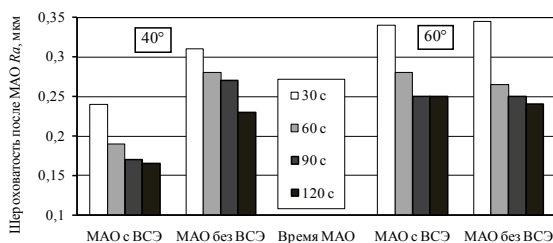


Рис. 2.37. Кинетика изменения шероховатости рабочих поверхностей фрез при разных условиях MAO

Показано, что при MAO с углом базирования фрез $\rho = 60^\circ$ влияние действия ВСЭ на шероховатость обработанной поверхности меньше, чем с $\rho = 40^\circ$. Подобный факт объясняется тем, что при MAO МАП задерживается в зонах стружечных канавок осевого и концевоегo РИ и таким образом образует в них своеобразные зоны с пониженной активностью обработки, аналогичные теневым зонам [76, 113].

Установлено, что при использовании в процессе обработки для формирования стабильного МАИ, который восстанавливается в процессе цикла обработки, ВСЭ имеет место значительное снижение параметра Ra до 0,2 – 0,16 мкм за 60 – 120 с обработки. Такая разница в полученных результатах свидетельствует о существенном влиянии тангенциальной составляющей сил резания, возникающей при взаимодействии МАИ с обрабатываемыми поверхностями и важность поддержания неизменной формы и плотности МАИ по всему объему рабочей зоны в условиях его активного перемешивания [76, 92].

Характер изменения степени наклепа поверхностного слоя концевых фрез, изготовленных из быстрорежущей стали, в процессе MAO практически не исследовался, отдельные результаты, приведенные в [62, 76] явно недостаточны для обеспечения равномерной обработки длинномерных деталей.

При MAO РИ расположенного под углом $\rho = 40^\circ$ без использования ВСЭ происходит неравномерная обработка по высоте рабочей зоны. Выполненные исследования изменения степени наклепа поверхностного слоя фрез показали, что в зоне возле точки P_3 наклеп отсутствует, в средней части – в зоне P_2 соответствует данным приведенным на рис. 2.38 и в нижней части зазора – в зоне P_1 степень наклепа составляет 0,08 – 0,11 в зависимости от степени вытеснения МАИ обрабатываемой деталью в нижнюю часть рабочей зоны.

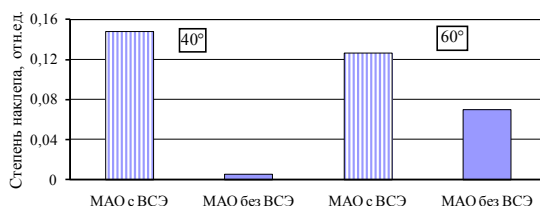


Рис. 2.38. Изменение степени наклепа поверхностного слоя фрез при MAO при разных условиях обработки

Ранее было показано, что величина наклепа существенно зависит от конструкции обрабатываемой детали, ее базирования в рабочих зазорах и режимов обработки. Установлено, что на степень упрочнения поверхностного слоя инструмента при MAO направление вращения вокруг собственной оси деталей существенного влияния не оказывает. Анализ изменения степени наклепа поверхностного слоя фрез, после цикла MAO показал, что важно не только равномерная плотность МАИ по высоте магнитного зазора, а и угол базирования деталей по отношению к направлению движения инструмента в кольцевой ванне, который определяет степень нормальной составляющей силового воздействия МАИ на поверхность деталей.

Расчеты нормальной и тангенциальной составляющих интенсивностей обработки при MAO, выполненные по методике приведенной в [33, 79, 88] показали, что для угла $p = 40^\circ$ отношение интенсивности воздействия от нормальной до тангенциальной составляющих скорости обработки составляют 0,73, что является достаточным для обеспечения эффективного процесса MAO в больших магнитных зазорах, в то время как для $p = 60^\circ$ указанное отношение составляет 0,49 и явно недостаточно [88, 92, 69].

MAO фрез выполняли в режиме «стекания» [72, 146] с изменением направления вращения изделий вокруг собственной оси как с использованием ВСЭ для формирования стабильного МАИ, так и без него. На процесс эффективной эксплуатации фрез большое влияние оказывает величина радиуса округления РК – r , которая является поверхностью непосредственно контактирующей с материалом заготовки, и по которой идет процесс отделения стружки. Величина r измеряется в плоскости, перпендикулярной линии пересечения передней и задней поверхностей инструмента. Измерения r проводили оптическим методом на приборе MikroCAD, который обеспечивает высокую точность по сравнению с методом ощупывания. Полученные результаты изменения величины r РК фрез в контрольных зонах по высоте рабочей зоны при различных условиях MAO приведены на рис. 2.39.

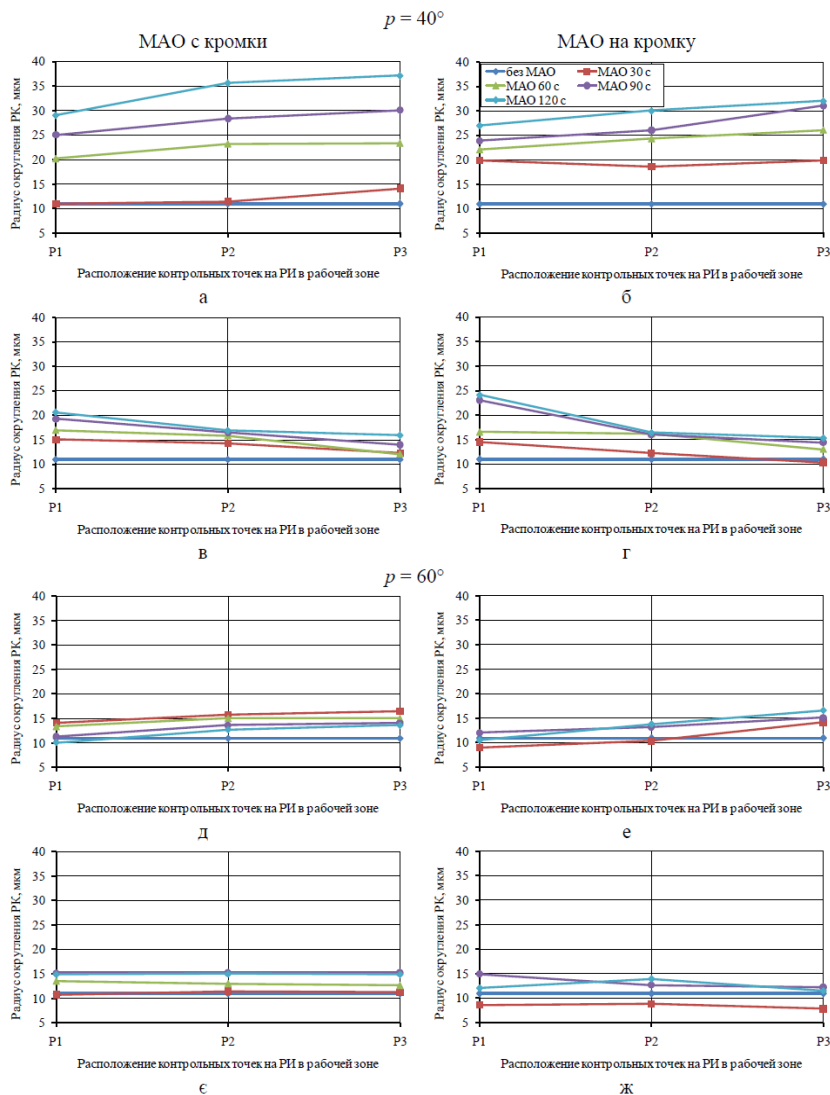


Рис. 2.39. Изменение величины $r_{\text{РК}}$ фрез по высоте рабочей зоны при разных условиях МАО:
а, б, д, е – с использованием ВСЭ, в, г, е, ж – без ВСЭ

Показано, что активный процесс формирования радиусов округления РК происходит при углах наклона РИ к плоскости кольцевой ванны $\rho = 40^\circ$. При МАО без использования ВСЭ округление РК реализуется в нижней части рабочей зоны, куда вытесняется основная масса МАП в процессе обработки, где формируется МАИ с повышенной плотностью. Использование ВСЭ при МАО в условиях больших магнитных зазоров позволяет выполнять относительно равномерное округления РК по высоте рабочей зоны.

Скорость округления РК в верхней, нижней и средней частях рабочей зоны при различных углах базирования деталей с использованием ВСЭ и без него приведены в таблице 2.7. Показано, что для обеспечения равномерного округления РК на цилиндрической части осевого РИ вдоль оси целесообразно выполнять его базирование в рабочей зоне станка с учетом основных требований, предъявляемых к реализации эффективного процесса МАО, реологических свойств МАИ и выполнять обработку с использованием ВСЭ для обеспечения условий формирования стабильного МАИ. Установлено, что средняя скорость округления РК концевой РИ изготовленного из быстрорежущих сталей после цикла МАО с использованием ВСЭ равна 0,178 мкм/с, что почти в 3 раза больше, чем в условиях без обеспечения восстановления формы и свойств МАИ восстанавливающими стержневыми элементами [65, 72, 90].

Из анализа полученных результатов установлено, что формирование острых кромок на деталях с полукруглыми поверхностями, к которым можно отнести концевой и осевой РИ, целесообразно выполнять при следующих условиях МАО: режим «стекания» МАИ с кромок, что уменьшает вероятность образования малоподвижных скоплений порошка в стружечных канавках.

Таблица 2.7

Скорость изменения r РК фрез при разных условиях МАО, мкм/с

Условия МАО		Угол наклона РИ – ρ	
Зона расположения РК в рабочей зоне станка	Направление вращения РИ вокруг собственной оси	40°	60°
		МАО с ВСЭ / МАО без ВСЭ	
нижняя часть (в районе т. P_1)	с кромки	0,167 / 0,078	0 / 0,041
	на кромку	0,121 / 0,11	0,007 / 0,028
средняя часть (в районе т. P_2)	с кромки	0,224 / 0,047	0,047 / 0,034
	на кромку	0,152 / 0,049	0,028 / 0,033
верхняя часть (в районе т. P_3)	с кромки	0,228 / 0,038	0,009 / 0,034
	на кромку	0,178 / 0,043	0,041 / 0,018

2.7 Влияние условий магнитно-абразивной обработки на показатели качества твердосплавных фрез

В современном производстве широко применяется твердосплавный режущий инструмент. Проведен ряд исследований по применению на финишных этапах его изготовления MAO [33, 122, 147, 153, 156] для одновременного улучшения физико-механических свойств и создания благоприятной микрогеометрии рабочих поверхностей. Однако недостаточно внимания уделено условиям проведения MAO реального осевого и концевой РИ, изготовленного из твердого сплава, в кольцевой рабочей зоне МАИ со стабильными свойствами который формируется в процессе MAO с использованием ВСЭ.

Предварительно полученные положительные результаты при MAO концевых фрез, из быстрорежущей стали, требуют дополнительных исследований для распространении их на твердосплавный РИ.

Проведены экспериментальные исследования процесса MAO на концевых фрезах без покрытия диаметром 12 мм, длиной 100 мм, длина рабочей части 40 мм, материал – твердый сплав типа BK10 (K20/30) [ISO 513]. Условия обработки: режим «стекания» и «натекания», с использованием ВСЭ для формирования стабильного МАИ на протяжении всего цикла обработки; МАП – Полимам-Т 200/100 мкм с добавлением алмазной пасты зернистостью 20/14 + 3/2 мкм; скорость вращения фрезы вокруг кольцевой ванны и вокруг собственной оси – 300 об/мин, $B = 0,25$ Тл. MAO фрез выполняли в условиях их вращения вокруг собственной оси в направлении на РК по часовой стрелке. Угол базирования фрезы относительно плоскости кольцевой ванны составлял 40° , а ВСЭ – $35^\circ - 45^\circ$.

Характер изменения радиусов округления РК на цилиндрической части фрезы, в зависимости от времени обработки представлены на рис. 2.40.

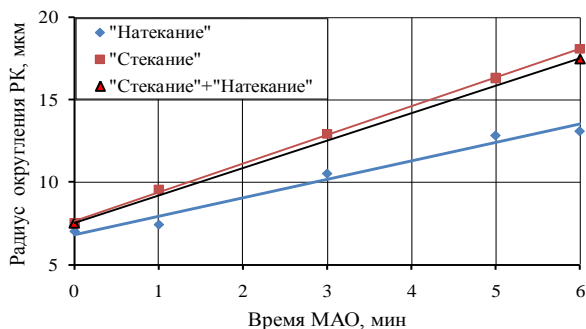


Рис. 2.40. Изменение величин радиусов округления РК на цилиндрической части фрез, в зависимости от времени MAO

Показано, что при использовании ВСЭ при MAO концевых фрез реализуется равномерная обработка и округления РК на цилиндрической части по всей рабочей длине фрезы. Установлено, что с увеличением продолжительности процесса MAO характер изменения величины радиусов округления РК на цилиндрической части происходит по линейному закону, что свидетельствует о высокой эффективности использования ВСЭ.

Скорость увеличения величины радиуса округления РК при MAO в режиме «стекания» составляет 1,74 мкм/мин, в режиме «натекания» на рабочие поверхности – 1,12 мкм/мин, а при режиме «стекания» 4 мин + «натекание» 2 мин – 1,66 мкм/мин. Важно отметить, что при MAO в режиме «натекания» через 3 мин обработки на задних торцевых поверхностях фрез следов от предварительной обработки не наблюдается, в то время как при MAO в режиме «стекания» они не удаляются (рис. 2.41). Это объясняется тем фактом, что торец фрезы в указанных условиях в течение всего цикла обработки находится в малоактивных «теневой зоне» – зоне, где имеет место недостаточный прижим МАП к обрабатываемым поверхностям, то есть не выполняется одно из условий, необходимое для реализации эффективного процесса MAO.

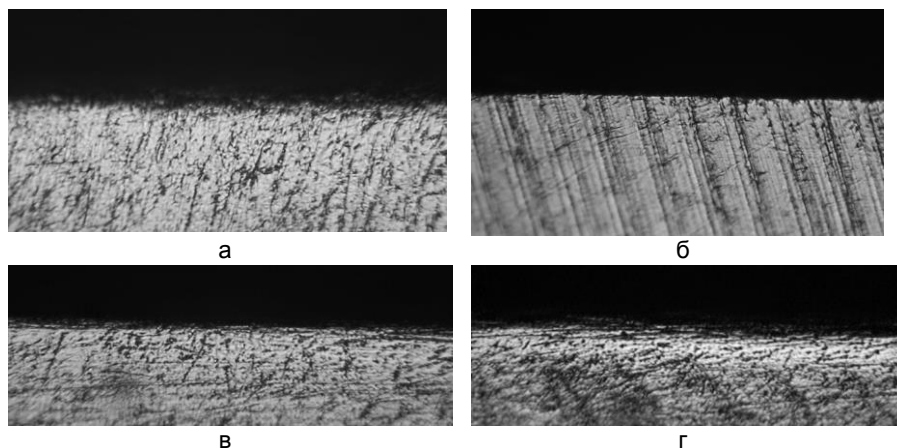


Рис. 2.41. Внешний вид РК фрез после MAO:
на торцевой части а – режим «натекание»; б – режим «стекание»;
на цилиндрической части в – режим «натекание»; г – режим
«стекание» x300

Для обеспечения равномерности обработки всех рабочих поверхностей фрезы как на цилиндрических, так и на торцевых участках, с учетом полученных данных о кинетике процесса обработки и притупления РК в режимах «стекания» и «натекания» по закону аддитивности было рассчитано оптимальное технологическое время обработки в режиме «стекания» и «натекания» в технологическом цикле процесса MAO фрез. Экспериментальная проверка результатов расчетов показала, что обеспечивается равномерная обработки всех рабочих поверхностей фрезы, как на торцевой части, так и на цилиндрической с формированием радиусов округления РК величиной 18 – 20 мкм при исходном – 7 – 7,5 мкм и равномерной шероховатости, которая составила $Ra = 0,05 - 0,08$ мкм. При этом с РК полностью удалены и располированы микровырывы материала и микросколы, сформированные в процессе заточки инструмента на операции шлифования. Шероховатость рабочих поверхностей после MAO снижается с величины $Ra 0,32-0,34$ мкм до 0,2 мкм.

Для подтверждения эффективности использования ВСЭ в процессе MAO осевого и концевго инструмента, полученные результаты сравнивали с результатами обработки фрез в идентичных условиях, но без ВСЭ. Внешний вид обработанных поверхностей фрезы представлен на рис. 2.42.

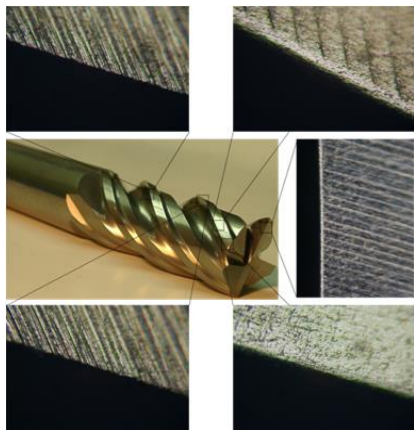


Рис. 2.42. Внешний вид обработанных фрез и отдельных ее рабочих элементов без использования ВСЭ в процессе MAO (x130)

Показано, что после 5 мин MAO обеспечивается качественная обработка РК вблизи торцевой части фрез. На расстоянии 5 мм от торца фрезы процесс MAO «затухает» и в более отдаленных от торца зонах прекращается, что связано с особенностями

переформирования МАИ и вытеснением основной массы порошка в нижнюю часть рабочей зоны. В указанной области формируется повышенная плотность МАИ, он становится малоподвижным и не выполняется его активное перемешивание в процессе МАО. При этом в верхней и средней части рабочей зоны плотность МАИ становится недостаточной для проведения эффективной обработки.

Испытания фрез на стойкость выполняли на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ – МАНО МН 600 Е при фрезеровании стали 38ХМ без использования СОТС. Условия фрезерования: скорость резания – 50 м/мин, подача на зуб – 0,072 мм/зуб, подача – 382 мм/мин, глубина фрезерования – 12 мм, ширина фрезерования – 6 мм. На рис. 2.43 изображены кривые износа, полученные при экспериментальных исследованиях. Критерием была величина износа по задней поверхности 0,3 мм [11].

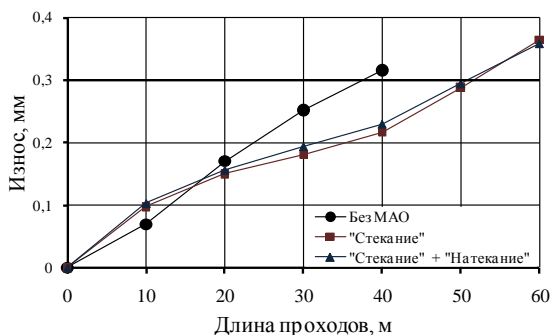


Рис. 2.43. Кривые износа задней поверхности твердосплавных концевых фрез Ø12 мм

Установлено, что стойкость фрез после МАО на 30 – 35% больше, чем у необработанных. При данных режимах резания фрезы без МАО изнашиваются с постоянной скоростью, а процесс износа сопровождается значительными вырывами и скалыванием РК. А кривые износа для обработанных фрез имеют классический вид, при этом скалывания на РК или совсем отсутствуют, либо имеют гораздо меньшую величину. Использование при МАО ВСЭ позволило обеспечить равномерную обработку по всей длине рабочей части, о чем свидетельствует равномерное уменьшение шероховатости вдоль оси фрезы. Стойкость РИ в значительной степени зависит именно от величины радиуса округления РК, так как для фрез обработанных при различных условиях, но с одинаковой величиной радиусов, стойкость практически одинакова.

2.8 Влияние условий магнитно-абразивной обработки на показатели качества метчиков из быстрорежущей стали

В предыдущих исследованиях было показано, что условия формирования ферроабразивной среды со стабильными свойствами зависит от геометрических и микрогеометрических характеристик МАП. Необходимо отметить, что ранее выполненные исследования процесса MAO лопаток ГТД порошками с округлыми и осколочными частицами показали, что возможно при финишной обработке выполнять или преимущественное полирование, или упрочнение поверхностного слоя изделий [16]. Отдельные результаты по применению МАП с различной формой частиц для MAO сверл и анализ условий контактного взаимодействия зерен с обрабатываемыми поверхностями приведены в [20, 50]. Но приведенные результаты ограничивались или расчетами, или исключительно качественными результатами, подтверждались наличием пластического деформирования поверхностного слоя материала, или опосредованными данным – по изменению степени наклепа поверхностного слоя изделий. Подтверждение полученных данных и условий использования различных типов МАП было выполнено на примере MAO метчиков изготовленных из быстрорежущей стали.

Экспериментальные исследования проводили на метчик М10. MAO выполняли при следующих условиях: скорость движения вдоль оси кольцевой ванны $V = 2,5$ м/сек, вращения вокруг собственной оси $\omega = 350$ об/мин, $B = 0,25$ Тл, угол базирования $p = 45^\circ$, $q = 25^\circ$, режим «стекания» с использованием ВСЭ диаметром 10 мм, с углом базирования относительно плоскости кольцевой ванны 40° и режим «натекания» без использования ВСЭ. Для формирования МАИ в процессе MAO метчиков использовали МАП различных типов: Полимам-М зернистостью 400/315 мкм, Церамам – 630/400 мкм, Полимам-Т – 400/315 мкм, ПР Р6М5 – 200/100 мкм.

После MAO контролировали изменение параметра шероховатости Ra по задней и передней поверхностях метчиков. Результаты измерений приведены на рис. 2.44. Полученные результаты являются подтверждением предыдущих исследований по абразивной и полирующей способности МАП, которые имеют округлую и осколочную форму частиц с величиной параметра неравноосности k_f , приведенной в табл. 1.1 и значениями радиусов округления РК отдельных частиц (табл. 1.2, рис. 1.1, 1.2), которые используются для формирования МАИ. Как показано на рис 2.44 на передней поверхности метчиков изменение шероховатости

несущественно в связи с тем, что частицы порошка задерживаются в канавках. Полученные результаты являются прямым подтверждением того, что осколочная форма частиц имеет лучшую абразивную способность.

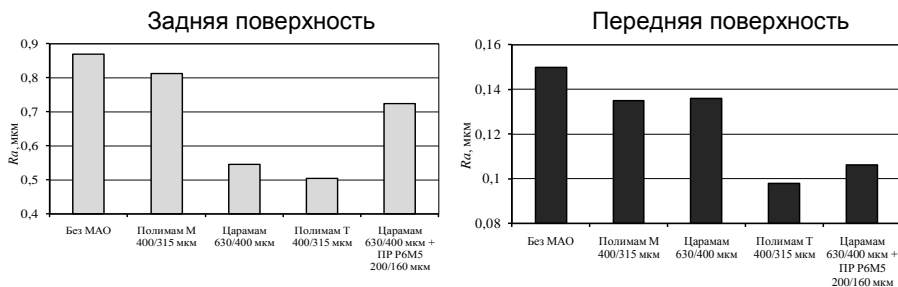


Рис. 2.44. Изменение шероховатости рабочих поверхностей метчиков после МАО с использованием различных типов МАП

Поверхностную твердость метчиков измеряли на задней поверхности. Результаты измерения после цикла МАО приведены на рис. 2.45.

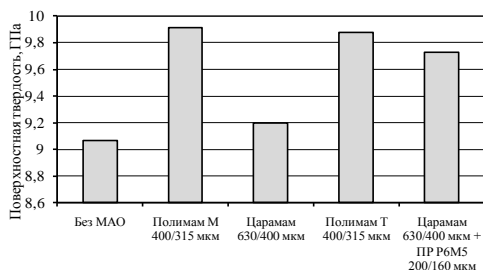


Рис. 2.45. Поверхностная твердость метчиков после проведения цикла МАО разными типами МАП

Показано, что после МАО округлыми типами порошков поверхностная твердость МАО увеличивается, что является подтверждением расчетов по определению условий контакта обрабатываемых поверхностей с МАИ [50, 80] с учетом реальных значений величины $r_{кз}$ частиц МАП (табл. 1.2) и не противоречат данным предыдущих исследований [19, 24, 39].

Результаты изменения величины радиусов округления РК рабочих элементов метчиков после цикла МАО различными типами МАП приведены на рис. 2.46. Положительное влияние процесса МАО осевого РИ на показатели качества является предпосылкой для обеспечения повышения эксплуатационной стойкости.

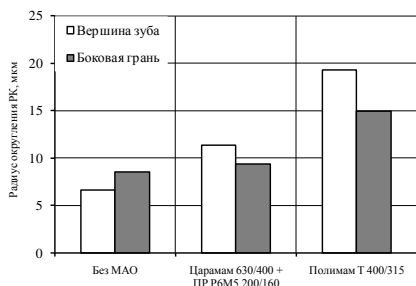


Рис. 2.46. Величины радиусов округления РК рабочих элементов метчиков после цикла MAO разными типами МАП

Полученные результаты исследований эксплуатационной стойкости метчиков в основном показывают количественный ее рост [3, 98] без указания динамики износа. В связи с этим было выполнено исследование эксплуатационных характеристик метчиков после цикла MAO различными типами МАП при нарезании метрической резьбы в предварительно подготовленной плите, изготовленной из стали 3 толщиной 10 мм при частоте вращения шпинделя 90 об/мин, скорость 2,826 м/мин. Результаты приведены на рис 2.47.

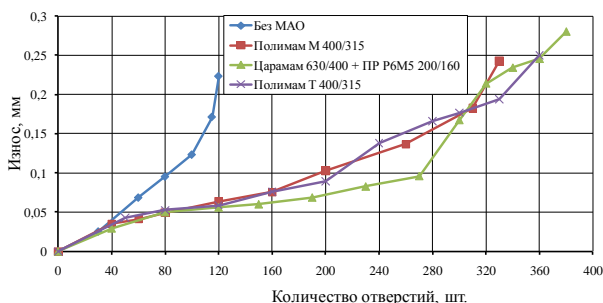


Рис. 2.47. Износ метчиков по задней поверхности в зависимости от количества нарезанных отверстий при $V = 2,826$ м/мин

Установлено, что процесс MAO метчиков в условиях формирования стабильного МАИ обеспечивает рост их стойкость при эксплуатации не менее чем в 2 – 2,5 раза. Указанный рост объясняется как улучшением микрогеометрии рабочих поверхностей, так и физико-механических свойств поверхностного слоя инструмента. Полученные результаты не противоречат результатам исследований других авторов и существенно расширяют объем информации в указанном направлении.

Раздел 3

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА МНОГОГРАННЫХ НЕПЕРЕТАЧИВАЕМЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ КОЛЬЦЕВОГО ТИПА

Метод МАО при соблюдении рациональных условий обработки обеспечивает формирование необходимых эксплуатационных характеристик многогранных неперетачиваемых твердосплавных пластин (МНТП), за счет повышения параметров их качества, к которым относятся изменение физико-механических свойств поверхностных слоев, снижение шероховатости рабочих поверхностей пластин, формирование рациональных радиусов округления их режущих кромок (РК) [3, 46, 67]. Формирование указанных параметров качества происходит в условиях МАО, при которых на переднюю и заднюю поверхности, на РК будут действовать заданные значения силы возникающие в процессе обработки, определяемые величиной тангенциальной и нормальной составляющими скорости взаимодействия МАИ с поверхностями пластин, и зависящие от параметров их базирования в рабочей зоне станка с большими рабочими зазорами кольцевого типа.

При реализации определенных условий обработки, возможно, обеспечить целенаправленное снижение шероховатости, повышение поверхностной твердости рабочих поверхностей, что способствует увеличению эксплуатационной стойкости твердосплавного инструмента [37, 69, 70]. Ранее было показано, что эффективность и качество обработки деталей при МАО в условиях больших магнитных зазоров зависит от реализации трех основных условий:

- наличия достаточного и равномерно распределенного давления МАИ на поверхности обрабатываемых деталей (в больших рабочих зазорах – наличие достаточной нормальной составляющей скорости обработки);

- наличие соответствующей тангенциальной составляющей скорости обработки, необходимой для обеспечения равномерного обтекания всех обрабатываемых поверхностей;

- эффективное перемешивание зерен МАИ с целью постоянного обновления режущих кромок и удаления микростружки от обрабатываемых поверхностей [65] с одновременным восстановлением рабочей формы МАИ. Наиболее существенным является величина и соотношение соответствующих составляющих скоростей относительного перемещения каждого отдельного участка

поверхностей изделий относительно квазинеподвижного МАИ, который формируется в рабочих зонах станков.

Для станков, имеющих большие рабочие магнитные зазоры, в которых применяются относительно слабые магнитные поля воспроизведение указанных условий может быть обеспечено за счет усложнения траектории движения деталей при их определенном пространственном расположении в рабочих зонах.

3.1 Влияние кинематики и динамики процесса MAO на качество МНТП

Предварительно было проведено сравнение эффективности процесса MAO МНТП в различных условиях, реализуемых на оборудовании, которое обеспечивает разнообразную кинематику и динамику процесса перемещения обрабатываемых деталей в рабочих зонах при обработке [73].

Экспериментальные исследования, выполненные на станках трех типов, на которых обеспечивается разная кинематика и динамика процесса перемещения обрабатываемых деталей в рабочих зонах при обработке:

- на магнитно-абразивном роторном станке MAPC-4 с вертикальным расположением шпинделей, в которых на оправках закрепляют МНТП (рис. 3.1), которые осуществляют медленное движение вдоль рабочей зоны и вращаются с большой скоростью вокруг собственной оси;

- на установке типа кольцевая ванная с шестишпиндельным модулем, который обеспечивает изменение соотношения линейной скорости движения вдоль кольцевой ванны к линейной скорости движения вдоль оси деталей в диапазоне от 1:20 до 1:2. Для пластин целесообразно использовать соотношение 1:10 [21, 120] (рис. 3.2);

- на экспериментальной установке, аналогичной кольцевой ванне со специально разработанной технологической наладкой, что обеспечивает: возможность позиционирования и дальнейшего перемещения обрабатываемых изделий под разными углами в кольцевой рабочей зоне; возможность вращения деталей вокруг оси оправок, используемых для крепления МНТП; в разных направлениях с регулируемой угловой скоростью; возможность управляемого вращения головки станка с технологической наладкой вокруг оси кольцевой ванны. Данная установка является развитием и совершенствованием схемы роторной обработки, реализованной в предыдущих двух случаях (рис. 1.5).



Рис. 3.1. Рабочая зона станка MAPC

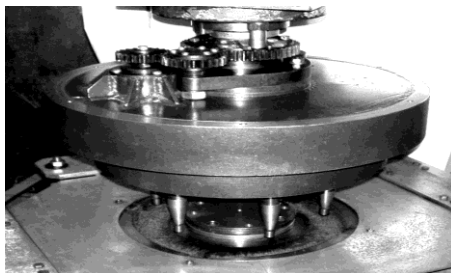


Рис. 3.2. Шестишпindelный рабочий модуль установки типа кольцевая ванна с вертикальным расположением оправок з МНТП

Исследования проводили на четырехгранных пластинах типа CNMG 120412, SNMG 12040822 и SNUM 120408, изготовленных из двух и трехкарбидных твердых сплавов типа T15K6 и TT10K8 фирмами KENNAMETAL, MITSUBISHI и ОАО «Кировградский завод твердых сплавов». В исходном состоянии шероховатость рабочих поверхностей необработанных пластин фирм KENNAMETAL и MITSUBISHI составляла 0,7 – 0,9 мкм, радиусы округления РК составили 30 – 38 мкм, на них не было микросколов. Шероховатость рабочих поверхностей кировградских пластин составляла 0,8 – 0,9 мкм, опорной поверхности – 0,33 – 0,35 мкм, радиус округления РК 35 – 45 мкм, на отдельных пластинах присутствуют микросколы и неправильная форма радиуса.

Первая группа пластин обрабатывалась на роторном станке MAPC-4 при скорости вращения вертикально расположенных шпинделей с закрепленными в них на оправках МНТП (рис. 3.1) 2,8 м/с и скорости перемещения вращающихся деталей через рабочую зону станка 0,006 м/с. Время MAO составляло 120 с. Обработку выполняли с реверсивным вращением. Величина магнитной индукции в рабочих зонах (без МАП) составляла 0,28 Тл. Для обработки использовали порошок Ферромап с размером зерен 200/100 мкм с добавлением 5% алмазной пасты АСМ 3/2 мкм [98].

Вторая группа пластин обрабатывалась на установке типа кольцевая ванная с шестишпindelным модулем. MAO выполняли порошком Ферромап с размером зерен 630/400 мкм и 200/100 мкм с добавлением 5% алмазной пасты АСМ 3/2 мкм, при величине магнитной индукции 0,3 Тл, скорости обработки 2 и 3 м/с, время обработки 120 с. Из них 60 с обработка выполнялось при вращении

шпиндельного модуля по часовой стрелке и 60 с – против часовой стрелки.

Третья группа пластин обрабатывалась на экспериментальной магнитно-абразивной установке типа кольцевая ванная при скорости MAO, которая варьировалась в диапазоне 2 – 2,5 м/с, время обработки составляло 120 и 360 с с реверсивным вращением, магнитная индукция в рабочей зоне 0,25 Тл. Угол наклона оправок, на которых устанавливали МНТП, по отношению к оси кольцевой ванны менялся в диапазоне от 0° до 45°. Вращение оправки вокруг собственной оси осуществлялось при угловых скоростях 200, 500 и 600 об/мин. Причем направления вращения или совпадало, или было противоположным направлению вращения вокруг оси кольцевой ванны.

Исследовали влияние углов базирования МНТП в рабочих зонах, режимов MAO на изменение величины шероховатости на задней, передней и опорных поверхностях, характер изменения величины радиусов округления РК при вершине и на гранях пластин, характер изменения величины опорной поверхности микропрофиля.

На первом этапе исследования выполнено сравнение кинематики процесса MAO, которая реализуется на разных станках при вертикальном расположении шпиндельных оправок с установленными в них МНТП, изготовленных кировградским заводом твердых сплавов. Установлено, что величина Ra как на задней, так и на передней поверхностях пластин за время обработки 120 с с реверсом вращения достигает величины 0,6 – 0,63 мкм на передней и задней поверхностях и практически не зависит от состава применяемого порошкового МАИ. При этом следует отметить, что при обработке на станке MAPC получено худшие результаты, подтверждающие результаты работ [71, 120]. Шероховатость опорных поверхностей после MAO достигла величины 0,2 – 0,22 мкм. Зависимости изменения величины опорной поверхности от относительной высоты микронеровностей необработанных и обработанных МНТП на разных установках представлено на рис. 3.3.

Такая низкая эффективность MAO объясняется исходным качеством пластин. Анализ изменения величины опорной поверхности микропрофиля в зависимости от величины уровня микронеровностей (рис. 3.3) показал, что при MAO на станке MAPC имеет место некоторое снижение высоты микровыступов в области вершин на передней поверхности МНТП, что может быть объяснено преобладанием при обработке тангенциальных составляющих сил резания при MAO и очень незначительными нормальными составляющими сил. На задней поверхности преимущественно

обрабатывается зона у вершин пластины, что связано с особенностями кинематики процесса МАО [120], то есть проявляется неравномерная обработка деталей.

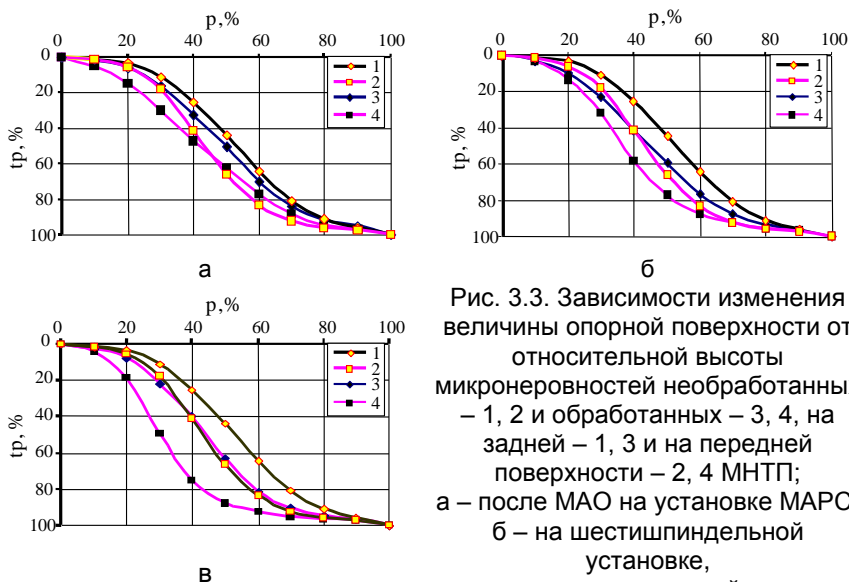


Рис. 3.3. Зависимости изменения величины опорной поверхности от относительной высоты микронеровностей необработанных – 1, 2 и обработанных – 3, 4, на задней – 1, 3 и на передней поверхности – 2, 4 МНТП; а – после МАО на установке МАРС, б – на шестишпиндельной установке, в – на экспериментальной установке

При обработке на станке, оснащённом шестишпиндельной головкой, обеспечивается равномерная обработка. Наилучшие результаты получены при использовании МАИ с добавлением алмазной пасты. Варьирование соотношениями угловых скоростей и направлений вращения деталей вокруг оси кольцевой рабочей зоны и вращения шпинделя с МНТП, реализуемой на экспериментальной установке показало, что при совпадении направлений вращения имеет место улучшение не только шероховатости (рис. 3.4), но и характера изменения опорной поверхности микропрофиля в зависимости от относительного уровня высоты микронеровностей. Происходит округление и удаления микровыступов, формируется сглаженный микрорельеф. При противоположном вращении характер изменения кривых величины опорной поверхности в зависимости от уровня высоты микронеровностей незначителен.

Анализ изменения радиусов округления РК МНТП после МАО в различных условиях позволил установить, что после МАО на станке МАРС при вершине на уголках пластин формируется радиус округления

РК с величиной 72 – 75 мкм, а на гранях пластин происходит только незначительное его увеличение на 5 – 7 мкм.

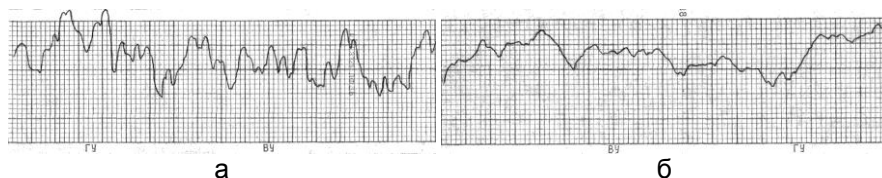


Рис. 3.4. Профилограммы задней поверхности МНТП а – до МАО, б – после МАО при вертикальном расположении шпинделей на экспериментальной установке, ГУ 50000, ВУ 500

Обработка на шестишпиндельной установке приводит к увеличению величины радиуса округления РК до 57 – 62 мкм при вершине и до – 40 – 50 мкм на грани. Минимальное притупление имеет место при обработке на экспериментальной установке и не превышает величины радиуса 5 – 12 мкм как при вершине, так и на гранях при условии совпадение направлений вращения головки и шпинделя.

Второй этап исследований был выполнен на пластинах CNMG 120412 при совпадении направлений вращения рабочей головки и шпинделя, с установленными МНТП, на экспериментальной установке. Определяли влияние угла наклона пластин в диапазоне 0° – 40° по отношению к плоскости кольцевой ванны на изменение величины шероховатости, характер изменения опорной поверхности микропрофилю и радиуса округления РК. Полученные результаты представлены в виде гистограмм на рис. 3.5 и 3.6.

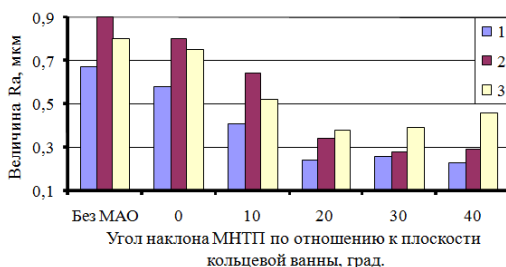


Рис. 3.5. Гистограммы изменения величины шероховатости поверхностей МНТП при разных углах установки в рабочей зоне: 1 – на задней, 2 – на опорной, 3 – на передней поверхностях

МАО выполняли порошком Ферромап с размером зерен 400/315 мкм с добавлением алмазной пасты зернистостью 3/2 мкм, при величине магнитной индукции в рабочей зоне 0,25 Тл. Скорость вращения вокруг оси кольцевой ванны 2,3 м/с (230 об/мин), а шпинделя с МНТП 490 об/мин. Установлено, что наилучшие результаты как по шероховатости рабочих поверхностей МНТП, так и по величине округления РК обеспечиваются при угле наклона 30°.

Полученные данные, особенно по округлению РК, являются следствием реализации эффектов, описанных в [81, 114] – эффектов по обтеканию порошковым МАИ обрабатываемых поверхностей сложной геометрической формы, связанных с его реологическими свойствами, условиями формирования и структурирования, особенностями контактного взаимодействия с отдельными элементами МНТП, образованиями в МАИ при МАО квазистабильных, веретенообразных порошковых образований.

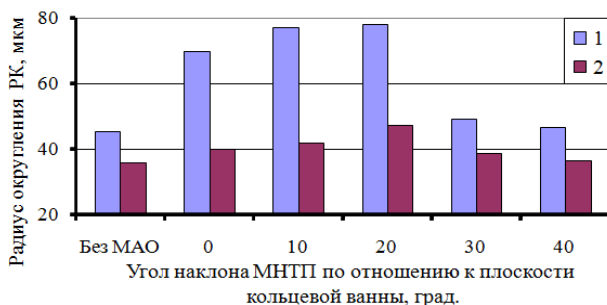


Рис. 3.6. Гистограммы изменения радиуса округления РК МНТП при разных углах установки в рабочей зоне: 1 – при вершине, 2 – на грани

Характер изменения величины опорных поверхностей в зависимости от относительной величины высоты микронеровностей показал, что именно при углах базирования пластин 20° – 30° по отношению к плоскости кольцевой ванны имеет место рациональное соотношение нормальных и тангенциальных составляющих сил, необходимых для обеспечения эффективного, равномерного, объемного полирования рабочих поверхностей МНТП (рис. 3.7).

Варьирование скоростью вращения деталей (МНТП SNMG 12040822) вокруг оси кольцевой ванны в диапазоне скоростей 150 – 350 об/мин и величиной магнитной индукции от 0,15 до 0,3 Тл при углах базирования МНТП в диапазоне 20° – 30° показали, что минимальная шероховатость величиной 0,17 – 0,18 мкм на рабочих

поверхностях МНТП обеспечивается при использовании МАИ с размером частиц 400/315 мкм с добавлением алмазной пасты, при времени обработки 120 с, магнитной индукции 0,15 – 0,2 Тл, при скорости MAO 2,5 м/с. В указанных условиях MAO формируется достаточно жесткий и подвижный МАИ, который позволяет реализовать наиболее благоприятный процесс для обеспечения условий нивелирования элементов МАИ относительно обрабатываемых поверхностей.

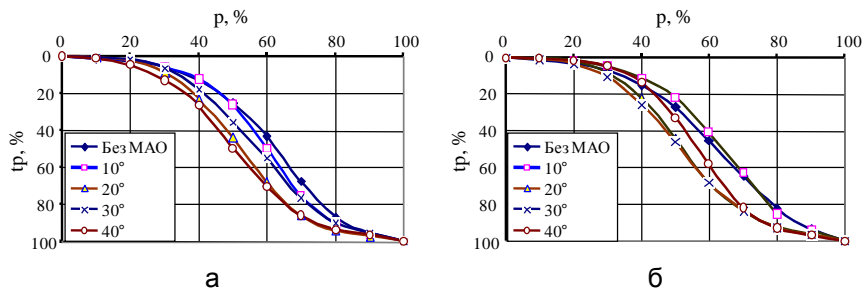


Рис. 3.7. Зависимости изменения величины опорной поверхности от относительной высоты микронеровностей для МНТП, установленных под разными углами к плоскости кольцевой ванны: а – на задней, б – на передней поверхностях

Отметим, что после MAO пластин порошком с размером зерен 400/315 мкм с добавлением алмазной пасты формируется меньшая шероховатость по сравнению с обработкой порошками с зернистостью 200/100 мкм. Это свидетельствует о том, что зерна МАП в процессе MAO исполняют роль своеобразного эластичного микропритира. А при одинаковой величине магнитной индукции в рабочей зоне силы прижима обрабатывающих элементов МАИ с большими размерами частиц к поверхности МНТП будут выше, по причине их большей намагниченности и инерционности. Что и обеспечивает повышение эффективности процесса обработки.

Анализ полученных результатов показал, что MAO МНТП целесообразно выполнять при наклонном расположении шпинделя с обрабатываемой деталью относительно плоскости рабочей зоны. Исследование процесса MAO МНТП на установках позволяющих выполнять обработку при наклонном расположении оправки [73 – 75] показали, что наиболее эффективно процесс реализуется при условиях, когда угол наклона плоскости пластины по отношению к плоскости кольцевой ванны составляет 20° – 30° . При таких условиях

базирования в процессе обработки формируется микропрофиль рабочих поверхностей пластин с располированными вершинами с $Ra < 0,2$ мкм, и незначительным радиусом округления РК – 5 – 12 мкм.

Предварительные расчеты, приведенные в [71] свидетельствуют о возможности управляемого воздействия МАИ с обрабатываемой поверхностью МНТП путем реализации разного соотношения скоростей вращения деталей вокруг оси кольцевой ванны и осей шпинделей, которые могут быть наклонены как относительно плоскости кольцевой ванны, так и относительно плоскости параллельной оси кольцевой ванны, касательной к окружности вращения вокруг нее. В [120] установлены оптимальные условия процесса MAO МНТП необходимые для достижения, как определенного упрочнения поверхностного слоя, так и получения шероховатости рабочих поверхностей на уровне $Ra 0,2 - 0,3$ мкм. Показано, что обеспечение управляемого процесса MAO может реализовываться за счет соблюдения определенных динамических факторов при обработке, которые определяются нормальной и тангенциальной составляющими скоростей относительного перемещения рабочих элементов МНТП в магнитных зазорах станков. Для этого необходимо определение углов базирования МНТП в рабочих зонах с целью дальнейшего возможного управления в широких пределах величинами нормальной и тангенциальной составляющих скорости процесса MAO и воспроизведения преимущественных условий упрочнения или полирования и формирования необходимой микрогеометрии рабочих поверхностей инструмента, величины и формы округления РК.

3.2 Методика расчета кинематических параметров MAO МНТП в условиях больших магнитных зазоров кольцевого типа

При обработке в больших рабочих зазорах технически сложно обеспечить большие значений напряженности магнитного поля. В таких условиях интенсивность обработки зависит от составляющих скоростей взаимодействия МАИ с обрабатываемыми поверхностями, поскольку именно суммарная скорость взаимодействия групп зерен порошка [81] с участками поверхностей характеризует интенсивность обработки и определяется кинетической энергией.

Для энергетической характеристики процесса MAO по составляющим скоростям взаимодействия МАИ и обрабатываемых элементов МНТП можно использовать величину интегральной интенсивности обработки. Предварительно рассчитав интегральную интенсивность обработки по составляющим скорости возможно

прогнозировать преобладающий характер обработки. Поэтому, для обеспечения эффективной обработки необходимо управлять соотношением тангенциальных и нормальных составляющих скоростей взаимодействия МАИ с поверхностями пластин, которые зависят от параметров базирования пластин в рабочих зонах станков с кольцевым расположением и большой величиной магнитных зазоров [65].

Исследование процесса MAO МНТП выполняли для установки типа кольцевая ванная, приведенной в [73, 74, 120]. Схема условий базирования МНТП для приведенной установки представлена на рис. 3.8. Данная схема позволяет выполнить расчеты для любой фасонной поверхности, в том числе и для МНТП.

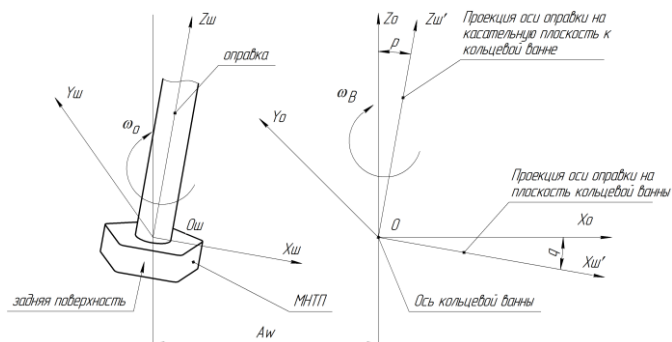


Рис. 3.8. Расчетная схема MAO МНТП на установке типа кольцевая ванна

Для исследования процесса MAO в каждой отдельной точке МНТП в заданный момент времени вводим следующие системы координат:

- система координат $X_0Y_0Z_0$ связана с кольцевой ванной, и вращается со скоростью ω_B вокруг оси Z_0 ;
- система координат $X_{ш}Y_{ш}Z_{ш}$ связана с оправкой. Ось $Z_{ш}$ является осью вращения оправки. Данная система координат повернута вокруг оси Y_0 на угол ρ , а затем вокруг вертикальной оси на угол q , что позволяет наклонять обрабатываемую деталь в произвольном направлении. Кроме того данная система координат смещена относительно начала координат системы $X_0Y_0Z_0$ на величину $A_{ш}$;
- система координат $X_{ш'}Y_{ш'}Z_{ш'}$ связана с обрабатываемой МНТП и вращается со скоростью ω_0 вокруг оси $Z_{ш}$.

На рис. 3.8 обозначено: ρ – угол наклона оправки, который измеряется в касательной плоскости к кольцевой ванне, q – угол

поворота оправки вокруг вертикальной оси, измеренный между касательной плоскостью к кольцевой ванны и проекцией оси оправки на плоскость кольцевой ванны.

Координаты точки на поверхности МНТП – ptd и направление вектора нормали к поверхности – Nd в данной точке определяются как:

$$ptd = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$Nd = \begin{pmatrix} Nx \\ Ny \\ Nz \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Координаты заданной точки pto и направление вектора нормали No в системе координат оправки при повороте пластины вокруг собственной оси можно описать:

$$rz(t) = \begin{pmatrix} \cos(t) & -\sin(t) & 0 \\ \sin(t) & \cos(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$pto = rz(t) \cdot ptd \quad (3.4)$$

$$No = rz(t) \cdot Nd \quad (3.5)$$

где t – угол поворота МНТП вокруг собственной оси, $rz(t)$ – матрица поворота вектора на угол t .

Координаты заданной точки ptB и направление вектора нормали NB в системе координат кольцевой ванны при наклоне оправки на угол p и повороте на угол q .

$$rx(p) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(p) & -\sin(p) \\ 0 & \sin(p) & \cos(p) \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$rz(q) = \begin{pmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & 0 \\ \sin(q) & \cos(q) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

$$ptB = rz(q) \cdot rx(p) \cdot pto + Aw \quad (3.8)$$

$$NB = rz(q) \cdot rx(p) \cdot No \quad (3.9)$$

где $rx(p)$ – матрица поворота вектора на угол p , $ry(q)$ – матрица поворота вектора на угол q , Aw – радиус кольцевой ванны.

Линейная скорость движения точки вокруг оси кольцевой ванны VB :

$$RB = \begin{bmatrix} (ptB)_0 \\ (ptB)_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$VB = \omega_B \times RB \quad (3.11)$$

где RB – расстояние от заданной точки на рабочей поверхности МНТП оси Z_0 кольцевой ванны.

Линейная скорость движения точки вокруг оси оправки Vo :

$$Ro = \begin{bmatrix} (pto)_0 \\ (pto)_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$Vo = rz(q) \cdot rx(p) \cdot (\omega_o \times Ro) \quad (3.13)$$

где Ro – расстояние от точки до оси Z оправки.

Абсолютная скорость движения точки V :

$$V = VB + Vo \quad (3.14)$$

Угол β между вектором скорости и вектором нормали к поверхности в данной точке:

$$\beta = \arccos \left(\frac{V \cdot NB}{|V| \cdot |NB|} \right) \quad (3.15)$$

Тогда величины нормальной Vn и тангенциальной Vt составляющих вектора скорости относительно обрабатываемой поверхности будут равны:

$$Vn = |V| \cdot \cos(\beta) \quad (3.16)$$

$$Vt = |V| \cdot \sin(\beta) \quad (3.17)$$

В зависимости от того, как направлены вектор скорости и вектор нормали относительно обрабатываемой поверхности возможен различный характер ее взаимодействия с МАИ и, соответственно, в определенный момент времени в определенной точке может

происходить преимущественно процесс полирования или упрочнения поверхностного слоя [75], или поверхность может вообще не обрабатываться, то есть поверхность будет располагаться в «теневой зоне». Для определения характера взаимодействия МАИ с обрабатываемыми элементами необходимо определить интегральную интенсивность обработки по кинетическим параметрам.

Интегральные интенсивности обработки IV_n и IV_t характеризуют энергетический аспект взаимодействия зерен и групп зерен МАИ с обрабатываемыми поверхностями по величинам нормальной и тангенциальной составляющей скорости обработки. Они определяются, как сумма скоростей по определенной составляющей скорости взаимодействия МАИ и определенной точки обрабатываемой поверхности за полный оборот пластины вокруг собственной оси. Необходимо учитывать, что определенную часть оборота рассматриваемая точка находится в «теневой зоне», то есть она не взаимодействует с МАИ, это имеет место тогда, когда угол между вектором нормали к поверхности, на которой лежит эта точка, и между вектором скорости больше 90° . Интегральная интенсивность обработки по тангенциальной и нормальной составляющими скорости определяется как:

$$IV_t = \int_0^{2\pi} V_t(t) \cdot akt(\beta(t)) dt \quad (3.18)$$

$$IV_n = \int_0^{2\pi} V_n(t) \cdot akt(\beta(t)) dt \quad (3.19)$$

Определив условия взаимодействия определенных поверхностей и элементов обрабатываемых деталей при МАО в больших рабочих зазорах кольцевого типа, можно прогнозировать характер обработки, то есть оценивать условия, при которых будет происходить преимущественное полирование или упрочнение поверхностного слоя рассматриваемых поверхностей.

3.3 Определение составляющих скоростей взаимодействия рабочих элементов МНТП с МАИ при МАО в условиях больших магнитных зазоров кольцевого типа

Выполнено математическое моделирование условий обработки МНТП при МАО в условиях больших магнитных зазоров кольцевого типа с диаметром рабочей зоны равным 200 мм. Расчеты проведены на примере пластин типа PNMM. Теоретические расчеты показали,

что при изменении угловой скорости вращения МНТП ω_O в диапазоне 0 – 400 об/мин вокруг оси оправки и изменении угловой скорости вращения оправки $\omega_B = 0$ – 500 об/мин вокруг оси кольцевой ванны нормальная и тангенциальная составляющие скорости при увеличении угловых скоростей изменяются равномерно. Расчеты выполнены для углов $\rho = 10^\circ, 24^\circ, 42^\circ$, при которых возможна реализация разнообразных условий взаимодействия МАИ и обрабатываемых поверхностей. Именно данные углы рекомендованы для МАО МНТП в предыдущих исследованиях. Расчет изменения нормальных и тангенциальных составляющих скоростей на задней поверхности МНТП при изменении угла наклона оправки выполнено для нескольких вариантов соотношения угловых скоростей ω_O и ω_B , а именно для: $\omega_O = 10$ об/мин, $\omega_B = 400$ об/мин; $\omega_O = 300$ об/мин, $\omega_B = 300$ об/мин; $\omega_O = 400$ об/мин, $\omega_B = 10$ об/мин. Результаты расчетов (рис. 3.9) показали, что для всех соотношений угловых скоростей наблюдается максимум нормальных и тангенциальных составляющих скорости в диапазоне углов наклона оправки $\rho = 20^\circ - 30^\circ$, что подтверждает выводы сделаны ранее. При этих углах наклона оправки на обрабатываемых поверхностях МНТП реализуются условия, при которых происходит активный процесс МАО [65].

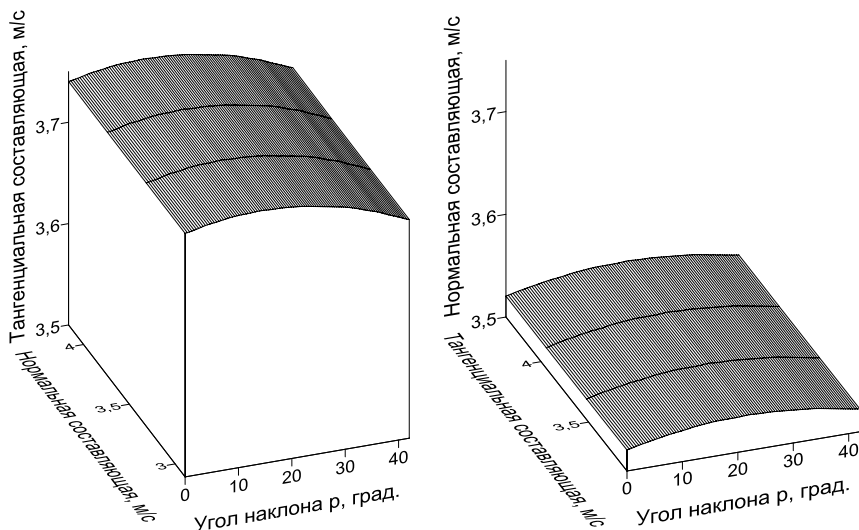


Рис. 3.9. Изменение нормальной и тангенциальной составляющих скорости на задней поверхности при изменении угла наклона оправки ρ для $\omega_O = 300$ об/мин, $\omega_B = 300$ об/мин

Изменение нормальных и тангенциальных составляющих скорости на задней поверхности МНТП для различных углов наклона оправки и при различных соотношениях угловых скоростей вращения имеет плоскостной характер. На величину нормальных и тангенциальных составляющих скорости наибольшее влияние оказывает угловая скорость вращения оправки вокруг оси кольцевой ванны ω_B . При преобладании ω_O над ω_B составляющие скорости будут небольшими (для $\omega_O = 700$ об/мин при отношении $\omega_O/\omega_B = 25/1$ максимальная нормальная составляющая скорости будет 0,753 м/с, тангенциальная – 1,017 м/с), причем они будут расти с ростом ω_B . И наоборот, при преобладании ω_B над ω_O скорости будут большими, так для $\omega_B = 500$ об/мин при отношении $\omega_O/\omega_B = 1/100$ максимальная нормальная скорость равна 5,56 м/с, тангенциальная – 5,7 м/с. При этом они мало зависят от ω_O . Так, например, при одинаковой угловой скорости ω_B и разных углах наклона оправки, но при соотношениях $\omega_O/\omega_B = 1/100$ и $\omega_O/\omega_B = 1/50$ величины этих скоростей будут отличаться лишь на сотые доли процента.

При изменении угла поворота оправки вокруг собственной оси на $q = 0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ$ и угла наклона оправки в диапазоне $p = 0 - 60^\circ$ нормальная и тангенциальная составляющие скорости уменьшаются при увеличении угла наклона оправки p (рис. 3.10).

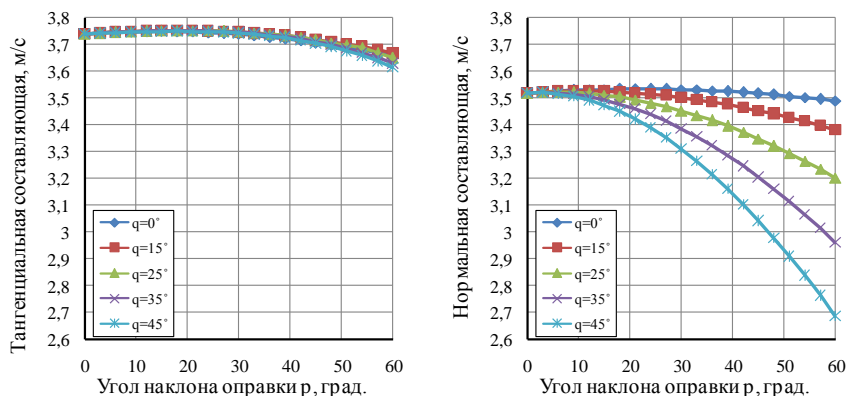


Рис. 3.10. Изменение нормальной и тангенциальной составляющих скорости при изменении угла наклона оправки p в диапазоне от 0° до 60° и в зависимости от величины угла поворота оправки вокруг собственной оси q для $\omega_O = 300$ об/мин, $\omega_B = 300$ об/мин

Показано, что при увеличении углов q и p нормальная составляющая скорости уменьшается, а тангенциальная почти не меняется. Причем уменьшение нормальной составляющей будет происходить тем быстрее, чем больше будет угол поворота оправки вокруг собственной оси q . При изменении угла наклона оправки p и угла поворота оправки вокруг собственной оси q , для тангенциальной составляющей наблюдается максимум при $p = 20^\circ - 30^\circ$. Нормальная составляющая уменьшается с увеличением угла наклона оправки p (рис. 3.11).

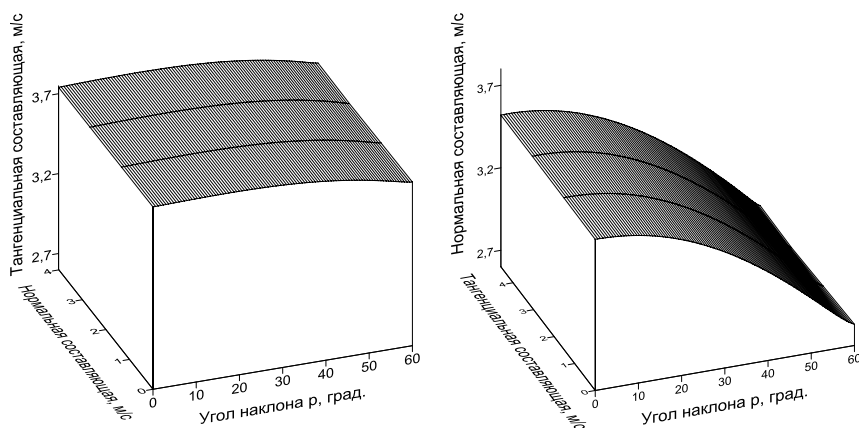


Рис. 3.11. Изменение нормальной и тангенциальной составляющих скорости при изменении угла поворота оправки q и в зависимости от угла наклона оправки p для $q = 45^\circ$, $p = 0 - 60^\circ$, $\omega_O = 300$ об/мин, $\omega_B = 300$ об/мин

3.4 Интегральная оценка интенсивности обработки вдоль режущей кромки МНТП при МАО в условиях больших магнитных зазоров кольцевого типа

Анализ значений величин интегральных интенсивностей обработки вдоль РК выполняли для условий обработки в режиме «натекания» и «натекания с оправки», когда МАИ «натекает» на обрабатываемые поверхности со стороны оправки (рис. 3.12).

Интегральные оценки интенсивности обработки на передней и задней поверхностях по всей длине РК выполняли для пластин типа SNMA без округления на углах. Расчеты выполняли для таких параметров базирования пластин в рабочей зоне станка: $p = 45^\circ, 10^\circ$, $q = 0^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 90^\circ$. Данные параметры были выбраны из тех

соображений, чтобы обеспечить возможность создания различных условий взаимодействия МАИ с передней и задней поверхностями пластин и обеспечить разностороннее влияние порошка на свойства и микрогеометрию поверхностного слоя.

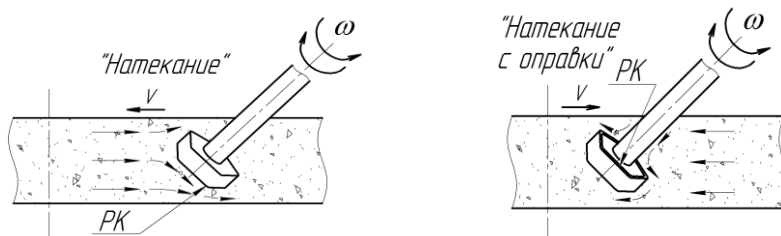
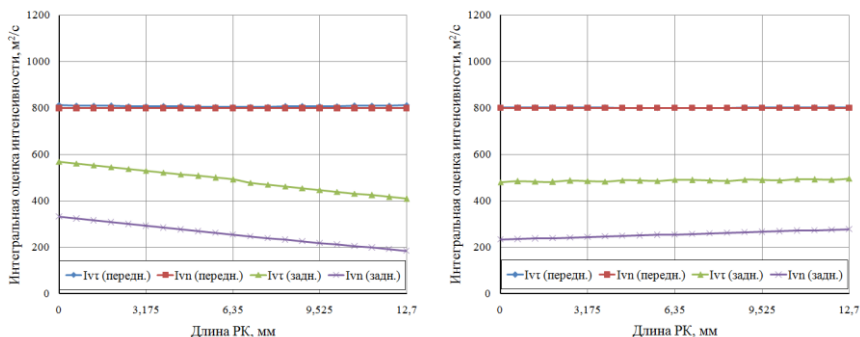


Рис. 3.12. Схема обработки МНТП

Для расчетов принято, что скорость движения оправки с пластиной вдоль рабочей зоны равна 3 м/с (движение против часовой стрелки и по часовой стрелке), скорость вращения оправки вокруг собственной оси – 400 об/мин (вращение с реверсом). Результаты расчетов представлены на рис. 3.13.

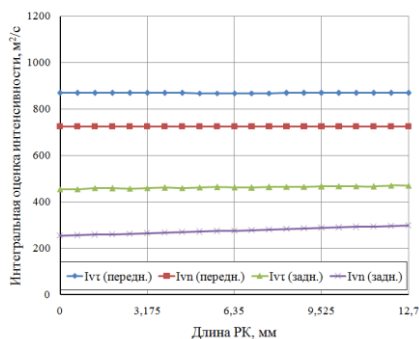
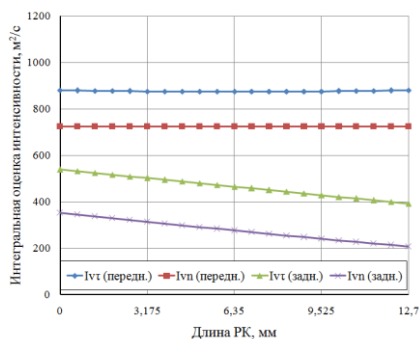


$\alpha - \rho = 45^\circ$; $q = 0^\circ$ «натекание с оправки»

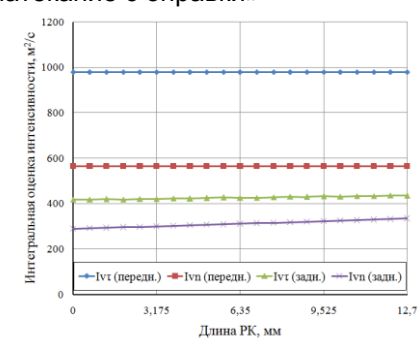
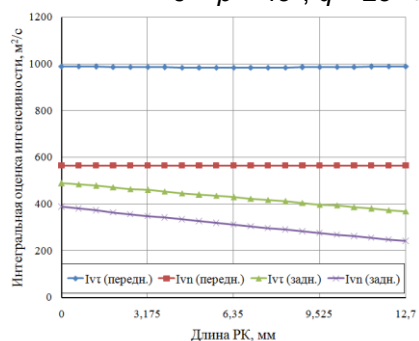
Вращение оправки вокруг
собственной оси против часовой
стрелки

Вращение оправки вокруг
собственной оси по часовой
стрелке

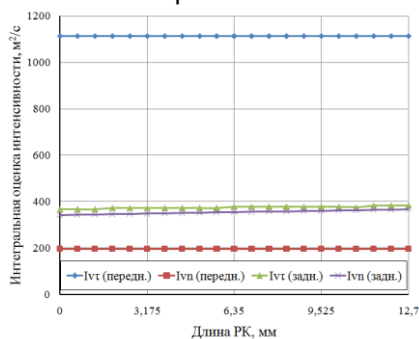
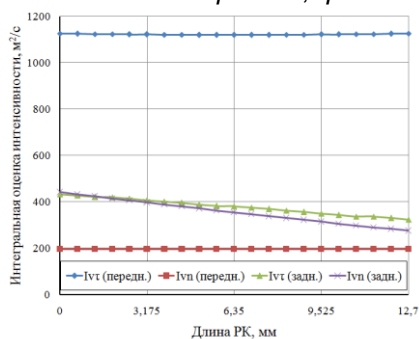
Рис. 3.13. Интегральные интенсивности обработки на передней и задней поверхностях вдоль РК МНТП



$b - p = 45^\circ; q = 25^\circ$ «натекание с оправки»



$b - p = 45^\circ; q = 45^\circ$ «натекание с оправки»

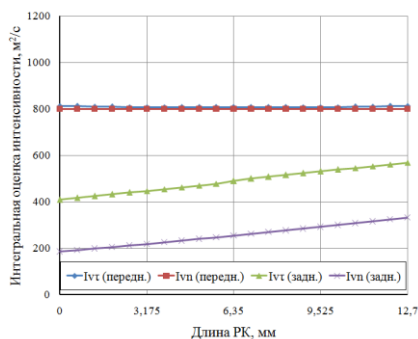
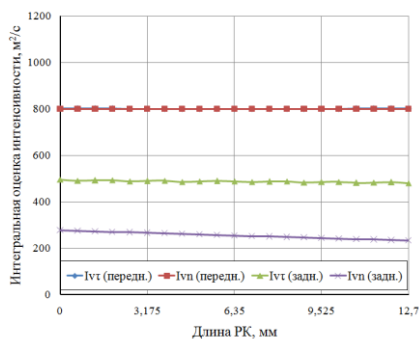


$g - p = 10^\circ; q = 0^\circ$ «натекание с оправки»

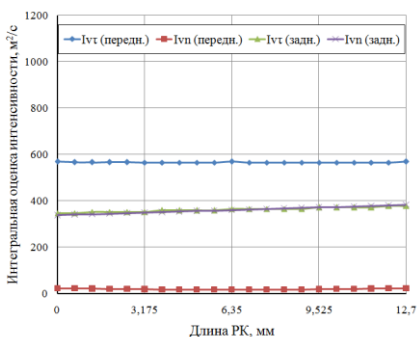
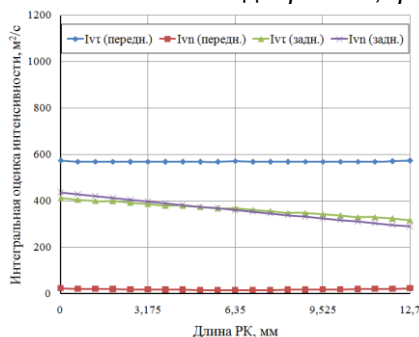
Вращение оправки вокруг
собственной оси против часовой
стрелки

Вращение оправки вокруг
собственной оси по часовой
стрелке

Рис. 3.13. Продолжение



$d - p = 45^\circ; q = 0^\circ$ «натекание»



$e - p = 45^\circ; q = 90^\circ$ «натекание с оправки»

Вращение оправки вокруг
собственной оси против часовой
стрелки

Вращение оправки вокруг
собственной оси по часовой
стрелке

Рис. 3.13. Интегральные интенсивности обработки на передней и задней поверхностях вдоль РК МНТП (Продолжение)

Теоретически установлено, что на передней поверхности величины интегральных интенсивностей практически не меняются по длине РК, что связано с кинематикой движения МНТП в рабочей зоне станка.

При углах базирования $p = 10^\circ$, $q = 0^\circ$ на передней поверхности интегральная интенсивность по тангенциальной составляющей скорости максимальна, а по нормальной – минимальна, а на задней поверхности – они практически одинаковы (рис. 3.13 г).

При обработке в режиме «натекания с оправки» для $p = 45^\circ$ и при увеличении угла поворота оправки относительно вертикальной оси q от 0° до 45° интенсивности на передней поверхности с учетом

тангенциальной составляющей скорости увеличиваются, а с учетом нормальной – уменьшаются, а на задней поверхности интенсивности изменяются противоположно, но на меньшую величину (рис. 3.13 а – д). При углах базирования $p = 10^\circ$, $q = 0^\circ$ на передней поверхности интегральная интенсивность по тангенциальной составляющей скорости максимальна, а по нормальной – минимальная, а на задней поверхности они практически одинаковые (рис. 3.13 г). Графики изменения интенсивностей для $p = 45^\circ$, $q = 0^\circ$ при обработке в режиме «натекания» зеркальные графикам при обработаны в режиме «натекания с оправки» (рис. 3.13 а и д). При $p = 45^\circ$, $q = 90^\circ$ (рис. 3.13 е) интегральные интенсивности на передней поверхности по тангенциальной составляющей скорости обработки максимальны, а по нормальной – минимальны, на задней поверхности они практически одинаковы, что связано с особенностями установки пластин в рабочей зоне и кинематикой процесса МАО.

Показано, что при изменении углов базирования пластин в рабочей зоне при МАО возможно управлять условиями взаимодействия МАИ с обрабатываемыми поверхностями и РК МНТП, получая преимущественное ударно-фрикционное или фрикционно-ударное взаимодействие МАИ с обрабатываемыми поверхностями. Комплексное улучшение качества МНТП, что включает в себя величину и форму округления РК, микрогеометрию и физико-механические характеристики передней и задней поверхностей, зависит от кинематических параметров процесса МАО. Поэтому прогнозирование процесса обработки целесообразно выполнять с учетом энергетических аспектов взаимодействия МАИ с обрабатываемыми поверхностями, которые определяются интегральными интенсивностями обработки по каждой составляющей скорости. Для эффективного процесса обработки необходимо обеспечить такие условия, при которых на все поверхности будут действовать достаточные силы взаимодействия с ними МАИ, что в условиях больших магнитных зазоров достигается усложнением траектории движения деталей в рабочей зоне. Управление значениями составляющих скорости обработки позволяет управляемо изменять условия преимущественного полирования или упрочнения поверхностного слоя, что требует дополнительной экспериментальной проверки.

3.5 Влияние МАО на микрогеометрию рабочих поверхностей, радиус и форму округления режущих кромок МНТП

Работоспособность твердосплавного РИ в значительной степени зависит от состояния поверхности и поверхностного слоя, а

именно: микрогеометрии поверхностей и РК, физико-механических свойств поверхностных слоев, наличия на поверхностях защитных покрытий и тому подобное. Поэтому на финишных этапах их изготовления необходимо обеспечить соответствующие твердость и прочность поверхностных слоев рабочих поверхностей, снижение шероховатости и формирование необходимых величин радиусов округления РК и их формы. Важно отметить, что метод МАО является перспективным при подготовке поверхностей перед нанесением износостойких покрытий [81, 120]. МАО позволяет выполнять комплексное обеспечение всех параметров качества МНТП, но для этого необходимо иметь информацию об условиях обработки, при которых будет формироваться необходимые величина и форма округления РК, микрогеометрия рабочих поверхностей и необходимые физико-механические свойства поверхностных слоев МНТП. К ним относятся факторы, связанные с базированием пластин в рабочих зонах и условия обработки:

- углы базирования пластин в кольцевой рабочей зоне;
- ориентация МНТП относительно оправки;
- траектория и скорости относительного перемещения рабочих поверхностей пластин и МАИ;
- состав и свойства МАИ;
- скорости вращения пластин относительно оправки и кольцевой рабочей зоны, режимы обработки;
- суммарное время обработки и соотношение обработки в режиме «натекание», «стекание» и «натекание с оправки».

При МАО значительную роль играет время обработки, поэтому при изучении процесса формирования параметров качества МНТП необходимо особое внимание уделить кинетике их формирования, то есть их изменению в зависимости от времени обработки.

3.5.1 Формирование радиуса округления и формы округления режущих кромок пластин при МАО

Эксплуатационные свойства твердосплавного РИ во многом зависят и определяются величиной и формой радиуса округления РК, оцениваемой величиной К-фактора [158]. В значительной степени это связано с тем, что твердый сплав хрупкий материал, чувствительный к концентраторам и микроконцентраторам напряжений, которые при эксплуатации могут быть местами возможного зарождения микротрещин, приводящих к разрушению и преждевременной потере работоспособности МНТП. Поэтому важно на финишных этапах их изготовления уделять особое внимание формированию

благоприятных как микрогеометрии РК, так и рабочих поверхностей МНТП.

При MAO твердосплавных пластин на станках типа «кольцевая ванна» с большими рабочими зазорами возможно формирование равномерного радиуса округления РК с определенной величиной К-фактора и удаление с их поверхности микроконцентраторов напряжений. Но для этого необходимо соблюдение параметров MAO, которые будут влиять на получение необходимых величин округления РК, ее формы, и определение временного фактора, имеющего критическое влияние. Предыдущие аналитические исследования показывают, что MAO позволяет эффективно повышать качество поверхностей и РК МНТП, но данная гипотеза требует экспериментальной проверки.

Цикл экспериментальных исследований выполняли на МНТП типа РNMM 110408 при скорости вращения пластин вокруг оси кольцевой ванны 200 и 300 об/мин, вокруг собственной оси – 350 об/мин. Обработка выполнялась с реверсом вращения при условии, что направление вращения пластин вокруг оси кольцевой ванны и собственной оси совпадали. Угол наклона оправки относительно плоскости кольцевой ванны составлял 10°, 24° и 42°. В качестве МАП использовали ДЧК с размером зерен 1000/630 мкм с добавлением алмазной пасты зернистостью 3/2 мкм. Обработку выполняли поэтапно, суммарное время обработки составило 4 мин. После каждого этапа MAO (26 с) выполняли измерения радиусов округления РК пластин в 12 – 16 сечениях.

Исследования кинетики изменения величины радиусов округления РК МНТП для различных углов базирования деталей в рабочей зоне и скоростей MAO показали, что первые 100 – 125 с процесса MAO происходит монотонное, близкое к линейному притупление РК (рис. 3.14) – увеличение ее радиуса округления.

Скорость притупления кромок составляет 0,11 – 0,12 мкм/с для указанных условий MAO. Через 130 – 150 с после начала процесса MAO происходит их заострение – уменьшение на 3 – 5 мкм величины радиусов округления РК. Дальнейшая обработка более 2,5 мин при скорости вращения вокруг оси кольцевой ванны 200 об/мин приводит к увеличению радиуса округления РК со скоростью 0,05 – 0,09 мкм/с, а при 300 об/мин изменение величины радиусов не проявляется и стабилизируется на уровне 12 – 15 мкм. Подобное различие в характере округления РК пластин при различных скоростях MAO связано с особенностями формирования-разрушения веретенообразных уплотненных зон в МАИ и наличием критических скоростей, при которых изменяется механизм перестроения МАИ при MAO [65, 81, 140].

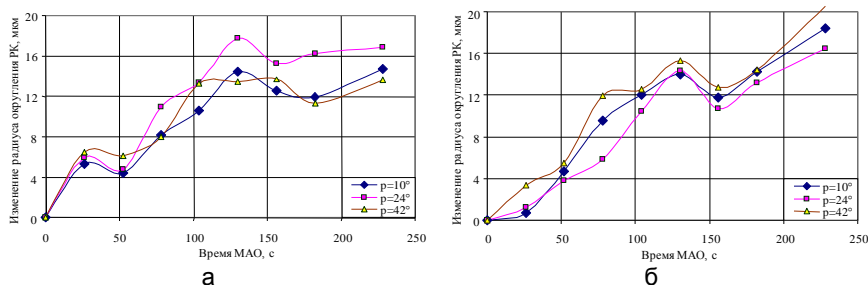


Рис. 3.14. Кинетика изменения величины радиусов округления РК МНТП при MAO, скорость вращения вокруг оси кольцевой ванны: а – 300 об/мин, б – 200 об/мин

Исследование кинетики изменения радиусов округления РК МНТП при MAO в условиях больших рабочих зазоров показали, что в процессе обработки в течение 3 мин происходит управляемое изменение величины РК, они притупляются до величины 40 – 45 мкм при исходных значениях 25 – 30 мкм.

Кроме угла наклона оправки – p при обработке МНТП исследовано влияние угла поворота оправки q на особенности формирования микрогеометрии РК. Исследование проводили на пятигранных твердосплавных пластинах типа PNMM 120408, изготовленных из твердого сплава марки ВК8. В исходном состоянии до MAO после спекания пластины были обработаны виброабразивным методом. На РК присутствовали микродефекты в виде микросколов, вырывов, о чем свидетельствует величина $R_z = 16$ мкм. В связи с низким качеством поверхностей и РК пластин для выполнения последующих исследований была выполнена дополнительная обработки передней и задней поверхностей вдоль одной из граней МНТП, а именно шлифование и полирование до величины $R_a = 0,07 - 0,08$ мкм, что позволило сформировать качественную РК и в дальнейшем выполнять измерения твердости поверхностей.

Процесс обработки был разбит на 8 этапов по 26 с каждый – вращение МНТП осуществлялось с реверсом вокруг оси кольцевой ванны и вокруг оси оправки в одном направлении по часовой стрелке в течение 13 с и 13 с – против. Перед выполнением эксперимента и после каждого этапа на пластинах измеряли шероховатость на задних поверхностях, поверхностную твердость и радиус округления РК. Угол наклона оправки относительно вертикальной оси составлял $p = 24^\circ$,

угол при котором процесс обработки происходит наиболее эффективно.

Для получения различного соотношения нормальных и тангенциальных составляющих скорости, возникающих при MAO по схеме представленной на рис. 3.8 угол q поворота оправки относительно вертикальной оси меняли дискретно 0° , 20° , 45° . Для восстановления и лучшего перемешивания МАИ использовали ВСЭ [34, 60, 80, 84, 142], который был противоположно установлен под углом 45° к плоскости кольцевой ванны. В качестве магнитно-абразивного материала использовали смесь ДЧК с размером зерен 400/315 мкм с алмазной пастой зернистостью 14/10 мкм, с добавлением СОТС марки Асфол. Угловая скорость вращения оправки вокруг оси кольцевой ванны $\omega_B = 200$ об/мин (линейная скорость движения оправки вдоль кольцевой рабочей зоны – 2 м/с), угловая скорость вращения оправки с закрепленной на ней МНТП равнялась $\omega_O = 300$ об/мин. Индукция магнитного поля в рабочей зоне между полюсными наконечниками была равной $B = 0,23$ Тл. На рис. 3.15 представлена кинетика изменения величин радиусов округления РК в зависимости от угла поворота оправки q .

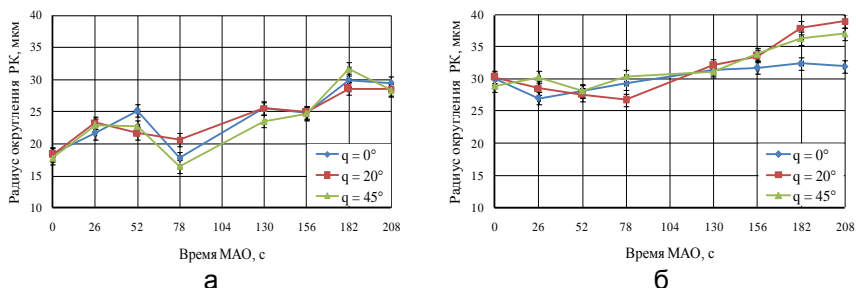


Рис. 3.15. Кинетика изменения величины радиусов округления РК МНТП в зависимости от угла поворота оправки q : а – подготовленная РК; б – неподготовленная РК

Показано, устойчивое увеличение радиуса округления РК в исследуемых диапазонах условий MAO. Характер изменения радиусов, сформированных дополнительно не обработанными поверхностями, при различных значениях угла q практически одинаковый. Установлено, что на всех пластинах имеет место уменьшение радиуса через 70 – 90 с обработки, что может быть связано с изменением физико-механических свойств поверхностного слоя пластин – удалением и изменением состояния дефектного

поверхностного слоя, сформированного на этапах предварительной обработки. Максимальные величины радиусов округления РК формируются через 180 с обработки, причем для условий максимального соотношения тангенциальной к нормальной составляющей скорости обработки эта величина максимальная, что подтверждает результаты расчетов выполненных ранее. Характер изменения радиуса округления РК вдоль дополнительно обработанных граней имеет аналогичный характер.

Показано, что на эффективность MAO существенное влияние имеют величины и соотношения тангенциальной и нормальной составляющих скоростей, имеющих место при MAO, в условиях обработки на станках с большой кольцевой рабочей зоной и подтверждает результаты расчетов и моделирования. Варьирования углами базирования пластин в рабочей зоне позволяет управлять характеристиками процесса MAO за счет изменения соотношения этих составляющих скоростей обработки.

На характер формирования округления РК значительное влияние оказывают параметры базирования пластин в рабочей зоне станка, поэтому выполнено экспериментальное исследование влияния данных условий на формирование радиуса округления РК для четырехгранных пластин типа SNMA 120408, изготовленных из твердого сплава марки BK60M (ISO- K10).

МНТП обрабатывали 6 мин при следующих условиях: индукция магнитного поля в рабочей зоне 0,25 Тл; МАП – смесь порошка Ферромап зернистостью 200/100 мкм и алмазной пасты зернистостью 20/14 мкм [98]; угловая скорость вращения оправки с пластиной вокруг собственной оси 400 об/мин (3 мин вращения оправки против часовой стрелки, 3 мин – по часовой стрелке) скорость движения пластины вдоль рабочей зоны 3 м/с (вращение оправки вокруг оси кольцевой ванны против и по часовой стрелке). Углы базирования пластин в рабочей зоне: угол наклона оси оправки относительно вертикальной оси рабочей зоны $p = 45^\circ, 10^\circ$, угол поворота оправки относительно вертикальной оси $q = 0^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 90^\circ$. Обработку выполняли в режиме «натекания» и «натекания с оправки», как это показано на рис. 3.12. В обоих случаях активное воздействие МАИ в процессе MAO имело место на переднюю поверхность. Процесс обработки выполняли с использованием ВСЭ $\varnothing 10$ мм рациональной формы.

Полученные величины радиусов округления РК представлены на рис. 3.16. Доказано, что на радиус округления РК влияет угол поворота оправки q вокруг вертикальной оси и ориентация МНТП относительно оправки. Так при увеличении угла q от 0° до 45° при

обработке в режиме «натекания с оправки» радиус округления кромок увеличивается. Наибольшая величина радиуса округления РК в данном случае была получена при $p = 45^\circ$, $q = 45^\circ$, и равна 13,4 мкм на кромке и 38 мкм при вершине. При таком расположении пластин в рабочей зоне станка осуществляется активное взаимодействие МАИ с РК и их притупление. Теоретически рассчитано, что при увеличении угла q увеличивается соотношение величин IV_t/IV_n (рис. 3.13 а – в) непосредственно на РК с 1,46 до 1,56. То есть, на формирование радиуса округления РК большое влияние оказывает наличие тангенциальной составляющей скорости обработки.

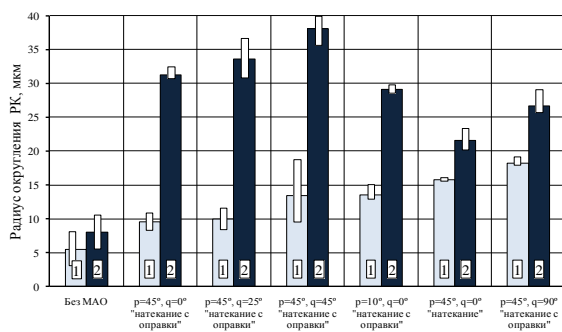


Рис. 3.16. Радиусы округления РК в зависимости от условий базирования пластин в рабочей зоне станка:

- 1 – на прямолинейном участке РК;
- 2 – при вершине

При $p = 10^\circ$, $q = 0^\circ$ получено меньшую величину радиуса округления РК при вершине пластин и большую на прямолинейном участке кромки по сравнению с предыдущим случаем. При таком расположении пластин в рабочей зоне МАИ легко огибает оправку и происходит равномерная обработка кромок и вершин.

При углах $p = 45^\circ$, $q = 0^\circ$ в режиме обработки «натекание», радиус округления на прямолинейной кромке больше, а на кромке при вершине меньше, чем при обработке при таких же параметрах базирования пластин в рабочей зоне, но в режиме «натекания с оправки». Это свидетельствует о влиянии уплотненной зоны образующейся при формировании МАИ и на ее взаимодействии с РК пластин. При отсутствии оправки и обработке в режиме «натекания» МАИ становится более подвижным, что способствует равномерному формированию округленных РК, а не преимущественно при вершине, как это происходит при обработке в режиме «натекания с оправки», когда МАИ активно взаимодействует только с углами пластин.

При обработке в режиме «натекания с оправки» с углами $p = 45^\circ$, $q = 90^\circ$ радиусы округления РК достигают 26,6 мкм при вершине и 18,2 мкм на прямолинейных кромках. При этом активнее обработка будет проходить по задней поверхности пластин, что подтверждается

теоретическими расчетами (рис. 3.13 е). При этом не будет формироваться уплотненная зона в МАИ, что способствует активному удалению материала, как на прямолинейных кромках, так и на кромках при вершинах МНТП.

Разные величины радиусов округления РК на различных участках пластин объясняются наличием уплотненной зоны и ухудшением условий движения в ней МАИ относительно передней поверхности МНТП, а также различными величинами нормальной и тангенциальной составляющих скоростей обработки, с которыми МАИ взаимодействует с этими зонами.

Ранее отмечено, что существенным параметром, который обеспечивает повышение работоспособности РИ, является К-фактор, характер изменения которого, при указанных условиях MAO, представлены на рис. 3.17. Экспериментальные исследования процесса MAO показали, что в условиях больших рабочих зазоров обеспечивается формирование не только округления РК определенной формы, но и имеет место возможность управления величиной К-фактора.

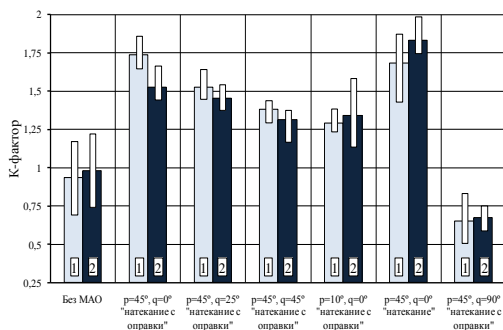


Рис. 3.17. Величина К-фактора в зависимости от условий базирования пластин в рабочей зоне станка:

- 1 – на прямолинейном участке РК;
- 2 – при вершине

Показано, что при обработке в режиме «натекания с оправки» с увеличением угла q величина К-фактора уменьшается, так при $q = 0^\circ$ она равна 1,75 на кромке и 1,5 при вершине, при $q = 25^\circ$ К-фактор равен 1,5 и 1,45, при $q = 45^\circ$ он – 1,38 и 1,3 соответственно. Это объясняется тем, что при увеличении угла q снижается активность взаимодействия МАИ с передней поверхностью и увеличивается с задней, что подтверждается аналитическими расчетами (рис. 3.13 а – в). Величина IVn на передней поверхности уменьшается, что приводит к уменьшению прижима МАИ к поверхности, а соответственно уменьшается и диспергирование материала с передней поверхности, что вызывает уменьшение величины К-фактора.

При $p = 10^\circ, q = 0^\circ$ обработка в режиме «натекания с оправки» обеспечивает формирование кромок с величиной К-фактора равного 1,3

и 1,35. При этом соотношение величин IV_t/IV_n на передней поверхности увеличивается до величины 5,69, в сравнении с предыдущим случаем, у которого это соотношение равно 1,74 (рис. 3.13 г), что еще больше уменьшает силу прижима зерен к этой поверхности.

При МАО в режиме «натекания» при $p = 45^\circ$, $q = 0^\circ$ величина К-фактора максимальная и не совпадает с данными, полученными при обработке в режиме «натекания с оправки» для тех же углов базирования пластин в кольцевой рабочей зоне. Это свидетельствует о том, что наличие оправки влияет на взаимодействие МАИ с передней поверхностью. Без нее порошок будет лучше скользить по поверхности, но с меньшей силой прижима. Оправка формирует уплотненную зону, которая притормаживает относительное движение между элементами МАИ и передней поверхностью МНТП в процессе обработки, что объясняет получение меньшей величины К-фактора при обработке в режиме «натекания с оправки», чем при обработке в режиме «натекания» при прочих равных условиях обработки.

При МАО с $p = 45^\circ$, $q = 90^\circ$ в режиме «натекания с оправки» получено величину К-фактора 0,65 – 0,67, что меньше 1. В данных условиях активно обрабатывается задняя поверхность, а передняя практически не обрабатывается и формируется неблагоприятная форма округления РК. Полученные результаты подтверждают аналитические расчеты, представленные на рис. 3.13 е, так как зерна МАИ практически не прижимаются к передней поверхности, о чем свидетельствует соотношение величин IV_t/IV_n равное 30,65. IV_n на передней поверхности практически равна нулю, и соответственно не будет проходить процесс удаления материала, а будет обеспечиваться обработка только задней поверхности, что и объясняет получение величины К-фактора меньше 1.

Внешний вид РК до и после МАО на прямолинейном участке и при вершине пластин представлены на рис. 3.18.

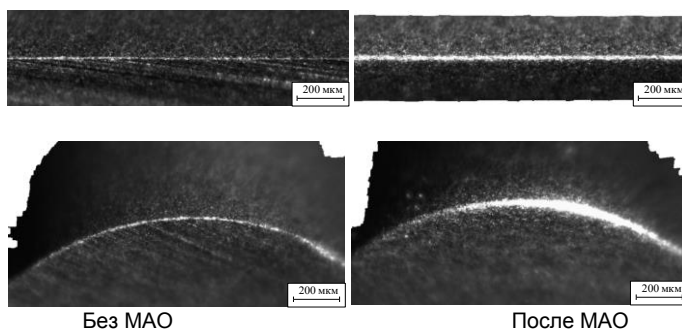


Рис. 3.18. Внешний вид РК до и после МАО на прямолинейном участке и при вершине МНТП

Обеспечение формирования соответствующей величины и формы РК МНТП реализуется при оптимальном размещении обрабатываемых деталей в межполюсном пространстве и определенным соотношением времени обработки в режиме «натекания» и в режиме «стекания» на установках с кольцевым расположением рабочих зон. На процесс MAO влияет ориентация пластин относительно оправки. В процессе MAO МНТП может располагаться, таким образом относительно оправки, что передняя поверхность может ориентироваться или к оправке или противоположно ей. Обработку МНТП выполняли в режиме «натекания», «стекания» и «натекания с оправки». В случае обработки в режиме «стекания» передняя поверхность пластин располагалась противоположно оправке, таким образом оправка не влияла на уплотнение МАИ вблизи данной поверхности.

Для экспериментальных исследований были выбраны пятигранные твердосплавные пластины без покрытия типа PNMM 120408 изготовленные «Кировградским заводом твердых сплавов», материал – ВК8. MAO выполняли при скорости движения МНТП вдоль кольцевой ванны – 3 м/с, скорости вращения пластин вокруг оси оправки 400 об/мин, индукции магнитного поля в рабочей зоне – 0,25 Тл. Обработку выполняли с применением смеси ферромагнитных зерен (Ферромаг) с зернистостью 200/100 мкм и алмазной пасты зернистостью 3/2 мкм и 20/14 мкм [98]. На часть пластин после обработки было нанесено TiAlN покрытие PVD методом. В таблице 3.1 представлены другие параметры MAO, которые варьировались при выполнении экспериментальных исследований, а именно: соотношение времени обработки в режиме «натекания», «стекания» и «натекания с оправки»; углы базирования пластин в рабочей зоне станка – p и q .

На первом этапе исследовано влияние размеров частиц алмазной пасты, которая использовалась для MAO с последующим нанесением износостойкого покрытия на формирование радиусов округления РК и К-фактора. Полученные величины представлены на рис. 3.19. MAO выполняли при идентичных условиях, меняли только зернистость алмазной пасты: 3/2 мкм и 20/14 мкм, длительность процесса равна 5 мин, все остальные условия MAO представлены в таблице 3.1.

Показано, что при использовании алмазной пасты с большей зернистостью 20/14 мкм величины радиусов округления РК получены несколько большие и равны 35 – 36 мкм на прямолинейном участке РК и 45 – 47 мкм на участках РК, которые расположены при вершинах МНТП. Для пластин, обработанных с использованием алмазной пасты зернистостью 3/2 мкм соответственно эти величины равны 33 – 34 мкм и 39 – 41 мкм (рис. 3.19 а). Для пластин, на которых уже сформирована РК после нанесения износостойкого покрытия величина радиуса округления практически не меняется, а он только увеличивается для необработанных пластин, что может быть связано с особенностями

процесса физического осаждения покрытий, когда материал покрытия конденсируется на наиболее выступающих частях поверхностей. Для таких пластин после покрытия формируется радиус округления РК на прямолинейной кромке 11 – 18 мкм, а при вершинах 16 – 23 мкм.

Таблица 3.1

Условия MAO МНТП

Время MAO	Соотношение	МАП	Углы базирования	Покрытие	ВСЭ
Без MAO	–	–	–	TiAlN	–
5 мин	3 мин «натекание»+ 2 мин «стекание»	Ферромап 200/100 мкм + АСМ 3/2 мкм	$p=30^{\circ}$, $q=25^{\circ}$	–	–
	3 мин «натекание»+ 2 мин «стекание»			TiAlN	
	3 мин «натекание»+ 2 мин «стекание»	–			
	3 мин «натекание»+ 2 мин «стекание»	TiAlN			
	10 мин	7 мин «натекание»+ 3 мин «стекание»		–	
7 мин «натекание»+ 3 мин «стекание»		TiAlN			
10 мин «натекание»		–			
10 мин «стекание»		–			
10 мин «натекание с оправки»		–			
1,5 мин		1 мин «натекание»+ 0,5 мин «стекание»	$p=45^{\circ}$, $q=25^{\circ}$	–	ø8мм 45°
3 мин	3 мин «натекание с оправки»				
5 мин	5 мин «натекание с оправки»				
3 мин	3 мин «натекание»				
5 мин	5 мин «натекание»				
5 мин	5 мин «натекание»	S330 1200/900 мкм	$p=30^{\circ}$, $q=25^{\circ}$	–	–

Показано, что при использовании алмазной пасты с большей зернистостью 20/14 мкм величины радиусов округления РК получены несколько большие и равны 35 – 36 мкм на прямолинейном участке РК и 45 – 47 мкм на участках РК, которые расположены при вершинах МНТП. Для пластин, обработанных с использованием алмазной пасты зернистостью 3/2 мкм соответственно эти величины равны 33 – 34 мкм и 39 – 41 мкм (рис. 3.19 а). Для пластин, на которых уже сформирована РК после нанесения износостойкого покрытия величина радиуса округления практически не меняется, а он только увеличивается для необработанных пластин, что может быть связано с особенностями процесса физического осаждения покрытий, когда материал покрытия конденсируется на наиболее выступающих частях поверхностей. Для таких пластин после покрытия формируется радиус округления РК на прямолинейной кромке 11 – 18 мкм, а при вершинах 16 – 23 мкм.

Величина К-фактора (рис. 3.19 б) у необработанных МНТП на всех участках равна 1, РК острая, без сформированного радиуса округления. После нанесения износостойкого покрытия величина К-фактора увеличивается как на прямолинейных участках РК, так и при вершинах пластин до величин 1,1 – 1,25 и 1 – 1,15 соответственно. Очевидно, это связано с особенностями нанесения тонких износостойких покрытий и с неравномерным осаждением материала на переднюю и заднюю поверхности МНТП вблизи острой РК. Отметим, что величина радиуса округления тоже растет.

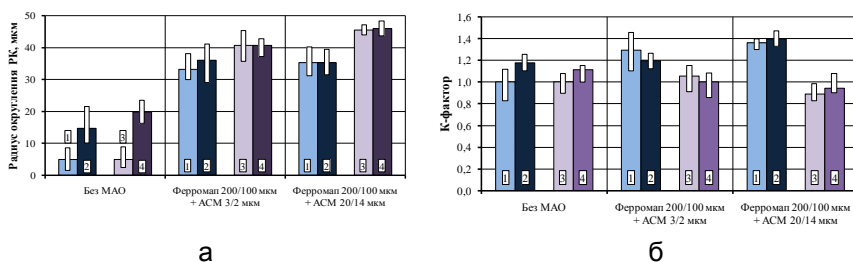


Рис. 3.19. Результаты исследования: а – радиус округления РК; б – К-фактор при МАО 3 мин в режиме «натекания» + 2 мин «стекания», $p=30^\circ$, $q=25^\circ$: 1 – РК на грани без покрытия; 2 – РК на грани с TiAlN; 3 – РК при вершине без покрытия; 4 – РК при вершине с TiAlN

После обработки МАП с алмазной пастой зернистостью 20/14 мкм и 3/2 мкм величина К-фактора на прямолинейном участке РК возрастает до величины 1,1 – 1,45 и 1,3 – 1,4 соответственно для

большей и меньшей зернистости алмазной пасты, а при вершинах практически не меняется и находится в пределах 0,9 – 1,1. Получение различных величин К-фактора на прямолинейном участке РК и при вершине объясняется особенностями взаимодействия МАИ с ними в процессе MAO, поскольку задняя поверхность при вершине находится на большем расстоянии от оси вращения пластин вокруг собственной оси, что обеспечивает равномерную обработку передней и задней поверхностей, а прямолинейный участок РК более активно обрабатывается именно по передней поверхности. При этом на величину К-фактора, как и на величину радиусов округления РК, наличие покрытия не оказывает значительного влияния, и его величина практически не отличается от полученных результатов для непокрытых пластин.

На втором этапе исследовано влияние соотношения технологического времени обработки в режиме «натекания», «стекания» и «натекания с оправки» на величину радиусов округления РК и К-фактора (рис. 3.20). Данные значения получены при MAO с использованием порошка Ферромап зернистостью 200/100 мкм и алмазной пасты с размером зерен 20/14 мкм для формирования МАИ, остальные параметры обработки представлены в таблице 3.1.

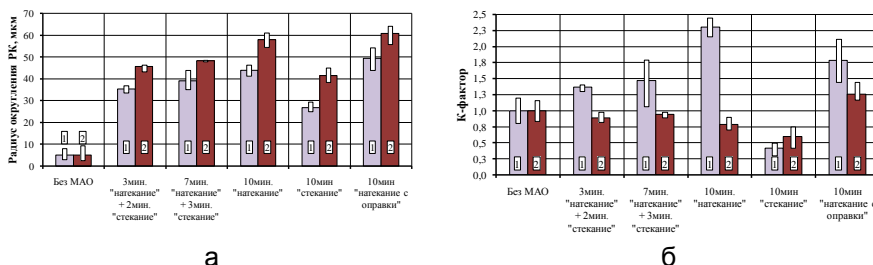


Рис. 3.20. Результаты исследования: а – радиуса округления РК, б – К-фактора при обработке с разным соотношением времени «натекания», «стекания» и «натекании с оправки»: 1 – РК на грани; 2 – РК при вершине

Экспериментально установлено, что при указанных условиях базирования МНТП в рабочей зоне в течение 3 мин обработки в режиме «натекания» и 2 мин в режиме «стекания» величины радиусов округления РК будут равны 35 – 36 мкм на прямолинейном участке РК и 45 – 47 мкм на РК при вершинах пластин, меньше чем при обработке в соотношении 7 мин «натекания» и 3 мин «стекания».

Доказано, что с увеличением времени обработки округление РК увеличивается, при этом данное изменение не имеет линейного характера. При обработке в течение 10 мин только в режиме «натекания» эти величины будут больше на 4 – 5 мкм на гранях и на 8 – 10 мкм при вершинах МНТП. При обработке 10 мин только в условиях «стекания» величина радиуса округления РК на грани равна 26 – 28 мкм, а при вершине пластин 40 – 42 мкм, что значительно меньше величины радиуса при обработке в течение 10 мин. Это происходит потому, что при таких условиях MAO на РК действуют значительно меньше силы обработки. Наибольшая величина радиуса округления 50 – 60 мкм была получена за 10 мин MAO в режиме «натекания с оправки», когда МНТП располагалась передней поверхностью к оправке. Это объясняется тем фактом, что при MAO оправка выполняет специфическую роль в процессе формирования МАИ в зоне обработки, создавая подвижную уплотненную зону на передней поверхности МНТП, которая приводит к повышению нормальных и тангенциальных составляющих сил необходимых для интенсификации процесса обработки.

Показано, что величина К-фактора (рис. 3.20 б) при обработке 3 мин в режиме «натекания» + 2 мин в режиме «стекания» и 7 мин «натекания» + 3 мин «стекания» увеличивается на прямолинейном участке РК до величины 1,1 – 1,45, а при вершине незначительно уменьшается до величины 0,9 – 1 и, почти не зависит от времени MAO. При обработке 10 мин в режиме «натекания» на прямолинейном участке РК получена наибольшая величина К-фактора 2,3, а при вершине она меньше 0,8, что свидетельствует о различных условиях взаимодействия этих участков МНТП с МАИ в процессе MAO. В данном случае передняя поверхность прямолинейной РК активно взаимодействует с порошком, а при вершине задняя. Что определяется траекторией и скоростями относительно движения этих участков с МАИ.

При обработке 10 мин только в условиях «стекания» получено величину К-фактора значительно меньше 1, поскольку в данном случае более активно обрабатывается задняя поверхность, а передняя находится в теневой зоне, а обработка происходит только за счет скорости вращения МНТП вокруг собственной оси, а учитывая габариты пластин, эта скорость очень мала по сравнению с линейной скоростью перемещения пластины вдоль кольцевой рабочей зоны. При обработке в режиме «натекания с оправки» при всех идентичных условиях по сравнению с обработкой в режиме «натекания» на прямолинейном участке РК К-фактор получен меньшей величины, равной 1,6 – 2, а при вершине большей – 1,2 – 1,4. Такое изменение

формы округления может быть объяснено только наличием действия оправки непосредственно возле обрабатываемых поверхностей, которая уменьшает относительную скорость движения МАИ на передней поверхности пластин, увеличивая при этом силу их взаимодействия в процессе обработки.

Экспериментальные исследования влияния соотношения технологического времени обработки в режиме «натекания», «стекания» и «натекания с оправки» на величину радиуса округления РК показали, что в процессе MAO происходит их устойчивое увеличение, причем величина округления зависит именно от соотношения времени обработки в различных режимах MAO и от ориентации пластин относительно оправки. Установлено, что при обработке в режиме «натекания», когда передняя поверхность пластины расположена со стороны оправки за 10 мин MAO режущая кромка притупляется до величины 50 – 60 мкм. Установлено, что при данных условиях обработки происходит притупление РК, формируется равномерная кромка без концентраторов напряжений, ее внешний вид на гранях и углах МНТП представлен на рис. 3.21.

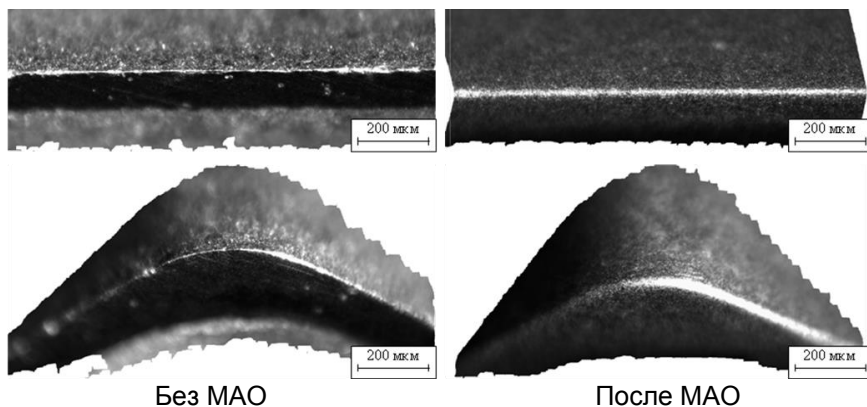


Рис. 3.21. Внешний вид РК на прямолинейном участке и при вершине МНТП

Выполненные ранее исследования позволили доказать эффективность использования дополнительных конструктивных элементов для восстановления формы и свойств МАИ в процессе MAO [86]. Поэтому для обработки партии пластин использовали дополнительный ВСЭ $\varnothing 8$ мм, изготовленный из немагнитного материала, который устанавливался под углом 45° к плоскости кольцевой ванны, схема обработки представлена на рис. 3.22.

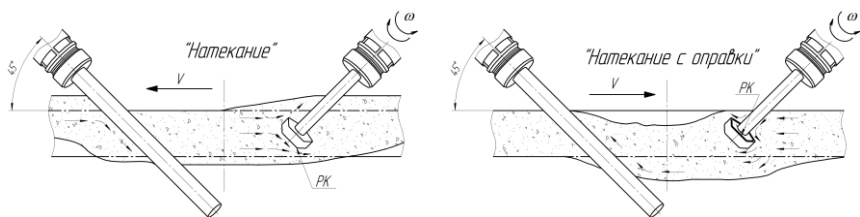


Рис. 3.22. Схема МАО МНТП с использованием ВСЭ

На рис. 3.23 представлены величины радиусов округления РК и К-фактора при обработке порошком Ферромап с размером зерен 200/100 мкм и алмазной пастой зернистостью 20/14 мкм при углах базирования пластин $p = 45^\circ$ и $q = 25^\circ$ при различном соотношении обработки в режимах «натекания», «стекания» и «натекания с оправки» с использованием ВСЭ.

Экспериментально установлено, что при данных условиях обработки увеличение времени МАО ведет к увеличению величины радиусов округления РК. При обработке в режиме «натекания с оправки» за 3 мин формируется радиус величиной 20 – 26 мкм на прямолинейном участке и 36 – 42 мкм при вершине, а за 5 мин соответственно 30 – 36 мкм и 56 – 62 мкм. При аналогичных условиях обработки, но для режима «натекания» эти величины получены меньшие: – для 3 мин на прямолинейном участке величина РК составляет 21 – 24 мкм, при вершине 27 – 34 мкм, для 5 мин соответственно 25 – 32 мкм и 30 – 37 мкм, что еще раз доказывает влияние оправки на уплотнение МАИ при обработке в режиме «натекания с оправки». Величина радиусов округления при вершинах данных пластин, аналогично предыдущим исследованиям, больше, чем на прямолинейных участках, объясняется разной скоростью обработки этих участков и наличием вблизи полюсных наконечников «мертвых зон» с МАИ, который малоподвижный и более уплотненный. При комбинированной обработке в течение 1 мин в режиме «натекания» и 0,5 мин в режиме «стекания» получено радиусы округления РК на прямолинейном участке величиной 20 – 24 мкм, при вершине 26 – 29 мкм, являются наименьшими величинами среди рассмотренных режимов и соотносятся с радиусами полученными за 3 мин обработки в режиме «натекания». Это свидетельствует о нелинейной кинетике изменения величины радиуса округления РК.

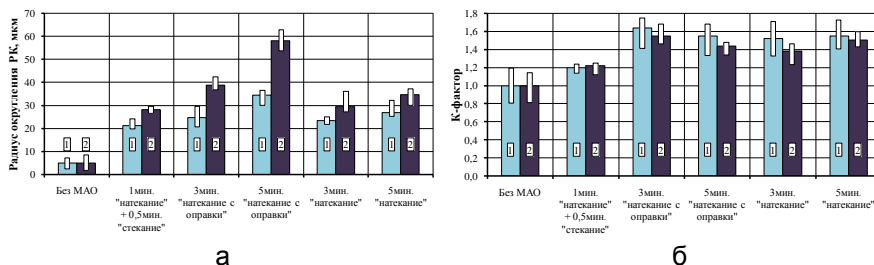


Рис. 3.23. Результаты исследования: а – радиусов округления РК, б – К-фактора при обработке с разным соотношением времени «натекания», «стекания» и «натекания с оправки», $p = 45^\circ$, $q = 25^\circ$ с использованием ВСЭ: 1 – РК на грани; 2 – РК при вершине

Величина К-фактора при данных условиях обработки для всех пластин находится в пределах 1,4 – 1,6. Как и в предыдущих исследованиях, она на прямолинейном участке кромки несколько выше, чем при вершине, что объясняется наличием «мертвых зон» и различной скорости относительного движения МАИ и данных участков МНТП. При обработке в течение 1 мин в режиме «натекания» и 0,5 мин в режиме «стекания» получено величину К-фактора одинаковую на всех участках РК и равную 1,15 – 1,25, которая наименьшая среди всех, поскольку при таком соотношении уменьшается отрицательное влияние «мертвых зон» [87]. Так как при 0,5 мин обработки в режиме «стекания» передняя поверхность находится в теневой зоне, что приводит к значительному снижению интенсивности ее обработки и таким образом уголки на передней поверхности практически не обрабатываются.

Эффективный процесс MAO изделий из твердых сплавов реализуется при использовании МАИ, сформированного из смесей, состоящих из ферромагнитного порошка и добавок алмазной пасты. Приведенные рекомендации по выбору зернистости алмазной пасты [98] относятся в основном к проблеме обеспечения соответствующей производительности и минимальной шероховатости обрабатываемых изделий.

Однако влияние указанных характеристик на процесс формирования микрогеометрии РК МНТП не исследовали, особенно при формировании радиусов округления. Поэтому был выполнен анализ влияния размеров частиц порошковых материалов, из которых формируется МАИ на кинетику изменения величины округления РК при MAO в больших магнитных зазорах кольцевого типа. Для экспериментальных исследований использовали пластины без

покрытия типа SEAN 1203AFTN-M14-K фирмы SECO, изготовленных из кермета марки НХ. Процесс обработки был разделен на 4 этапа по 2 мин каждый. При этом одну минуту пластина вращалась по часовой стрелке вокруг оси оправки, а вторую – против часовой стрелки, вращение вокруг оси кольцевой ванны было выбрано, таким образом, чтобы преимущественно обрабатывалась передняя поверхность. Использовали ВСЭ, который располагался в том же направлении что и оправка с пластиной под углом 60° к плоскости кольцевой ванны. Углы базирования пластин равны: $p = 40^\circ$, $q = 10^\circ$. Индукция магнитного поля в рабочей зоне – 0,23 Тл. При MAO для формирования МАИ использовали две смеси ДЧК с размером зерен 400/315 мкм с алмазной пастой зернистостью 14/10 мкм и смесь ДЧК размер зерен 200/100 мкм с алмазной пастой зернистостью 3/2 + 2/1 мкм.

На рис. 3.24 представлена кинетика изменения радиусов округления РК в зависимости от времени MAO при использовании МАИ различного состава. Показано, что радиусы округления РК при MAO увеличиваются. При использовании ДЧК 400/315 мкм с алмазной пастой 14/10 мкм, на начальном этапе обработки имеет место более активное округления кромок, чем при использовании более мелкого магнитно-абразивного порошка, а через 300 – 360 с обработки интенсивность округления снижается, в то время, как мелкий МАП обеспечивает равномерное притупление кромок с одинаковой скоростью. Это объясняется тем, что при меньшей величине алмазных зерен имеет место большая их концентрация на поверхности ферромагнитных зерен и процесс обработки идет более активно и стабильно, обеспечивая равномерную обработку.

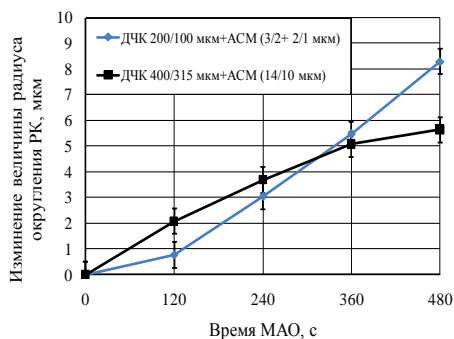


Рис. 3.24. Изменение величины радиуса округления РК в процессе MAO в зависимости от зернистости МАП

После обработки по всей длине кромки формируется практически одинаковая величина радиуса округления (рис. 3.25).

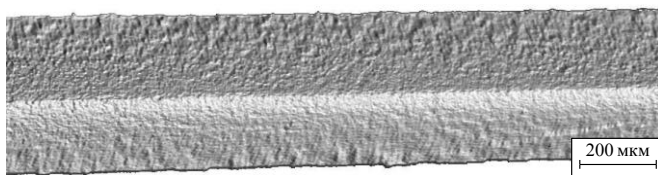


Рис. 3.25. 3D изображение РК после МАО

В результате МАО с рабочих поверхностей МНТП и РК удаляются микронеровности характерные для процесса шлифования (рис. 3.26).

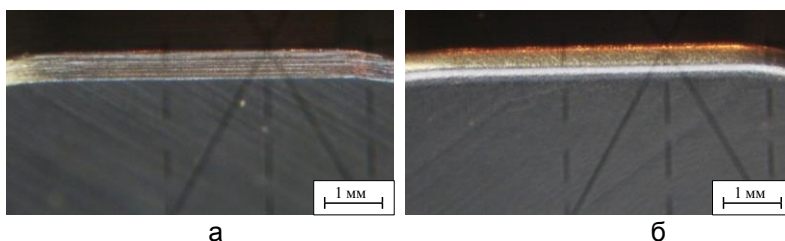


Рис. 3.26. Внешний вид кромок МНТП: а – до и б – после МАО

Установлено, что наиболее эффективная МАО, в данных условиях, выполняется при использовании для формирования МАИ смеси ДЧК зернистостью 200/100 мкм с алмазной пастой зернистостью 3/2 + 2/1 мкм.

Ранее было показано, что при обработке в режиме «натекания с оправки», вблизи передней поверхности образуется квазиуплотненная зона МАИ, приводящая к повышению нормальных и тангенциальных составляющих сил, что обеспечивает интенсификацию процесса обработки. При обработке в режиме «натекания», когда МАИ движется с противоположной от оправки стороны, такой зоны не образуется и процесс происходит менее интенсивно. Таким образом, при обработке двусторонних твердосплавных пластин при МАО требуется изменение ориентации пластин относительно оправки. Для обеспечения возможности процесса МАО без переустановки МНТП целесообразным является использование дополнительного стержневого элемента, имитирующего оправку, который располагается с противоположной от оправки стороны МНТП. Таким образом, возможно исключить операцию изменения ориентации пластин относительно оправки,

заменяв ее только на изменение направления вращения оправки с МНТП относительно оси кольцевой рабочей зоны. При вращении в одном направлении роль уплотняющего элемента будет выполнять оправка, а при изменении направления – дополнительный стержневой элемент.

При исследованиях процесса MAO в условиях больших рабочих зазоров кольцевого типа было использовано двусторонние пластины без стружколомающих канавок типа PNMA-110408, изготовленные «Кировградским заводом твердых сплавов», марка твердого сплава – ВК8. В исходном состоянии РК острая с концентраторами напряжений, которые являются нежелательными и при эксплуатации могут быть местами возможного зарождения микротрещин, приводящих к разрушению и преждевременной потери работоспособности инструментом. Радиус округления РК при вершинах составлял 9 – 14 мкм, на прямолинейном участке РК – 10 – 14 мкм, величина К-фактора равна 0,98 – 1.

Обработку МНТП выполняли при скорости движения МНТП вдоль кольцевой ванны 3 м/с (движение по и против часовой стрелки), при угловой скорости вращения пластин вокруг оси оправки – 250 об/мин (вращение с реверсом), угол наклона оправки по отношению к оси кольцевой рабочей зоны $p - 40^\circ$ и угол поворота по отношению к касательной плоскости рабочей зоны $q - 18,5^\circ$. Индукция магнитного поля в рабочей зоне равна 0,25 Тл в свободном от МАП зазоре. Время обработки – 6 мин: 3 мин в режиме «натекания» и 3 мин в режиме «натекания с оправки». Пластины обрабатывали МАИ сформованным из порошка Ферромап зернистостью 200/100 мкм и алмазной пасты зернистостью 28/14 мкм. Обработку выполняли с восстанавливающим форму и свойства МАИ немагнитным стержневым элементом $\varnothing 10$ мм рациональной формы.

Для улучшения процесса обработки в режиме «натекания» было использовано дополнительный стержневой элемент, который в процессе обработки выполнял роль уплотняющего МАИ элемента аналогичного по действию оправке при обработке в режиме «натекания с оправки», когда порошок движется со стороны оправки. Длина дополнительного элемента составляла 28 мм, и была достаточной для того, чтобы нижняя его часть располагалась в процессе MAO за пределами сформированного МАИ в нижней части рабочей зоны. В процессе MAO пластина располагается в центральной части рабочей зоны высотой 30 мм. Для того чтобы дополнительный стержневой элемент не влиял на распределение магнитной индукции в рабочей зоне и не ухудшал кинематику относительного движения МАИ обрабатываемых поверхностей он был изготовлен из немагнитного

материала. Схема МАО МНТП в рабочей зоне станка типа «кольцевая ванна» представлена на рис. 3.27.

Для определения параметров взаимодействия МАИ с обрабатываемыми поверхностями МНТП рассчитаны значения интегральных интенсивностей обработки IV_n и IV_t за один оборот пластины вокруг собственной оси по тангенциальной и нормальной составляющим скорости по методике представленной выше. Принято, что РК прямолинейная без округления при вершинах. В результате расчетов было получено четыре зависимости изменения величин интегральных интенсивностей взаимодействия МАИ с передней и задней поверхностями непосредственно возле РК, просуммировав которые была определена суммарная интегральная интенсивность за цикл МАО по длине РК.

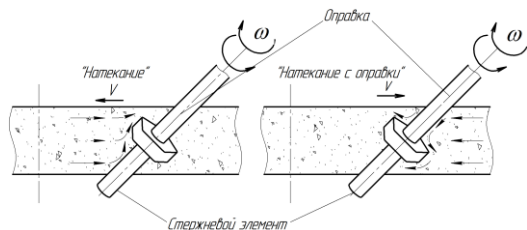


Рис. 3.27. Схема МАО пластин с дополнительным стержневым элементом

Величины IV_n и IV_t взаимодействия МАИ с РК со стороны оправки выше интенсивности со стороны дополнительного стержневого элемента. Это связано с тем, что угол наклона оправки по отношению к оси рабочей зоны ρ равен 40° , что и обусловило несколько неравные условия взаимодействия при различных направлениях движения МНТП вдоль кольцевой рабочей зоны станка, но эта разница не превышает 1,5%. Отметим тот факт, что суммарная интегральная интенсивность обработки за цикл МАО практически не изменяются по длине РК, обеспечивая равномерность обработки. При данных условиях МАО будет происходить идентичная и равномерная обработка как в режиме «натекания», так и в режиме «натекания с оправкой» передних поверхностей с двух сторон МНТП. Полученные после МАО величины радиусов округления РК и К-факторов при обработке с дополнительным стержневым элементом представлены на рис. 3.28.

Показано, что произошло притупление РК, исчезли микроконцентраторы напряжений, сформировался радиус округления, величина которого равна на РК при вершине со стороны оправки 24 – 27 мкм, на прямолинейной кромке – 19 – 21 мкм. На РК при вершине

со стороны дополнительного стержневого элемента 27 – 30 мкм, на прямолинейном участке кромки – 20 – 23 мкм. Величины К-фактора были получены следующие: со стороны оправки на РК при вершине – 0,67 – 0,77, на прямолинейной РК – 0,98 – 1,05, со стороны стержневого элемента на кромке при вершине – 0,9 – 0,95, на прямолинейном участке РК – 1,2 – 1,3. Величины радиусов округления и К-фактора со стороны стержневого элемента получены выше, чем со стороны оправки, что зависит от характера взаимодействия МАИ с данными кромками в процессе обработки.

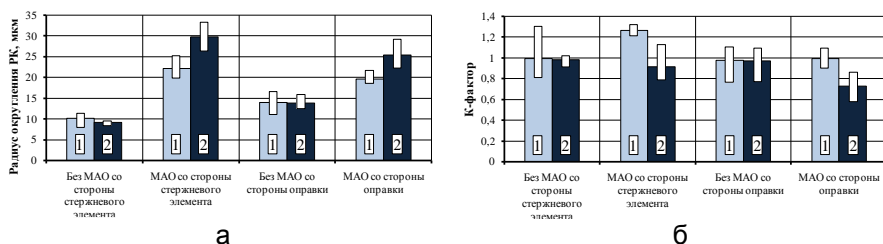


Рис. 3.28. Результаты исследования: а – радиусов округления РК, б – величины К-фактора при обработке с дополнительным стержневым элементом: 1 – РК на грани; 2 – РК при вершине

Как и для предыдущих исследований, после МАО величина К-фактора при вершинах меньше, а радиусов округления РК больше, чем на прямолинейных участках РК, что связано с особенностями взаимодействия задних поверхностей при вершинах МНТП с малоподвижными и уплотненными «мертвыми» зонами вблизи полюсных наконечников, разницей в суммарных скоростях обработки на данных участках. Также причиной может быть неодинаковое исходное качество задней и передней поверхностей, так как задняя поверхность была подвергнута только вибро-абразивной обработке, а передняя поверхность дополнительно шлифовалась.

3D изображения РК до и после МАО со стороны оправки и стержневого элемента при вершинах и на прямолинейных частях РК МНТП приведены на рис. 3.29. Данные изображения были получены при измерении радиусов округления РК и величин К-фактора на оптическом приборе MikroCAD. В результате МАО выполнено притупление РК, сформирован равномерный радиус округления РК, исчезли микроконцентраторы напряжений и был обеспечен гладкий микрорельеф рабочих поверхностей, на пересечении которых образуется РК.

Отметим, что в промышленности широко используются МНТП без стружколомающих канавок, при их переточке по передней поверхности

возможно восстановить их работоспособность, но при такой схеме переточки полученная РК будет острой с большим количеством выступов и впадин. Поэтому стойкость переточенного инструмента ниже стойкости нового. Использование MAO после переточки пластин позволяет восстановить их работоспособность и сформировать необходимую микрогеометрию РК и рабочих поверхностей МНТП.

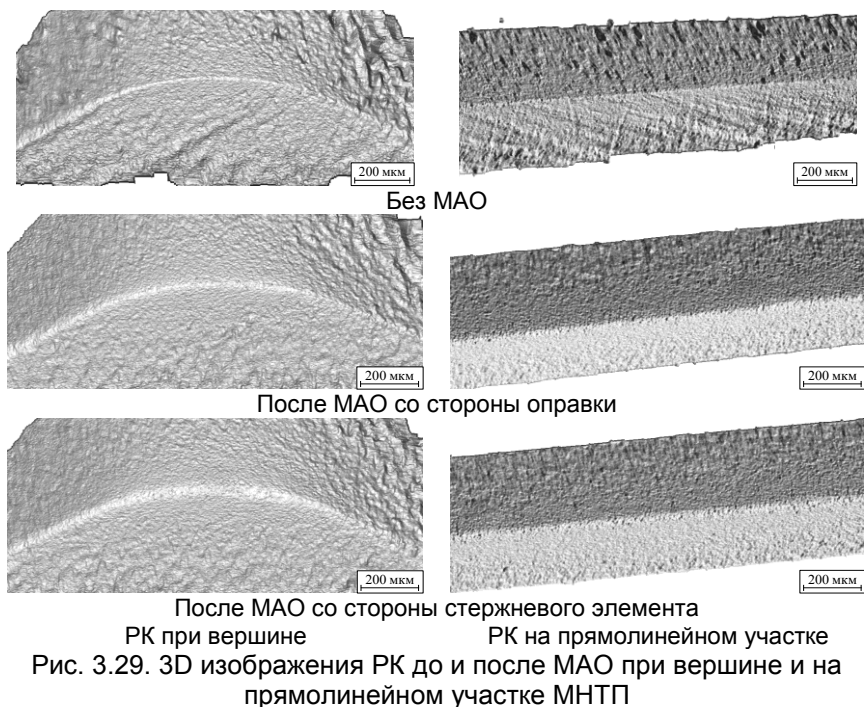


Рис. 3.29. 3D изображения РК до и после MAO при вершине и на прямолинейном участке МНТП

В отдельных случаях для формирования специальной формы РК на них выполняют шлифование микрофасок или даже делают микроогранку, что позволяет предварительно задавать необходимую форму кромок. Метод MAO не позволяет формировать радиусы округления слишком больших размеров. Но является перспективным при предварительном выполнении микроогранки для обеспечения определенной формы РК и величины радиуса округления и последующем выполнении MAO для формирования равномерного радиуса округления РК. Поэтому важным аспектом является исследование влияния MAO на формирование РК на МНТП, на которых предварительно выполнены микрофаски.

Экспериментальные исследования выполняли на твердосплавных пластинах без покрытия типа SNMM 120412, изготовленных из твердого сплава ISO K30, M30-M40. МНТП обрабатывали 6 мин в режиме «натекания с оправки» при следующих условиях: величина магнитной индукции в рабочей зоне 0,25 Тл; МАИ – смесь ДЧК зернистостью 400/315 мкм и алмазной пасты зернистостью 14/10 мкм; угловая скорость вращения оправки с пластиной вокруг собственной оси 400 об/мин (3 мин вращения оправки против часовой стрелки, 3 мин – по часовой стрелке), скорость движения пластины вдоль рабочей зоны 3 м/с; $p = 45^\circ$, $q = 20^\circ$. Процесс МАО выполняли с использованием ВСЭ $\varnothing 10$ мм.

Установлено, что при МАО происходит формирование равномерного радиуса округления РК без огранки и фаски, причем не меняется ее форма, величина К-фактора до обработки и после практически равна 1 как на прямолинейном участке, так и на РК при вершине. Форма и 3D изображения кромки до МАО и после представлены на рис. 3.30. В результате обработки величина радиусов округления РК увеличивается с 41 – 44 мкм до 50 – 56 мкм на прямолинейном участке и при вершинах МНТП соответственно.

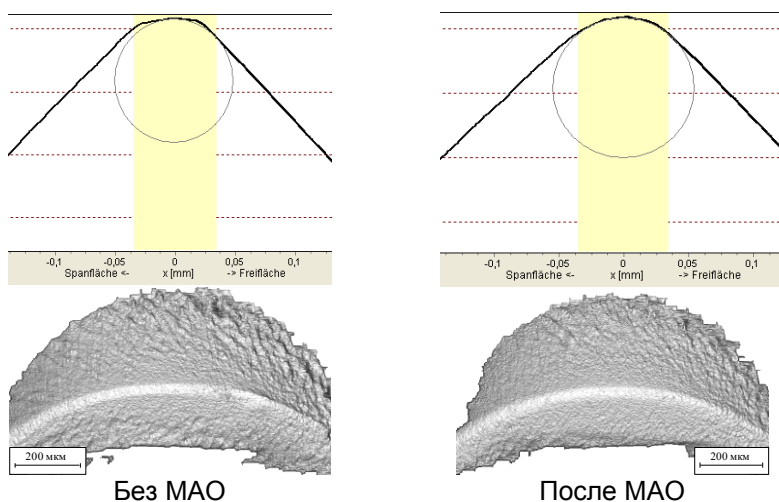


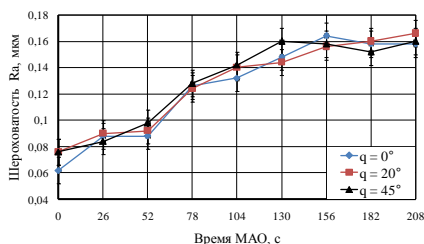
Рис. 3.30. Форма и 3D изображения РК при вершине МНТП без обработки и после МАО

Таким образом, показано, что МАО позволяет формировать РК, на которых предварительно выполнены микрофаска, не изменяя при этом величины К-фактора, а удалять только огранку, формируя равномерную и гладкую РК с предварительно заданной формой.

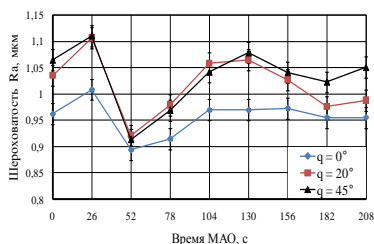
3.5.2 Влияние MAO на шероховатость рабочих поверхностей МНТП

Резерв повышения работоспособности МНТП кроме получения качественной РК во многом зависит от микрогеометрии рабочих поверхностей инструмента. MAO позволяет уменьшить шероховатость передней и задней поверхностей МНТП, что важно для повышения их работоспособности. При фрикционном взаимодействия, когда преобладает интенсивность обработки с тангенциальной составляющей скорости, происходит выглаживание поверхностей, снижается шероховатость и происходит более активное снятие материала, чем при обработке с преувалирующим ударным взаимодействием, при котором происходит наклеп поверхностного слоя рабочих элементов МНТП. Поэтому, необходимо определить влияние параметров базирования пластин в рабочей зоне станка, соотношение времени обработки в режиме «натекания», «стекания» и «натекания с оправки», времени MAO и состав МАИ на формирование шероховатости рабочих поверхностей и РК МНТП.

Экспериментальные исследования влияния угла поворота оправки q с МНТП вокруг вертикальной оси выполнены для твердосплавных пластин типа PNMM 120408, MAO которых выполнено при условиях обработки представленных в разделе 3.5.1. Передняя и задняя поверхности этих пластин в исходном состоянии была шлифована, а шероховатость составляла $Ra = 3$ мкм. Передняя и одна из задних граней пластин были дополнительно подготовлены с помощью шлифования и полирования до величины $Ra = 0,07 - 0,08$ мкм. Измерение шероховатости выполняли поэтапно на задней поверхности. Характер изменения шероховатости обработанных поверхностей представлен на рис. 3.31.



а



б

Рис. 3.31. Кинетика изменения шероховатости задней поверхности МНТП на: а – дополнительно подготовленных, б – на неподготовленных поверхностях

Установлено, что после 130 – 160 с обработки шероховатость стабилизируется и при дальнейшей обработке практически не изменяется, что подтверждает общие закономерности, характерные для процесса MAO [108]. Данные закономерности свойственны как для необработанных, так и для дополнительно обработанных поверхностей. Причем на дополнительно обработанных поверхностях получено реальное значение шероховатости, которую можно сформировать при использовании в проведенных исследованиях МАИ. Характер изменения шероховатости на неподготовленной поверхности имеет волнообразный вид.

Отметим, что важным фактором является наследственность обработки. Именно этот факт позволяет объяснить то, что не удалось добиться улучшения шероховатости поверхности предварительно обработанной виброабразивным методом после MAO не меняя размеров МНТП. Определено влияние соотношения технологического времени и условий обработки в режиме «натекания», «стекания» и «натекания с оправки» на шероховатость рабочих поверхностей и РК МНТП для пятигранных пластин типа PNMM 120408 обработанных при тех же режимах. Установлено, что зернистость алмазной пасты, которая обеспечивает реализацию процесса микрорезания при MAO, влияет на величину шероховатости поверхностей, так с добавлением алмазной пасты с размером зерен 3/2 мкм шероховатость поверхностей будет меньше в среднем на 65 – 70% чем шероховатость, полученная при добавлении пасты зернистостью 20/14 мкм. После нанесения покрытий шероховатость ухудшается, вследствие особенностей кинетики формирования покрытий и присутствия микрокапельной составляющей на поверхностях МНТП [148].

На рис. 3.32 а приведены изменения величин шероховатости R_a передней и задней поверхностей МНТП и параметра шероховатости R_t режущих кромок (рис. 3.32 б) в зависимости от условий обработки в режиме «натекания», «стекания» и «натекания с оправки» и общего времени MAO. Показано, что величина R_a после MAO пластин МАП с алмазной пастой зернистостью 20/14 мкм отличается по величине на передней и задней поверхностях. Такое изменение шероховатости происходит за счет различной механики взаимодействия МАИ с рабочими поверхностями МНТП. Показано, что шероховатость поверхностей пластин уменьшается с увеличением времени MAO, так при комбинировании различных условий обработки за 3 мин обработки в режиме «натекания» и 2 мин «стекания» получено величину R_a на передней и задней поверхностях практически одинаковую – 0,39 – 0,46 мкм, а за 7 мин

«натекания» и 3 мин «стекания» эта величина меньше и составляет 0,32 – 0,35 мкм при исходной величине шероховатости 0,46 – 0,48 мкм на передней поверхности и 0,69– 0, 72 мкм на задней. В данном случае происходит равномерная обработка, как передней, так и задней поверхностей пластин. При обработке 10 мин только в режиме «стекания» величина шероховатости на передней поверхности равна 0,4 – 0,42 мкм, что значительно больше, чем при обработке в режиме «натекания», для которого $Ra = 0,09 - 0,1$ мкм и в режиме «натекания с оправки» с величиной $Ra = 0,17 - 0,22$ мкм.

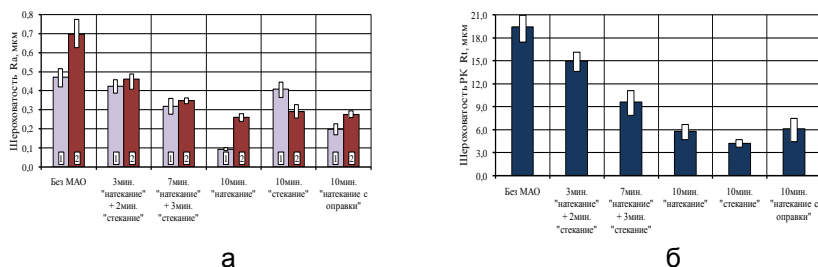


Рис. 3.32. Изменение величины параметров шероховатости: а – рабочих поверхностей;

1 – передняя, 2 – задняя; б – режущая кромка МНТП

На задней поверхности, во всех этих случаях, после МАО величина шероховатости практически одинакова и равна 0,26 – 0,29 мкм. Что свидетельствует о том, что величина Ra на задней поверхности в указанных условиях обработки практически не зависит от ориентации МНТП в рабочей зоне, а зависит от времени обработки и зернистости алмазной пасты, как было показано выше.

Величина Rt на РК также зависит от соотношения обработки при различных режимах и времени МАО. Экспериментально показано (рис. 3.32 б), что с увеличением времени МАО Rt снижается с 14 – 16 мкм для пластин обработанных 3 мин в режиме «натекания» + 2 мин «стекания» до 9 – 10 мкм, для обработки 7 мин в условиях «натекания» + 3 мин «стекания». Шероховатость РК пластин до МАО составляла 19 – 21 мкм. Для обработки 10 мин в режимах «натекания», «стекания» и «натекания с оправки» шероховатость почти одинакова и равна 4 – 6 мкм. Что свидетельствует о том, что дефекты кромок находятся со стороны задней поверхности, так как при таких режимах МАО задняя поверхность находится в одинаковых условиях взаимодействия с МАИ при МАО.

Установлено, что при указанных условиях обработки происходит снижение шероховатости рабочих поверхностей и РК, но для различных параметров МАО эти изменения разные. Наименьшая величина

шероховатости на передней поверхности $Ra = 0,09 - 0,1$ была получена при обработке в режиме «натекания». На задней поверхности величина шероховатости получена при суммарном времени MAO 10 мин и составляет $0,26 - 0,29$ мкм и не зависит от ориентации МНТП относительно оправки, а зависит от времени обработки и зернистости алмазной пасты.

Для выполнения эффективного процесса MAO МНТП важными являются исследования влияние состава МАМ на шероховатость рабочих поверхностей. Экспериментальные исследования были выполнены на керметных пластинах без покрытия SEAN 1203AFTN-M14-K. Условия MAO аналогичны представленным в разделе 3.5.1. Установлено, что шероховатость поверхностей через 200 с обработки стабилизируется и соответствует величине, характерной для заданных условий MAO – при использовании МАИ, сформированного из ДЧК зернистостью 200/100 мкм и алмазной пасты зернистостью 3/2 + 2/1 мкм шероховатость равна $0,06 - 0,07$ мкм, а при использовании смеси ДЧК 400/315 мкм с алмазной пастой с размером зерен 14/10 мкм, соответственно $Ra = 0,1 - 0,11$ мкм. Внешний вид поверхностей МНТП до и после MAO представлены на рис. 3.33.

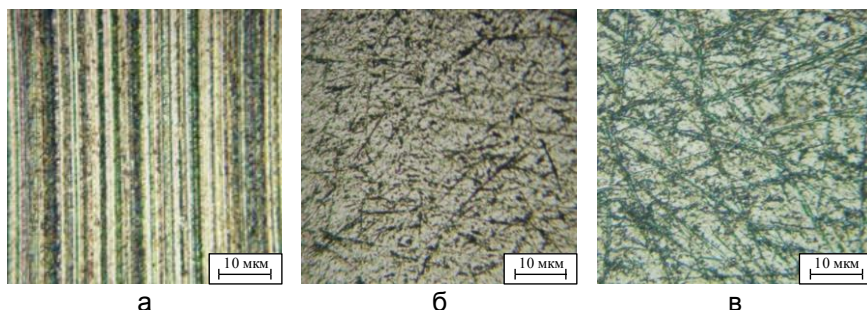


Рис. 3.33. Внешний вид поверхностей пластин: а – без MAO; б – MAO порошком ДЧК 200/100 мкм + АСМ (3/2+2/1 мкм); в – MAO порошком ДЧК 400/315 мкм + АСМ 14/10 мкм

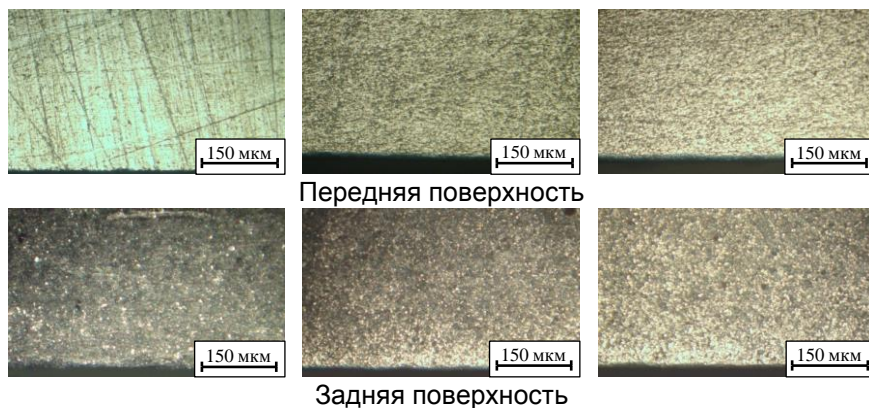
После обработки на поверхности отсутствует регулярный микрорельеф характерный для процесса шлифования (рис. 3.26), имеют место хаотично расположенные риски, различной величины и глубины. При использовании мелкой алмазной пасты микроцарапины короткие, неглубокие, а для крупной, соответственно, более глубокие и протяженные. При величине алмазных зерен 3/2 + 2/1 мкм их концентрация на поверхности частиц МАП больше по сравнению с алмазной пастой с размером зерен 14/10 мкм. Поэтому процесс обработки в таком случае проходит более активно, поскольку

одновременно на обрабатываемые поверхности действует большее количество РК алмазного порошка.

Как показано выше для обработки двухсторонних МНТП целесообразно использовать дополнительный немагнитный стержневой элемент, имитирующий оправку и закрепленный с противоположной стороны МНТП, который, при обработке в режиме «натекания» формирует квазиуплотненную зону, которая приводит к повышению нормальных и тангенциальных составляющих сил, обеспечивает интенсификацию процесса обработки, как для случая обработки в режиме «натекания», обеспечиваемый оправкой.

Для экспериментальных исследований МАО в условиях больших рабочих зазоров кольцевого типа использовали двусторонние пластины без стружколомающих канавок типа PNMA 120408, которые были обработаны при режимах МАО представленных в разделе 3.5.1. По технологии завода-изготовителя пластины были подвергнуты виброабразивной обработке с последующей плоской алмазной шлифовкой передней и опорной поверхностей. В исходном состоянии шероховатость R_a передней поверхности пластин составляла 0,06 мкм, задней – 0,76 мкм.

На рис. 3.34 представлены передние и задние поверхности МНТП без МАО и после.



а – без МАО б – со стороны оправки в – со стороны стержневого элемента

Рис. 3.34. Передняя и задняя поверхность МНТП до и после МАО

После МАО с передней поверхности исчезли характерные регулярные царапины полученные на операции шлифования, обеспечен гладкий микрорельеф рабочих поверхностей МНТП.

Величина шероховатости передней поверхности Ra осталась на прежнем уровне, что обусловлено зернистостью абразивной составляющей МАИ, которая использовалась при MAO, шероховатость задней поверхности снизилась с $Ra = 0,76$ мкм для виброабразивно обработанных поверхностей до $Ra 0,5$ мкм, появились хаотично расположены микроцарапины.

3.6 Влияние метода MAO на твердость поверхностного слоя рабочих элементов МНТП

Кроме микрогеометрии рабочих поверхностей и РК МНТП на их работоспособность существенно влияют физико-механические свойства поверхностных слоев. После спекания пластин в их поверхностных слоях формируется неблагоприятное напряженное состояние, что значительно снижает их сопротивляемость нагрузкам, возникающим в процессе эксплуатации. Улучшить напряженное состояние и повысить твердость поверхностного слоя МНТП удастся за счет последующего алмазного шлифования, что, как правило, является последним этапом производства твердосплавного РИ. Но при этом формируется регулярный микрорельеф поверхности и образуются зазубрины на РК, а при несоблюдении режимов шлифования могут ухудшиться и физико-механические свойства поверхностных слоев. Поэтому для повышения работоспособности МНТП важным является формирование благоприятного напряженного состояния и повышение твердости и прочности поверхностных слоев РИ. Использование метода MAO позволяет положительно влиять на указанные свойства МНТП и поэтому его целесообразно выполнять после шлифования, как заключительной операции механической обработки РИ.

При MAO в больших магнитных зазорах основная работа по диспергированию и упрочнению поверхностей выполняется за счет динамических сил, поэтому для деталей пространственно сложной геометрической формы наибольшее влияние на качество обработки имеют именно условия их базирования и перемещения в рабочей зоне станка. Рассмотрим влияние различных параметров MAO на формирование необходимых свойств поверхностных слоев и повышение работоспособности МНТП в целом.

Как было установлено в [71, 73], наиболее эффективная и равномерная MAO МНТП реализуется при наклонном их расположения в кольцевых рабочих зонах по отношению к основному вектору движения – вращение вокруг оси кольцевой ванны – под углами $20^\circ - 40^\circ$, при условии, что соотношение нормальной к

тангенциальной составляющих скорости движения рабочих поверхностей изменяется от 1 до 2 [74].

Поэтому необходимо установить закономерности изменения твердости рабочих поверхностей в зависимости от условий MAO при указанных углах базирования пластин в рабочих зонах станков с кольцевым расположением магнитных зазоров.

Обработку твердосплавных пластин типа PNMM 110408 выполняли при условиях MAO представленных в разделе 3.5. Твердость поверхностей контролировали на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузках на индентор 0,5, 1, 1,5 и 2 Н в девяти зонах задней и передней поверхностей МНТП не менее чем по 5 раз при каждой нагрузке. Характер изменения величины твердости на задней поверхности при различных углах наклона оси пластины в зависимости от времени обработки представлен на рис. 3.35.

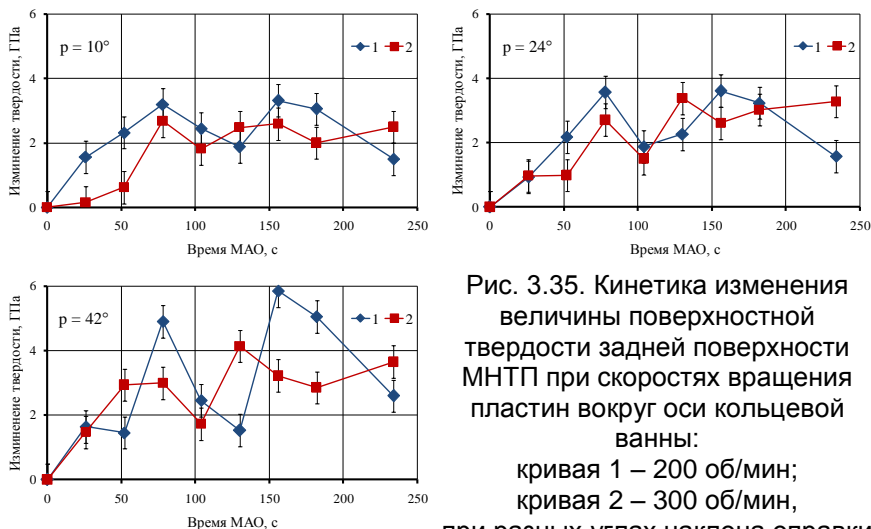


Рис. 3.35. Кинетика изменения величины поверхностной твердости задней поверхности МНТП при скоростях вращения пластин вокруг оси кольцевой ванны:

кривая 1 – 200 об/мин;

кривая 2 – 300 об/мин,

при разных углах наклона оправки

Показано, что через 75 с обработки поверхностная твердость возрастает на 2,5 – 5 ГПа. Причем, при угловой скорости вращения пластин вокруг оси кольцевой ванны 300 об/мин увеличение величины поверхностной твердости несколько меньше. Характерным является тот факт, что твердость растет не монотонно, а с определенной периодичностью. Первый максимум изменения твердости для всех исследуемых углов базирования МНТП в рабочих зонах в процессе MAO проявляется через 60 – 75 с. При этом

коэффициент наклепа поверхностного слоя составляет 1,2 – 1,25. Второй всплеск твердости проявляется через 125 – 160 с процесса MAO. С увеличением угла наклона оси пластины от 10° до 42° рост поверхностной твердости довольно значительный и составляет 40%.

Аналогичный характер изменения поверхностной твердости имеет место и на передней поверхности МНТП, с той лишь разницей, что для этих поверхностей максимальный наклеп проявляется уже через 50 – 60 с обработки, затем несколько снижается и практически стабилизируется, увеличение поверхностной твердости составляет 3 – 4 ГПа (рис. 3.36). Подобные различия в изменении величины поверхностной твердости передней и задней поверхностей МНТП объясняется различными условиями, в которых обрабатываются указанные элементы.

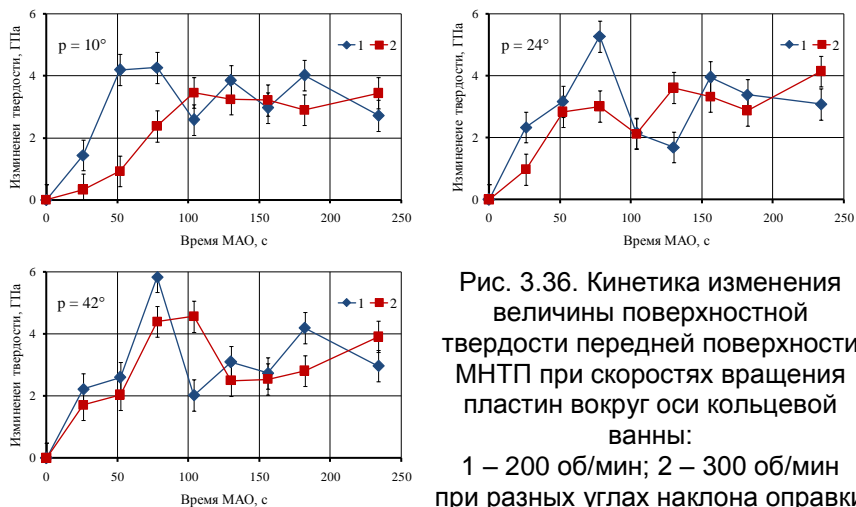


Рис. 3.36. Кинетика изменения величины поверхностной твердости передней поверхности МНТП при скоростях вращения пластин вокруг оси кольцевой ванны:
1 – 200 об/мин; 2 – 300 об/мин при разных углах наклона оправки

Если при малых углах наклона оси пластины по отношению к оси вращения в кольцевой ванне при MAO процесс взаимодействия МАИ с задней поверхностью происходит в ударно-фрикционном режиме – когда преобладают нормальные составляющие силы, то с передней поверхностью МАИ взаимодействует в фрикционно-ударном режиме, когда преобладают процессы скобления, истирания и выглаживания поверхности и поверхностного слоя. Наклеп поверхностного слоя МНТП подтверждает факт повышения плотности дефектов в нем. Наиболее активно дефектность слоя повышается в условиях фрикционного взаимодействия МАИ с обрабатываемыми

поверхностями пластин, в то время как ударное взаимодействие частиц МАП и их групп с поверхностями МНТП способствует преимущественно снижению энергетического уровня необходимого для активного размножения дефектов в поверхностном слое обрабатываемых деталей [49, 120, 121, 127].

Ранее отмечалось, что через 130 – 150 с МАО происходит уменьшение величины радиусов округления РК для данных условий обработки. Заметим, что данному этапу предшествует снижение поверхностной твердости, как на передних, так и на задних рабочих поверхностях МНТП. Выполненные исследования кинетики изменения поверхностной твердости МНТП при МАО в условиях больших магнитных зазоров при указанных углах базирования p за 3 мин имеет место стойкое повышение величины поверхностной твердости передней и задней поверхностей в 1,2 – 1,3 раза.

Предыдущие исследования и расчеты кинематики процесса МАО МНТП показали, что максимальные нормальные и тангенциальные составляющие скорости находятся в диапазоне углов наклона оправки $p = 20^\circ - 30^\circ$ при угле поворота оправки относительно вертикальной оси $q = 45^\circ$ (раздел 3.3). Угол q влияет на изменение соотношения тангенциальной к нормальной составляющих скорости обработки. При увеличении угла q это соотношение будет увеличиваться, что позволяет обеспечивать лучшие условия для пластического деформирования и наклепывания поверхностного слоя МНТП в результате ударного взаимодействия частиц МАИ с обрабатываемыми поверхностями. В противном случае – упрочнение поверхностного слоя может реализовываться в режиме фрикционного взаимодействия [16, 39, 49].

В экспериментальных исследованиях использовали пятигранные твердосплавные пластины типа PNMM 120408, изготовленные из твердого сплава ВК8. МАО выполняли при условиях обработки представленных в разделе 3.5.1. Одна из задних поверхностей была отполирована, на ней выполняли измерения поверхностной твердости.

Характер изменения поверхностной твердости на задней поверхности МНТП в зависимости от времени обработки для всех параметров базирования волнообразный (рис. 3.37). Через 80 – 90 с процесса МАО имеет место первый пик поверхностной твердости, а после 150 с – второй. Показано, что для исследуемых углов q амплитуда изменения поверхностной твердости разная, максимальная для $q = 0^\circ$, минимальная для $q = 45^\circ$, что объясняется тем, что при $q = 0^\circ$ преобладает нормальная составляющая скорости, соответственно будет максимальное ударное взаимодействие и будет

иметь место максимальный наклеп, а при $q = 45^\circ$ соотношение меняется в пользу тангенциальной составляющей, соответственно будет преобладать фрикционное взаимодействие [3].

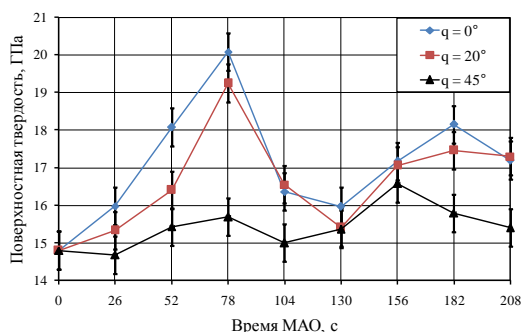


Рис. 3.37. Кинетика изменения величины поверхностной твердости МНТП при разных углах q

Аналогично данным полученным при изучении кинетики изменения шероховатости на неподготовленной поверхности МНТП, характер изменения поверхностной твердости имеет волнообразный характер, с той лишь разницей, что этот процесс находится в противофазе к шероховатости, что подтверждает результаты исследований, полученные в ранее и в работе [46]. Показано, что при повышении твердости шероховатость увеличивается, а при ее уменьшении, соответственно, уменьшается.

При МАО в поверхностных слоях деталей происходит активное накопление дефектов, что приводит к увеличению поверхностной твердости. Когда концентрация дефектов становится достаточно высокой, повышается вероятность образования микротрещин в тонком приповерхностном слое. При дальнейшей обработке реализуется диспергирование сформированного дефектного микрослоя с поверхности. При этом происходит частичное его разупрочнение и твердость снижается. При подобном механизме изменения свойств поверхностного слоя возможно уменьшение радиуса округления РК, происходит активизация процесса полирования и шероховатость снижается.

Показано, что рациональными параметрами базирования МНТП в рабочей зоне будут угол наклона оправки в касательной плоскости к кольцевой ванны $p = 20^\circ - 30^\circ$, угол поворота оправки относительно вертикальной оси кольцевой ванны $q = 20^\circ - 30^\circ$. При указанных значениях углов базирования на обрабатываемые поверхности действуют достаточные тангенциальные и нормальные

составляющие скорости обработки, при этом происходит повышение поверхностной твердости пластин до величины $HV = 17,5$ ГПа.

Определено влияние параметров базирования МНТП в рабочей зоне при MAO на физико-механические свойства их поверхностных слоев. Исследование выполнено на четырехгранных пластинах без покрытия типа SNMA, изготовленных из твердого сплава BK6OM (ISO - K10). MAO выполнено при условиях представленных в разделе 3.5.1.

На рис. 3.38 представлено изменение величины поверхностной твердости МНТП после MAO на передней и задней поверхностях при различных условиях их базирования в кольцевой рабочей зоне.

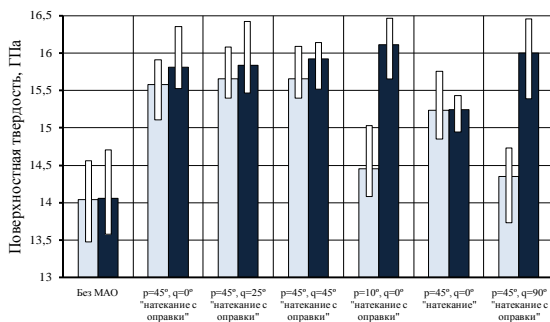


Рис. 3.38. Поверхностная твердость в зависимости от условий базирования пластин в рабочей зоне станка: 1 – на передней; 2 – на задней поверхности

Установлено, что при углах базирования пластин $p = 45^\circ$ и $q = 0^\circ, 25^\circ, 45^\circ$ в режиме «натекания с оправки» можно получить величину поверхностной твердости на передней поверхности в пределах $HV = 15,6 - 15,7$ ГПа, а на задней поверхности $HV = 15,8 - 15,9$ ГПа. Показано, что для всех трех углов q поворота оправки вокруг вертикальной оси величина поверхностной твердости практически одинакова. Это свидетельствует о том, что на величину поверхностной твердости этот угол базирования не имеет значительного влияния. Аналитически было рассчитано, что на переднюю и заднюю поверхности для углов $q = 0^\circ, 25^\circ, 45^\circ$ будут действовать различные IV_t и IV_n , но суммарные интегральные интенсивности обработки по тангенциальной и нормальной составляющих скорости обработки на каждой из поверхностей будут оставаться практически одинаковыми (рис. 3.13 а – в). Это свидетельствует о том, что упрочнение поверхностного слоя зависит от энергетического аспекта взаимодействия МАИ с обрабатываемыми

поверхностями МНТП. Отметим, что суммарная интегральная интенсивность обработки в два раза больше на передней поверхности, чем на задней, но поверхностная твердость на задней поверхности больше, что может свидетельствовать о необходимости, при упрочнении поверхностных слоев, не только наличия достаточных величин IV_t и IV_n , но и определенного их соотношения.

При углах базирования пластин $p = 10^\circ$, $q = 0^\circ$ взаимодействие МАИ с передней и задней поверхностями МНТП не одинаково. На передней поверхности величина поверхностной твердости после МАО равна 14,45 ГПа, что близко к исходному значению, а на задней – 16,1 ГПа. Это объясняется тем, что при таком базировании пластин в рабочей зоне при обработке обеспечивается активное взаимодействие МАИ с задней поверхностью и практически отсутствие взаимодействия с передней, что подтверждает теоретические расчеты, представленные на рис. 3.13 г. Суммарная интегральная интенсивность обработки передней поверхности имеет значение сравнимое с предыдущими результатами, но упрочнение при этом не происходит, что еще раз подтверждает важность не только значений IV_t и IV_n , но и их соотношения.

При обработке в режиме «натекания» при углах $p = 45^\circ$, $q = 0^\circ$ поверхностная твердость на передней и задней поверхностях равна 15,2 ГПа, что меньше, чем при тех же углах базирования, и для обработки в режиме «натекания с оправки». Теоретически полученные интегральные интенсивности обработки в обоих случаях одинаковы (рис. 3.13 а, д), что говорит о влиянии оправки на формирование свойств МАИ. Оправка способствует формированию в процессе МАО квазиуплотненной зоны перед передней поверхностью МНТП, что и обуславливает получение большей величины поверхностной твердости. При обработке в режиме «натекания» оправка не будет формировать уплотненной зоны, МАИ будет более подвижным и поверхностная твердость будет ниже.

При обработке в режиме «натекания с оправки» для углов базирования $p = 45^\circ$, $q = 90^\circ$ поверхностная твердость на передней поверхности равна 14,35 ГПа, почти не отличается от исходного значения, а на задней 16 ГПа, что намного больше, чем на передней. В этом случае, как и для углов базирования $p = 10^\circ$, $q = 0^\circ$, поверхностная твердость зависит от соотношения IV_t и IV_n (рис. 3.13 е). На передней поверхности IV_t больше, а IV_n почти отсутствует, что не обеспечивает условий обработки, при которых будет достигаться упрочнение поверхностного слоя.

Экспериментальные исследования влияния параметров базирования МНТП в рабочей зоне при МАО на их поверхностную твердость, показали, что изменение углов базирования пластин в

рабочей зоне при МАО обеспечивает управление условиями взаимодействия МАИ с рабочими поверхностями. При этом обеспечивается преобладание ударно-фрикционного или фрикционно-ударного взаимодействия МАИ с обрабатываемыми поверхностями. Показано, что метод МАО при данных условиях обработки позволяет повысить поверхностную твердость на 11 – 13% на передней и задней поверхностях пластин. На упрочнение поверхностного слоя большое влияние оказывает величина IV_n .

В результате выполненных исследований показано, что для упрочнения поверхностей МНТП при МАО необходимо обеспечить условия обработки, при которых отношение IV_t/IV_n будет не более 2.

Определено влияние соотношения обработки в режиме «натекания», «стекания» и «натекания с оправки» на получение поверхностной твердости на передней и задней поверхностях МНТП для пластин без покрытия типа PNMM 120408, изготовленных из твердого сплава марки ВК8. МАО этих пластин выполнили при условиях представленных выше. Показано, что размер зерен алмазной пасты практически не влияет на величину поверхностной твердости, она почти одинакова как для АСМ зернистостью 3/2 мкм, так и для АСМ с размером зерен 20/14 мкм, и увеличивается с 13 ГПа до 14,5 – 15 ГПа.

На рис. 3.39 показаны величины поверхностной твердости на передней и на задней поверхностях МНТП, обработанных при различном соотношении технологического времени обработки в режимах «натекания», «стекания» и «натекания с оправки», измерения выполняли при нагрузке на индентор 1, 1,5 и 2 Н.

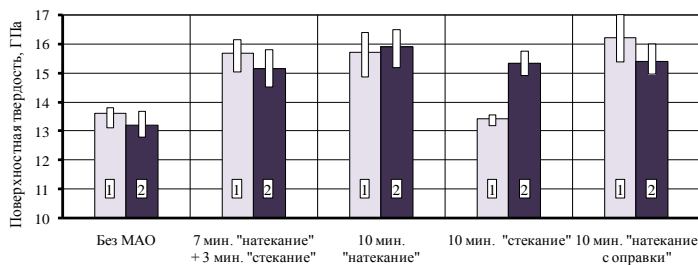


Рис. 3.39. Поверхностная твердость при МАО с различным соотношением технологического времени обработки в режимах «натекания», «стекания» и «натекания с оправки»: 1 – передняя поверхность; 2 – задняя поверхность

Показано, что на передней поверхности после 7 мин обработки в режиме «натекания» и 3 мин в режиме «стекания» и при обработке 10 мин в режиме «натекания» величина поверхностной твердости

практически одинакова и равна 15,7 – 15,8 ГПа, по сравнению с 13,1 – 13,6 ГПа для МНТП без обработки. Это происходит из-за того, что в обоих случаях при заданных условиях базирования МНТП в рабочей зоне передняя поверхность находится в одинаковых условиях взаимодействия с МАИ.

При МАО в режиме «стекания» на переднюю поверхность не действует достаточная величина силы для обеспечения обработки и величина поверхностной твердости почти не отличается от исходной. Наибольшая величина поверхностной твердости 16,2 ГПа была получена после 10 мин МАО в режиме «натекания с оправки», когда МНТП располагалась передней поверхностью к оправке. На задней поверхности при МАО в течении 7 мин в режиме «натекания» и 3 мин в режиме «стекания» величина поверхностной твердости составляет 15,2 ГПа, при обработке только в режиме «натекания» – 15,9 ГПа. При обработке в течение 10 мин на «стекание» и «натекание с оправки» величина поверхностной твердости одинакова и равна 15,4 ГПа, в силу того, что задние поверхности одинаково взаимодействуют с МАИ, и в данном случае меняется только ориентация пластины относительно оправки.

Установлено, что при обработке в режиме «натекания с оправки» за 10 мин МАО достигается наибольшая величина поверхностной твердости на передней поверхности МНТП и составляет 16,2 ГПа. На величину твердости на задней поверхности ориентация пластин и соотношение времени обработки в режиме «натекания» и «стекания» имеют меньшее влияние и ее величина равна 15,2 – 15,9 ГПа.

Определено влияние условий МАО в больших магнитных зазорах кольцевого типа на изменение твердости по глубине приповерхностного слоя МНТП. Исследования выполнены на твердосплавных пластинах без покрытия типа PNMM 120408, изготовленных из твердого сплава ВК8. Пластины обрабатывали 3 мин в режиме «натекания» и 2 мин «стекания» смесью ферромагнитного порошка Ферромап зернистостью 200/100 мкм и алмазной пасты с размером зерен 3/2 мкм, 10 мин в режиме «натекания» и 10 мин «натекания с оправки» – смесью Ферромап 200/100 мкм и алмазной пасты 20/14 мкм, другие условия МАО представлены в разделе 3.5.1. Установлено, что при данных условиях обработки происходит увеличение твердости приповерхностного слоя на глубину 150 – 170 мкм, зависимости распределения твердости представлены на рис. 3.40.

При обработке 10 мин в режиме «натекания с оправки» величина твердости на 4 – 5% больше твердости, полученной при

обработке в режиме «натекания» при прочих равных условиях обработки. При обработке в режиме «натекания с оправки», оправка выполняет специфическую роль в процессе формирования МАИ в зоне обработки, создавая подвижную уплотненную зону вблизи передней поверхности МНТП, что и объясняет получение большей величины жесткости МАИ. При таких условиях обработки увеличиваются силы взаимодействия МАИ с поверхностью изделий. За 5 мин обработки МНТП при комбинировании режимов обработки «натекания» и «стекания» величина твердости ниже, чем при обработке в течение 10 мин в режиме «натекания» при прочих равных условиях.

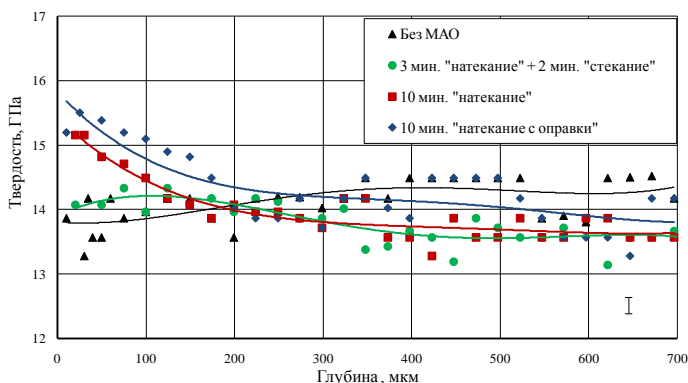


Рис. 3.40. Изменение твердости по глубине приповерхностного слоя МНТП при разных условиях МАО

Увеличение твердости приповерхностного слоя происходит за счет квазиизмельчения карбидной составляющей, что является следствием повышения плотности дислокаций в приповерхностном слое в результате процессов его микропластической деформирования при МАО и за счет частичного преобразования типа решетки кобальтовой связи из гексагональной плотноупакованной в гранецентрированную кубическую.

На рис. 3.41 изображены микроструктуры по глубине поверхностного слоя. Показано, что величина карбидной составляющей в приповерхностном слое обработанных пластин равна 1 – 2,5 мкм, а у необработанных 2,5 – 4 мкм. На зернах карбида вольфрама появляются линии скольжения дислокаций, происходит уменьшение размеров блоков мозаики, увеличивается их плотность. За счет таких изменений в структуре приповерхностного слоя происходит повышение физико-механических свойств поверхностного

слоя, в том числе и увеличение твердости, как на поверхностях, так и в приповерхностном слое, меняется напряженное состояние поверхностного слоя – растягивающие напряжения переходят в напряжение сжатия, что актуально для обеспечения повышенной стойкости и положительно влияет на качество нанесения износостойких покрытий. Таким образом, показано, что рост твердости твердых сплавов связан не только с изменением в связующей фазе, а и с изменениями в карбидной составляющей.

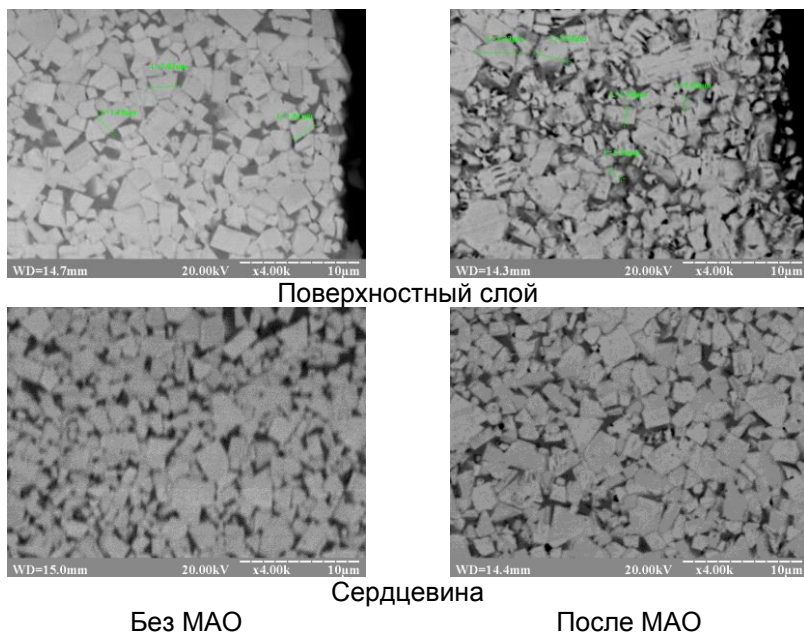


Рис. 3.41. Микроструктура поверхностного слоя и сердцевины МНТП

Определено влияние размеров зерен порошковых материалов, из которых формируется МАИ на кинетику изменения величины поверхностной твердости при MAO в условиях обработки в больших магнитных зазорах кольцевого типа для пластин типа SEAN 1203AFTN-M14-K, изготовленных из кермета марки НХ (рис. 3.42). Условия MAO представлены в разделе 3.5.1.

Аналогично ранее полученным результатам характер изменения поверхностной твердости волнообразный, с той лишь разницей, что первый пик твердости характерный для времени MAO 100 – 140 с. При использовании смеси ДЧК зернистостью 200/100 мкм с алмазной пастой зернистостью 3/2 + 2/1 мкм амплитуда изменения величины

поверхностной твердости более существенная, а при использовании ДЧК зернистостью 400/315 мкм с алмазной пастой зернистостью 14/10 мкм величина твердости в начале обработки увеличивается, принимает максимальное значение, а затем практически не меняется. Что может быть обеспечено более высокой абразивной способностью смеси ДЧК 400/315 мкм с алмазной пастой зернистостью 20/14 мкм по сравнению с ДЧК 200/100 мкм с пастой 3/2 + 2/1 мкм. В конечном итоге, после обработки величина твердости в обоих случаях почти одинакова и превышает исходную на 13 – 14%.

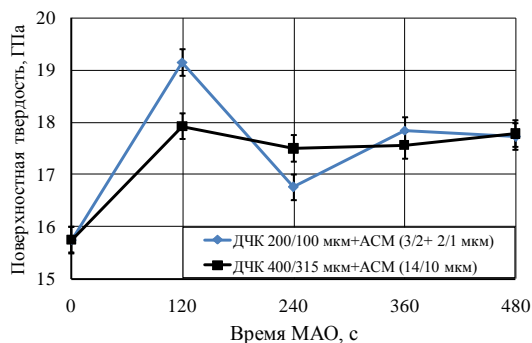


Рис. 3.42. Кинетика изменения величины поверхностной твердости МНТП после МАО в зависимости от состава МАИ

Для определения влияния дополнительного немагнитного стержневого элемента на формирование твердости рабочих поверхностей МНТП выполнены экспериментальные исследования при обработке в режиме «натекания» и «натекания с оправки» (рис. 3.27) при условиях МАО представленных в разделе 3.5.1.

В результате экспериментальных исследований показано, что поверхностная твердость на передней поверхности повысилась до величины 16,1 ГПа, на задней – до 13,75 ГПа, что в среднем составляет на передней поверхности 13,5%, на задней – 14,1%. Отметим, что твердость на передней поверхности МНТП, которая в процессе МАО располагалась со стороны оправки и передней поверхности со стороны стержневого элемента, идентична, что подтверждает эффективность его использования.

Для перешлифованных МНТП без стружколомающих канавок поверхностная твердость передней поверхности была понижена, из-за снятия наклепанного поверхностного слоя, что является причиной более низкой стойкости перезаточенных пластин по сравнению с новыми. Применение же после перезаточки дополнительного МАО обеспечивает восстановление высокой работоспособности пластин за счет повышения поверхностной твердости и формирования радиусов округления РК.

3.7 Влияние МАО на прочность и сопротивление разрушению МНТП

При МАО МНТП кроме формирования необходимых микрогеометрических показателей качества рабочих поверхностей и РК обеспечивается повышение их сопротивления разрушению и прочность. Для экспериментальных исследований конструкционной прочности МНТП применяется метод трехточечного изгиба, который реализуется на гидравлических установках ZD-4 и ZD-40. Для этого используются специальные приспособления (рис. 3.43 и 3.44) [76, 77].

Пластины испытывали в положении, когда в зоне растяжения располагали переднюю или заднюю поверхности. Такой подход дает возможность учесть влияние технологических и конструкционных факторов на предел прочности.

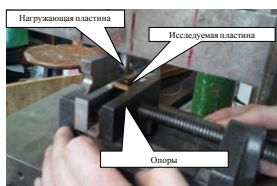


Рис. 3.43. Приспособление для тестирования на изгиб МНТП на установке ZD-4



Рис. 3.44. Приспособление для тестирования на изгиб МНТП на установке ZD-40

Для определения сопротивления разрушению РК МНТП при контактных нагрузках с трением, предложено выполнять сканирование РК, которое происходит путем приложения контактного усилия с трением при перемещении нагрузочного элемента с цилиндрической поверхностью вдоль грани пластины. Устройство для испытаний представлено на рис. 3.45. В качестве нагрузочного элемента использовано треугольную твердосплавную пластину с радиусом при вершине 1,1 мм.



Рис. 3.45. Приспособление для оценки сопротивляемости разрушению РК МНТП при контактной нагрузке с трением

В результате испытаний на задней поверхности пластины формируются сколы, линейные размеры, площадь и плотность которых характеризуют сопротивление локальной нагрузке и могут быть использованы для оценки эксплуатационных свойств МНТП как после МАО, так и после других методов финишной обработки (рис. 3.46).

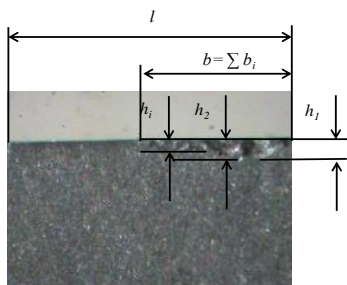


Рис. 3.46. Сколы на задней поверхности МНТП, которые возникают при контактной нагрузке и силовом сканировании кромки

Измеряются глубина скола h_i , линейный размер участка скола вдоль кромки b_i , N – количество сколов. Максимальная глубина скола определяется по:

$$h_{\max} = \max(h_i) \quad (3.20)$$

Средняя глубина скола:

$$h_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i \quad (3.21)$$

Суммарная длина b участков со сколами вдоль грани определяется:

$$b = \sum_{i=1}^N b_i \quad (3.22)$$

где l – длина сканирования.

Для расчета суммарной площади сколов – F_i их форму аппроксимируют полуэллипсами, прямоугольниками, треугольниками:

$$F = \sum_{i=1}^N F_i \quad (3.23)$$

Параметры h_{\max} , h_{\max}/h_{mean} , b/l и F характеризуют сопротивление разрушению РК и сравниваются для твердосплавных пластин после различных условий обработки.

Было исследовано конструкционную прочность при изгибе МНТП из сплавов Т15К6 и ВК8. В таблице 3.2 представлены результаты испытаний конструкционной прочности в условиях трехточечного изгиба МНТП типа WNMG 120408, изготовленных из твердого сплава Т15К6 без покрытия.

Таблица 3.2

Результаты испытаний при поперечном изгибе МНТП

Состояние МНТП	Время МАО, мин	Передняя поверхность				Задняя поверхность			
		Твердость передняя/опорная поверхность Р=200г, ГПа	Средняя величина твердости, ГПа	$\sigma_{изг}$, МПа	Прирост $\sigma_{изг}$ относительно исходного, МПа	Твердость Р=200г, ГПа	Средняя величина твердости, ГПа	$\sigma_{изг}$, МПа	Прирост $\sigma_{изг}$ относительно исходного, МПа
Без МАО	1	–	–	441	441 без фаски	–	–	1460/1623	1671
		–	–	657	657 снятая фаска	–	–	1719	
Ферромаг 200/100 мкм + АСМ 20/14 мкм	2	18,3/18,5	19	622	695 (+4%)	16,2	17,8	1719	1752 (+5%)
		19,6/16		740	снятая фаска	19,4		1784	
	4	19,2/20,8	19,2	657	647 (-1,5%)	16,6	16,6	1411	1443 (-18%)
		–		637	снятая фаска	–		1476	
	6	20/20,7	19,6	804	801 (+22%)	20,3	17,9	1735	1890 (+13%)
		19,2/15,2		799	снятая фаска	15,5		2044	
S330 1200/900 мкм	2	20,6/17,9	20,75	740	945 (+44%) снята фаска	16	15,8	1265	1403 (-20%)
		22,9/20,2		1151		15,7		1541	

МАО выполняли при следующих условиях: угловая скорость вращения пластин вокруг оси оправки – 300 об/мин; величина магнитной индукции в рабочей зоне – 0,25 Тл; угол наклона оправки по отношению к вертикальной оси кольцевой ванны $p = 40^\circ$; угол поворота оправки относительно вертикальной оси $q = 20^\circ$; скорость движения пластин вдоль кольцевой рабочей зоны – 2,5 м/с; МАО –

смесь порошка Ферромап зернистостью 200/100 мкм и алмазной пасты зернистостью 20/14 мкм. Также обработку выполняли порошком S330 (чугунные шарики фракции 1200/900 мкм) без АСМ. Время обработки варьировалось.

Показано, что важным параметром МАО является время обработки. Прочность обеих поверхностей пластин, как и твердость изменяется с некоторой периодичностью (рис. 3.47). МАО в течение 2 мин приводит к некоторому росту прочности при изгибе при обеих схемах исследования (4 – 5%). При условии, что обработка длится 4 мин $\sigma_{изг}$ уменьшается, особенно по схеме, когда в зоне растяжения – задняя поверхность. Увеличение времени обработки до 6 мин увеличивает $\sigma_{изг}$ на 13 – 22%. Результаты, полученные после МАО МНТП чугуными шариками с размером частиц 1200/900 мкм свидетельствуют об эффективности использования такого МАП, но нуждается в оптимизации условий обработки.

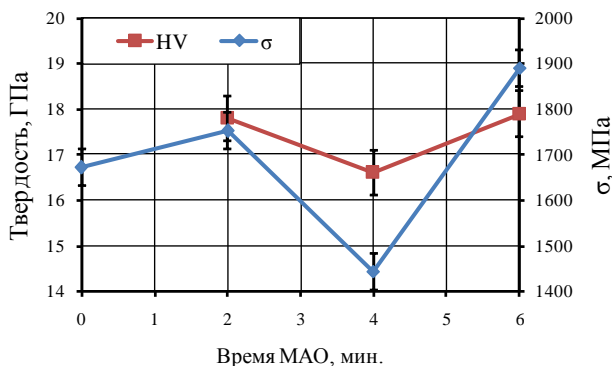


Рис. 3.47. Зависимость изменения поверхностной твердости задней поверхности МНТП из Т15К6 и прочности при изгибе от времени МАО

Показано, что при выборе рациональных условий МАО возможно увеличить конструкционную прочность МНТП. В таблице 3.3 приведены результаты испытаний на конструкционную прочность в условиях поперечного изгиба пластин РNММ 120408, (материал пластин ВК8). МАО выполняли при режимах представленных выше (раздел 3.5.1).

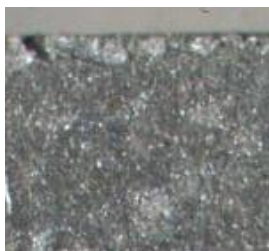
Анализ полученных результатов показывает, что для всех режимов обработки наблюдается рост прочности МНТП. Наличие тонкого вакуум-плазменного покрытия не влияет на конструкционную прочность. Максимальный рост прочности наблюдается для пластин обработанных 10 мин в режиме «натекания с оправки».

Таблица 3.3

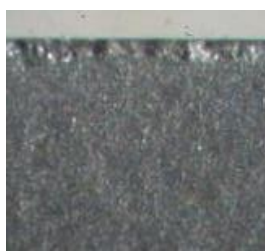
Результаты испытаний пластин PNMM 120408 при поперечном изгибе
(передняя поверхность – в зоне растяжения)

Состояние пластин		№	Разрушающая сила, Н	Граница прочности $\sigma_{изг}$, МПа	Прирост $\sigma_{изг}$ относительно исходного, МПа	Время MAO, мин	Режим MAO
Без MAO		В 1	1000	976	1027	–	–
		В 2	1105	1078			
После MAO	Ферромап + АСМ 3/2 мкм	1	1130	1103	1105 (+ %7,5)	5	3 мин «натекание» + 2 мин «стекание»
		2	1135	1108			
	Ферромап + АСМ 20/14 мкм	3	1255	1225	1200 (+17%)	5	3 мин «натекание» + 2 мин «стекание»
	Ферромап + АСМ 20/14 мкм + TiCN	4	1205	1176			
	Ферромап+ АСМ 20/14 мкм	5	910	888	–	10	«натекание»
		6	1275	1244	1244 (+21%)		«натекание с оправки»

Выполнены исследования сопротивления разрушению РК этих МНТП при контактной нагрузке с трением до и после MAO. Исследования кромок выполняли при нагрузке $P = 50,6$ Н и 79,97 Н. Внешний вид РК до и после MAO представлено на рис. 3.48.



Без MAO



После MAO

Рис. 3.48. Сколы на задней поверхности МНТП при сканировании кромки с нагрузкой $P = 79,97$ Н

Определялись следующие параметры: линейные размеры сколов h_i , b_i ; максимальная глубина сколов h_{max} , средняя глубина сколов h_{mean} , отношение максимальной глубины сколов до средней h_{max} / h_{mean} , длина участков, на которых есть сколы l , плотность повреждаемости кромок b/l и общая площадь сколов F . Результаты измерений представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Параметры сравнительных испытаний РК пластин с ВК8 при
контактной нагрузке с трением

Параметры	$P = 50,6 \text{ Н}$		$P = 79,97 \text{ Н}$	
	Без МАО	МАО	Без МАО	МАО
h_{\max} , мм	0,132	0,0614	0,23	0,132
h_{mean} , мм	0,0736	0,054	0,11	0,0795
h_{\max}/h_{mean}	1,79	1,13	2,07	1,66
b , мм	5,425	0,572	9,64	8,095
b/l	0,477 (47,7 %)	0,05 (5 %)	0,86 (86 %)	0,71 (71 %)
F , мм ²	0,248	0,024	0,8	0,68

Показано, что при нагрузке $P = 50,6 \text{ Н}$ для образцов после МАО глубина максимального скола уменьшается более чем вдвое, общая площадь сколов уменьшается в 10 раз, параметр повреждаемости уменьшается с 47,7% до 5% по сравнению с образцами в исходном состоянии. Параметр $h_{\max} / h_{\text{mean}}$ характеризует степень однородности повреждений (при $h_{\max} / h_{\text{mean}} = 1$, кромка повреждается одинаково по всей длине). Он снижается с 1,79 для необработанных пластин до 1,13 для обработанных. С ростом P значительно возрастают все рассматриваемые показатели для обработанных и необработанных пластин.

Преимущества МАО при росте нагрузки сохраняются, но разница между обработанными и необработанными образцами уменьшается. Глубина максимального скола уменьшается в 1,7 раза, общая площадь сколов снижается в 1,18 раза, параметр повреждаемости уменьшился с 86% до 71% по сравнению с образцами в исходном состоянии. Степень неоднородности повреждений также возрастает при увеличении P , и для необработанных образцов и для обработанных составляет 2,07 и 1,66 соответственно.

Анализ полученных результатов показывает существенные преимущества обработанных пластин по сопротивлению локальным нагрузкам. Эти преимущества прежде всего проявляются при нагрузке $P = 50,6 \text{ Н}$, что связано с особенностями изменения характеристик приповерхностного слоя изделий после МАО по глубине.

3.8 Влияние МАО на повышение стойкости МНТП

В предыдущих исследованиях теоретически рассчитано и экспериментально установлено, что комплексно улучшить качество

МНТП возможно в результате МАО в больших магнитных зазорах кольцевого типа, что обеспечивает повышение их работоспособности. Эффективность МАО и формирование рациональных величин радиусов округления РК, шероховатости и твердости рабочих поверхностей в значительной степени определяется условиями и временем обработки, базированием и траекторией перемещения пластин в рабочих зонах.

Экспериментальные исследования влияние параметров и условий МАО в условиях больших магнитных зазоров кольцевого типа на стойкость выполнено на МНТП типа SNMG 120412, изготовленных из твердого сплава марки BK8 обработанных с наклонным расположением оправки относительно плоскости рабочей зоны величиной $\rho = 20^\circ$. МАО этих пластин выполняли 5 мин в режимах «натекания» и «натекания с оправки» и следующими параметрами: угловая скорость вращения оправки вокруг оси кольцевой ванны $\omega_B = 300$ об/мин, угловая скорость вращения оправки с закрепленной на ней МНТП $\omega_O = 300$ об/мин, индукция магнитного поля в рабочей зоне между полюсными наконечниками $B = 0,23$ Тл, МАМ – Ферромап зернистостью 400/315 мкм и 200/100 мкм с добавлением алмазной пасты зернистостью 3/2 мкм, обработку выполняли с использованием СОТС марки Асфол.

На рис. 3.49 представлены кривые износа по задней поверхности при точении стали 45 без СОТС при $V = 100$ м/мин, $t = 1,5$ мм, $s = 0,35$ мм/об на станке 16К20. Показано, что при использовании МАО на финишных этапах производства МНТП обеспечивается повышение их стойкости. Износ необработанных пластин до величины 0,3 мм по задней поверхности проявляется через 75 мин, радиус округления РК которых составляет 40 – 45 мкм, на кромках присутствуют сколы и вырывы. Для МНТП обработанных порошком Ферромап 400/315 мкм и 200/100 мкм с алмазной пастой зернистостью 3/2 мкм при МАО в режиме «натекания» стойкость повышается до 110 мин, а их радиусы округления РК равны 50 – 60 мкм и 55 – 58 мкм соответственно и не имеют вырывов и сколов. Для пластин обработанных в режиме «натекания с оправки» стойкость повышается до 140 мин, что больше чем для пластин обработанных при тех же условиях, но в режиме «натекания», величина радиуса округления РК которых равна 50 – 55 мкм. Повышение стойкости в данном случае происходит за счет формирования гладкого радиуса округления РК и рациональной его формы. Кроме угла наклона оправки ρ при базировании МНТП в рабочей зоне выполняли дополнительно ее поворот относительно вертикальной оси на угол q , что обеспечивает лучшие условия взаимодействия МАИ с обрабатываемыми поверхностями пластин.

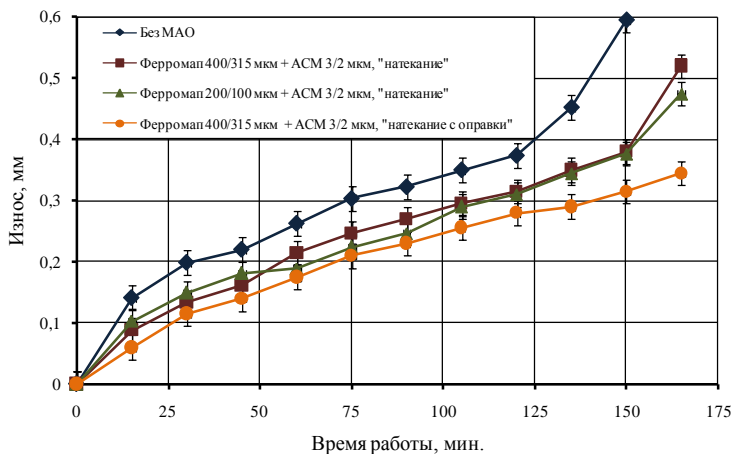


Рис. 3.49. Износ по задней поверхности МНТП при точении стали 45, $V = 100$ м/мин, $t = 1,5$ мм, $S = 0,35$ мм/об

Далее выполнены экспериментальные исследования работоспособности МНТП для пластин без покрытия типа РNММ 120408, изготовленных из сплава ВК8. Обработка пластин выполняли с варьированием соотношения технологического времени обработки в различных режимах и с базированием МНТП в рабочей зоне под углами p и q при условиях МАО представленных в разделе 3.5.

На рис. 3.50 представлены кривые износа МНТП по задней поверхности при точении стали 40Х13 без СОТС, при $V = 90$ м/мин, $s = 0,195$ мм/об, $t = 1$ мм на станке 1К62.

Стойкость МНТП без МАО (рис. 3.50, кривые 1, 2, 3) не превышает 60 мин, а в отдельных случаях составляет всего 20 мин (кривая 2). Увеличение времени эксплуатации приводит к катастрофическому разрушению МНТП, которое сопровождается выкрашиванием и скалыванием РК. Пластины, которые были обработаны 10 мин в режиме «натекания» (кривая 6) обладают стойкостью в 1,8 – 1,85 раза большей по сравнению с необработанными, время их работы составляет в среднем 110 мин, при этом скалывание кромок не происходит. Пластины, которые были обработаны при аналогичных условиях, но в режиме «стекания» показали стойкость ниже даже, чем в необработанных. Это объясняется тем, что при таких условиях МАО величина радиуса округления РК меньше (26 – 28 мкм на кромке на грани и 40 – 42 мкм на кромке при вершине), чем при обработке в режиме «натекания» (42 – 43 мкм на грани и 50 – 57 мкм на углу), а величина К-фактора

равна 0,4 на РК на грани и 0,6 на кромке при вершине пластин, что меньше по сравнению с пластинами обработанными в режиме «натекания» – 2 – 2,3 на кромке на грани и 0,75 – 0,8 на кромке при вершине и меньше по сравнению с необработанными пластинами.

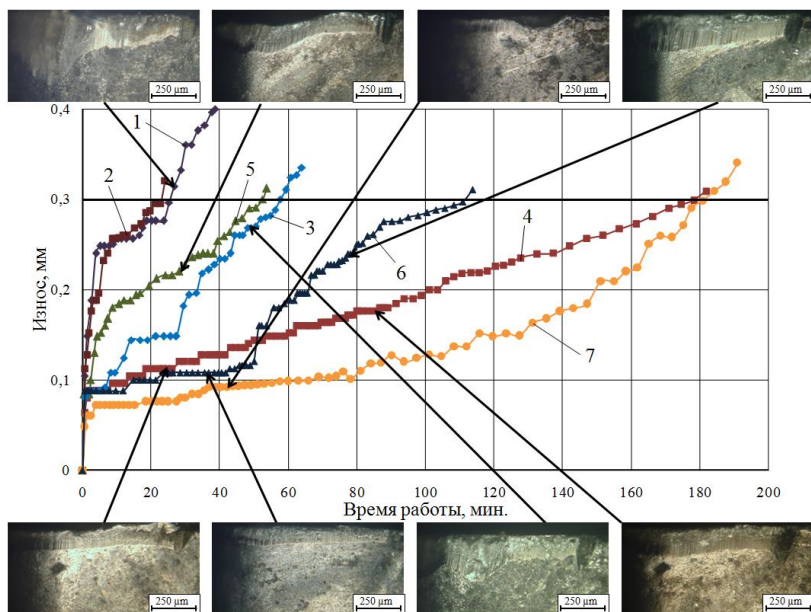


Рис. 3.50. Износ МНТП по задней поверхности при точении стали 40Х13, $V = 90 \text{ м/мин}$, $t = 1 \text{ мм}$, $s = 0,195 \text{ мм/об}$: 1, 2, 3 – без МАО; 4 – «натекание с оправки»; 5 – «стекание»; 6 – «натекание»; 7 – «натекание» + «стекание»

Поверхностная твердость на передней поверхности практически равна твердости пластин без МАО. Это связано с тем, что МАИ недостаточно взаимодействует с передней поверхностью, вследствие чего нормальная составляющая скорости его взаимодействия с обрабатываемой поверхностью близка к нулю, то есть передняя поверхность при МАО в указанных условиях находится в «теневой зоне» [120]. При МАО МНТП в режиме «натекания с оправки» (кривая 4) стойкость пластин повышается в 2,5 – 3 раза. При таких условиях МАО поверхностная твердость пластин на передней поверхности составляет 16,2 ГПа, а на задней – 15,4 ГПа, по сравнению с необработанными – 13,6 и 13,1 ГПа, соответственно.

Величина К-фактора равна 1,7 – 2 на РК на грани и 1,2 – 1,3 на кромке при вершине пластин, величина радиуса округления равна 48 – 50 мкм на кромке на грани и 60 – 62 мкм на кромке при вершине. У пластин обработанных 5 мин в режиме «натекания» и «стекания» (кривая 7) стойкость также повышается в 2,5 – 3 раза за счет повышения поверхностной твердости на передней и задней поверхностях, формирования благоприятной формы округления РК (К-фактор 1,1 – 1,5 на кромке на грани и 0,9 – 1,2 на кромке при вершине) и ее притупления. Отметим, что у пластин обработанных методом MAO сведен до минимума период приработки, что способствует повышению стойкости такого инструмента.

Износ МНТП характеризуется неравномерным характером, и имеет пики роста скорости износа, что связано с процессами скалывания РК на микроуровне. После скалывания происходит приработка в уже новых условиях резания (с другой величиной и формой округления РК), далее происходит снова скалывания и формирование РК, процесс повторяется циклически до тех пор пока не переходит в фазу катастрофического износа. На рис. 3.51 представлен график изменения скорости износа МНТП обработанных в режиме «натекание с оправки».

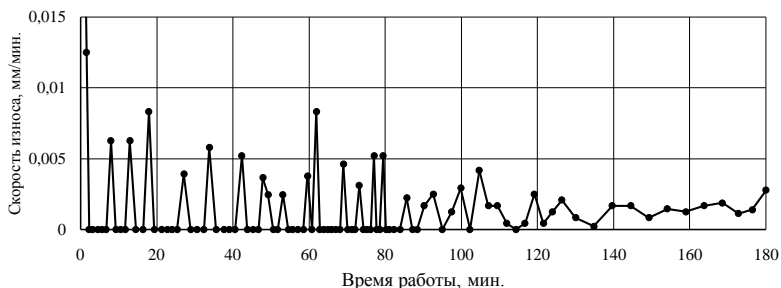


Рис. 3.51. Изменение скорости износа МНТП

Для представленного графика, соответствующего износу МНТП обработанных в режиме «натекания с оправки», средний период микроскалываний 6,95 мин, а средняя скорость износа 0,0026 мм/мин. Для пластин обработанных при тех же условиях, но в режиме «стекания» средний период микроскалывания равен 5,67 мин, средняя скорость износа – 0,0102 мм/мин. Для пластин обработанных в режиме «натекания» эти величины соответственно равны – 4,28 мин и 0,0037 мм/мин, для пластин обработанных в течение 3 мин в режиме «натекания» и 2 мин в режиме «стекания» средний период

микроскалывания равен 9,59 мин, а средняя скорость износа – 0,0025 мм/мин. Для необработанных пластин эти величины соответственно равны – 4,77 мин и 0,0136 мм/мин. Для МНТП обработанных на финишных этапах методом MAO характерен больший период между скалывания и гораздо меньшая скорость износа.

Проведенные исследования влияния MAO МНТП на их эксплуатационную стойкость показали, что данный метод финишной обработки позволяет снизить скорость износа с 0,0136 мм/мин до 0,0025 – 0,0037 мм/мин и повысить стойкость в 2,5 – 3 раза.

Анализ полученных результатов показал, что на стойкость МНТП существенное влияние оказывают характер округления РК, их форма и поверхностная твердость передней и задней поверхностей. Доказана целесообразность использования на финишных этапах изготовления МНТП метода MAO для повышения их стойкости.

Раздел 4

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

4.1 Экспериментальная установка для магнитно-абразивной обработки лопаток ГТД

Устройства и способы МАО деталей сложной пространственной формы – типа лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) предложенные раньше [134, 135] не реализуют всех возможностей метода, поскольку в первом случае затруднено создание магнитно-абразивного инструмента с приемлемыми свойствами в средней части немагнитного контейнера, во втором - обработка осуществляется за счет незначительных осциллирующих движений лопаток. В НТУУ «КПИ» разработана установка для МАО лопаток, которая совмещает в себе преимущества двух предыдущих способов – большие скорости перемещения детали и достаточные для формирования эффективного МАИ значения индукции магнитного поля в рабочих зонах магнитных зазоров. Установка обеспечивает создание МАИ с заданными свойствами в рабочем зазоре типа «кольцевая ванна», вращение обрабатываемых лопаток вокруг оси кольцевой ванны, плавное введение лопатки в зону обработки, колебания лопатки вокруг оси крепления и осцилляцию вдоль этой оси. Для МАО больших лопаток со значительным углом закрутки предусмотрен механизм заданного, плавного поворота лопаток в зависимости от высоты детали. Разработанная установка может быть собрана на базе вертикально-фрезерного станка типа ЛФ-260, МА-633, ОЦ-Ижевск и подобных станках с подвижным шпинделем. Внешний вид установки приведен на рис. 4.1, а его принципиальная схема на рис. 4.2.

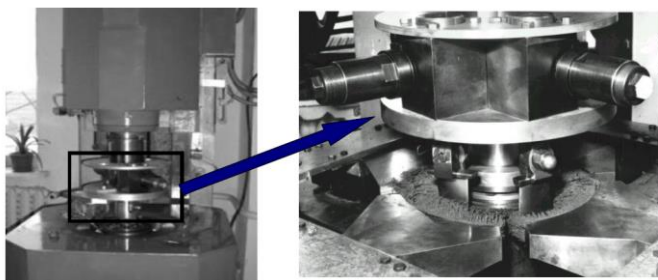


Рис.4.1. Внешний вид установки для МАО лопаток ГТД

На горизонтальном столе станка размещается (рис. 4.2) магнитная система, которая состоит из разветвленного, симметричного магнитопровода 1 с коаксиально расположенными полюсными наконечниками, которые образуют между полюсами кольцевую рабочую зону 11 и катушек 2 электромагнитов постоянного тока.

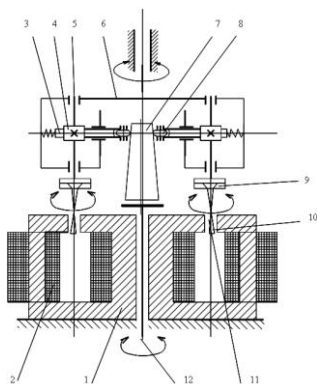


Рис. 4.2. Схема установки для магнитно-абразивной обработки лопаток ГТД

На столе, перпендикулярно к его плоскости вдоль оси кольцевой зоны, установлен с возможностью вращения вал 12, на котором с регулируемым эксцентриситетом \mathcal{E} размещен профильный копир 7. На шпинделе станка, который имеет возможность регулируемого вертикального перемещения, соосно с валом 12 установлена роторная головка 6, внешний вид которой в рабочем положении показан на рисунке 4.1. В роторной головке расположены радиально подвижные подпружиненные зубчатые рейки 3 (рис. 4.2).

На концах реек, повернутых к оси ротора, закреплены ролики 8, которые находятся в контакте с профильным копиром 7. Рейки 3 зацепленные с соответствующими шестернями 4 коаксиальных шпинделей 5, установленных в роторной головке 6. В шпинделях 5 предусмотрены державки 9 для крепления обрабатываемых лопаток 10.

Работает устройство следующим образом. Кольцевую рабочую зону 11 заполняют магнитно-абразивным порошком, из которого во время обработки формируется МАИ. Ротор 6, вращаясь с регулируемой частотой, с закрепленными в державках 9 шпинделей 5 лопатками 10 опускают. При этом лопатки вводятся в кольцевую рабочую зону магнитной системы – зону обработки. Рабочее движение осуществляют регулируемым вращением ротора 6 с возможностью реверса с необходимой частотой вращения. Ролики 8, обкатываются вокруг эксцентрически установленного копира 7, передают возвратно поступательное движение рейкам 3, которые

проворачивают шестерни 4 и осуществляют угловую осцилляцию вокруг собственных осей шпинделей 5 с державками 9 и лопатками 10. Амплитуда угловой осцилляции задается эксцентриситетом копира, а частота осцилляции – относительной частотой вращения ротора и копира. В процессе обработки ротор 6 постепенно опускается в направлении рабочей зоны на длину пера лопатки. При этом каждая державка проворачивается дополнительно вокруг своей оси на угол закрутки пера лопатки, в сторону противоположную закрутке, величина которого запрограммирована профилем копира 7. Тем самым, при введении лопатки в зону обработки, обеспечивается сохранение или изменение по заданному закону величины угла расположения лопатки относительно силовых линий коаксиального магнитного поля.

Перемещая вертикально ротор с обрабатываемыми деталями, регулируют время пребывания каждого определенного участка по длине пера и обеспечивают тем самым заданный режим обработки. Изменяя направление вращения ротора, обеспечивают обработку входных и выходных кромок пера лопаток.

Разработанная методика расчета конструктивных параметров установки для МАО лопаток позволяет по таблицам координат пера лопатки определить основные параметры конструкции установки, а именно радиус рабочей зоны, профиль копира, высоту рабочей зоны. Необходимо отметить, что оптимальный радиус рабочей зоны зависит от длины хорды и прогиба пера лопатки; высота рабочей зоны от отношения угла закручивания к высоте пера; профиль копира от угла закрутки пера лопатки по высоте.

Радиус рабочей зоны R определяется исходя из необходимой производительности установки, как:

$$R = N \cdot L / \pi \quad (4.1)$$

где N – количество одновременно установленных лопаток; L – длина хорды пера лопатки.

Определенный таким способом радиус обеспечит размещение лопаток по кольцу рабочей зоны с разрывами между ними равными L . После выбора R , выполняется проверочный расчет, основанный на следующих положениях – кривизна профиля лопатки, с некоторой точностью, может быть описана дугой круга радиуса r , что являет собой среднее арифметическое радиусов кругов описанных по линии спинки и линии корыта.

При перемещении лопатки с кривизной радиуса r по кругу радиуса R профиль пера лопатки (за счет взаимодействия его со встречным «поток» МАИ) изменяется, то есть изменяется кривизна лопатки по сравнению с кривизной лопаток, которая вычисляется по таблицам координат. Причем чем меньшее значение R , тем более значительное расхождение между табличным и кинематическим профилем. Табличный профиль отвечает отношению $R \gg r$, или $R > r$. При $R \sim r$ кинематический профиль выпрямляется (его средняя линия становится близкой к прямой рис. 4.3 б). В случае $R < r$ кинематический профиль приобретает обратную кривизну – загибается в сторону спинки пера лопатки (рис.4.3 в).

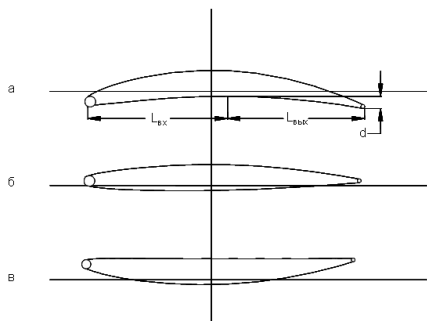


Рис. 4.3. Форма кинематического профиля пера лопатки для случаев:
а – $R > r$, б – $R \sim r$, в – $R < r$

С другой стороны, качественная, равномерная обработка лопатки выполняется при колебании последней в процессе обработки вокруг собственной вертикальной оси с угловой амплитудой $\theta = 15^\circ$ [11, 76]. Поэтому для обеспечения равномерной обработки необходимо, чтобы угол прогиба кинематического профиля лопатки был на $2 - 3^\circ$ меньше. Таким образом, оптимальным условиям обработки будет удовлетворять прогиб профиля, не превышающий $10 - 12^\circ$, что, например, отвечает симметричному прогибу в 1,6 мм при длине хорды пера 20 мм. В случае несимметричного прогиба в качестве действительного угла прогиба берется значение, которое определяется по формуле:

$$\delta = \arctg\left(\frac{d}{\min\{l\}}\right) \quad (4.2)$$

где δ – угол прогиба профиля; d – величина прогиба в мм (рис. 4.3 а); $\min\{l\}$ – минимальное из двух расстояний от входной и выходной кромок лопатки к месту измерения прогиба (рис. 4.3 а).

Проверочный расчет заключается в следующем. Определяется угол установки пересечения пера лопатки – гипотетический угол α_y

между касательной к средней линии кольцевой рабочей зоны и осью X лопатки. При этом считается, что центр координат лопатки находится на средней линии кольцевой ванны. Угол установки определяется как:

$$\alpha_y = -\arctg((Y_{r2} - Y_{r1}) / (X_{r2} - X_{r1})) \quad (4.3)$$

где Y_{r1} , Y_{r2} , X_{r1} , X_{r2} – координаты центров закругляет кромки (1 – входной, 2 – выходной), которые определяются по таблице координат пера лопатки.

Тот же угол α_y может определяться и как угол между осью Y и прямой, которая соединяет центр координат лопатки с центром круга лопатки r . Вычисляются координаты пересечения пера лопатки исходя из полученного угла установки α_y . В случае ($\alpha_y = 0$) они остаются без изменений. Перерасчет выполняется для каждого участка как:

$$\begin{cases} X_n = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} \cdot \cos \beta \\ Y_n = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} \cdot \sin \beta \end{cases} \quad (4.4)$$

где X_n , Y_n – новые координаты точки поверхности пера;

X_c, Y_c – старые координаты точки поверхности пера; β – угол расположения точки поверхности пера при переходе в полярную систему координат, определяемый как:

$$\beta = \begin{cases} \arctg(Y_c / X_c) + \alpha_y & X_0 > 0 \\ \arctg(Y_c / X_c) + \alpha_y + 180^\circ & X_0 < 0 \\ 0 & X_0 = 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Пересчитываются координаты сечений пера лопатки для получения сечения, которая далее будем называть сечением кинематического профиля. Координаты кинематического профиля вычисляются для каждой точки пера лопатки по формулам:

$$X_k = R \cdot \gamma \cdot \pi / 180^\circ$$

$$Y_k = -\frac{(Y_q - Y_n)}{|Y_q - Y_n|} \cdot \sqrt{(Y_q - Y_n)^2 + (X_q - X_n)^2} \quad (4.6)$$

где γ – угол между линиями, которые соединяют центр рабочей зоны с центром координат лопатки и точкой пера (X_n , Y_n); X_q , Y_q – координаты точки пересечения траектории смещения центра

координат с линией, которая соединяет центр круга рабочей зоны с точкой (X_n, Y_n) , определенные как:

$$\begin{aligned} X_q &= R \cdot \sin \gamma \\ Y_q &= R \cdot (\cos \gamma - 1) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Строится кинематический профиль сечения и определяется его прогиб. Если полученное значение величины прогиба пера удовлетворяет условиям обработки, то выбранный радиус принимается за основной, в другом случае вносятся следующие коррективы:

- если величина прогиба больше допустимой величины на корыте, то необходимо уменьшить радиус R ;
- если величина прогиба больше допустимой величины на спинке, то необходимо увеличить радиус R ;
- если прогиб несимметричен, то необходимо изменить угол α_y .

Дальше рассчитывают высоту зоны обработки, для чего определяется интерполяционная зависимости α_y от высоты пера лопатки H . Известно, что высота рабочей зоны должна ограничиваться некоторой величиной, связанной с закручиванием лопатки по высоте пера таким образом, чтобы угол между пересечениями в верхней и нижней части рабочей зоны не превышал определенного, заранее заданного значения $\alpha_{пр.}$. Поэтому высота рабочей зоны H_z вычисляется как:

$$H_z = \alpha_{пр} \cdot \frac{|H_n - H_0|}{|\alpha_n - \alpha_0|} \quad (4.8)$$

где H_0, H_n – значение высоты пера лопатки для начального (0) и конечного (n) сечений.

Для полученного значения H_z выполняется проверочный расчет со «скользящим» положением зоны обработки. Если для какого-либо участка лопатки значение:

$$\alpha^* = \alpha_y \cdot (H_i) - \alpha_y \cdot (H_i + H_z) /$$

окажется больше $\alpha_{пр.}$, то H_z уменьшается на величину $H_z/10$, и проверочный расчет продолжается с того места, на котором он был приостановлен. Значение H_z , которое удовлетворяет всем сечениям по высоте лопатки, принимается за основное.

Интерполяционная зависимость α_y от H , полученная при расчете высоты рабочей зоны, используется для расчета профиля копира, который выполняется по формуле:

$$\Delta D_i = k \cdot (\alpha_i - \alpha_{cp}) \quad (4.9)$$

где ΔD_i – отличие диаметра копира в i -ом сечении от его среднего диаметра, k – коэффициент передачи привода отработки угла, который представляет собой увеличение диаметра копира, необходимое для обеспечения поворота лопатки на один градус, α_{cp} – среднее значение угла установки лопатки, которое определяется как:

$$\alpha_{cp} = (\alpha_0 + \alpha_n) / 2 \quad (4.10)$$

где α_i – текущее значение угла установки лопатки, определенное по интерполяционной зависимости для H_i – текущей высоты пересечения лопатки (рис. 4.4):

$$H_i = H_{ki} + \frac{H_z}{2} - H_{кр} \quad (4.11)$$

где H_{ki} – расстояние от текущего i -го сечения копира до верхнего края рабочей зоны; H_z – высота рабочей зоны; $H_{кр}$ – расстояние между местом контакта привода отработки угла с копиром и плоскостью базирования лопатки.

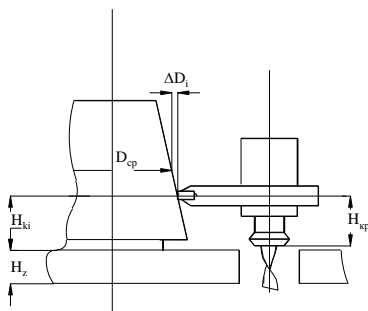


Рис. 4.4. Принципиальная схема взаимного расположения расчетных элементов механизма поворота лопаток во время МАО

Полученные таким способом значения D_i используют для изготовления копира, а значение α_{cp} называется углом базирования лопатки. Этот угол задает начальный поворот узла крепления лопатки. По описанной методике разработана программа.

В том случае, когда известна функция изменения величины угла закрутки лопаток по высоте – h пера – $g(h)$, то закон перемещения зубчатой рейки 3 (рис. 4.2) относительно шестерни 4

на шпинделе 5, обеспечивающие поворот лопаток в процессе МАО будет определяться функцией:

$$\Phi(h) = 2 \cdot \pi \cdot g(h) R_w / 360 \quad (4.12)$$

где R_w – радиус шестерни 4.

Пусть $\xi(h)$ является функцией образующей профиль копира 7, которую нужно определить. Тогда при перемещении рейки 3 по копиру 7, ее положение относительно шестерни 4, которая установлена на шпинделе 5, а значит и величина поворота шпинделя вместе с лопаткой будет определяться функцией:

$$\Psi(h) = h \cdot d\xi(h) / dh \quad (4.13)$$

Выполнив сравнение функций $\Phi(h)$ и $\Psi(h)$, получим уравнение, решение которого позволит получить функцию изменения профиля копира относительно вертикальной оси:

$$\xi(h) = \frac{2\pi R_w}{360} \cdot \int \frac{g(h)}{h} dh \quad (4.14)$$

Как отмечалось выше, угловая осцилляция лопаток вокруг оси шпинделя 5 осуществляется за счет эксцентрического расположения копира 7. При чем величина эксцентриситета копира, определяемая как:

$$\varepsilon = \frac{2\pi R_w \theta}{360} \quad (4.15)$$

и зависит от амплитуды угла колебаний θ лопаток при МАО. Тогда минимальная длина рабочей части зубчатой рейки 3 будет составлять:

$$l = l_1 + 2\varepsilon \quad (4.16)$$

где l_1 – минимальное перемещение зубчатой рейки, которое определяется величиной угла закрутки пера лопатки из разницы значений α_0 и α_n – начального и конечного угла базирования лопатки в соответствующих сечениях копира H_0 и H_n .

По результатам расчетов, выполненных на нескольких группах лопаток установлено, что для большинства компрессорных лопаток прогиб статического профиля составляет не более 4–6°, а значит, что для них радиус рабочей зоны может находиться в границах $[R_{min} \infty]$,

где величина R_{min} – получена по описанной выше методике. Для других лопаток радиус рабочей зоны ограничен сверху, что, в свою очередь, ограничивает максимальную производительность установки.

4.2 Технологическое обеспечение качества геометрических параметров рабочих кромок лопаток ГТД

Использование метода MAO для обработки кромок деталей разного назначения исследовалось во многих работах. Особенно нужно отметить работы [38, 129]. С физической точки зрения возможность использования магнитно-абразивного инструмента, сформированного в больших зазорах в условиях кольцевой рабочей зоны для формирования кромок деталей типа лопаток было доказано ранее и базируется на особенностях поведения порошкового МАИ во время обработки, который имитирует обтекание деталей дискретно непрерывной средой, может иметь переменную вязкость и соответствующие триботехнические свойства.

При использовании метода MAO для обработки и формирования кромок необходимо прогнозировать возможности искривления других рабочих размеров деталей. Особенно это касается ответственных деталей, таких как лопатки компрессоров ГТД. Установлено, что длительная обработка в кольцевой рабочей зоне приводит к неравномерному снятию материала с детали по высоте рабочих зон. В результате этого возможна отбраковка деталей. Поэтому было проведено исследование интенсивности размерного снятия в условиях идентичных условиям производства с кромок образцов, которые имитируют лопатки ГТД.

Условия обработки образцов выбирали согласно с рекомендациями, приведенными в [82, 124], которые обеспечивали наиболее эффективную обработку. Магнитную индукцию в рабочих зонах магнитных зазоров, заполненных магнитно абразивным порошком устанавливали равной – 0,4, 0,5 и 0,6 Тл. Время обработки варьировалось в диапазоне 0–10 минут. Снятие материала с обрабатываемых кромок оценивали на часовом проекторе при стократном увеличении путем определения величины радиусов кромок, поперечного размера образцов и их толщины. Характерные зависимости изменения величины поперечного размера образцов в области обрабатываемых кромок в зависимости от высоты рабочих зазоров приведены на рис. 4.5. Отметим что ноль на оси абсцисс на рис. 4.5 совпадает с верхним сечением рабочей кольцевой зоны. При оценке интенсивности процесса MAO определяли координаты максимума функций, которые указывают на наибольший съём материала и наиболее

вероятное место возможного уменьшения допустимых размеров; площадь под кривыми изменения поперечного размера, которое является интегральной характеристикой, описывающей общую активность МАИ; дисперсию съема, которая определяет размеры и расположения зоны наиболее активного действия МАИ.

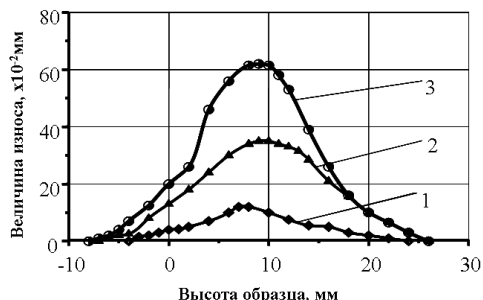


Рис. 4.5. Зависимости изменения поперечного размера образцов по высоте в процессе МАО при магнитной индукции в рабочих зазорах 0,5 Тл при времени обработки: кривая 1 – 3 мин, кривая 2 – 5 мин, кривая 3 – 10 мин

Анализ выше указанных характеристик позволил разделить процесс МАО кромок образцов на несколько стадий. На первой стадии на протяжении 3 – 3,5 минут МАО выполняется активное формирование кромок на образцах. Это подтверждается данными измерений самих кромок и малым изменением поперечных размеров. Увеличение магнитной индукции в рабочих зазорах с порошком приводит к более активному завершению процесса формирования кромок потому, что увеличение магнитной индукции до величины индукции насыщения МАИ приводит к росту жесткости МАИ и его абразивной способности. Так при индукции, которая равна 0,6 Тл этот процесс идет более чем в 2 раза активнее чем при $B = 0,4$ Тл. Это указывает на важность вопроса рационального выбора величины B при формировании кромок. Установлено, что рост индукции в указанных граница приводит к уменьшению дисперсии снятия, что в свою очередь может быть причиной возникновения неравномерной обработки по высоте магнитного зазора при стационарном по высоте расположении деталей в зоне обработки.

Перед второй стадией кромки образцов сформированы полностью. Характерным признаком этой стадии есть активное снятие материала, особенно в зоне обрабатываемой кромки. Установлено, что при $B = 0,4$ Тл уменьшение толщины образцов практически не происходит, а при 0,5 и 0,6 Тл достигает 0,1 – 0,2 мм. Для этой стадии обработки присущее значительное снятие материала с поверхности, уменьшения размеров деталей, которое в 2 – 3 раза превышает их изменение на первой стадии формирования кромок.

Третья, заключительная стадия, имеет низшую активность процесса снятия материала с поверхности: максимальное снятие в 2,5 – 3 раза ниже, чем на второй стадии, которая в полной мере объясняется изменением физико-механических характеристик поверхностного слоя деталей, затуханием процесса МАО [3]. На второй стадии эффективность снятия характеризуется формированием поверхности, которая наиболее оптимальная с точки зрения ее «обтекания» порошковым МАИ. На третьей стадии оптимальный профиль и форма образца уже сформированы, и потому процесс обработки менее всего интенсивен. Носит устоявшийся затухающий характер, аналогичный зависимостям изменения удельного съема от времени МАО.

Одной из наиболее ответственных операций при изготовлении лопаток газотурбинных двигателей является формирование кромок пера. Традиционные способы, связанные с использованием на финишных операциях большого количества ручного труда высокой квалификации и тем самым приводящие к удорожанию продукции и нестабильному ее качеству. Особенно сложной является эта задача, для малогабаритных лопаток, радиус кромок которых составляет менее 0,1 мм. Наиболее перспективным для осуществления данной технологической операции является метод МАО в больших зазорах, вследствие особых свойств МАИ и специфических особенностей его взаимодействия с обрабатываемой поверхностью.

Исследования проводились на разработанной лабораторной установке с рабочей зоной типа кольцевой ванны (рис. 4.1). Использовали магнитно-абразивный порошок Полимам-Т, с размером частиц 160/100 мкм. При выборе указанного размера частиц учитывали известную информацию о наличии веерообразных уплотнений и критических скоростей при МАО лопаток [82]. В качестве экспериментальных образцов для исследований использовали лопатки из сплава ЭП-718 ВД с высотой пера 28 мм, длиной хорды 22 мм и величиной прогиба пера 3мм. Угол закручивания пера не превышал 1° и принимался равным нулю с точностью $\pm 30'$. Обработке подвергались кромки пера лопатки, радиус округления которых, согласно чертежа, изменяется по высоте в пределах 0,1 – 0,15 мм. Предварительно, на заточном станке, формировалась хорда пера лопатки, а на обрабатываемой кромке плоскость, которая образует прямой угол с направлением выхода кромки (рис. 4.6).

Под направлением выхода кромки здесь и дальше в тексте принимается направление касательной к средней линии сечения лопатки в центре округления формируемой кромки, как показано рис. 4.6, а под

углом выхода кромки – угол между направлением выхода кромки и базовой осью X .

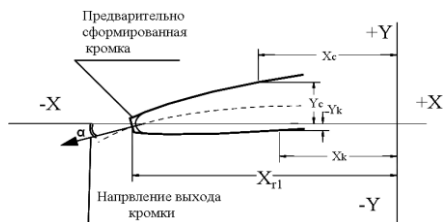


Рис. 4.6 Схема обрабатываемой кромки пера лопатки в принятой системе координат

Лопатки с сформированными на кромках плоскостями подвергались МАО. Через фиксированные интервалы времени обработки контролировали состояние обрабатываемой кромки – снимали отпечатки пяти контрольных сечений по высоте пера лопатки на свинцовой пластине толщиной 0,3 – 0,8 мм. Отпечатки фиксировали на проекторе ЧП-2 при увеличении $\times 100$ либо на инструментальном микроскопе на просвет. При снятии отпечатков лопатка и свинцовая пластина закреплялись в оправках, смонтированных на базе оптической скамьи. Погрешность установки деталей по углу не превышала $0,5^\circ$, а по высоте пера лопатки – 0,2 мм.

На первом этапе исследовали влияние угла α между направлением выхода кромки и касательной к траектории движения центра координат лопатки на процесс округления кромок. При этом лопатка осуществляла только вращение вокруг оси кольцевой ванны и не осуществляла колебательных движений вокруг своей вертикальной оси. Обработка выполнялась на фиксированных режимах: скорость движения лопатки 4,5 м/с; магнитная индукция в рабочих зазорах, заполненных магнитно-абразивным порошком с размером частиц 160/100 мкм составляла 0,55 Тл; угол фиксированного разворота лопатки составлял: -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° и 15° . За отрицательное направление принято отклонение обрабатываемой кромки лопатки во внешнюю сторону от оси кольцевой ванны.

Наиболее характерные внешние виды кромок в сечениях, где согласно чертежа формируемый радиус округления кромок равен 0,15 мм, от времени обработки для разных значений α приведен на рис. 4.7.

Для сравнения, вместе с линией отпечатка, тонкой линией приведена кромка, которая отвечает чертежу лопатки. Установлено, что при значениях угла поворота пера лопатки равных -15° , 10° , 15°

обработка носит локальный характер. Наиболее приемлемые результаты по форме кромки получены при углах поворота пера лопатки: -5° и 0° (рис. 4.7 в, г), когда достигается практически равномерное округление без видимых завалов на одну или другую из сторон.

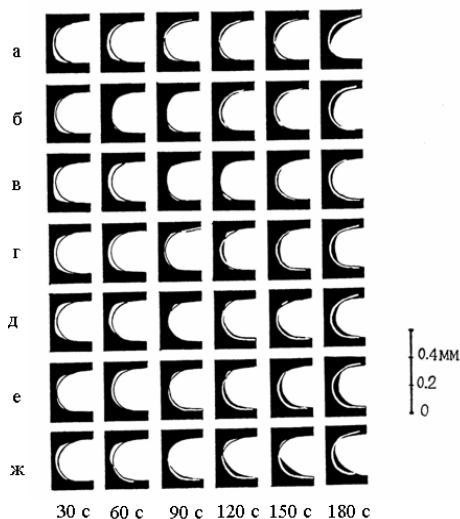


Рис. 4.7. Изменение формы обрабатываемой кромки от времени обработки и угла базирования лопатки:

а – -15° ;
 б – -10° ;
 в – -5° ;
 г – 0° ;
 д – 5° ;
 е – 10° ;
 ж – 15°

Оценивалась также производительность процесса по величине радиуса округления, который сформировался за цикл обработки. Усредненные результаты приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1
 Зависимость максимального радиуса качественно округленной кромки от времени обработки и угла базирования лопатки

Угол базирования, °	Время обработки, с			
	30	60	90	120
-15	0,10	0,12	0,15	0,22*
-10	0,10	0,12	0,13	0,22*
-5	0,10	0,13	0,14	0,17*
0	-	0,10	0,12	0,15*
5	-	0,11	0,12	0,15*
10	0,10	0,11	0,13	0,19*
15	0,10	0,12	0,14	0,21*

*Примечание: Результаты получены на лопатках из материала ЭП 718 с радиусом кромки 0,13 – 0,25 мм согласно с чертежом.

Полученные результаты являются прямым подтверждением предположения о целесообразности использования МАО в условиях кольцевой ванны для формирования кромок лопаток.

При движении лопатки в рабочем зазоре, заполненном магнитно-абразивным порошком, процесс обработки определяется несколькими совместно протекающими процессами, а именно формированием и разрушением веерообразных уплотнений, которые обрабатываемая деталь формирует и перемещает перед своей передней кромкой, уплотнением порошкового МАИ в зонах выхода из зазоров, а эти процессы, в свою очередь зависят от характера магнитных и реологических взаимодействий в системе. В окончательном итоге эти взаимодействия сказываются через существование предельных скоростей [68, 82], которые имеют прямое отношение к процессу обработки.

Если деталь движется с малой скоростью, то вместе с ней, перед ее передней кромкой перемещается порция порошка в виде квазистабильного веерообразного уплотнения, которое имеет очень малую скорость относительно детали и предотвращает контакт детали с другими порциями МАИ. Обработка в таких случаях или вообще не происходит, или происходит очень медленно. При превышении деталью предельного значения скорости происходит срыв веерообразного уплотнения с передней кромки и происходит активный контакт поверхности детали, в особенности в области кромки лопатки, с основной массой МАИ. Именно в таком случае происходит активная обработка. Изменение угла α в первой серии опытов практически означало изменение условий срыва веерообразных уплотнений.

Фактически для значительных отклонений α от 0 срыв происходил только с одной стороны лопатки, вторая же сторона оставалась надежно прикрытой. Потому округление кромки происходило только с одной стороны лопатки. На рис. 4.8 показана схема образования (рис. 4.8 а) и разрушения (рис. 4.8 б) веерообразных уплотнений при разных значениях угла α .

Участки повышенной плотности при МАО лопаток, кроме случая (рис. 4.8 б), остаются практически неподвижными относительно поверхности лопатки. При значениях α близких к 0° срыв веерообразных уплотнений происходит по обе стороны пера, вследствие чего обработка носит равномерный характер. С другой стороны пребывание кромки пера лопатки под постоянным давлением новых порций порошка, что и наблюдается при закритических скоростях, приводит к активному диспергированию материала с поверхности пера лопатки в области кромки. С

увеличением времени обработки округление происходит одновременно с уменьшением толщины пера лопатки.

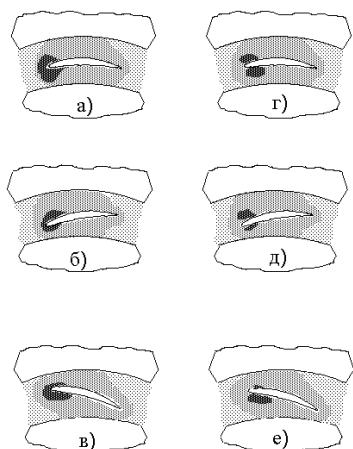


Рис. 4.8. Схема образования зон повышенной плотности МАИ при:
а – в образовании, г – е
разрушении веерообразных
уплотнений при значениях угла α
базирования лопатки в рабочей
зоне:

а, г – $\alpha = 0^\circ$;
б, д – $\alpha = 10^\circ$;
в, е – $\alpha = -10^\circ$

Таким способом при обработке кромок лопаток в условиях кольцевой ванны при отсутствии колебаний лопатки вокруг собственной вертикальной оси происходит округление кромки пера, однако не обеспечивается необходимая производительность и соответствующее высокое качество округления. Рост скорости МАО приводит к уменьшению размера хорды, а уменьшение скорости – к затуханию и прекращению процесса. Обработка при малых отклонениях угла α от нуля приводит к уменьшению толщины кромки, при больших отклонениях к односторонней обработке и утолщению кромки за счет уменьшения величины хорды.

Для устранения указанных технологических недостатков было исследовано влияние амплитуды угла колебаний лопатки вокруг своей вертикальной оси на процесс округления кромок при значениях угла α равных -3° , 0° , 3° . Амплитуда угла колебания лопатки θ равнялась 5° , 9° и 14° . Полученные результаты показали, что дополнительное колебание лопатки вокруг вертикальной оси приводит к активизации обработки кромок в целом тем сильнее, чем больше амплитуда колебания, и увеличивает производительность в 1,8 – 2 раза (табл. 4.2).

Кромка, на формирование которой без колебаний вокруг вертикальной оси необходимо время 120 – 150 секунд, при введении дополнительного указанного движения, закругляется за 60 – 80 секунд. При этом существенная активизация обработки кромок

(например при $\theta = 14^\circ$) приведет к значительному снятию материала с поверхности лопаток и уменьшению размера хорды, на что указывают результаты приведенные на рис. 4.5 и увеличение величины, с увеличением времени обработки, радиуса обрабатываемой кромки.

Таблица 4.2

Изменение величины радиусов формируемых кромок от времени обработки, угла базирования и амплитуды колебаний

Угол базирования, °	Амплитуда колебаний θ °	Время обработки, с				
		20	40	60	80	100
-3	5	0,12	0,16	0,20	0,21	0,21
0	5	0,10	0,15	0,18	0,20	0,21
3	5	0,12	0,18	0,18	0,19	0,20
-3	9	0,13	0,18	0,18	0,20	0,21
0	9	0,12	0,15	0,16	0,20	0,20
3	9	0,13	0,16	0,20	0,22	0,22
-3	14	0,15	0,18	0,22	0,26	0,27
0	14	0,12	0,16	0,21	0,24	0,26
3	14	0,15	0,19	0,22	0,27	0,29

Обработка при амплитуде колебаний $\theta = 5^\circ$ дает наиболее приемлемые результаты. В течение 100 – 120 секунд происходит округление кромки до радиуса, равного 0,18 мм. При этом формируется кромка правильной формы, с центром закругления практически в расчетной точке, искривление радиуса за счет уменьшения толщины лопатки не превышает 0,02 мм, а уменьшение величины размера хорды, при таких условиях не проявляется вплоть до времени обработки 180 с.

Таким образом, наложение на основное движение лопатки – вращение вокруг оси кольцевой ванны, дополнительного колебания лопатки вокруг своей вертикальной оси позволяет выполнять качественное округление кромок лопаток. Это происходит за счет срыва веерообразных уплотненных формирований, образование которых приведено ранее, а при низких значениях скорости движения, за счет постоянного изменения угла атаки обрабатываемой кромки. Переменный угол атаки способствует тому, что при каждом колебании лопатки, ее кромка проходит положения, в которых происходит или образование, или разрушение веерообразных уплотнений в разных зонах обрабатываемой кромки. При обработке же без колебаний происходит или только их квазиустойчивое образование, или только разрушение. Непрерывное изменение процессов образования и разрушения веерообразных уплотнений создает наиболее благоприятные условия для обработки кромок.

Большие значения амплитуды колебаний (как например 14°) приводят к тому, что подавляющими становятся процессы разрушения уплотненных порций, что способствует интенсификации уменьшения величины хорды пера детали и разрушению квазистационарных формирований в порошковом МАИ.

В процессе внедрения способа МАО кромок лопаток были использованы результаты выполненных исследований. Полученные кромки контролировались по методикам, которые являются нормативными на предприятии. Установлено практически идеальное формирование входных и выходных кромок лопаток разных геометрических размеров, изготовленных из таких материалов, как ВТ-18, ВТ-9, ЭИ-961. Радиусы формируемых кромок изменялись от 0,09 до 0,45 мм.

Применение предложенного способа и условий МАО практически исключает брак при формировании радиусов кромок, обеспечивает высокую производительность и надежность данного технологического процесса.

4.3 Влияние магнитно-абразивной обработки на состояние поверхности и физико-механические характеристики поверхностного слоя лопаток ГТД

Возможность получения высоких классов шероховатости поверхности ($Ra < 0,2$ мкм) со значительной производительностью без изменения геометрии деталей делает метод МАО достаточно привлекательным при использовании его на финишных операциях изготовления таких ответственных и сложных деталей, как лопатки компрессоров газотурбинных двигателей [25]. Выполненные предыдущие исследования [3, 38, 76, 114] показали перспективность использования технологии МАО, как полирующе-упрочняющей операции. Необходимо отметить, что обработка деталей на магнитно-абразивном станке с кольцевым расположением магнитных зазоров значительной величины в слабых магнитных полях позволяет совмещать в себе преимущества двух методов обработки – непосредственно МАО и струйных методов, которые обеспечивают эффективное упрочнение поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Однако известные результаты не позволяют в достаточной степени определить особенности влияния данного вида обработки на состояние физико-механических характеристик поверхностного слоя лопаток ГТД, пути целенаправленного их изменения и при этом конкретно установить технологические аспекты метода МАО для промышленного использования на финишных операциях изготовления и ремонта лопаток компрессоров ГТД.

4.3.1 Влияние условий процесса МАО на формирование технологических остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток ГТД

Влияние режимов МАО при обработке в условиях кольцевого расположения магнитных зазоров [144] на характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей исследовали на лопатках компрессоров с высотой пера 36 мм, хордой 24 мм и $S_{max} = 1,4 - 3,1$ мм, изготовленных из сплава ЭП718ВД (ХН45МВТЮБР), с исходной шероховатостью поверхности Ra 0,3 мкм, которые прошли предыдущую термическую обработку – двойное старение в вакууме с целью стабилизации микроструктуры лопаток и внутренних напряжений, которые получены на предыдущих этапах изготовления деталей.

Обработку выполняли порошком СП-17 (ТУ 24.08-708-73) с размером частиц 500/200 мкм, который имеет высокую абразивную способность и позволяет проводить МАО в достаточно жестких условиях. Особенность использования в качестве магнитно-абразивного материала порошка СП-17 определяется тем фактом, что он позволяет получать конечную шероховатость поверхности после МАО в достаточно широких границах Ra от 0,3 мкм до 1 мкм в зависимости от режимов обработки. Время обработки деталей составляло 2 мин с реверсом вращения (на входную кромку лопаток – 70 с, на выходную – 50 с) при плавном введении деталей в зону обработки, которая сформирована полюсными наконечниками высотой 20 мм.

Установлено [3, 25], что эффективность процесса МАО прежде всего определяется жесткостью МАИ, сформированного магнитным полем в рабочих зазорах в процессе обработки. А именно индукцией магнитного поля в рабочем пространстве магнитных зазоров и скоростью главного рабочего движения при МАО. В нашем случае – это скорость вращения вокруг оси кольцевой ванны. Поэтому на первом этапе более подробно проанализировано влияния именно этих параметров на характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое и шероховатость поверхности лопаток.

Изменение остаточных напряжений, их величина и характер распределения по глубине поверхностного слоя пера лопаток определяли по методу Н. Давиденкова – при послойном удалении материала с поверхности [8] образцов в виде прямоугольных полосок, вырезанных вдоль вертикальной оси лопатки возле входной, выходной кромок деталей на расстоянии 1 мм от кромки и в центре пера.

Был исследован диапазон скоростей МАО $V = 1,7 - 6$ м/с, и диапазон магнитных индукций в рабочих зазорах – $B = 0,1 - 0,6$ Тл. Результаты изменения отрицательных остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток в зависимости от выше указанных параметров приведены на рис. 4.9 – 4.11.

Показано, что эпюры остаточных напряжений имеют идентичный характер. Установлено, что уменьшение частоты вращения деталей вокруг оси кольцевой рабочей зоны, то есть скорости основного рабочего движения лопаток с 4,55 м/с до 1,7 м/с при магнитной индукции в рабочих зазорах 0,35 – 0,4 Тл не приводит к уменьшению глубины залегания остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток.

При этом имеет место снижение величины напряжений, что связано с уменьшением работы, которая тратится на пластичную деформацию поверхностного слоя в результате уменьшения пути, в течении которого происходит активное воздействие МАИ на деталь при неизменном времени МАО для разных значений V [76].

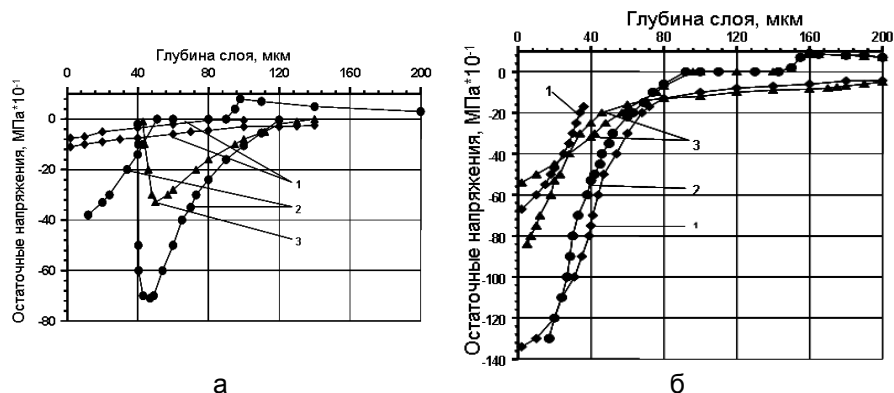


Рис.4.9. Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей для разных участков пера лопатки при $V = 2,6$ м/с и величине B : а – 0,35 Тл, б – 0,6 Тл: кривая 1 – вблизи выходной кромки лопатки; кривая 2 – в центре пера лопатки; кривая 3 – вблизи входной кромки лопатки

Увеличение скорости МАО до 6 м/с приводит к уменьшению величины и глубины залегания напряжений до -400 МПа и 80 мкм, соответственно.

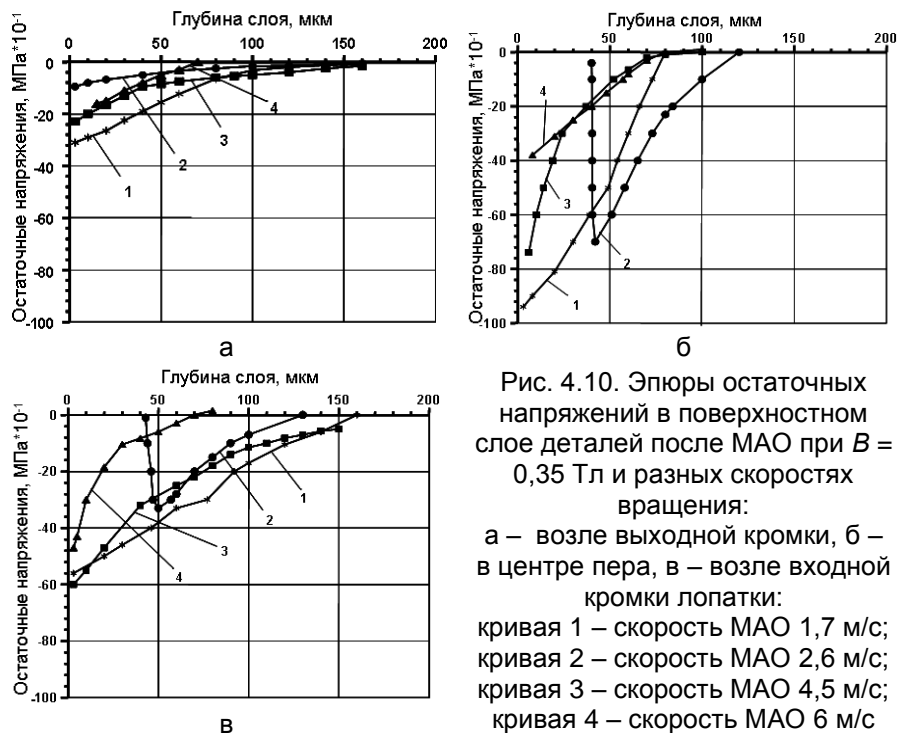


Рис. 4.10. Эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после МАО при $B = 0,35$ Тл и разных скоростях вращения:

а – возле выходной кромки, б – в центре пера, в – возле входной кромки лопатки:

кривая 1 – скорость МАО 1,7 м/с;
 кривая 2 – скорость МАО 2,6 м/с;
 кривая 3 – скорость МАО 4,5 м/с;
 кривая 4 – скорость МАО 6 м/с

Это объясняется тем, что процесс упрочнения (наклепа) поверхности, связанный с пластической деформацией поверхностных слоев детали проходит менее интенсивно, чем диспергирование материала с поверхности лопаток. То есть энергии от ударного взаимодействия элементов МАИ с поверхностью лопаток не достаточно для формирования глубинных остаточных напряжений. Кроме того, в процессе МАО выполняется активное диспергирование поверхностного слоя.

Подобные явления имеют место как при незначительных скоростях МАО – $V = 2,2 - 2,8$ м/с, так и при $V = 4,5 - 5$ м/с. С увеличением магнитной индукции от 0,1 до 0,6 Тл наблюдается повышение величины отрицательных напряжений в поверхностном слое пера лопаток, особенно в центре детали, и снижение глубины их залегания (менее 100 мкм).

Это объясняется тем, что увеличение величины B приводит к росту жесткости МАИ, т.е. к возрастанию сил давления со стороны элементов МАИ на поверхность деталей, и как результат,

проявляется повышение величины сил резания и интенсивности пластической деформации поверхностного слоя. Наибольшие напряжения имеют место в центре пера лопатки, что связано с большим временем процесса активной MAO этой части лопаток.

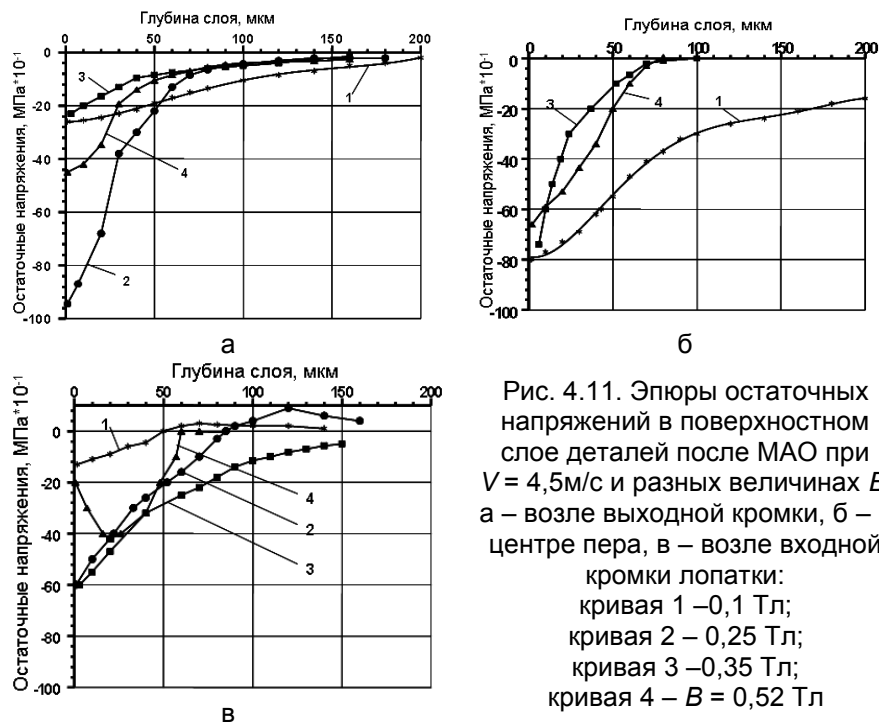


Рис. 4.11. Эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после MAO при $V = 4,5 \text{ м/с}$ и разных величинах B : а – возле выходной кромки, б – в центре пера, в – возле входной кромки лопатки:
 кривая 1 – $0,1 \text{ Тл}$;
 кривая 2 – $0,25 \text{ Тл}$;
 кривая 3 – $0,35 \text{ Тл}$;
 кривая 4 – $B = 0,52 \text{ Тл}$

Подтверждение этого факта получено при анализе изменения средней шероховатости поверхности в процессе MAO в зависимости от B и V (рис.4.12). Увеличение величины B от $0,2$ до $0,5 \text{ Тл}$ приводит к активизации диспергирования материала с лопаток, и как результат к ухудшению шероховатости поверхности, в то время как при $B = 0,1 - 0,2 \text{ Тл}$ имеет место формирование минимальной шероховатости для данного типа применяемого магнитного абразива [98]. Повышение величины Ra связано с тем, что увеличение магнитной индукции приводит к росту жесткости МАИ, т.е. растет сила давления со стороны инструмента на поверхность деталей, и как результат повышается глубина обработки.

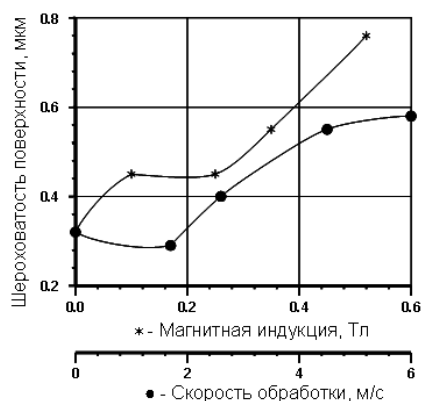


Рис.4.12. Зависимость шероховатости поверхности пера лопатки после МАО от магнитной индукции в рабочем зазоре при $V = 4,5$ м/с и от скорости обработки при $B = 0,35$ Тл

Идентичные результаты получены и при росте скорости МАО. Это связано с силами взаимодействия между МАИ и поверхностью деталей, а также особенностями перемешивания порошка в рабочих зонах во время МАО, то есть динамикой процесса [68]. Для проверки установленных закономерностей и определения особенностей влияния процесса МАО порошком Полимам-Т исследовано изменения состояния поверхности и поверхностного слоя пера лопаток в зависимости от режимов обработки. Полученные результаты приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток и шероховатость поверхности после МАО порошком Полимам-Т

Скорость МАО	Магнитная индукция в рабочих зазорах	Время обработки	Размер частиц МАИ	Шероховатость поверхности, мкм		Остаточные напряжения (входная кромка) (центр лопатки) (выходная кромка)		
м/с	Тл	мин	мкм	корыто	спинка	величина, МПа*10 ⁻¹	глубина, мкм	Особенности
1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	0,4	5	315/200	0,32		до 30 до 30 до 60	до 30 до 30 до 150	

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4,55	0,2	3,5	400/315	0,34 – 0,78		до 20 до 40 10 – 15	до 200 до 200 и более до 100 и более	
4,55	0,1	5,8	400/315	0,35 – 0,84		до 5 35 – 40 до 10	до 100 до 200 и более до 100 и более	
4,55	0,3	3,3	400/315	0,23– 0,33	0,26– 0,5	20 – 50 20 – 40 40 – 55	до 100 до 120 до 100	
4,55	0,2	5,15	400/315	0,24– 0,28	0,23 – 0,24	25 – 35 20 – 30 до 40	до 120 до 200 до 100 и более	
6	0,2	3,5	400/315	0,27– 0,3	0,23 – 0,25	30 – 50 20 – 30 20 – 30	до 100 и > до 200 и > до 100	
4,55	0,4	3,5	315/200	0,095– 0,16	0,095– 0,2	15 – 45 20 – 30 до 15	до 100 до 150 до 100	
4,55	0,2	5,15	315/200	0,12 – 0,17	0,129 – 0,17	20 – 40 30 – 50 20 – 40	до 150 110 150	подслой. тах 520МПа на 35 мкм
4,55	0,2	3,3	400/315	0,25 – 0,38		20 – 40 40 – 50 20 – 40	до 200 и >	подслой. тах 600МПа на 50 мкм
4,55	0,2	4,85	400/315	0,24 – 0,42		30 – 40 20 – 30 30 – 50	до 100 и > до 120 до 100 и >	подслой. тах 650МПа на 50 мкм
3	0,7	3,5	400/315	0,1 – 0,25		55 – 75	до 100 и >	

Полученные результаты позволяют установить основные тенденции изменения поверхностных характеристик деталей, но не определяют оптимальных режимов обработки – определенных раньше при использовании традиционных технологических операций изготовления деталей.

4.3.2 Влияние наследственности обработки на состояние поверхности и физико-механические свойства поверхностного слоя лопаток компрессоров ГТД

Рациональное использование MAO, как упрочняюще-полирующей операции в технологическом процессе изготовления лопаток невозможно без информации о состоянии поверхности, поверхностного слоя деталей и их эксплуатационных характеристиках. Существующие технологические цепочки изготовления лопаток на заключительных стадиях обработки состоят из:

- 1) слесарной обработки, которая включает у себя полирование прикомлевой зоны (R –перехода) и входных кромок;
- 2) заключительного полирования пера на ленточных виброполировальных (ЛВП) станках и ручной доводки кромок;
- 3) термической обработки (двойное старение);
- 4) поверхностного упрочнения пера лопаток путем обдувки микрошариками;
- 5) виброшлифование лопаток.

На первом этапе нами проведены работы по MAO рабочих лопаток компрессоров вместо обработки на станках ЛВП перед упрочнением микрошариками. Замена процесса обработки на станках ЛВП методом MAO объясняется недостатками, какие присущи методу виброполирования:

- возможность подрезания кромки лопатки, что делает необходимым наличие дополнительного припуска по хорде пера лопаток;
- не обрабатывается прикомлевая зона и полка лопаток;
- для каждой ступени необходимо наличие индивидуального станка или дополнительной специальной оснастки.

Кроме того, вибрации, шум и запыленность, которые являются спутниками процесса обработки на станках ЛВП, значительно ухудшают условия труда.

Подготовка лопаток для MAO на первой слесарной операции, которая выполнялась после вальцевания и обсечки пера, проводилась с более тщательной обработкой R -перехода без его заключительного полирования. При этом размер по хорде был выполнен в соответствии с чертежами, а шероховатость поверхности пера лопаток допускалась в пределах Ra 0,3 – 0,4 мкм. MAO выполняли порошком Полиам-Т с размером частиц 250/160 мкм, в течение 120 секунд с реверсом (60 с на входную кромку и 60 с на выходную), при скорости перемещения вдоль кольцевой ванны

4,5 м/с и магнитной индукции в рабочем зазоре 0,4 Тл. После МАО получена общая шероховатость поверхности с $Ra = 0,2 - 0,3$ мкм при отдельных отклонениях от действующих образцов в виде черточек и вмятин длиной 15 мм и глубиной меньше 0,008 мм (рис. 4.13, рис. 4.14), которые являются следствием операции вальцевания.

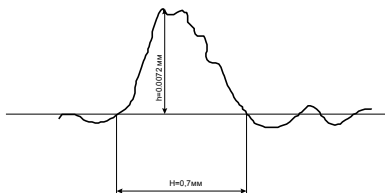


Рис.4.13. Профилограмма характерного дефекта на поверхности лопатки после операции вальцевания и последующей МАО

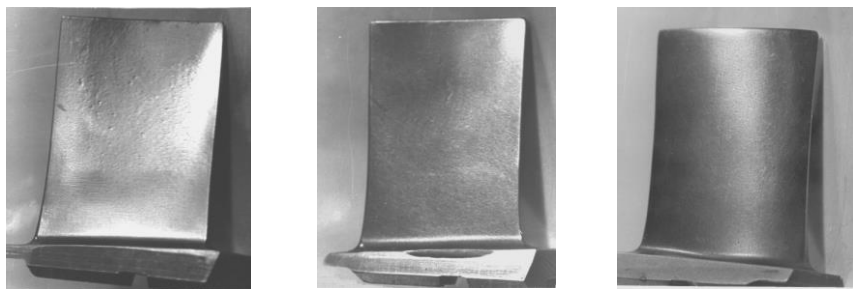


Рис. 4.14. Внешний вид лопаток после МАО

Последующие технологические операции изготовления лопаток были сохранены. После каждой технологической операции изготовления лопаток контролировали качество деталей по шероховатости поверхности, величине и глубине залегания остаточных напряжений. Результаты контроля приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4
Результаты контроля качества деталей после разных технологических операций обработки

Вид обработки	Шероховатость поверхности Ra , мкм	Остаточные напряжения	
		величина, МПа	глубина залегания, мкм
Ручное полирование	0,32 – 0,63 (корыто) 0,63 (спинка)	+300 ÷ -500	до 200
После МАО	0,32	+150 ÷ -300	до 200
После упрочнения микрошариками	0,89 – 0,97	-(500 ÷ 920)	до 160
После виброшлифования	0,204 – 0,28	-(500 ÷ 850)	более 100

В результате исследований остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток, изготовленных с использованием MAO, перед технологической операцией упрочнения микрошариками установлен существенный их разброс по величине от +100 МПа до -500 МПа при глубине залегания от 40 мкм до 200 мкм (рис. 4.15). Такое различие в величине напряжений от сжимающих к растягивающим является следствием ручного полирования. Операция термической обработки, которая используется в существующем технологическом процессе (двойное старение) выполняется для стабилизации механических и структурных характеристик материала лопаток.

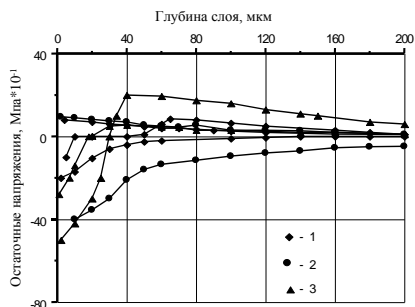


Рис.4.15. Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей для разных частей пера лопатки после ручного полирования и MAO:

кривая 1 – вблизи выходной кромки;
кривая 2 – в центре пера лопатки;
кривая 3 – вблизи входной кромки

Исследовано влияние данной технологической операции на характер изменения напряженного состояния поверхностного слоя лопаток после MAO. Установлено, что двойное старение не приводит к полному удалению остаточных напряжений в поверхностном слое. Причем растягивающие напряжения устраняются полностью, а сжимающие уменьшаются до 100 – 400 МПа при глубине их залегания 80 – 120 мкм (рис. 4.16).

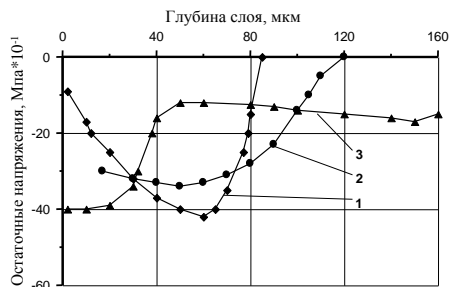


Рис. 4.16. Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей для разных частей пера лопатки после MAO и двойного старения:
кривая 1 – вблизи выходной кромки;
кривая 2 – в центре пера лопатки;
кривая 3 – вблизи входной кромки

Это связано со специфическими особенностями подобной термической обработки, направленной на стабилизацию структуры материала (выделение в материале лопаток упрочняющей γ' фазы).

Лопатки, которые прошли обработку магнитно-абразивным методом, и лопатки, которые после MAO дополнительно упрочнялись микрошариками и подвергались виброшлифованию, исследовались на сопротивление усталости. После MAO детали имели предел выносливости $\sigma_{-1}=600$ МПа, а с последующей обработкой по существующей технологической цепочке – $\sigma_{-1}=660$ МПа, что для первого случая отвечает минимальному пределу, а для второго – выше предела выносливости серийных лопаток (600 – 620 МПа). В связи с тем, что после упрочнения лопаток микрошариками шероховатость поверхности не отвечает требованиям чертежей и составляет Ra 0,89 – 0,97 мкм на втором этапе исследовалась возможность замены технологической операции виброшлифования повторной MAO. Как и на первом этапе использовались аналогичные режимы MAO. В результате обработки получена шероховатость поверхности, которая не превышает Ra 0,2 мкм. Исследования остаточных напряжений в окончательно обработанных лопатках показали (рис. 4.17), что в поверхностном слое формируются сжимающие напряжения, достигающие величины (-1200) МПа в сечениях возле выходной кромки и в центре пера лопаток, и до (-600) МПа возле входной кромки с глубиной залегания напряжений 150 – 200 мкм.

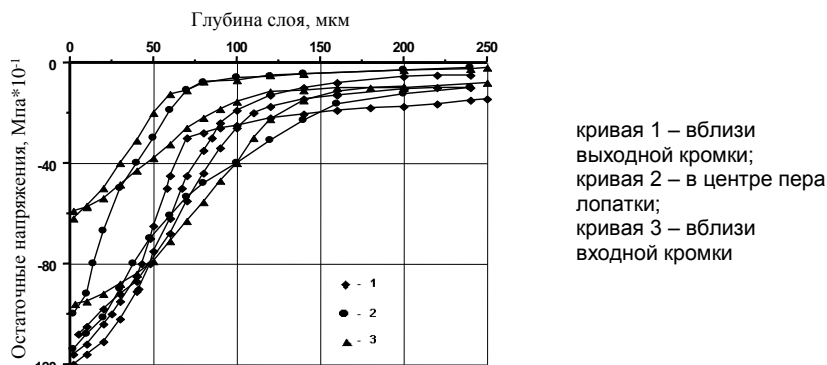


Рис. 4.17. Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей для разных частей пера лопатки после MAO, упрочнения микрошариками и повторной MAO

Испытания на выносливость показали снижение предела выносливости до 580 МПа. Причем разрушение лопаток проходило по выходной кромке с образованием трещины под углом 45° , что позволяет утверждать о наличии повышенного наклепа выходной кромки, как наиболее тонкой, чувствительной к обработке, которая имеет наибольший уровень остаточных напряжений.

4.3.3 Оптимизация технологических параметров МАО для обеспечения заданных свойств поверхности и поверхностного слоя лопаток при обработке в кольцевой ванне

Необходимость, возникшая в связи с задачей определения оптимальных условий МАО лопаток и анализа экспериментальных данных требует проведения их нормализации с последующим применением регрессионного анализа, который позволяет получать формализованные выражения для многопараметрических моделей параметров, которые контролируются, – шероховатости поверхности, величины остаточных напряжений и глубины их залегания. Ниже приведено уравнение регрессии в ненормированном виде для случая обработки порошком Полимам-Т с размером частиц 400/315 мкм и 315/200 мкм; при скорости обработки, изменяющейся в диапазоне 250 – 450 об/мин (3 – 5,4 м/с), магнитной индукции в рабочих зазорах 0,1 – 0,6 Тл и времени обработки 150 – 300 с.

$$\begin{aligned}
 R_a &= -0.9 + 0.005V + 1.14B - 0.005\tau + 0.003\lambda - 6 \cdot 10^{-6}V^2 + 1.2B^2 + 9 \cdot 10^{-6}\tau^2 - 0.00001B\lambda \\
 \sigma_{\text{вх}} &= 474 - 2.29V - 460B + 1.31\tau + 0.2\lambda + 0.0023V^2 + 0.48VB - 0.0024\tau^2 + 0.0023B\lambda \\
 \sigma_{\text{цнт}} &= 66 - 0.72V - 131.5B - 0.18\tau - 0.29\lambda - 0.0008V^2 - 284B^2 - 1.37VB + 0.0013B\lambda \\
 \sigma_{\text{вых}} &= 1122 - 4.56V - 223B + 0.85\tau + 0.32\lambda + 0.0047V^2 - 510B^2 - 0.015V\tau + 0.0047B\lambda \\
 h_{\text{вх}} &= -5491 + 20V + 5829B + 0.07\tau + 0.1\lambda - 0.08V^2 - 1024B^2 - 11.2VB - 0.0008B\lambda \\
 h_{\text{цнт}} &= -19378 + 72V + 1617B - 0.32\tau + 2.38\lambda - 0.07V^2 - 1272B^2 - 28.6VB - 0.02VB\lambda \\
 h_{\text{вых}} &= -21631 - 74V + 545B - 32.3\tau - 0.3\lambda - 0.06V^2 - 1226B^2 + 0.07\tau^2 - 0.003VB\lambda
 \end{aligned}$$

где R_a – шероховатость поверхности обработанных лопаток, мкм; $\sigma_{\text{вх}}$, $\sigma_{\text{цнт}}$, $\sigma_{\text{вых}}$ – остаточные напряжения в поверхностном слое пера лопаток возле входной кромки, в центре пера и возле выходной кромки, соответственно, кгс/мм² ($\times 10$ МПа); $h_{\text{вх}}$, $h_{\text{цнт}}$, $h_{\text{вых}}$ – глубина залегания остаточных напряжений в аналогичных зонах, мкм; V – скорость вращения лопаток, которые обрабатываются, об/мин ($\times 0.012$ м/с); B – магнитная индукция в рабочих зазорах, которые

заполнены магнитно-абразивным порошком, Тл; τ – время обработки, с; λ – средний размер частиц магнитно-абразивного порошка, мкм.

Анализ полученных регрессионных зависимостей показал, что наиболее существенное влияние на значение параметра R_a , в определенных границах факторного пространства, имеют: скорость МАО, размер частиц МАИ и взаимодействие факторов скорость – магнитная индукция, то есть факторы, которые определяют особенности формирования МАИ и его свойства. Геометрическая интерпретация полученных зависимостей в виде топограмм поверхностей приведена на рис. 4.18.

Показано, что уменьшение размера частиц магнитно-абразивного порошка приводит к более активному снижению шероховатости поверхности. Для обеспечения равномерной шероховатости поверхности при использовании более мелких порошковых материалов необходимо применять более низкие магнитные индукции и скорости обработки.

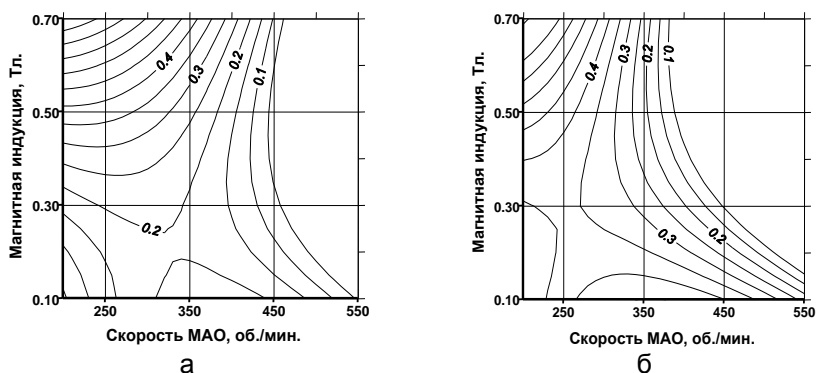


Рис. 4.18. Изменение шероховатости поверхности R_a , мкм в зависимости от магнитной индукции и скорости МАО; время обработки 300 с, размер частиц МАП: а – 315/200 мкм; б – 400/315 мкм

Наиболее существенным фактором, который влияет на величину и глубину залегания остаточных напряжений есть условия формирования МАИ, которые в уравнениях регрессии описываются членами при $VB \cdot \lambda$. Примеры геометрической интерпретации топограмм поверхностей функций остаточных напряжений в координатах скорость обработки – магнитная индукция для отдельных фиксированных значений времени МАО и размера частиц магнитно-абразивного порошка приведены на рис. 4.19.

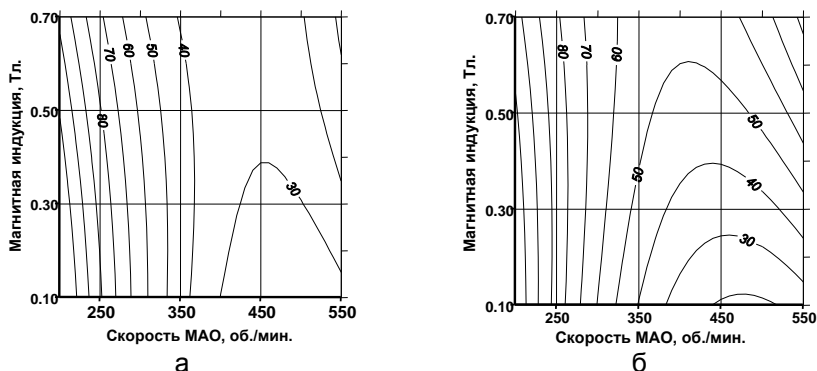


Рис. 4.19. Зависимость остаточных напряжений ($\times 10$ МПа) в зоне входной кромки лопаток в зависимости от скорости МАО и магнитной индукции; время обработки 250 с, размер частиц порошка: а – 315/200 мкм; б – 400/315 мкм

Характерной для полученных сечений является их седловидная форма. Причем для входной и выходной кромок зависимости имеют минимумы по скорости вращения в пределах 350 – 500 об/мин (4,2 – 6 м/с) и максимумы по величине магнитной индукции (более 0.5 Тл). Для центра пера лопатки характерным является преобладание члена $V B$, что приводит к диагональной ориентации «седла».

С целью определения оптимальных режимов МАО, которые обеспечивают получение минимальных значений шероховатости поверхности и необходимых остаточных напряжений в поверхностном слое, выполнялось построение интегральной целевой функции и ее оптимизация [22, 102]. Функция имела вид:

$$F(V, \mathbf{B}, \tau, \lambda) = \sum_{i=1}^N \Delta f_i(V, \mathbf{B}, \tau, \lambda) \cdot K_i \quad (4.17)$$

$$\Delta f_i(V, \mathbf{B}, \tau, \lambda) = \frac{\min_{i=1,2} (f_i(V, \mathbf{B}, \tau, \lambda) - f_i^1)}{f_i^2 - f_i^1} \quad (4.18)$$

$$K_i = \begin{cases} 0, f_i^1 \leq f_i \leq f_i^2 \\ 1, \Delta f_i \leq 0.1 \\ 10, \Delta f_i > 0.1 \end{cases} \quad (4.19)$$

где $F(V, B\lambda)$ – значение интегральной целевой функции; f_i – значение функции i -го параметра; f_i^1 и f_i^2 – нижняя и верхняя границы i -го параметра; K – коэффициент штрафа, значения которого зависят от величины выражения в скобках.

Выбор коэффициента штрафа выполняется таким образом, чтобы при попадании в заданные границы, его вклад в значение целевой функции тождественно равнялся нулю. Отклонение параметру от заданного интервала не более чем на 10% приводит к увеличению его вклада приблизительно до 0,5 (суммарно для всех факторов до 3,55), а более значительные отклонения – до 10 и больше.

Примеры топограмм поверхностей интегральной целевой функции в координатах скорость MAO – магнитная индукция и время обработки – магнитная индукция приведены на рис. 4.20 – 4.22, соответственно.

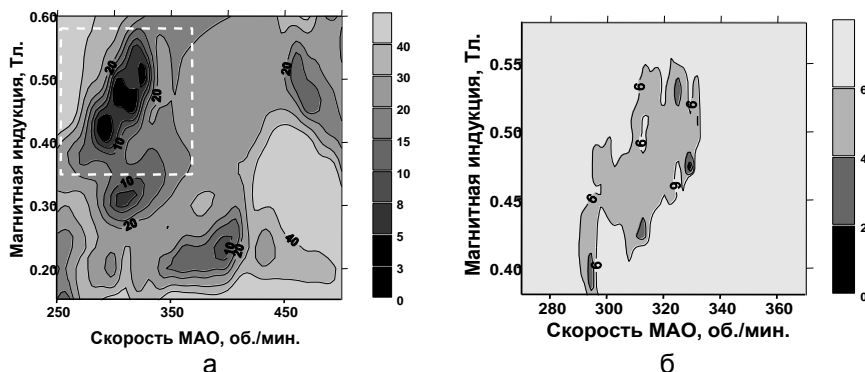


Рис. 4.20. Топограммы поверхностей интегральной целевой функции для условий: время обработки 200 с, размер частиц порошка 315/200 мкм – а и в выделенном подпространстве – б

Установлено, что наиболее приемлемые условия обработки имеют место при использовании порошка с размером частиц 315/200 мкм, значениях скорости обработки $V = 3 - 4$ м/с (250 – 330 об/мин) и магнитной индукции в рабочих зазорах, которая изменяется от 0,2 до 0,55 Тл при изменении времени обработки с 200 с до 300 с. При использовании порошка с размером частиц 400/315 мкм зона качественной обработки существенно расширяется. Увеличение времени MAO с использованием МАИ с размером частиц 315/200 мкм приводит к практически линейному росту интегральной целевой функции. При обработке порошком 400/315 мкм, целевая функция

имеет минимум, как по времени обработки, так и по скорости МАО. Наиболее качественно процесс МАО возможно выполнять в зоне изменений скорости 3,6 – 4,2 м/с (300 – 350 об/мин), времени обработки 170 – 240 с, магнитной индукции 0,22 – 0,28 Тл.

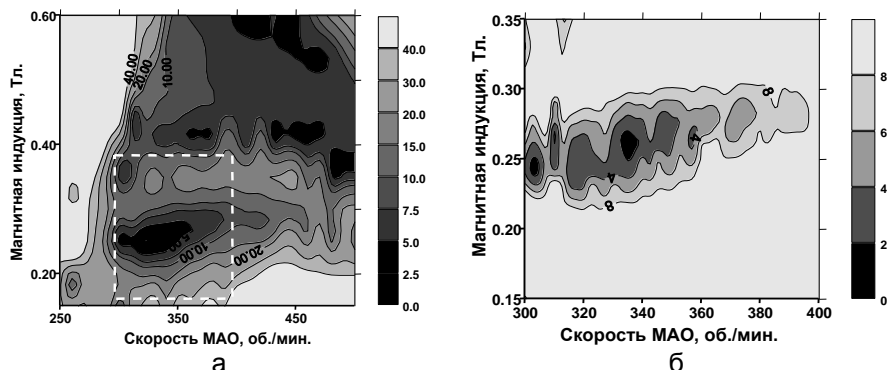


Рис. 4.21. Топограммы поверхности интегральной целевой функции для условий: время обработки 200 с, размер частиц порошка 400/315 мкм– а и в выделенном подпространстве – б

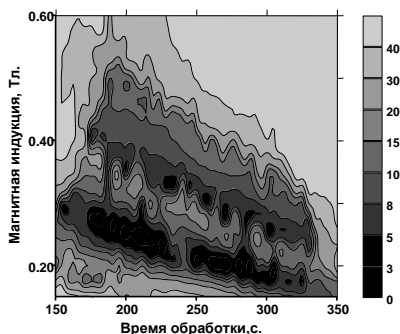


Рис. 4.22. Топограмма поверхности интегральной целевой функции для условий: скорость обработки 3,84 м/с (320 об/мин), размер частиц порошка 400/315 мкм

Интегральная целевая функция имеет достаточно сложный, ступенчатый характер с большим количеством локальных экстремумов, поиск которых с использованием традиционных методов (покоординатного спуска Гаусса-Зейделя) усложнен. Наиболее приемлемым для такой функции является метод многомерной стохастической аппроксимации в варианте алгоритма наилучшей пробы [14].

Для поиска одной точки необходимо более 1500 расчетов функции с двух – трех кратным уменьшением шага поиска.

Характеристики четырех точек, которые отвечают минимальному значению целевой функции, приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Результаты оптимизации интегральной целевой функции

Условия формирования МАИ	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4
V , об./мин. (м/с)	335 (4,02)	384 (4,61)	351 (4,21)	348 (4,18)
B , Тл	0,15	0,75	0,18	0,18
τ , с	315	183	290	262
λ , мкм	381	348	398	402
Свойства поверхности и поверхностного слоя лопаток				
Ra , мкм	0,26	0,11	0,25	0,28
σ_{ex} , кгс/мм ² (МПа)	40(382)	39(371)	41(402)	44(432)
$\sigma_{цнт}$, кгс/мм ² (МПа)	68(667)	70(687)	54(530)	58(569)
$\sigma_{облх}$, кгс/мм ² (МПа)	31(304)	27(265)	35(343)	29(284)
h_{ex} , мкм	115	91	105	116
$h_{цнт}$, мкм	136	118	128	138
$h_{вых}$, мкм	83	84	92	98

Учитывая выполненные исследования, результаты расчетов и вариации введения MAO в существующую технологическую схему изготовления деталей нами была предложена опытная технологическая цепочка, которая состояла из операций:

1. Обработка лопаток до операции полирования R -перехода и входных кромок включительно;
2. Термическая обработка (двойное старение);
3. Магнитно-абразивная окончательная обработка;
4. Последующие операции контроля, маркировки и подготовки деталей к установке в двигатель.

По предложенной схеме до операции MAO выполнялись все операции существующего технологического процесса, включительно с операцией «двойное старение», которая завершает технологический цикл перед операцией MAO. Операции ЛВП, упрочнение микрошариками и виброшлифования не выполнялись.

Обработка контрольной партии деталей за предложенной технологической цепочкой и при определенных оптимальных режимах обработки: скорость вращения деталей вокруг оси кольцевой ванны $V = 3,5$ м/с, магнитная индукция в рабочих щелях магнитных зазоров $B = 0,2$ Тл, время обработки 300 секунд (обработка с реверсом вращения – 200 с на входную кромку + 100 с на выходную), применяемый

магнитно-абразивный порошок – Полимам-Т с размером частиц 400/315 мкм, обеспечила получение лопаток с шероховатостью поверхности Ra (0,2 – 0,25) мкм и остаточными напряжениями в поверхностном слое, характер изменения которых приведен на рис. 4.23.

Нужно отметить, что аналогичные характеристики поверхности и поверхностного слоя лопаток являются наилучшими с точки зрения обеспечения наиболее оптимальных эксплуатационных свойств деталей, которые определены в течение многолетнего опыта изготовления и эксплуатации лопаток в реальных условиях. Исследование лопаток на сопротивление усталости показали их соответствие техническим требованиям, то есть составляют $\sigma_{-1} = 640$ – 660 МПа.

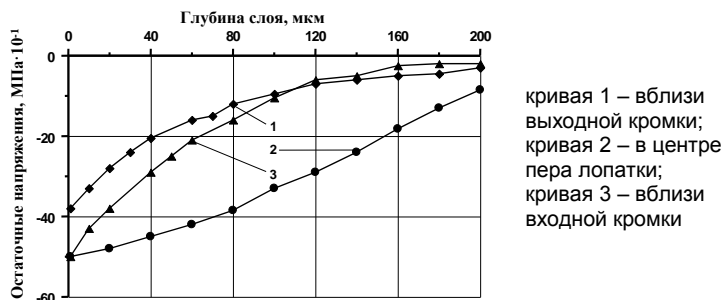


Рис. 4.23. Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей для разных участков пера лопатки при оптимальных условиях МАО

4.4 Применение МАО для восстановления эксплуатационных характеристик лопаток компрессоров ГТД при ремонте

Использование МАО, как финишной операции при обработке лопаток компрессоров ГТД обеспечивает не только равномерное улучшение шероховатости поверхности пера лопаток [24, 25] с высокой производительностью, но и упрочнение поверхностного слоя деталей [63]. Разработанные технология и установка для МАО лопаток позволяют выполнять формирование кромок лопаток [116, 131, 144]. Варьирование технологическими режимами МАО обеспечивает возможности проведения обработки с регулируемым влиянием на разные участки пера лопатки [89], что позволяет

рекомендовать такую технологию для использования при ремонте лопаток.

Компрессорные лопатки в процессе эксплуатации поддаются эрозионному износу. В результате этого детали с наработкой более 1500 часов имеют на своей поверхности дефекты в виде кавитационных раковин, следов абразивного и коррозионного износа, который легко контролируется визуально. Удаление дефектного слоя осуществляется, как правило, путем ручного шлифования и полирования раковин и коррозионных трещин абразивными кругами с применением разных паст до полного их удаления. В результате выполнения такой операции удаляется значительный слой материала с поверхности (глубиной до 0,5 – 0,8 мм) вблизи дефектов до полного их исчезновения. При этом возникает опасность:

- закрытия раковин наплывами материала, то есть формирование скрытого дефекта;
- выход за предельно допустимые размеры профиля, то есть полной выбраковке детали;
- снижение эксплуатационных характеристик.

Преимущества магнитно-абразивного метода, который использует в качестве рабочего тела специальный подвижно-скоординированный МАИ, интегральная жесткость которого может легко регулироваться в широких пределах, делает его достаточно привлекательным для решения задач, которые вытекают из недостатков и опасностей традиционной технологии ремонта лопаток ГТД с использованием жестко связанного абразивного инструмента.

Исследован процесс MAO лопаток компрессора ГТД, время наработки которых составляло 2500 – 3000 часов. Геометрические параметры лопаток: высота пера 65 мм, длина хорды 45 мм, угол закрутки изменяется в диапазоне 0,15 – 0,45 град/мм. Материал лопаток – сплав ЭИ 961. Лопатки поддавались предыдущей промывке и дефектации. Детали после промывки имеют матовую поверхность, покрыты тонкой окисной пленкой сероватого цвета. Места эрозии имеют вид черно-серых точек диаметром от 0,1 до 1 мм с рыхлой поверхностью и занимают около 45 – 50% поверхности пера лопатки преимущественно возле выходной кромки со стороны корыта и возле входной кромки на спинке. Шероховатость поверхности достаточно равномерна и имеет величину Ra 0,1 – 0,3 мкм, то есть отвечает требованиям по Ra для новых деталей. Опорная длина профиля $t_p(50)$ составляет 30 – 40%.

Для удаления с поверхности продуктов эрозии, окислов и загрязнений, с целью вскрытия действительного микропрофиля пера деталей после эксплуатации, выполнено кратковременную MAO

лопаток с использованием «мягкого» МАИ на щадящих режимах. Режим обработки: скорость перемещения вдоль ванны – 0,1 – 0,2 м/с, напряженность магнитного поля в рабочих зазорах $0,35 \cdot 10^5$ А/м (0,05 – 0,06 Тл), время обработки 2 – 4 с, магнитно-абразивный порошок Ферромап с размером частиц 200/100 мкм. В результате магнитно-абразивной очистки обеспечивается металлический блеск поверхности пера. Эрозионные раковины «раскрыты» (очищенные от рыхлого слоя). Контроль шероховатости поверхности пера лопаток выполняли на профилометре марки Калибр 252 в 50 зонах на корыте и спинке лопатки. В каждой зоне выполнялось не менее 5 измерений параметра Ra , что позволило избежать случайных ошибок. Измерения проводили не менее чем на 5 лопатках из каждого предназначенного для ремонта комплекта лопаток (44 шт.). В результате статистической обработки результатов измерений получены усредненные топограммы шероховатости поверхности пера детали (рис. 4.24) после эксплуатации.

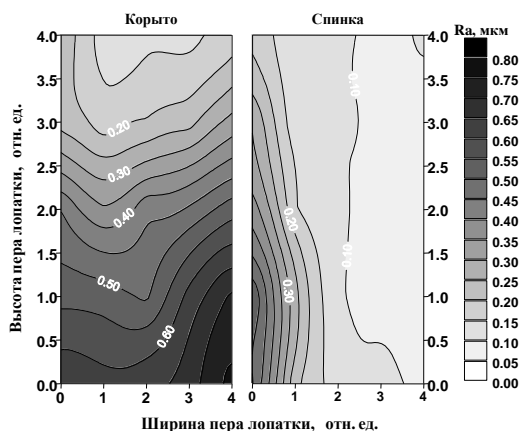


Рис.4.24. Топограммы изменения величины Ra поверхности пера лопатки после эксплуатации

Анализ топограмм показывает, что наибольшие повреждения пера лопатки имеют место на краю консоли возле выходной кромки корыта. В этой зоне величина Ra составляет от 0,4 до 0,8 мкм. Установлено, что шероховатость поверхности существенно улучшается по мере приближения к прикомлевой зоне – до Ra 0,15 мкм. Причем возле входной и выходной кромок чистота поверхности хуже, чем в центральной части пера, где находится ось жесткости (вертикальная ось) лопатки.

Подобное распределение параметра Ra связано с особенностями эксплуатации деталей и их характеристиками

прочности, которые определяют условия вибраций лопаток в компрессоре при работе. Минимальная шероховатость в прикомлевой зоне и вблизи вертикальной оси детали говорит о том, что условия работы лопаток в этих зонах наиболее благоприятны с точки зрения их повреждаемости.

Спинка лопатки наиболее подвержена эрозионному износу вблизи входной кромки. Максимальная шероховатость наблюдается возле края кромки – Ra 0,5 – 0,6 мкм. В прикомлевой зоне величина Ra составляет 0,15 – 0,2 мкм. Отметим, что на спинке следы эрозии менее выражены.

Наиболее дефектная область на пере лопаток это входная кромка, шероховатость которой составляет Ra 0,7 – 1 мкм с большим количеством эрозионных раковин, с достаточно острыми краями. Характер изменения шероховатости по длине хорды и по высоте лопатки показано на рис. 4.25.

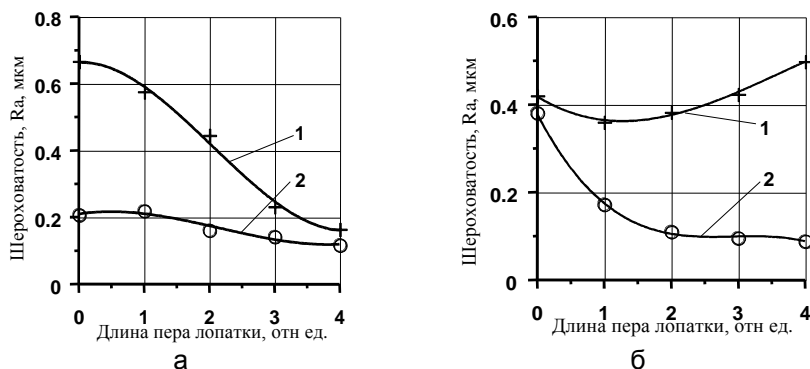


Рис. 4.25. Среднее значение шероховатости пера лопатки: а – по длине, б – высоте; кривая 1 для корыта, кривая 2 для спинки пера; начало координат на краю консоли возле входной кромки

Согласно [98] для достижения минимальной шероховатости поверхности пера лопаток методом МАО необходимо использовать порошок зернистостью менее 200 мкм. Такая зернистость порошка определена для исходной шероховатости пера Ra 0,8 – 1 мкм. Однако необходимо учитывать наличие на поверхности эрозионных раковин, кромки которых при ремонте должны располировываться. Для выполнения процесса располировки целесообразно использовать порошок зернистостью 630 – 400 мкм. При этом допускается незначительное ухудшение шероховатости поверхности пера лопаток на участках с $Ra < 0,15$ мкм, но обеспечивается существенное

снижение технологической и эксплуатационной наследственности на участках, где исходная шероховатость $Ra \geq 0,8$ мкм.

Для МАО использовали магнитно-абразивный порошок Ферромап с осколочной формой частиц, с установленным выше размером частиц. Скорость МАО составляла 3 – 3,5 м/с, что обеспечивает равномерное «обтекание» поверхности пера и кромок лопаток абразивной средой [68, 94]. Напряженность магнитного поля в рабочих зонах магнитных зазоров составляла $(2...2,4) \cdot 10^5$ А/м, амплитуда колебаний лопаток вокруг вертикальной оси – 14° , частота колебаний 60 – 70 Гц. В качестве СОТС использовали масло Индустриальное.

Наличие неравномерной по высоте пера лопатки шероховатости требует, соответственно, и разного времени МАО каждого участка пера. Поэтому на разработанной установке [114, 144] выполняли позонную обработку по длине пера. МАО корыта целесообразно проводить более длительное время возле края консоли пера, чем для спинки в средней части пера и прикомлевой зоне. За базовый цикл МАО принята схема обработки пера со ступенчатым перемещением лопаток через зону обработки со скоростью 23,5 мм/мин, с промежуточными остановками на 35 с, 20 с, 20 с и 10 с при обработке на входную кромку и с паузами в вертикальном перемещении вдоль оси лопатки при обработке в противоположном направлении (на выходную кромку) – 10 с и 10 с, с промежутком между паузами 95 с. В результате такого цикла МАО каждый участок пера лопатки находится в зоне активной обработки переменное время.

Для анализа динамики процесса МАО лопаток полный технологический цикл обработки был разбит на четыре этапа:

- 1 этап – время обработки 55 с;
- 2 этап – время обработки 55 с + 50 с;
- 3 этап – время обработки 55 с + 50 с + 75 с
- 4 этап – реверс вращения (на выходную кромку) время обработки 115 с.

По окончании каждого этапа выполняли контроль шероховатости пера лопатки. Топограммы шероховатости поверхности лопаток приведены на рис. 4.26.

Полный цикл МАО пера лопаток обеспечил полное раскрытие и разполировку острых краев эрозионных раковин на поверхности без существенного удаления материала с поверхности вблизи мест эрозии. Шероховатость окончательно обработанных методом МАО лопаток не превышает $Ra 0,55$ мкм с величиной опорной длины

профиля $t_p(50) \gg 70 - 75\%$, что отвечает техническим требованиям на шероховатость лопаток после ремонта. Важно отметить, что улучшение шероховатости поверхности происходит больше всего активно в зонах поверхности пера лопатки наиболее подверженным повреждениям, то есть на корыте в верхней части пера и на спинке – вблизи входной кромки. Характер ухудшения параметра Ra – до $0,06 \text{ мкм}$ определяется предельной минимальной величиной шероховатости, обусловленной типом и размером частиц используемого при обработке магнитного абразива [98].

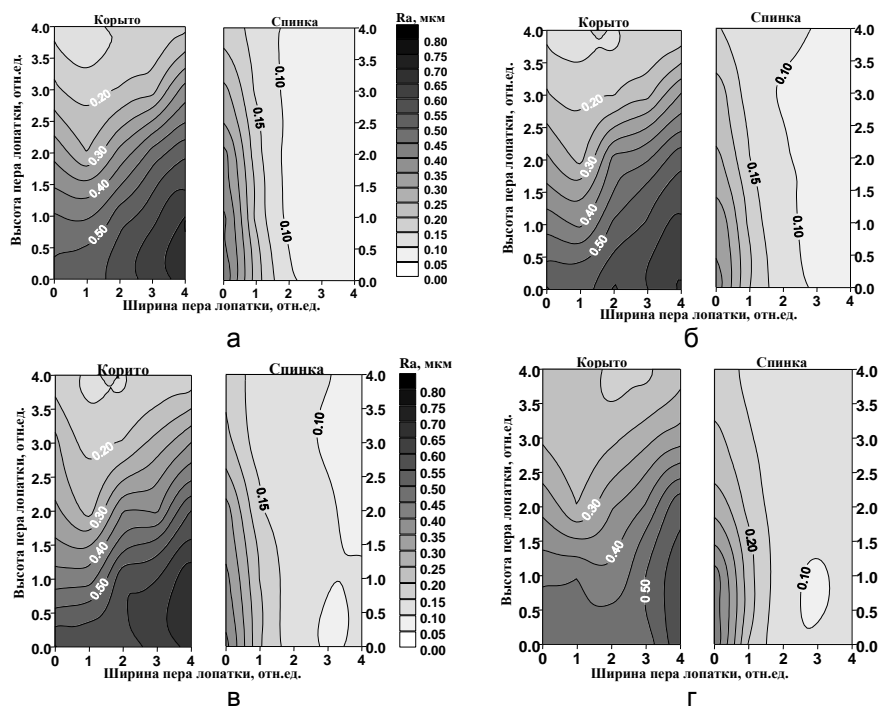


Рис. 4.26. Топограммы шероховатости поверхности пера лопатки после МАО; а – этап 1; б – этап 2; в – этап 3; г – этап 4; начало координат на краю консоли у входной кромки

Анализ изменения параметра Ra поверхности лопатки на промежуточных этапах обработки показал, что изменение шероховатости имеет волнообразный убывающий характер с периодом улучшения – ухудшение шероховатости поверхности

порядка 40 – 60 с и амплитудой 0,05 – 0,1 мкм. Аналогичные результаты установлены в [99] при струйно-абразивной обработке. Их связывают с физико-механическими изменениями, которые происходят в поверхностном слое материала при обработке.

Изменение шероховатости пера лопатки за полный цикл МАО лопаток порошком Ферромап с размером частиц 630/400 мкм показал, что средняя скорость изменения шероховатости равна величине $0,42 \cdot 10^{-3}$ мкм/с. Причем, чем больше величина Ra на поверхности лопатки до МАО, тем выше скорость. Так при исходной $Ra = 0,7$ мкм скорость изменения $Ra - V(Ra)$ составляет $(0,8 - 0,9) \cdot 10^{-3}$ мкм/с. При $Ra = 0,25$ мкм $V(Ra) = 0$ мкм/с для данного типа порошка. Когда шероховатость меньше 0,25 мкм наблюдается процесс незначительного ухудшения шероховатости поверхности (не больше 0,06 мкм).

Таким образом, целесообразно рекомендовать такую технологию МАО лопаток при их ремонте: введение лопатки в рабочую зону на высоту рабочей зоны и дальнейшая позонная обработка пера, при ступенчатом перемещении лопаток через зону обработки на высоту рабочей зоны со скоростью 20 – 25 мм/мин с промежуточными остановками подачи на 35 – 40 секунд при обработке на входную кромку. Далее выполняется смена направления вращения лопатки и подачи, которая обеспечивает обработку в направлении на выходную кромку. При обработке на выходную кромку рекомендуется такой режим: остановка подачи на 10 – 15 секунд, вертикальную подачу, остановку при подходе консоли пера лопатки к нижнему срезу рабочей зоны установки и остановку подачи на 10 – 15 секунд, выход из рабочей зоны на рабочей подаче.

4.5 Влияния наследственности обработки поверхности ремонтируемых лопаток с последующим нанесением тонкослойных покрытий на их эксплуатационные характеристики

При МАО в поверхностном слое деталей формируются остаточные сжимающие напряжения, которые являются желательными при подготовке поверхности деталей под нанесение ионно-плазменных покрытий типа TiN с толщиной, слоя 5 – 10 мкм, с повышенной твердостью, износо- и коррозионной стойкостью. Выполненные ранее исследования по использованию покрытий такого класса для повышения надежности деталей не дали удовлетворительных результатов. Поэтому целью работы было экспериментальное исследование технологических особенностей использования обработки деталей методом МАО как полирующе-

упрочняющей и подготовительной операции перед нанесением тонких покрытий, а также изучение влияния нанесенных таким способом покрытий типа TiN на характеристики сопротивления усталости ремонтных лопаток компрессоров ГТД.

Объектом исследования были лопатки 9 степени компрессора ГТД двигателя НК-12 с эксплуатационной наработкой 2000 часов, высотой пера 65 мм, величиной хорды 45 мм, углом закрутки, изменяющимся в диапазоне 0,15 – 0,45 град/мм, изготовленных из сплава ЭИ 961. Снятые с двигателя детали поддавались предварительной промывке и дефектации. Лопатки обрабатывали методом MAO с последующим нанесением TiN покрытия.

Для исследования влияния технологического цикла MAO на характеристики сопротивления усталости, обработанные лопатки испытывали на электродинамическом вибростенде по первой изгибной форме колебаний при комнатной температуре и симметричном цикле нагрузки. Деформацию лопаток в зоне вероятного разрушения (спинка, входная кромка возле комля) определяли с помощью тензорезисторов КФ-5 (база 3 мм), которые наклеивались в соответствующих зонах пера лопатки. Соответствие измеряемого от тензорезистора сигнала уровню напряжений в лопатках в местах наклейки устанавливали с помощью динамического тарирования тензорезисторов на камертонной балке. При пересчете деформаций в напряжение принято значение модуля упругости данной стали по работе [112]. За критерий предельного состояния (разрушение) лопатки принимали падение резонансной частоты колебаний на 2 – 3%, при котором в лопатке появляется макротрещина от усталости. База испытаний для оценки ограниченного предела выносливости составляет $N = 2 \cdot 10^7$ циклов.

Исследование на сопротивление усталости выполняли на двух партиях лопаток, которые отличаются финишной обработкой на технологической операции ремонта. В первой партии полирование профиля пера лопатки выполнено по технологии ремонтного предприятия. Во второй – на лопатки, обработанные методом MAO, наносили покрытие TiN с толщиной слоя 6 – 8 мкм. Контроль шероховатости пера детали с покрытием показал равномерное увеличение шероховатости поверхности с покрытием на величину $Ra = 0,1 - 0,2$ мкм. При этом важно отметить значительное ухудшение опорной длины профиля к $t_p(50) < 30\%$. Это связано с особенностями процесса нанесения покрытия и его структурой, которая имеет столбчатый характер. Причем, чем ниже шероховатость исходной поверхности, тем образуется более плотное и мелкозернистое покрытие. На лопатках с TiN выполняли повторную MAO по режимам

аналогичными предыдущим с той разницей, что использовался более мелкозернистый магнитно-абразивный порошок с размером частиц 200/100 мкм, а скорость вертикальной подачи в 4 раза превышала скорость подачи на первом этапе. После повторной MAO установлено уменьшение шероховатости поверхности до $Ra = 0,1 - 0,4$ мкм, с опорной длиной профиля $t_p(50) > 80\%$. На лопатки, которые прошли технологический цикл ремонта MAO + TiN + MAO повторно нанесено покрытие TiN. В результате контроля шероховатости поверхностей пера получены топограммы изменения величины Ra , которые приведены на рис. 4.27.

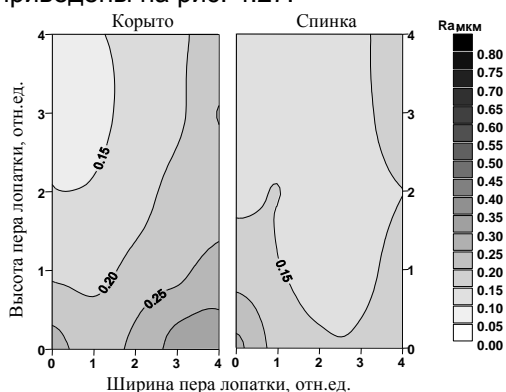


Рис.4.27. Топограммы шероховатости поверхности пера лопатки после технологического цикла ремонта MAO + TiN + MAO + TiN; начало координат на краю консоли возле входной кромки

Показано, что применение подобного технологического цикла ремонта обеспечивает формирование шероховатости поверхности, которые отвечают требованиям для новых деталей. Важно отметить высокое качество покрытия на входных и выходных кромках лопаток. Повторная MAO не привела к диспергуваню с поверхности пера слоя TiN, в том числе и с кромок, что говорит о высокой адгезии покрытия к основе. Результаты проведенных исследований лопаток на сопротивление усталости приведено на рис. 4.28. Кривые усталости для двух партий испытанных лопаток получены методом линейного регрессионного анализа. Кроме того, на рис. 4.28 показаны экспериментальные точки для лопаток после первичной обработки MAO.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что экспериментальные точки для лопаток после MAO практически мало отличаются от лопаток после полирования (кривая 1), с учетом большого рассеивания долговечности ($S_{lg} > 0,6$) и малых объемов выборки. Кривая 2 для лопаток, обработанных по схеме MAO + TiN + MAO + TiN, характеризуется малым разбросом экспериментальных точек и повышением граничного предела выносливости не менее чем на 30 МПа.

Следует отметить, что если в лопатках, обработанных по серийной технологии и с применением одноразового MAO, место разрушения было в корневом сечении на входной кромке, то лопатки с покрытием TiN разрушались на входной кромке, но в сечении на уровне 1/3 высоты пера и выше. Причем практически отсутствует рассеивание по долговечности.



Рис. 4.28. Результаты исследований на усталость рабочих лопаток (сплав ЭИ 961) компрессора НК-12 после наработки 2000 часов для разной технологии ремонта;
1 – полирование;
2 – MAO + TiN + MAO + TiN;
○ – MAO

Показано, что технологический цикл ремонта с помощью MAO обеспечивает улучшение качества поверхности (уменьшение шероховатости и ее равномерность) лопаток с эксплуатационными дефектами типа эрозийных и коррозионных язв, расположенных локально. Метод MAO позволяет осуществлять качественную подготовку поверхности лопаток для нанесения многослойных покрытий типа TiN, обеспечивая высокие адгезионные свойства покрытия. Показано, что кривая усталости для лопаток, обработанных по схеме MAO + TiN + MAO + TiN, характеризуется малым разбросом экспериментальных точек и повышением граничного предела выносливости.

4.6 Применение MAO для финишной обработки лопаток компрессоров изготовленных из титановых сплавов

Положительные результаты, полученные при MAO стальных лопаток, при их ремонте, особенно в сочетании с нанесением тонких ионно-плазменных покрытий типа TiN, делают технологию MAO достаточно привлекательной не только для получения высоких классов шероховатости рабочих поверхностей лопаток, но и для повышения эксплуатационной надежности. Предыдущие исследования показали, что наилучшие результаты можно получить за счет использования магнитно-абразивного инструмента со специфическими свойствами, которые позволяют регулируемо влиять на микрогеометрию поверхности пера и

на состояние поверхностного слоя лопаток за счет пластичной деформации неровностей.

Исследовали влияние MAO с использованием МАИ, который сформировано из порошков с разными абразивно-полирующими и реологическими свойствами с целью управляемого, прогнозируемого воздействия на физико-механические характеристики поверхностей.

Было проведено исследование влияния MAO с использованием специализированного порошкового МАИ на финишных этапах изготовления лопаток III ступени компрессора низкого давления (КНД) двигателя Д-36 из сплава титана BT3-1. Высота пера лопатки составляет 71 мм, хорда 31 мм. Исследования проводили на полностью готовых деталях, которые прошли операции окончательного формирования профиля, прикомлевой зоны, формирования и полирования входных и выходных кромок лопаток (ручная обработка) и виброабразивную обработку в ультразвуковых установках (ультразвуковое упрочнение). Исходная шероховатость поверхности таких лопаток составляет $Ra = 0,34 - 0,4$ мкм при величине опорной поверхности микропрофиля на уровне 50% – $t_p(50) = 78,1\%$. Внешний вид профилограмм поверхности таких лопаток приведен на рис. 4.29. Микропрофиль имеет типичный вид, характерный для поверхностей после виброабразивной обработки с выглаженным микрорельефом, без значительных концентраторов напряжений.



Рис. 4.29. Профилограмма поверхности лопаток III ступени КНД двигателя Д-36 после виброабразивной обработки; ГУ x500, ВУ x10000

Учитывая положительные результаты по использованию комбинированной обработки при ремонте поверхности стальных лопаток MAO + TiN + MAO + TiN был проведен цикл исследований на титановых лопатках. Установлено, что шероховатость поверхности после указанного цикла обработок улучшается на величину $Ra 0,2 - 0,3$ мкм (рис. 4.30).

Испытания на усталость лопаток с двойным TiN покрытием показали, что сопротивление усталости не ниже серийно изготовленных деталей. На этом этапе исследований MAO выполняли в течение 6,5 минут при перемещении лопаток вдоль кольцевой ванны со скоростью 3 – 3,5 м/с. При чем половина полного времени обработки выполнялась при вращении в направлении на входную кромку, а половина – наоборот – на выходную. Использовали магнитно-абразивный порошок Ферромап с размером частиц 315/200 мкм. Медленное перемещение через рабочую зону в вертикальном направлении выполняли со скоростью 0,35 мм/с. Магнитная индукция в рабочих зонах (свободных от МАИ) составляла

0,27 Тл. Для более детального изучения влияния процесса MAO, с использованием MAИ разного назначения, на состояние поверхности лопаток на разных этапах комплексного процесса комбинированной обработки лопаток были проведены дополнительные исследования с целью оптимизации такой обработки.

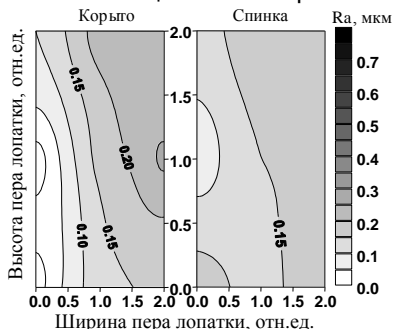


Рис. 4.30. Топограммы изменения шероховатости поверхности пера лопаток из сплава VT3-1 после цикла обработки за схемой MAO + TiN + MAO + TiN

С учетом предыдущей шероховатости поверхности пера лопаток по рекомендациям, приведенным в [3], в качестве магнитно-абразивного материала для получения минимальной шероховатости после MAO был выбран порошок Полимам-Т с размером частиц 200/100 мкм. Исследования реологических и эксплуатационных свойств такого порошка и смесей на его основе показали, что наилучшие результаты можно ожидать при использовании для MAO специально сформированного MAИ из смеси Полимам-Т с размером частиц 200/100 мкм – 80 – 90% и сферического порошка ПР Р6М5 с размером частиц 100/63 мкм в количестве 10 – 20% [81]. Будем называть такой MAИ полирующе-упрочняющим (MAИ_{п-у}). Для сравнения выполняли обработку MAИ, который сформирован из порошка ПР Р6М5 с размером частиц 315/200 мкм. Такой порошок, имея низкие абразивные свойства в составе MAИ, способствует пластической деформации микровыступов на поверхности, не выполняя значительного диспергирования материала, и обеспечивает наилучшие условия для «обтекания» MAИ обрабатываемой поверхности. При этом он должен обеспечивать формирование сжимающих напряжений в поверхностном слое деталей, которые являются желательными, а MAИ будет иметь преимущественно упрочняющие свойства и его будем обозначать – MAИ_у. Скорость MAO составляла 3 – 3,1 м/с, время обработки и магнитная индукция в рабочих зазорах аналогична выше приведенным. В результате MAO с использованием магнитно абразивного инструмента, сформированного из порошка ПР Р6М5 315/200 мкм, – MAИ_у, изменения величины шероховатости поверхности – Ra не установлено. Установлено некоторое изменение внешнего вида микропрофиля – имеет место более выглаженный рельеф (рис. 4.31 а). Обработка с использованием MAИ,

составленного из смеси порошков Полимам-Т и ПР Р6М5 позволила получить поверхность с $Ra = 0,13$ мкм и внешним видом микропрофиля, приведенным на рис. 4.31 б.

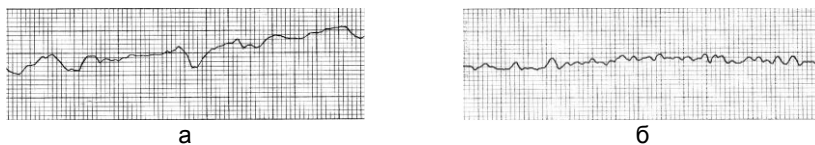


Рис. 4.31. Профилограммы поверхности лопаток после МАО:
а – порошком ПР Р6М5 с размером частиц 315/200 мкм, б – смесью порошков Полимам-Т 200/100 мкм и ПР Р6М5 100/63 мкм;
ГУ x500, ВУ x 10000

После первого цикла МАО было выполнено или повторное МАО, или нанесение покрытия TiN. Лопатки после обработки смесью порошков имели шероховатость поверхности из $Ra = 0,13$ мкм, повторно обрабатывались порошком ПР Р6М5 с размером частиц 315/200 мкм. При этом микропрофиль и шероховатость поверхности пера не изменились. На лопатки обработанные МАИ_{п-у} (составленного из смеси порошков) и на лопатки с двойной МАО, с использованием МАИ_{п-у}, а затем МАИ_у было нанесено TiN покрытий. В результате шероховатость поверхности пера лопаток ухудшилась до $Ra = 0,6$ мкм практически одинаково для всех лопаток. Последующая МАО с использованием МАИ_{п-у} или МАИ_у на аналогичных режимах привела к снижению шероховатости поверхности до $Ra = 0,1$ мкм в первом случае и $Ra = 0,12$ мкм – во втором. Формы микропрофиля после нанесения ионно-плазменного покрытия и после МАО с использованием МАИ_{п-у} и МАИ_у покрытия приведено на рис. 4.32.

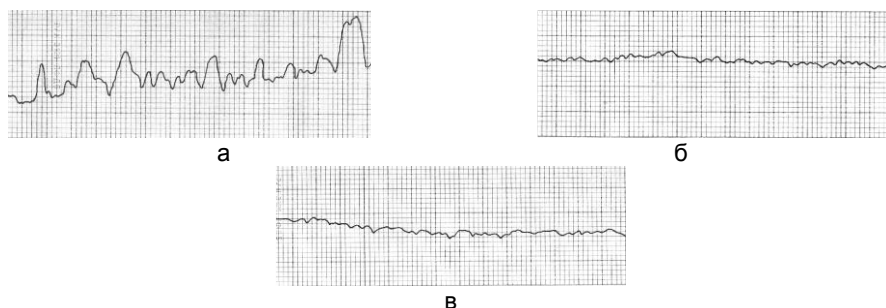


Рис. 4.32. Профилограммы поверхности лопаток после цикла: а – МАО + TiN, б – МАО + TiN + МАО порошком ПР Р6М5 с размером частиц 315/200 мкм, в – МАО+TiN+МАО смесью порошков Полимам-Т 200/100 мкм и ПР Р6М5 100/63 мкм; ГУ x500, ВУ x10000

При этом для МАИ_{п-у} и МАИ_у форма профиля внешне почти одинакова, как и шероховатость. Но исследования опорной длины профиля на разных уровнях показали, что наилучшие результаты получены при повторной MAO с использованием МАИ_{п-у} (рис. 4.33).

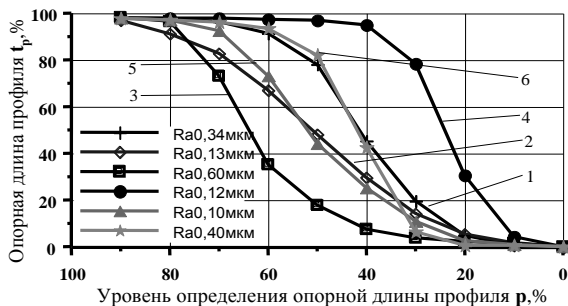


Рис. 4.33. Значение опорной длины микропрофиля поверхности лопатки после разных технологических циклов финишной обработки и упрочнения: 1 – виброабразивная обработка, 2 – виброабразивная обработка + MAO с МАИ_{п-у}, 3 – виброабразивная обработка + MAO с МАИ_{п-у} + TiN, 4 – виброабразивная обработка + MAO с МАИ_{п-у} + TiN + MAO с МАИ_{п-у}, 5 – виброабразивная обработка + MAO с МАИ_{п-у} + TiN + MAO с МАИ_у, 6 – виброабразивная обработка + MAO с МАИ_у

Эксплуатационную надежность лопаток оценивали по характеристикам сопротивления усталости. Как и при определении, сопротивления усталости ремонтируемых лопаток, напряжение в разных сечениях пера лопаток определяли с помощью тензорезисторов с последующей их тарировкой. Распределение напряжений по перу лопатки и схема расположения датчиков приведены на рис. 4.34.

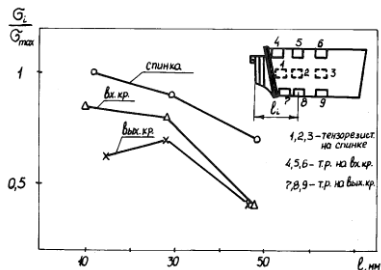


Рис. 4.34. Распределение напряжений по перу лопатки III степени КНД двигателя Д-36 (материал лопатки – сплав ВТЗ-1)

Характеристики сопротивления усталости лопаток обработанных с применением разной комбинации MAO и нанесения покрытий, а также разных типов применяемого МАИ приведены на рис. 4.35.

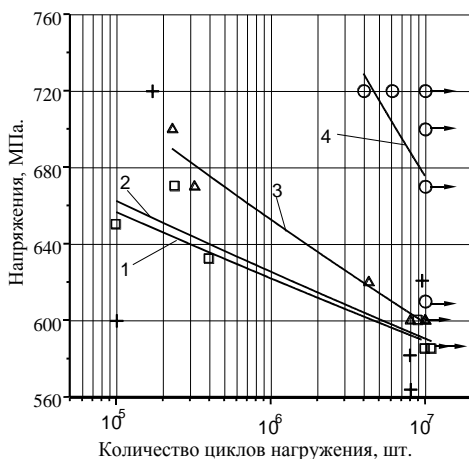


Рис. 4.35. Результаты испытаний на сопротивление усталости рабочих лопаток; 1 – после виброабразивной обработки, 2 – лопатки после комбинации MAO+TiN+MAO+TiN (порошок Ферромап 315/200 мкм), 3 – после виброабразивной обработки + MAO с МАИ_{п-у} + MAO с МАИ_у + TiN, 4 – после виброабразивной обработки + MAO с МАИ_{п-у} + TiN + MAO с МАИ_у

Установлено, что дополнительная MAO лопаток с использованием магнитно-абразивного инструмента сформированного из микрошариков ПР Р6М5 с размером частиц 315/200 мкм, с целью упрочнения поверхностного слоя перед нанесением покрытия приводит к позитивным результатам. Получено повышение сопротивления усталости на 100 – 120 МПа, отсутствует рассеивание по долговечности, как и в случае со стальными лопатками [28].

Показано, что, наилучшие результаты получены после технологической комбинации MAO+TiN+MAO с использованием МАИ_{п-у}. Получен рост сопротивления усталости не менее чем на 16%, то есть 100 МПа. Такой рост эксплуатационных характеристик лопаток связан не только с формированием оптимального микропрофиля поверхности с низкой шероховатостью, но и образованием наиболее оптимальных физико-механических характеристик поверхностного слоя, особенно под TiN покрытием, когда происходит повторная MAO. Именно во время заключительной MAO с использованием МАИ_{п-у}

происходит интенсивное формирование оптимального уровня напряжений сжатия под слоем покрытия, которое подтверждается результатами исследований приведенных выше.

Таким образом при изготовлении титановых лопаток можно рекомендовать технологическую цепочку финишной обработки, которая состоит из полирующе-упрочняющей операции МАО перед нанесением покрытия типа TiN и аналогичной МАО с применением специального композиционного МАИ, сформированного из смеси порошков, которая имеет в своем составе порошки, которые обеспечивают качественное полирование (осколочные равноосные частицы типа Полимам-Т) и упрочнение поверхности (сферические частицы типа ПР Р6М5). Причем процентный состав смеси должен обеспечивать формирование МАИ с наименьшей вязкостью для получения условий наилучшего нивелирования МАИ относительно обрабатываемой поверхности сложной конфигурации. Использование предложенной финишной комплексной технологической обработки лопаток с применения полирующе-упрочняющего магнитно-абразивного инструмента, изготовленных из сплава титану ВТ3-1, III степени КНД двигателя Д-36 обеспечило получение гарантированной величины граничного предела выносливости до 700 МПа при базе испытаний 10^7 циклов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное развитие техники, создание новых и совершенствование существующих машин, механизмов, приборов предусматривает использование высокоэффективных технологических процессов производства отдельных деталей. Актуальными являются проблемы повышения качества, надежности и эффективности их работы. Основной целью технологических процессов современного машиностроения – является обеспечение формообразования деталей с высокой точностью, заданной низкой шероховатостью рабочих поверхностей, достаточными прочностными характеристиками, износо- и коррозионной стойкостью и тому подобное.

Метод магнитно-абразивной обработки основан на реализации одновременного ударно-фрикционного и магнитного воздействия порошкового инструмента на обрабатываемую поверхность. Преимущества данного метода перед традиционными методами механической абразивной обработки обусловлены особыми свойствами рабочего тела, которое используется при обработке, а именно магнитно-абразивного инструмента, который формируется из ферромагнитного порошка со специальными свойствами в магнитных зазорах станков. Эти свойства – подвижно-скоординированное состояние порошковой среды, отсутствие жесткой связи, способность нивелировать относительно обрабатываемой поверхности позволяют осуществлять равномерную, производительную и высокоэффективную механическую обработку деталей простой и сложной пространственной формы, в том числе изготовленных из сложно обрабатываемых материалов – с высокой твердостью, вязкостью и хрупкостью.

Использование данного метода на финишных этапах производства деталей позволяет получать оптимальное сочетание микрогеометрических характеристик рабочих поверхностей и физико-механических свойств поверхностного слоя для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик. Оборудование и технология магнитно-абразивной обработки нашли свое применение при обработке концевой и осевой режущего инструмента, изготовленного как из быстрорежущих сталей, так и из твердых сплавов, многогранных неперетачиваемых твердосплавных пластин, лопаток газотурбинных двигателей как новых, так и при их ремонте.

В работе показано, что достижение наибольшей эффективности магнитно-абразивной обработки, деталей сложной формы обеспечивается при комплексной реализации процессов происходящих при формировании магнитно-абразивного инструмента и кинематики процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аверченков В. И. Влияние магнитно-абразивной обработки на износостойкость деталей машин / В. И. Аверченков. // Тр. Всесоюз. конф., – 1980. – №3. – С. 9–10.
2. Барон Ю.М. Влияние состояния кромок лезвий на эффективность режущих инструментов / Ю.М. Барон // Инструмент и технологии. – Спб., 1997. – Вип. 5.– С. 1 – 11.
3. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Барон Ю.М. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
4. Барон Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1975. – 127 с.
5. Барон Ю.М. Характеристика поверхностного слоя закаленной инструментальной стали Р6М5, подвергнутой магнитно-абразивному полированию и магнитной обработке / Ю.М. Барон, В.А. Литвиненко, М.И. Анисимов, Н.А. Сенчило // Физика и технология обработки металлов. Ленинград: ФТИ АН СССР. – 1984. – С. 153 – 158.
6. Барон Ю.М. Трение магнитно-абразивных порошков: внутреннее и в контакте с металлическими поверхностями / Ю.М. Барон, Е.М. Желтобрюхов // Ленинград. – 1985. –10 с. – Деп. во ВНИИТЭМР №235 мш.
7. Билык И. И. Получение магнитно-абразивных порошков с неравномерным распределением абразивной составляющей / И.И. Билык, А.Н. Степанчук. // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – К.: ИПМ АН УССР. – 1980. – С. 43 – 46.
8. Биргер И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М: МАШГИЗ, 1963. – 232 с.
9. Бобіна М. М. Вплив попередньої магнітно-абразивної обробки на властивості карбідних покриттів /М.М. Бобіна, Н.В. Ульяненко, Т.В. Лоскутова //Фізика і хімія твердого тіла.– 2003.– Том 4, №2. – С. 353– 357.
10. Бобіна М.М. Магніто-абразивна обробка багатограничних непереточуваних твердосплавних пластин/М.М. Бобіна, В.С. Майборода, Н.В. Ульяненко//Металознавство та обробка металів.– 2002.– №3.–С.72–75.
11. Богуслаев В.А. Детонационное нанесение покрытий на детали авиационных двигателей и технологического оснащения с последующей магнитно-абразивной обработкой / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, П.Д. Жеманюк и др. –Днепропетровск: Січ, 1996. – 336 с.
12. Булина И.Г. Экспериментальное исследование обтекания затупленных тел плоским потоком вязко-пластической среды / И.Г. Булина, В.П. Мясников, В.Г. Савин // Прикладная механика и техническая физика. – 1964. – №5. – С. 127 – 131.
13. Буше Н. А. К вопросу о процессах, происходящих на поверхности трения металлических материалов. В кн.: О природе

трения твердых тел / Н. А. Бушес // «Наука и техника». – Минск. – 1971. – С. 75 – 77.

14. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач / Ф.П. Васильев. – М.: Наука, 1988. – 552 с.

15. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. – М.:Машиностроение, 1993. – 336 с.

16. Власов В.М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей / В.М. Власов. – М.: Машиностроение, 1987. – 307 с.

17. Внуков Ю.М. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів: навчальний посібник / Ю.М. Внуков, В.О. Залога – Суми: СумДУ, 2010. – 243 с.

18. Вязовская Л.М. Применение магнитно-абразивного метода для обработки лопаток / Л.М. Вязовская, Б.И. Крамаровский, В.С. Майборода и др. // Авиационная промышленность. – 1990. – №9. – С. 20 – 22.

19. Гейчук В.М. Магнітно-абразивна обробка валів-шестерень насосів / В.М. Гейчук, В.С. Майборода, А.Ю.Гаврушкевич // Промислова гідравліка і пневматика. – 2007. – №1 (15). – С. 94 – 99.

20. Гейчук В.М. Синтез кінематики процесу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні : дис. докт. техн. наук: 05.03.01 / Гейчук В.М. – Київ, 2012. – 472 с.

21. Гейчук В.Н. Магнитно-абразивная обработка неперетачиваемых твердосплавных пластин / В.Н. Гейчук, В.С. Майборода, Н.В. Ульяненко // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Серия: Машиностроение. – 2002. – Вып. 43. – С. 118 – 121.

22. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт – М.: Мир, 1985. – 509 с.

23. Горелик С.С. Рентгенографический и электроннооптический анализ / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. – М.: Металлургия, 1970. – 367 с.

24. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов / В.К. Григорович. – М.: Наука, 1976. – 230 с.

25. Гридасова Т.Я. Магнитно-абразивная обработка лопаток на установке типа кольцевая ванна / Т.Я. Гридасова, В.С. Майборода, В.Я. Шлюко и др. // Авиационная промышленность. – 1985. – №8. – С. 19 – 20.

26. Грязнов Б.А. Влияние композиционного многослойного ионно-плазменного покрытия на сопротивление усталости рабочих лопаток компрессоров ГТД / Б.А. Грязнов, В.С. Майборода, Ю.С. Налимов и др.// Оценка и обоснование продления ресурса элементов

конструкцій. Труды конференции Ресурс 2000, 6-9 июня 2000 г. – Киев. – Т. 2. – С. 757 – 762.

27. Грязнов Б.А. Вплив комплексної магнітно-абразивної обробки і композиційних покриттів на характеристики втоми робочих лопаток ГТД / Б.А. Грязнов, В.С. Майборода, Ю.С. Налимов та ін.// Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні. ГТД-2001, Тези доповідей міжнар.наук.-техн.конф. 9-11.10.2001р. Київ. – С. 33 – 34.

28. Грязнов Б.А. Исследование влияния видов обработки поверхности и многослойного покрытия пера лопаток на их характеристики сопротивления усталости / Б.А. Грязнов, В.С. Майборода, Ю.С. Налимов и др.// Проблемы прочности. – №5, – 1999. – С. 109 – 116.

29. Грязнов Б.О. Вплив комплексної магнітно-абразивної обробки і композиційних покриттів на характеристики втоми робочих лопаток ГТД / Б.О. Грязнов, В.С. Майборода, Ю.С. Налимов, І.І. Білик, О.М. Герасимчук // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – №5(21). – С. 80 – 83.

30. Гнесин Г.Г. Принципы создания магнитно-абразивных материалов / Г.Г. Гнесин, М.Д. Крымский, Л.Н. Тульчинский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания.– Киев: ИПМ АНУССР, 1980.– С.17 – 25.

31. Дальский А.М. Механическая обработка металлов / А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1981. – 264 с.

32. Демин О.В. Совершенствование методов расчета и конструкций лопастных смесителей: автореф. дис. на соиск. научной степени канд. техн. наук: спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы» / О. В. Демин. – Тамбов, 2003. – 12 с.

33. Джулій Д.Ю. Підвищення якості багатограних непереточуваних твердосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні : дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Джулій Д.Ю. – Київ, 2014. – 175 с.

34. Джулій Д.Ю. Формування магнітно-абразивного інструменту при магнітно-абразивному обробленні довгомірних деталей у кільцевій робочій зоні / Д.Ю. Джулій, В.С. Майборода, І.В. Ткачук, В.М. Гейчук // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць. ЖДТУ. – Житомир. – 2011. – вип.11. – С. 92 – 107.

35. Дюбнер Л.Г. Магнитно-абразивная обработка концевое режущего инструмента / Л.Г. Дюбнер, В.С. Майборода, А.А. Ивановський // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – Київ, 2003.– № 44. – С. 107 – 108.

36. Дюбнер Л.Г. Магнитно-абразивная обработка осевого режущего инструмента./ Л.Г.Дюбнер, В.С. Майборода // Прогресивна

техніка і технологія – 2001. II міжнар.конф. Тези доповідей 28.06-2.07.2001р. Севастополь, С. 42.

37. Дюбнер Л.Г. Магнітно-абразивна обробка твердосплавного інструменту з покриттям на основі TiN / Л.Г. Дюбнер, В.С. Майборода, Н.В. Ульяненко // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк. – 2004. – №71. – С. 35 – 40.

38. Ефремов В.Д. Технологическое обеспечение качества рабочих кромок инструмента и деталей. / В.Д.Ефремов, П.И.Ящерицын Мн.: БАТУ. - 1997. – 251 с.

39. Жарский И.М. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин:[Учеб. пособие для студ. вузов]/И.М. Жарский, И.Л. Баршай, Н.А. Свидунович, Н.В. Спиридонов. – Мн.: Вышэйшая школа, 2005. – 299 с.

40. Жданович В.И. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей: Дис. ... канд. техн. наук. – Минск. – 1974. – 184с.

41. Загорский Г.Г. Исследование некоторых физико-механических свойств стали ШХ-15 после магнитно-абразивной обработки // Вопросы прочности и пластичности металлов: Материалы 8 науч. конф. молодых ученых АН БССР. – Минск. – 1974. – С. 188 – 189.

42. Загорский Г.Г. Распределение напряжений I и II рода и остаточного рода аустенита в поверхностном слое подшипников качения после магнитно-абразивной обработки / Г.Г.Загорский //Вопросы прочности и пластичности металлов: Материалы 8 науч. конф. молодых ученых АН БССР. – Минск. – 1972. – С. 190 – 191.

43. Івановський О.А. Формування магніто-абразивного інструменту для оброблення свердел в умовах великих магнітних щілин : дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / Івановський О.А. – Київ, 2009. – 135 с.

44. Кармалюк В.И. Вибрационные машины для обработки бурового твердосплавного инструмента/ В.И.Кармалюк, М.Д.Денисов, В.П.Чайка и др. // Вибрационная обработка твердосплавных изделий и бурового инструмента. – М.: НИИинформтяжмаш, 1976. – С. 19 – 23.

45. Кашеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение. – 1978. – 213 с.

46. Кобчиков В.С. Технология магнитно-абразивного полирования изделий из твердых сплавов: автореф. дисс. на соис. уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технология машиностроения"/В.С. Кобчиков.– Л., 1983. – 16 с.

47. Кожуро Л.М. Качество поверхностного слоя при магнитно-абразивном полировании / Л.М.Кожуро, Э.И.Ремизовский, Г.Б.

Ярошевич.// Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1985. – №9. – с. 146 – 150.

48. Корнілов О.А. Інженерні застосування плоскої задачі теорії пружності в розрахунках на міцність. – 1991. – Київ.: НМК ВО. 280 с.

49. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

50. Красовский А.Я. Статическая и динамическая прочность машин./ А.Я.Красовский, Е.И. Силкин – М.:Ун-т дружбы народов им. П. Лумумбы, 1969. – 323 с.

51. Красовский А.Я. Физические основы прочности / А. Я. Красовский. – АН УССР, Ин-т проблем прочности, Киев. политехн. ин-т. – Киев: Наукова думка, 1977. – 140 с.

52. Крымский М.Д. Влияние формы магнитно-абразивных зерен на их режущую способность / М.Д. Крымский. // Порошковая металлургия. – 1983. – №6. – С. 83 – 85.

53. Крымский М.Д. Методика оценки абразивной способности порошковых магнитно-абразивных материалов / М.Д. Крымский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев: ИПМ АНУССР, 1980. – С. 84 – 92.

54. Крымский М.Д. Оптимизация свойств магнитно-абразивного материала на основе железа и карбида кремния / М.Д. Крымский, О.А. Катрус, А.И. Дубров // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев: ИПМ АНУССР, 1980. – С. 25 – 33.

55. Крымский М.Д. Формирование порошкового магнитно-абразивного инструмента. 1. Восстановимость формы / М.Д. Крымский // Порошковая металлургия. – 1987. – №9. – С. 8 – 12.

56. Кудинова Э.Н. Разработка и исследование технологического процесса магнитно-абразивной обработки при наличии градиентных зон магнитного поля в рабочем зазоре : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / Э.Н. Кудинова. – Минск, 1981. – 20 с.

57. Кудря Н.А. Повышения стойкости бурового инструмента способом вибрационной объемной обработки / Н.А. Кудря, В.А. Повидайло, В.И. Кармалюк // Цв.Металлургия. – 1971. –№ 20. – С. 5 – 8.

58. Лебедев В.Я. Повышение эксплуатационных свойств инструмента для очистных и проходческих комбайнов магнитно-абразивной обработкой/ В.Я. Лебедев, В.Е. Бабиц // Пороходоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2009. – Вип. 12. – С. 113 – 118.

59. Лоскутов В.Ф. Нанесение карбидных покрытий на поверхность стали / В.Ф. Лоскутов // Металлофизика. – 1978. – Вип.73. – С. 95 – 97.

60. Майборода В. Магнітно-абразивне оброблення кільцевого різального інструменту в умовах великих магнітних щілин з використанням відновлювальних елементів / В. Майборода, Д. Джулій, І. Ткачук, О. Беляєв// Вісник ТНТУ, 2012 – №4(68) – С 133 – 141. – (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).

61. Майборода В.С. Исследование условий магнитно-абразивной обработки при кольцевом расположении магнитных зазоров / В.С. Майборода, О.В. Степанов, В.Я. Шлюко и др. // Технология и автоматизация машиностроения. – 1988. – №42. – С. 75 – 79.

62. Майборода В.С. Аналіз умов магнітно-абразивного оброблення багатограних непереточуваних твердосплавних пластин при їх довільному розташуванні в робочих зонах установки типу кільцева ванна / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського. – Кременчук, 2008. – №1(48), частина 2. – С. 27 – 31.

63. Майборода В.С. Влияние магнитно-абразивной обработки на свойства поверхности лопаток ГТД / В.С.Майборода, О.В.Степанов // Авиационная промышленность. – 1994. – №11/12. – С. 32 – 34.

64. Майборода В.С. Вплив магнітно-абразивної обробки на стан поверхневого шару лопаток газотурбінних двигунів//Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. – Вып.34. – 1999.– С. 217 – 222.

65. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту сформованого з сумішей порошків / В.С. Майборода // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наук. праць ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2009. – Вип.6. – С. 144 – 159.

66. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту, сформованого з двох фракційних сумішей порошків при магнітно-абразивній обробці у великих магнітних щілинах //Технологічні системи. – 2007. – №1(37). – С.40 – 55.

67. Майборода В.С. Дослідження впливу в'язкості змащувально-охолоджуючого технологічного середовища на властивості магнітно-абразивного інструменту / В.С. Майборода, О.А. Ивановский // Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. – Вып. 45. – 2004.– С. 99 – 102.

68. Майборода В.С. Закономерности движения ферроабразивного порошка при магнитно-абразивной обработке./ В.С.Майборода, В.Я.Шлюко, // Порошковая металлургия. – 1987. – №8. – С. 3 – 8.

69. Майборода В.С. Застосування магнітно-абразивної обробки для зміцнення різального інструменту / В.С. Майборода, Н.В. Ульяненко, Л.Г. Дюбнер, О.А. Івановський // Вісник ЖДТУ.–2003.–№ 3(27).–С. 22 – 31.

70. Майборода В.С. Кинетика формирования микропрофиля поверхности твердосплавного режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке / В.С. Майборода, Н.В. Ульяненко // Вісник Сумського державного університету. Технічні науки. – 2003. – №2 (48). – С. 104 – 111.

71. Майборода В.С. Кінематика процесу магнітно-абразивної обробки твердосплавних багатограних непереточуваних пластин в умовах кільцевої робочої зони / В.С. Майборода, Т.М. Капушак // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць. ЖДТУ. – Житомир. – 2004. – Т. 1. № 4(31). – С. 57 – 65.

72. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка деталей с консольным креплением на установке типа кольцевая ванна / В.С. Майборода, В.М. Гейчук // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVII Международ. н.-т. конф. 13 – 18.09.2010. Севастополь. Том 2. – 2010. – С. 130 – 134.

73. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка многогранных неперетачиваемых твердосплавных пластин в условиях больших рабочих зазоров. 1. Влияние условий базирования режущих пластин в рабочих зонах на эффективность процесса обработки./ В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий, Б.М. Фесюн и др. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк. – 2009. – Вип. 6(154). – С. 157 – 165.

74. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка многогранных неперетачиваемых твердосплавных пластин в условиях больших рабочих зазоров. 2. Формирование заданной шероховатости рабочих поверхностей режущих неперетачиваемых твердосплавных пластин / В.С. Майборода, В.Н. Гейчук, Е.С. Клишта // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк. – 2010. – Вип. 7(155). – С. 142 – 151.

75. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка многогранных твердосплавных пластин / В.С. Майборода, В.Я. Лебедев, А.Н. Климов // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. под. ред. Б.М. Хрусталева. – Минск. – 2009. – Вип. 25. – С. 85 – 89.

76. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей : дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Майборода В.С. – Киев, 1988. – 170 с.

77. Майборода В.С. Магнітно-абразивна обробка кінцевого твердосплавного різального інструменту / В.С. Майборода, О.А. Плівак, С.В. Майданюк та ін. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2007. – № 1(42), частина 1. – С. 66 – 70.

78. Майборода В.С. Магнітно-абразивна обробка осьового і кінцевого різального інструменту. Частина 1. Вплив магнітно-абразивної обробки на характеристики різальних поверхонь свердел / В.С. Майборода, Л.Г. Дюбнер, Н.В. Ульяненко // Наукові вісті НТУУ“КПІ”. – 2001. – №2. – С. 60 – 66.

79. Майборода В.С. Магнітно-абразивна обробка твердосплавних елементів бурових доліт / В.С. Майборода, Т.М. Капушак // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Зб. наук. праць ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2006. – Вип.3. – С. 62 – 81.

80. Майборода В.С. Магнітно-абразивне оброблення свердел виготовлених з швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, І.В. Ткачук, Н.В. Мініцька, Д.Ю. Джулій, О.О. Беляєв // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – Краматорськ. – 2012. – Вип. 31. – С. 271 – 279.

81. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. Дис. ... докт.техн.наук. – Київ, 2001. – 404 с.

82. Майборода В.С. Особенности перемещения порошка при магнитно-абразивной полировке малогабаритных деталей сложной конфигурации./ В.С. Майборода, В.Я. Шлюко, Т.Я. Гридасова // Порошковая металлургия. – 1985. – №7. – С. 90 – 95.

83. Майборода В.С. Особенности формирования и взаимодействия порошкового магнитно-абразивного инструмента с поверхностью деталей в кольцевых зазорах // Порошковая металлургия. – 1999. – №7/8. – с. 117 – 121.

84. Майборода В.С. Особенности формирования магнитно-абразивного инструмента при магнитно-абразивной обработке длинномерных деталей в кольцевой рабочей зоне / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий, И.В. Ткачук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк. – 2011. – Вип. 8(190). – С. 49 – 56.

85. Майборода В.С. Реологические характеристики магнитно-абразивных порошков в магнитном поле / В.С. Майборода, О.В. Степанов, Н.Л. Тараненко, В.Я. Верменко // Порошковая металлургия. – 1994. – №1/2. – С. 62 – 66.

86. Майборода В.С. Стан поверхневого шару лопаток газотурбинних двигунів// Вестник национального технического

университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – 1999. – вып. 34. – С. 217 – 222.

87. Майборода В.С. Структурно-физическая модель формирования магнитно-абразивного инструмента в больших рабочих зазорах кольцевого типа при обработке стержневых изделий / В.С. Майборода, И.В. Ткачук, Д.Ю. Джулий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк. – 2013. – Вип. 1(10). – С. 36 – 46.

88. Майборода В.С. Формирование магнитно-абразивного инструмента в рабочих зонах установок типа «кольцевая ванна» / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий, И.В. Ткачук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк. – 2012. – Вип. 9(205). – С. 127 – 133.

89. Майборода В.С. Формирование порошкового магнитно-абразивного инструмента при обработке лопаток газотурбинных двигателей / В.С. Майборода, О.В. Степанов // Порошковая металлургия. – 1996. – №1/2. – С. 92 – 98.

90. Майборода В.С. Формування магнітно-абразивного інструменту в кільцевих щілинах з різною формою поперечних перерізів робочих зон при магнітно-абразивній обробці кінцевих та осевих інструментів / В.С. Майборода, В.М. Гейчук, О.А. Івановський // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – Киев, 2006. – Вып. 49. – С. 153 – 164.

91. Майборода В.С. Формування магнітно-абразивного інструменту при магнітно-абразивному обробленні довгомірних деталей у кільцевій робочій зоні / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій, І.В. Ткачук, В.М. Гейчук // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наук. праць. ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2011 – Вип. 11 – С. 92 – 107.

92. Майборода В.С. Эффективность применения при магнитно-абразивной обработке восстанавливающих стержневых элементов / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий, И.В. Ткачук // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2012. – Вип. 30. – С. 171 – 177.

93. Майборода В.С. Магнітно-абразивна обробка осевого і кінцевого різального інструменту. 1. Вплив магнітно-абразивної обробки на характеристики різальних поверхонь свердел / В.С. Майборода, Л.Г. Дюбнер, Н. В. Ульяненко // Наукові вісті НТУУ «КПІ», 2001 – №2. – С. 60 – 66.

94. Майборода В.С. Закономерности формирования ферроабразивного порошка в магнитно-абразивный инструмент в

условиях кольцевого расположения магнитных зазоров / В.С.Майборода, О.В.Степанов, В.Я.Шлюко и др.//Порошковая металлургия.– 1989. – №5. – С. 72 – 77.

95. Мясников В.П. О постановке задачи обтекания тел вязко-пластических течений / В.П. Мясников // Прикладная механика и техническая физика. – 1962. – №4. – С. 52 – 59.

96. Наливка Г.Д. Некоторые свойства магнитно-абразивных порошков из псевдоплавленных композиций Fe–TiC / Г.Д. Наливка, В.С. Полищук, А.Н. Степанчук // Порошковая металлургия. – 1979. – №8. – С. 83 – 86.

97. Оликер В.Е. Абразивная обработка ферромагнитными порошками и пастами в магнитном поле / Оликер В.Е. – Киев: ИПМ АН УССР, 1984. – 43 с. – (Препринт / АН УССР, ИПМ; 1984).

98. Оликер В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В.Е. Оликер. – М.: Металлургия, 1990. – 176 с.

99. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А.Е. Проволоцкий. – К.: Тэхника, 1989. – 177 с.

100. Пуоджокайтис С.Б. Экспериментальное исследование давления порошков на обрабатываемую поверхность / С.Б. Пуоджокайтис//Материалы литовской респ.н.-т.конф. Секция машиностроения. Каунас, 1971. – С. 14 – 15.

101. Прокошкин Д.А. Химико-термическая обработка металлов – карбонитрация / Д.А. Прокошкин. – М.:Металлургия, Машиностроение, 1984. – 240 с.

102. Реклейтис Г. Оптимизация в технике / Г. Реклейтис, А. Рейвидран, К. Рэгсдел // Кн.1, М.:Мир, 1986. – 350 с.

103. Рыжов Э.В. Влияние технологической наследственности на износостойкость упрочненных поверхностей / Э.В.Рыжов, О.А.Гориенко // Прогрессивные технологич. методы повышения надежности и долговечности деталей машин и инструментов. Куйбышев, 1980.–С.10– 14.

104. Рыжов Э.В. Повышение износостойкости трущихся деталей магнитно-абразивной обработкой / Э.В. Рыжов, В.Ф. Чистов, В.М. Панченко // Теория трения, износа и смазки: Материалы Всесоюзн. науч. конф., ч.3 – Ташкент, 1975. – С. 165 – 166.

105. Садовская О.В. Математическое моделирование в задачах механики сыпучих сред / О.В.Садовская, В.М.Садовский. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.

106. Сакулевич Ф.Ю. Магнитно-абразивная обработка точных деталей / Ф.Ю. Сакулевич, Л.К. Минин, Л.А. Олендер. – Минск: Высшэйшая школа, 1977. – 288 с.

107. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с.

108. Сакулевич Ф.Ю. Сущность и физико-механические особенности магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич, В.И. Жданович // Новые методы испытания и обработки материалов. – Мн.: Наука и техника. – 1975. – С. 135 – 146.

109. Скворчевский Н.Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н.Я. Скворчевский, Э.Н. Федорович, П.И. Ящерицын. – Мн.: Навука і тэхніка, 1991. – 215 с.

110. Сорока О. Зміцнення твердосплавного різального інструменту для важкого машинобудування на основі поверхневої та об'ємної модифікації фізичними методами / О. Сорока, Ю. Родічев, В. Ковальов, Я. Васильченко // Вісник ТНТУ. – 2013. – Том 71, № 3. – С. 133 – 145. – (механіка та матеріалознавство).

111. Сорока О.Б. Прогнозування втомної міцності твердих сплавів, оброблених імпульсним магнітним полем / О.Б. Сорока, Ю.М. Родічев, В.Д. Ковальов, Я.В. Васильченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наук. праць. – Краматорськ. – 2013. – Вип. 32. – С. 315 – 323.

112. Справочник по авиационным материалам. Т.3 М.: Машиностроение, 1965 – 632 с.

113. Степанов О.В. Анализ динамических характеристик ферроабразивного инструмента при магнитно-абразивной обработке / О.В. Степанов, В.С. Майборода, В.Я. Шлюко и др. // Технология и автоматизация машиностроения. – 1989. – №43. – С. 94 – 97.

114. Степанов О.В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы: дис. канд. техн. наук : 05.16.06 / Степанов Олег Васильевич. – Киев, 1997. – 145 с.

115. Степанов О.В. Магнитно-абразивная обработка кромок лопаток ГТД / О.В. Степанов, В.С. Майборода // Авиационная промышленность, №5. – 1990. – С.15 – 17.

116. Степанов О.В. Методика расчета конструктивных параметров станка для магнитно-абразивной обработки лопаток ГТД / О.В. Степанов, В.С. Майборода, В.Я. Шлюко, А.В. Андронов // Авиационная промышленность. – 1992. – №4. – С. 17 – 19.

117. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко. – К.: Наука, 1975г. – 576 с.

118. Ткачук І.В. Геометричні характеристики магнітно-абразивних порошків / І.В. Ткачук, В.С. Майборода // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наук. праць. – Краматорськ, 2014. – Вип. 34 – С. 49 – 55.

119. Ткачук І.В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу: дис.канд. тех. наук: 05.03.01 / Ткачук Іванна Валентинівна – Київ, 2015. – 164с.

120. Ульяновенко Н.В. Підвищення працездатності твердосплавного інструменту шляхом застосування магнітно-абразивного оброблення та нанесення зносостійких покриттів : дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Ульяновенко Н.В. – Київ, 2006. – 160 с.

121. Фридель Ж. Дислокации / Фридель Ж. [пер. с англ. под ред. А.Л. Ройтбурда]. – М.: Мир, 1967. – 643 с.

122. Хоменко В.А. Магнитно-абразивная обработка метчиков / В.А. Хоменко, А.М. Иконников, А.В. Богданов // Ползуновский весник. – 2012. – № 1/1. – С. 318 – 320.

123. Шлюко В.Я. Влияние магнитного поля на магнитные характеристики магнитно-абразивного порошкового инструмента. / В.Я. Шлюко, В.С. Майборода, О.В. Степанов // В кн. Сборник научных и методических трудов КПИ к 50-летию инженерно-физического факультета(часть2). – Киев:Знание., 1994. – С. 88 – 94.

124. Шлюко В.Я. Магнитно-абразивная обработка деталей типа лопаток / В.Я.Шлюко, В.С.Майборода, Т.Я.Гридасова и др. // Технология и орг. пр-ва. – 1985. – №3. – С. 35 – 36.

125. Шлюко В.Я. Определение тангенциальных напряжений при магнитно-абразивной обработке / В.Я.Шлюко, Н.Л.Тараненко, В.С.Майборода и др. //Порошковая металлургия. – 1992.– №12.–С.43 – 46.

126. Шулев Г.С. Физико-технические основы обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками: автореф. дис. на соиск. научной степени канд. техн. наук: 05.02.08 / Г.С. Шулев. – Мн., 1965. – 22 с.

127. Якубов Ф.Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф.Я. Якубов, В.А. Ким. – Симферополь: Крымское учебно-педагогическое государственное издательство, 2005. – 300 с.

128. Ящерицын П.И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын, М.Т. Забавский, Л.М. Кожуро, Л.М. Акулович. – Минск.: Наука и техника. – 1988. –272 с.

129. Ящерицын П.И. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильного инструмента/ П.И.Ящерицын, Н.Я.Скворчевский, В.Д.Ефремов // Новые конструкции и прогрессивная технология производства инструмента. – М., 1984. – С. 223 – 227.

130. Ящерицын П.И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын, М.Т.

Забавский, Л.М. Кожуро, Л.М. Акулович. – Мн.:Наука и техника, 1988. – 272 с.

131. А.с. 1676180 СССР, В24В 31/112 Способ магнитно-абразивной обработки / В.С. Майборода, Б.И. Крамаровский, О.В. Степанов и др. – №4686508/08; Заявлено 03.05.89 – не публикуется.

132. А.с. 1227697 СССР, М.Кл. С21 в9/22 Способ химико-термической обработки деталей из быстрорежущей стали / Лоскутов В.Ф., Хижняк В.Г., Мороз Е.Г., Жалнин Л.В. – № 3750556/22-02; Заявлено 04.06.84; Оpubл.05.11.86, Бюл. № 6. – 3с.

133. А.с. 319454 СССР МПК В 24b 37/00 Способ магнитно-абразивной обработки изделий / Ф.Ю. Сакулевич. – №1379685/25-8; Заявлено 03.11.69; Оpubл. 02.11.71, Бюл. №33. – 2 с.

134. А.с. 403537 СССР, М.Кл. В 24b 31/10 Устройство для объемной полировки: / Е.Г. Коновалов, Ф.Ю. Сакулевич Л.М. Кожуро и др. – №1666214/25-8; Заявлено 03.06.71.; Оpubл. 26.10.73., Бюл. №43. – 4с.ил.

135. А.с. 462707 СССР, М.Кл. В 24b 31/10 Устройство для объемной полировки: / Ф.Ю. Сакулевич, Л.М. Кожуро, Г.А. Семенюк и др. – №1948081/25-8; Заявлено 24.07.73.; Оpubл. 05.03.75., Бюл. №9. – 3с.ил.

136. А.с. 657978 СССР, М.Кл. В 24b 31/10/ Устройство для абразивной обработки деталей ферромагнитными порошками в магнитном поле / Л.Д.Ключников, Ф.Ю.Сакулевич. – № 1238565/25-8; Заявлено 02.05.75; Оpubл.02.02.77., Бюл. №26. – 2с.ил.

137. А.с. 872222 СССР, М.Кл. В 24 В31/10. Приспособление для магнитно-абразивной обработки деталей / Ю.С. Кочура, А.А. Мизери, М.А. Куренков. – №2872115/25–08; заявл. 23.01.80.; опубл. 15.10.81, Бюл. №38.

138. А.с. 931414 СССР, М.Кл. В 24В 31/10 Устройство для магнитно-абразивной обработки: / Ю.А.Базарнов, Ф.Ю.Сакулевич, В.В.Смоляк. – №2832648/25-8; Заявлено 26.10.79.; Оpubл. 30.05.82., Бюл. № 20. – 4с.ил.

139. А.с. 975357 СССР, М.Кл. В24 В31/10 Способ магнитно-абразивной обработки наружных поверхностей инструментов/Ю.М.Барон, С.Ю.Иванов. –№ 3294154/25-08; Заявлено 01.06.81; Оpubл.23.11.82, Бюл. №43. – 3с.ил.

140. Пат. 18814 України В24 В31/112 (2006.01) МПК Спосіб магнітно-абразивної обробки/ Майборода В.С., Степанов О.В., Андронов А.В., Верменко В.Я., Давидов С.П., Устенко В.Г., Шлюко В.Я.; заявник та патентовласник Київський політехнічний інститут. № 4955047; заявл. 07.06.1991; опубл. 25.12.97; бюл. № 6/1997.

141. Пат. 84464 С2 Україна, МПК В24 В31/112 (2006.01). Магнітна система для об'ємної обробки феромагнітними порошками / Гейчук В.М., Майборода В.С.; заявник та патентовласник Національний

технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № а200611768; заявл. 08.11.2006; опубл. 27.10.2008; бюл. № 20.

142. Пат.104328 Україна В24 В31/112 (2006.01) МПК. Спосіб магнітно-абразивного оброблення / Майборода В.С., Гейчук В.М., Джулій Д.Ю., Ткачук І.В.; заявник та патентовласник Київський політехнічний інститут. № а201201745; заявл. 16.02.2012; опубл. 27.01.2014; бюл. № 2/2014.

143. Пат. 25441 А Україна В24 В31/11 Спосіб магнітно-абразивної об'ємної обробки / В.С.Майборода, В.Н.Гейчук, О.В.Степанов// 1998.- Бюл.№6.

144. Пат. 18814 Україна В24 В31/112 Спосіб магнітно-абразивної обробки: / В.С.Майборода, А.В.Андронов, В.Я.Верменко та ін.- Приоритет 29.10.93; Опубл. 25.12.97, Бюл. №6 – 2с.ил.

145. Пат. 78782 Україна С2 В24В 31/112 Універсальна головка для магнітно-абразивної обробки. /В.С.Майборода, В.М.Гейчук, А.А.Лисенко Опубл. 04.2007. Бюл.№5.

146. Biermann D. Magnetfinishen zur Präparation von VHM-Werkzeugen / D. Biermann, M. Wolf, T. Heymann // Wissenschaft und Forschung. – 2013. – 5 (2). – P. 24 – 29.

147. Breidenstein B. Residual Stress Development in Laser Machined PVD-Coated Carbide Cutting Tools / B. Breidenstein, C. Gey, B. Denkena // Materials Science Forum. International Conference on Residual Stresses 9 (ICRS 9). – 2013. – Vol. 768-769. – P. 391 – 397.

148. Byelyaev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung. Dissertation Dr.-Ing. –Magdeburg, Germany, 2008. – 149 p.

149. Carlos Julio Cortés Rodríguez. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing / Carlos Julio Cortés Rodríguez. – Kassel: Kassel University press GmbH, 2009.– P. 189.

150. Denkena B. Strategien für die Herstellung von Schneidkantenmikrogeometrien durch Querseiten-Planschleifen / B. Denkena, J. Köhler, C. Ventura // Forum, Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik. – 2012. – Vol. 25(3). – 92 – 97.

151. Karpuschewski B. Magneto-Abrasive Machining for the Mechanical Preparation of High-Speed Steel Twist Drills /B. Karpuschewski, O. Byelyayev, V.S. Maiboroda // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2009. – №58. – pp. 295 – 298.

152. Klimov O. Magnet-Abrasive-Bearbeitung von Werkzeuge aus WC-Hartmetall. Dissertation Dr.-Ing. –Magdeburg, Germany, 2014.-159 p.

153. Maiboroda V. Analyse von Prozessbedingungen auf der Werkzeugschneidkanten während der magnetabrasiven Bearbeitung von

Schafffräsen aus Hartmetall mit ihren positionierungen in Ringförmigen Arbeitszonen./ V. Maiboroda, B. Karpuschewski, O. Klymov // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – Вип. 1(10). – С. 28 – 35.

154. Maiboroda V. Schneidkantenmikrogestalt von Hartmetallwendeschneidplatten bei der Magnetabrasiven Bearbeitung / V. Maiboroda, D. Dzhulii, O. Byelyayev // In FORUM Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik. – September 2012. – Nr. 3. – P. 84 – 91. ISSN 2191-1347.

155. Suh N. P. The Delamination Theory of Wear./N.P.Suh //Wear, vol.25, N 1, 1973, p. 111 – 124.

156. Yamaguchi H. Magnetic abrasive finishing of cutting tools for machining of titanium alloys / H. Yamaguchi, A.K. Srivastava, R.E. Riveros, F. Hashimoto // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2012. – № 61/1. – P. 311–314.

157. Yamaguchi Hitomi, Shiumura Takeo, Kaneko Takehiro A new internal finishing process by applying magnetic abrasive finishing through the use of the pole rotation system. –Processing principle with a few finishing characteristic.//Int.J.Jap.Soc.Precis.Eng.- 1995. – 29. - №4. – P.309-310.

158. Tikal F. Schneidkantenpräparation Ziele, Verfahren und Messmethoden. Berichte aus Industrie und Forschung / F. Tikal, R. Bienemann, L. Heckmann // Kassel University Press GmbH. – Kassel, 2009. – 193 p.

Наукове видання

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

В. С. Майборода, І.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулій

МАГНІТНО-АБРАЗИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

(Російською мовою)

Формат 60*84/16. Ум друк.арк. 15,80.

Папір офсетний. Друк офсетний

Тир. 300 прим

Зам. №3139.

Віддруковано в ПП «Рута»

10014, Україна, м. Житомир, вул. Мала Бердичівська, 17 а,

Тел. (0412) 47 - 48 – 24

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК

№3671 від 14.01.2010

E-mailruta-bond@ukr.net