

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 621.9.048.4.06

Нерода  
Михаил Владимирович

Разработка и исследование технологического процесса обработки  
упрочненных поверхностей при помощи магнитно-электрического  
шлифования

1-36 01 01 Технология машиностроения

Магистерская диссертация  
на соискание степени магистра технических наук

Научный руководитель  
к.т.н., доцент Дмитриченко Эдуард Иванович

Минск, 2005

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И ТЕРМИНОВ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ОБРАБОТКА УПРОЧНЁННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ В ЗОНЕ ШЛИФОВАНИЯ.....	6
1.1. Влияние электрических и магнитных полей на производительность.....	9
1.2. Влияние электрических и магнитных полей на качество поверхности.....	21
1.3. Постановка задачи.....	30
2. ФИЗИКА ПРОЦЕССА МЭШ .....	31
2.1. Взаимодействие электрических и магнитных полей с механическим резанием.....	31
3. ОБЪЕКТЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ ...	39
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	45
4.1. Исследование влияния технологических режимов МЭШ на производи- тельность.....	45
4.2. Исследование влияния технологических режимов на качество обработ- ки .....	46
4.3. Выводы.....	50
5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЭШ ПО ОБРАБОТКЕ УПРОЧНЁННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	51
ЛИТЕРАТУРА .....	53
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Матрица планирования .....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Результаты опытов .....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Анализ данных и расчёт коэффициентов регрессии.....	59

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

- АШ – алмазное шлифование;
- АИШ – алмазно-искровое шлифование;
- ГИ – генератор импульсов;
- КМ – комбинированный метод;
- МЭШ – магнитно-электрическое шлифование;
- МАО – магнитно-абразивная обработка;
- МЭП – межэлектродный промежуток;
- СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость;
- ШП – шарикоподшипник;
- ЭХП – электрохимическое полирование;
- ППД – поверхностно-пластическое деформирование;
- ЭМН – электромагнитная наплавка;
- ЭХО – электрохимическая обработка;
- ЭИ – электрод-инструмент;
- ЭАШ – электроалмазное шлифование;
- ЭЭО – электроэрозионная обработка.

## ВВЕДЕНИЕ

Ограниченные запасы топлива и материалов в Беларуси не могут обеспечить достаточное воспроизводство парка машин силами машиностроения и наряду с его сохранением, требуют развития ремонтного производства, которое сберегает много живого и овеществлённого труда. Функции ремонтного производства заключаются в экономически обоснованном устранении неисправностей и восстановлении ресурса машин, т.е. во вторичном производстве техники из его ремонтного фонда. [10] При восстановлении изношенных деталей в 5-8 раз сокращается число технологических операций и на 40 – 80 % уменьшается стоимость восстановленных деталей по сравнению с изготовлением новых. [4]

В настоящее время большое распространение получили упрочняюще-восстанавливающие технологии, позволяющие экономить материальные и трудовые ресурсы. Существует множество способов повышения эксплуатационных свойств деталей машин. Наряду с традиционными способами упрочнения наибольшее развитие получили газотермические методы нанесения покрытий: электродуговая металлизация, газоплазменное, плазменное и детонационное напыление. Все эти методы успешно совершенствуются и нашли своё применение в промышленном использовании.

Процесс газотермического нанесения покрытий на рабочие поверхности деталей машин позволяет создавать в зависимости от материалов и технологии металлизации слои с определёнными свойствами. В результате этого повышается износостойкость, стойкость против коррозии, эрозии, кавитации и другие эксплуатационные свойства деталей машин. [19]

В последнее время для увеличения износостойкости деталей за счёт плазменного и газоплазменного напыления применяются самофлюсующиеся твёрдые сплавы на основе никеля и хрома, легированные бором и кремнием. [17] Специфические свойства упрочняющих покрытий заключаются в хрупкости нанесённого слоя, недостаточной прочностью его сцепления с метал-

лом заготовки, высокой твёрдости, что затрудняет последующую механическую обработку. [16] Интенсификация механической обработки при восстановлении деталей и упрочнении поверхностей осуществляется путём решения двух основных задач: совершенствование традиционных процессов обработки резанием и разработка принципиально новых комбинированных технологических процессов.

Перспективным направлением при обработке покрытий является применение электрофизических способов обработки металлов, к которым относятся: электроискровой, электроимпульсный, электроконтактнодуговой, анодно-механический, ультразвуковой, а также лучевой и другие. Электрофизические способы обработки имеют ряд преимуществ: возможность производить обработку поверхностей детали с самыми высокими физико-механическими свойствами, обработка которых обычными способами затрудняется. Применение комбинированных способов дает эффективное повышение производительности обработки упрочняющих покрытий при одновременном изменении физико-механических свойств материала детали в заданном направлении. Среди них всё большее распространение приобретают способы, заключающиеся в сочетании воздействия электрических и магнитных полей с механической обработкой.

В настоящее время имеются достаточные экспериментальные доказательства производительности и экономической эффективности применения наложения электрических и магнитных полей на зону обработки, но недостаточно теоретических обоснований способов комбинированной обработки, которые позволили бы определить оптимальные режимы резания и их наиболее эффективное использование.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния основных технологических факторов при шлифовании токопроводящих упрочнённых поверхностей с наложением на зону обработки электрических и магнитных полей в сочетании с механическим резанием с целью повышения производительности и качества поверхностного слоя деталей машин.

# 1. ОБРАБОТКА УПРОЧНЁННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ В ЗОНЕ ШЛИФОВАНИЯ

Существующие методы электрофизических и электрохимических методов размерной обработки являются эффективными методами формообразования. Эти процессы обычно подразделяют на 4 группы [27]: электроэрозионные, при которых материал заготовки удаляется в результате действия электрических разрядов; электрохимические, использующие преобразование электрической энергии в энергию, которая затрачивается на анодное растворение заготовки: лучевые, основанные на воздействии высококонцентрированных потоков энергии, и ультразвуковые, в которых обрабатываемый материал механически скалывается.

Электроэрозионное шлифование является одной из технологических операций электроэрозионной обработки. Процесс электроэрозионного шлифования основан на эффекте расплавления и испарения микропорций материала под тепловым воздействием импульсных электрических разрядов между поверхностью обрабатываемой детали и электрод-инструментом, погруженным в жидкую среду.

Электроэрозионное шлифование имеет следующие основные особенности: [36]

1. Твердость электрод-инструмента не обязательно должна превышать твердость обрабатываемого материала. Так, твердые сплавы и сверхтвердые материалы могут быть обработаны электрод-инструментами, изготовленными из сплавов цветных металлов. Использование этих сплавов упрощает и удешевляет производство таких электродов.
2. Производительность процесса и качество обработки не зависят от твердости материала заготовки.
3. Во время обработки заготовка не контактирует с электрод-инструментом. Между ними имеется межэлектродный зазор, который позволяет снизить

действующие на изделие усилия. При этом отсутствуют точечные усилия, необходимые на преодоление межмолекулярных связей при отрыве частиц материала.

4. Легко осуществимы сложные технологические операции (обработка фасонных поверхностей на изделиях из твердых и сверхтвердых материалов, тонкостенных легкодеформируемых изделий, пакетов магнитопроводов при устранении замыкания пластин по поверхности обработки и т.д.), которые трудно выполнить или вообще нельзя выполнить каким-либо способом механической обработки.

5. При правильном выборе технологического процесса значительно снижается трудоемкость обработки по сравнению с обработкой резанием, так как снижается число операций и переходов при обработке деталей сложной формы. В результате повышается производительность труда, уменьшается брак.

6. Обработка детали ведется в жидкой, вязкой диэлектрической среде, обеспечивающей демпфирование электрод-инструмента. Этот процесс шлифования применяют для чистовой обработки труднообрабатываемых материалов, магнитных и твердых сплавов, износостойких покрытий и упрочненных поверхностей деталей.

Отклонение профиля после электроэрозионного шлифования лежит в пределах 0,005...0,05 мм, шероховатость обработанной поверхности 2,5...0,25 мкм, производительность до 260 мм<sup>3</sup>/мин. Дефектный слой может достигать на черновых высокопроизводительных режимах до 0,2 мм; на чистовых и доводочных - менее 0,003 мм. [24]

Следует отметить, что электроэрозионное шлифование при обработке обычных материалов (стали, сплавов цветных металлов) имеет меньшую производительность, чем при обработке резанием.

В последние годы широко исследуются и получают практическое применение методы обработки упрочнённых поверхностей деталей машин, использующие энергию магнитного поля, созданного электромагнитом на постоянном или выпрямленном переменном токе. [9]

К ним можно отнести электромагнитную наплавку [31, 32] и магнитно-абразивную обработку (МАО).[2]

Поскольку при указанных методах обработки затраченной энергией является энергия магнитного поля электромагнита, появляется возможность существенным образом изменить условия восстановления и упрочнения, а также шлифования изделий. [16]

Особенностями МАО являются непрерывный контакт порошка с обрабатываемой поверхностью детали, что дает возможность повысить точность ее геометрических размеров и формы, снизить циклические нагрузки на систему «станок - приспособление - инструмент - деталь»; отсутствие жесткого крепления абразивного зерна в связке, способствующее самопроизвольному нивелированию режущего инструмента относительно формы обрабатываемой поверхности, устраняющее вероятность появления в зоне резания критических давлений и температур и повышающее физико-механические показатели качества поверхностного слоя материала изделия; возможность управления жесткостью инструмента и регулирование за счет этого съема металла с формообразующей поверхности изделия; отсутствие трения связки о поверхность изделия, существенно снижающее температуру в зоне абразивной обработки; возможность резания наиболее острой кромкой зерна магнитно-абразивного порошка (не нужна периодическая перезаточка инструмента); осуществление размерной или безразмерной (декоративной) обработки, обеспечивающей за 10...120 секунд съем металла или сплава 0,02...0,5 мм на диаметр; снижение шероховатости с 1,25...0,32 мкм до 0,08...0,01 мкм или с 10,0...2,5 мкм до 0,32... 0,08 мкм; сохранение геометрических размеров в пределах допуска, оставленного для операции шлифования; исключение засаливания инструмента, что позволяет шлифовать мягкие и вязкие материалы. [16]

Одним из перспективных способов обработки упрочненных поверхностей деталей машин является контактное магнитно-электрическое шлифование (МЭШ). Данный способ позволяет реализовать в месте обработки весьма большие мощности и получать производительность, намного превышающую



производительность других электроэрозионных методов обработки. Кроме того воздействие магнитного поля изменяет физико-механические свойства поверхностей деталей, что благоприятно сказывается на качестве и эксплуатационных характеристиках деталей машин. Наложение внешнего магнитного поля на зону шлифования существенно расширяет технологические возможности электрофизических способов обработки металлов.

### **1.1. Влияние электрических и магнитных полей на производительность**

Сравнительное шлифование упрочнённой поверхности детали из стали 45 пружинной проволокой (ГОСТ 9289-75) с охлаждающей жидкостью (3 % водный раствор кальцинированной соды) и без охлаждения показало, что наиболее рационально шлифование без охлаждающей жидкости.[4] Этот способ позволяет увеличить стойкость круга в 4,2 раза, повысить удельную производительность в 4,8 раз при снижении размерного износа круга. Высокой надёжностью при шлифовании металлопокрытия в горячем состоянии обладают мягкие круги по сравнению со среднемягкими. Износ по массе уменьшается в 1,7...4,5 раза по сравнению со шлифованием металлопокрытий в холодном состоянии.

Производительность электроэрозионной обработки(ЭЭО), как правило, оценивается не выработкой, а объемом металла  $M_{об}$ , удаляемого с обрабатываемой поверхности в единицу времени (в мм /мин). Величину  $M_{об}$  рассчитывают по соотношению:[27]

$$M_{об} = 60\psi_M V_3 f, \quad (1.1)$$

где  $V_3$  - средний объем металла, удаляемого за один импульс;  $\psi_M$  - коэффициент, учитывающий наличие не вызывающих эрозию импульсов короткого замыкания и холостых импульсов;  $f$  - частота импульсов.

Площадь обрабатываемой поверхности упрочнённых поверхностей существенно влияет на производительность: при средних и больших площадях это объясняется ролью процесса удаления из межэлектродного промежутка(МЭП) продуктов эрозии, а на малых площадях - невозможностью введения в МЭП энергии оптимальной мощности.

Экспериментальная зависимость «производительность - площадь обработки» имеет экстремум соответствующий максимуму. При постоянной площади обработки, но переменной мощности генератора импульсов (ГИ) картина явлений остается прежней и поэтому зависимость «производительность - мощность» также носит подобный экстремальный характер.

Совокупность зависимостей «производительность - площадь обработки - мощность» может быть представлена в виде пространственной диаграммы, построенной в трехмерной системе координат рис 1.1.[27] при финишной обработке термически упрочнённых поверхностей.

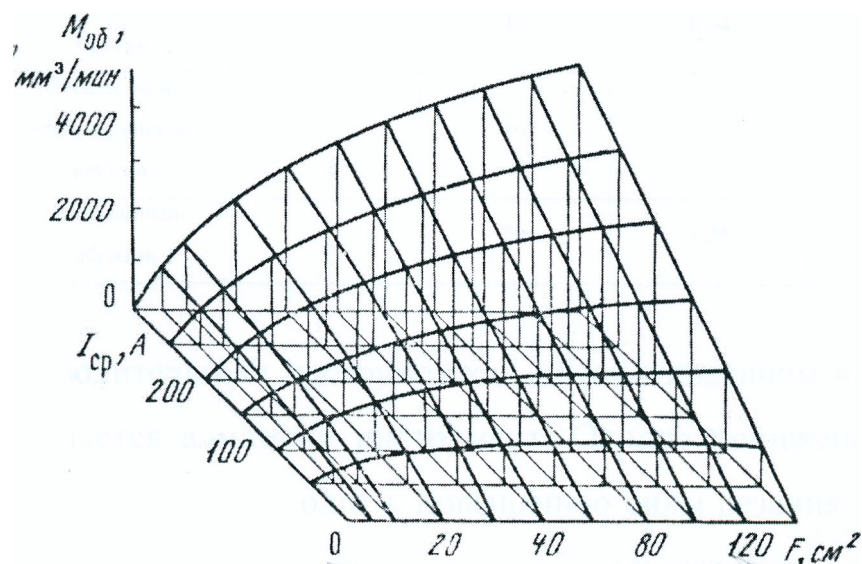


Рисунок 1.1 – Диаграмма зависимостей «производительность - площадь обработки - мощность»

Сочетание анодного растворения и механического (абразивного) воздействия на заготовку значительно повышают производительность процесса анодно-абразивной обработки. Технологические показатели процессов финишной обработки термически упрочнённых поверхностей приведены в табл. 1.1. [27]

Эффективными с точки зрения производительности являются также высоко-частотная электроискровая и электроконтактная обработка. Производительность метода в 30-50 раз выше чем при искровом способе обработки.[29]

Таблица 1.1 – Технологические показатели процессов финишной обработки

Разновидность анодно-абразивной обработки	Абразивный инструмент	Технологические показатели			
		Объёмная производительность, мм <sup>3</sup> /мин	Линейная скорость съёма мкм/мин	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Относительный износ инструмента, %
Электроалмазное шлифование	Алмазные круги на металлической связке	2000	-	0,16	0,1...0,2
Электроабразивное шлифование	Графитированные круги	120	-	0,16	20..40
	Металлоабразивные круги	4000	-	0,16	0,05...01
Электрохонингование	Абразивные бруски	-	20	0,08	10...20
Суперфиниширование	Электропроводные бруски	-	10	0,04	10...20
Анодно-абразивное полирование	Суспензия из мелкозернистого абразива	-	10	0.02	-
Анодно-абразивное галтование	Несвязанный абразив	-	20	1,25	0

Высокопроизводительным инструментом, обеспечивающим качественную обработку, является алмазный инструмент. Однако пониженная шлифуемость твёрдых покрытий приводит к повышению силы резания, температуре и удельной работе шлифования, повышенном удельном расходе алмазов, а также низкой производительности.[18]

Электролитическое шлифование применяют для повышения производительности, качества и геометрической точности обрабатываемых из твёрдых, магнитных, жаропрочных сплавов и упрочнённых поверхностей.[1]

Для достижения высокой производительности и уменьшения удельного расхода алмаза при электрохимическом шлифовании(ЭХШ) упрочнённых поверхностей в работе [18] исследованы различные виды электролитов.

Получены математические модели и построены графики зависимости производительности от скорости круга и продольной подачи.[18, 1]

Электроалмазное шлифование(ЭАШ) представляет собой высокопроизводительный способ обработки износостойких покрытий, титановых сплавов, вольфрамокобальтовых сплавов и жаропрочных сталей.[30]

Работа токопроводящего круга заключается во внедрении алмазных зерен в заготовку при приложении нормальной силы и срезании части припуска. При протекании постоянного тока через электролит, находящийся между зернами круга, связкой и деталью, происходит электрохимическое растворение обрабатываемого материала и облегчается работа алмазных зерен. Вследствие контакта связки с деталью и высокой частоты вращения круга в зоне резания возникают электроэрозионные процессы, приводящие к изменению свойств обрабатываемого материала и появлению на его поверхности углублений.

Напряжение  $U$  при постоянном давлении электрод-инструмента(ЭИ) определяет плотность тока в зоне обработки и долю электрохимического съема. С увеличением  $U$  плотность тока и производительность процесса возрастают.

С ростом давления ЭИ увеличивается съём металла резанием, но одновременно затрудняется удаление из межэлектродного пространства продуктов обработки, поэтому при постоянной плотности тока доля электрохимического съёма 2 от общего съёма 1 падает, рис. 1.2. [27]

При шлифовании больших поверхностей рабочий ток может достигать 2000 А, что дает возможность только благодаря анодному растворению удалять металл с производительностью более 1000мм<sup>3</sup>/мин (16,1мм<sup>3</sup>/с). Увеличение окружной скорости  $v_d$  также повышает производительность. При ЭАШ большая производительность и стойкость инструмента достигается при обработке износостойких покрытий кругами на токопроводящей металлической связке М1,М5, МВ 1.[37]

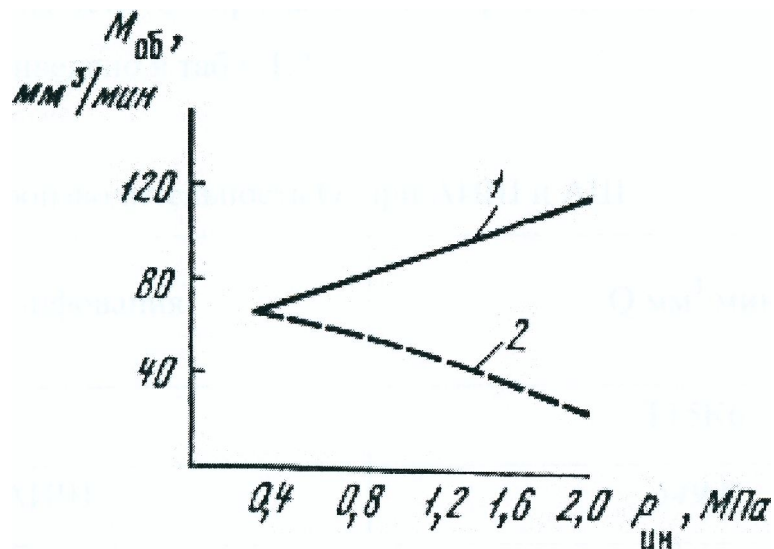


Рисунок 1.2 - Зависимость съема металла от давления электрода инструмента

Так при ЭАШ деталей с покрытием ПГ-ХН80СР2 кругами АС6 125/100 МВ1 100 средняя производительность металлосъема составила 6,8 мм<sup>3</sup>/с, а абразивными кругами 24А 40 СМ1 16К - 1,9 мм<sup>3</sup>/с.[37]

Следующим по значению высокопроизводительным способом резания труднообрабатываемых материалов является алмазно-искровое шлифование.[30] При этом для интенсификации шлифования в зону резания вводится дополнительная электрическая энергия от источников постоянного тока или электроимпульсных генераторов. Во время обработки происходит пробой диэлектрика или слабого электролита и образуются стабильные электроискровые разряды, воздействующие на обрабатываемую поверхность и связку круга с выделением тепловой энергии.

На обработанной поверхности от разрядов появляются лунки, меняются физико-механические свойства приповерхностных слоев обрабатываемого материала, что способствует повышению производительности обработки. Электрические режимы назначаются таким образом, чтобы толщина срезае-

мого слоя превышала глубину воздействия электрических разрядов. Сравнение производительности  $Q$ ) при алмазно-искровом(АИШ) и алмазном шлифовании(АШ) приведено в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Производительность  $Q$  при АИШ и АШ

Вид шлифования	$Q$ мм <sup>3</sup> /мин
	T15K6
АИШ	549,8
АШ	247,5
	ТН-20
АИШ	435,0
АШ	193,4

Электроабразивное шлифование по принципу обработки и оборудованию, в основном, соответствует процессу электроалмазного шлифования. Производительность данного способа на 1 мм ширины круга при глубине врезания до 1 мм достигает 10мм<sup>3</sup>/мин (1,17мм<sup>3</sup>/с) [27] при плотности тока 1, 2 ...1,4 А/мм<sup>2</sup>. Важным показателем технологического процесса является производительность и себестоимость обработки. В табл. 1.3 приведены результаты полученные при длительном шлифовании заготовок из твёрдого сплава T15K6 чугунным электрод-инструментом на круглошлифовальном станке с источником питания НИП-1. [36]

Таблица 1.3 – Результаты полученные при длительном шлифовании заготовок из твёрдого сплава Т15К6

Режим работы			Время работы с начала опыта, мин	Производительность, мм <sup>3</sup> /мин
I <sub>к</sub> , А	I <sub>р</sub> , А	I <sub>к</sub> /I <sub>р</sub>		
71	30	0,42	120	30
71	30	0,42	240	31
71	20	0,28	360	25
71	20	0,28	480	17
71	15	0,21	555	12,1
71	15	0,21	595	12,5
71	10	0,14	715	10,6
71	5	0,07	835	7,1
71	2,5	0,035	955	6,3

Большое применение находят способы электрохимической обработки (ЭХО) упрочненных поверхностей.[5] Так в работе [28] исследуется влияние основных факторов процесса ЭХО (напряжение на электродах, давления и температуры электролита) на производительность при обработке закалённой стали ЭИ 985 (42-45 HRC). Получено эмпирическое уравнение регрессии определяющее влияние факторов в процентах:

$$Y=0,4965+0,0972X_1+0,2049X_2+0,0491X_3+0,0183X_{12}+0,0310X_{13}+0,0640X_{23}+0,0290X_2^2 - 0,0179X_3^2, \quad (1.2)$$

где X<sub>2</sub> – U(B) напряжение, 43%;

X<sub>1</sub> – температура электролита T, 20%;

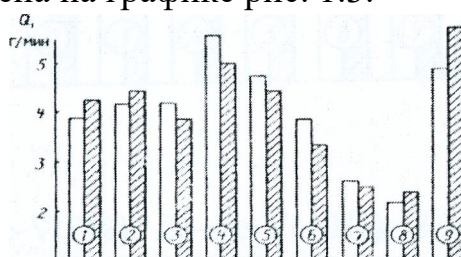
X<sub>3</sub> – давление электролита P, 10 %;

X<sub>23</sub> – парное взаимодействие U-P, 13,5%;

X<sub>13</sub> – T-P, 6,5%;

X<sub>12</sub> – T-U 7%.

Покрyтия, полученные электромагнитной наплавкой(ЭМН) для придания поверхностному слою необходимых свойств, восстановления размеров и форм изношенных деталей, требуют механической обработки[16]. Триботехнические характеристики покрyтий, полученных электромагнитной наплавкой, после различных способов финишной обработки представлены в работе [26]. По ряду причин и, в частности, из-за высокой твердости и небольшой толщины покрyтий наиболее целесообразно обрабатывать их шлифованием, так как при правильном выборе режима шлифования напряжения, возникающие в покрyтии, подложке и на границе их раздела значительно меньше, чем при других способах механической обработки. Абразивным инструментом, используемым при шлифовании, являются круги из электрокорунда на керамической или бакелитовой связке. Проведены исследования обрабатываемости электромагнитных покрyтий. [16] В качестве критериев обрабатываемости использовали съем материала (производительность)  $Q$  для черновой обработки и шероховатость поверхности при чистовой. Эксперименты проводили на круглошлифовальном станке модели 3Б12. Зависимость производительности  $Q$  от марки шлифовального круга при обработке покрyтий из порошка Fe-V(2%) представлена на графике рис. 1.3.



1 – 24A25НСМ17К5; 2 – 25А4НС25К6; 3 – 25А25ПСМ27К6; 4 – 91А16ПСМ29К; 5 – 25А40ПС25К6; 6 – 15А40НС27К6; 7 – 13А20НС27В5; 8 – 64С40ПМ3 7К5; 9 – АСР125/100С2100Б1

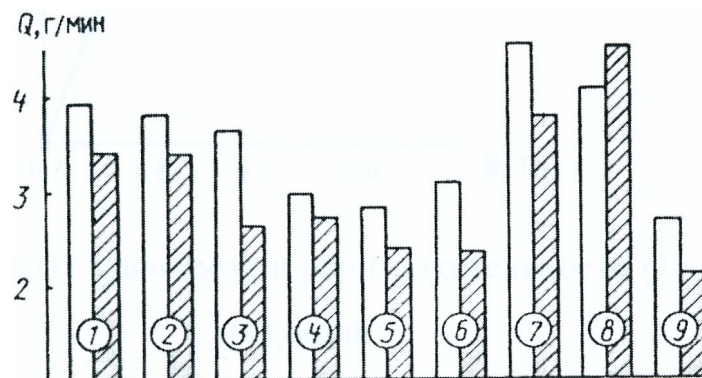
Рисунок 1.3 – Зависимость производительности  $Q$  от марки шлифовального круга при обработке покрyтий полученных ЭМН (не заштриховано) и ЭМН с ППД (заштриховано) из материала ферропорошка Fe-V(2%)



Обрабатываемость покрытий с поверхностно-пластическим деформированием (ППД) при черновой обработке незначительно лучше чем при чистой, рис. 1.4 что связано с уплотнением поверхностного слоя и повышением его твёрдости.[16]

Из результатов исследований представленных в виде графика (рис 1.4) следуют выводы, что метод нанесения покрытий не оказывает существенного влияния на обрабатываемость. В то же время химический состав материалов ферропорошков влияет на обрабатываемость покрытий.

Наилучшие результаты с точки зрения производительности и качества обработанной поверхности показали материалы на основе феррованадия и ферротитана.



1 – Fe-V(2%) 2 – Fe-V (10%); 3 – Fe-Ti

4 – С-300; 5 - P6M5K5; 6 - P6M5Ф3; 7 - сталь 45-B(1%); 8 - Fe; 9 - ФБ-3

Рисунок 1.4 - Зависимость производительности  $Q$  при обработке покрытий полученных ЭМН (не заштриховано) и ЭМН с ППД (заштриховано) из материалов ферропорошков

Основными технологическими параметрами при магнитно-абразивной обработке являются: магнитная индукция  $B$ , скорость вращения круга  $\vartheta$ , глубина шлифования  $H$ , подача  $S$ .

В работе [16] проведены исследования влияния технологических факторов на основные показатели процесса МАО закаленной стали У10А (58...62HRC). Получена математическая модель [16, 2], график зависимости производительности  $Q$  от магнитной индукции  $B$  приведён на рис 1.5.

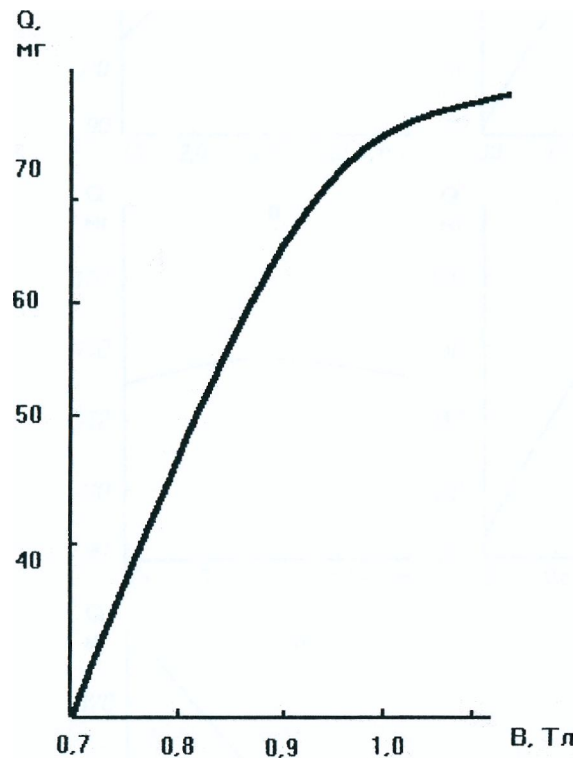


Рисунок 1.5 – График зависимости производительности  $Q$  от магнитной индукции  $B$

Из графика видно, что при увеличении магнитной индукции производительность возрастает, а с увеличением амплитуды осцилляции падает [16].

С целью выявления эффективности МАО покрытий, полученных КМ ЭМН с ППД проведены исследования обработки заготовки из стали 45 с покрытием порошком Р6М5К5 зернистость 250/180. Получена математическая модель, определяющая характер зависимости съема материала покрытия от технологических факторов на основании которой построены графики рис. 1.6.

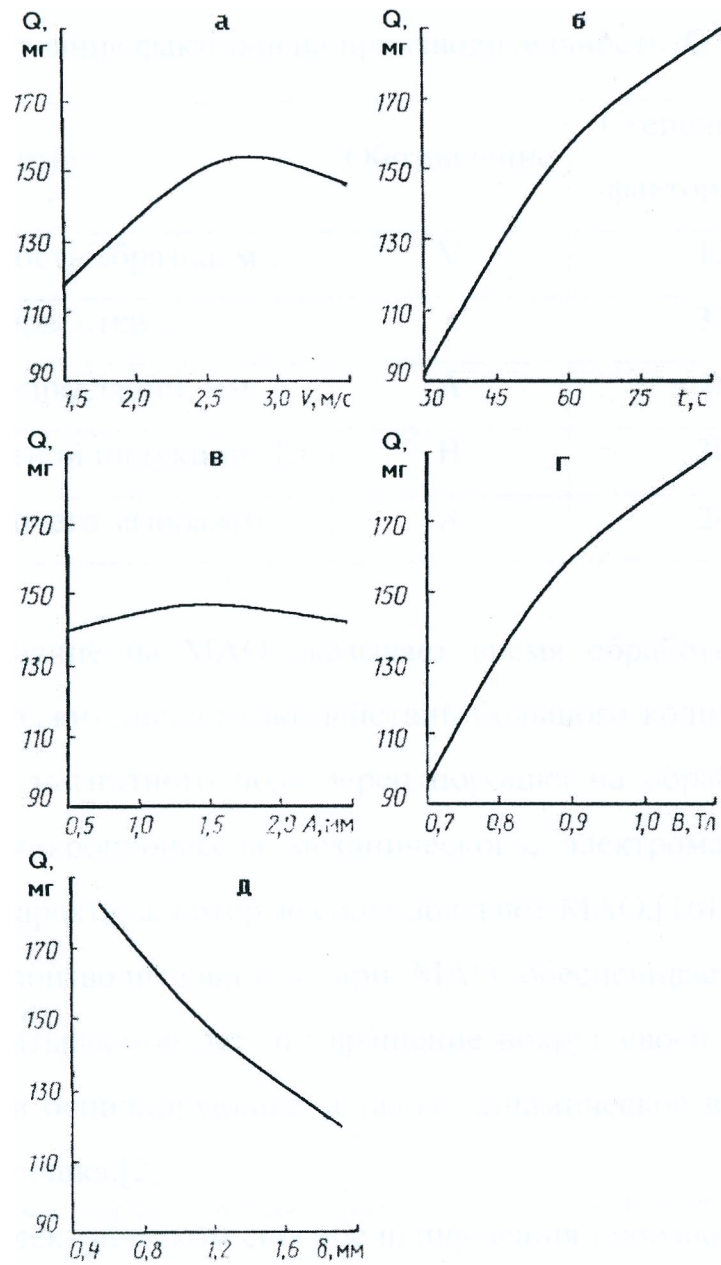


Рисунок 1.6 — Зависимость производительности  $Q$  от окружной скорости детали  $V$ (а), времени обработки  $t$ (б), амплитуды осцилляции  $A$ (в), магнитной индукции в рабочем зазоре  $B$ (г), величины рабочего зазора  $\delta$  (д)

Анализ полученной модели позволил выявить степень влияния факторов на производительность  $Q \Rightarrow t \Rightarrow B \Rightarrow \delta \Rightarrow V \Rightarrow A$  в порядке убывания.

Влияние факторов на функции отклика приведено в табл. 1.4.

Таблица 1.4 – Влияние факторов на производительность Q

Фактор	Обозначение	Степень влияния фактора на Q, %
Окружная скорость образца, м/с	V	12,64
Время обработки, с	t	31,95
Амплитуда осцилляции, мм	A	0,26
Величина магнитной индукции, Тл	B	30,52
Величина рабочего зазора, мм	$\delta$	24,63

Наибольшее влияние на MAO оказывает время обработки  $t$ . Время суммируется по продолжительности воздействий большого количества взаимосвязанных энергий магнитного поля зерен порошка на обрабатываемую поверхность и тех микропроцессов механического, электромагнитного и электрохимического характера, которые сопровождают MAO.[16]

Наибольшую производительность при MAO обеспечивает сочетание трех движений обрабатываемой детали: вращение вокруг своей оси, вращение по рабочей зоне и осциллирующее, а также динамическое влияние магнитно абразивного порошка.[2]

При магнитно-электрическом способе шлифования производительность зависит от значений параметров электрического режима (сила тока, напряжение), характера среды (воздух, жидкость) и других факторов, и достигает 3000 мм<sup>3</sup>/мин.[9]

В последнее время получают широкое распространение технологические процессы, в которых с целью повышения производительности и расширения технологических возможностей используется энергия магнитных полей, оказывающие влияние на формоизменение и состояние поверхностных слоев изделий. Их применяют как в качестве единственного источника энергии, так и в качестве дополнительного источника совместно с механическими воздействиями. [9]

## 1.2. Влияние электрических и магнитных полей на качество поверхности

При ЭЭО в результате воздействия электрических разрядов обработанная поверхность приобретает характерный микропрофиль, который определяется наличием лунок и оплавленных вершин.[33] Поверхностные слои обрабатываемой заготовки претерпевают структурные и химические превращения, чему дополнительно способствует поступление в них тех или иных элементов из рабочей жидкости и, в некоторых случаях, из электрод-инструмента. В силу этого, как и при любых других методах размерной обработки, качество поверхности при ЭЭО оценивают ее микро топографией и теми изменениями, которые произошли в поверхностном слое детали. [27]

Профиль обработанной поверхности после ЭЭО представляет собой результат наложения друг на друга огромного числа лунок. Получение наименьшей шероховатости поверхности возможно при уменьшении энергии разряда и, следовательно, снижении производительности.

Соответственно типу воздействия на обработанной поверхности детали обнаруживаются следующие области:

- 1) плавления и механических воздействий;
- 2) химического взаимодействия материала заготовки с веществом инструмента или рабочей средой;
- 3) остаточных напряжений;
- 4) термически измененного слоя.

Микрогеометрия обрабатываемой поверхности зависит от условий проведения процесса ЭЭО, в том числе теплофизических свойств материала электрод-заготовки, размеров обрабатываемой поверхности, типа рабочей жидкости и др.[33]

Первостепенное значение имеет электрический режим.[27] Из экспериментальных данных обработки закалённой стали X18H9T рис. 1.7, [27, 33]

видно, что шероховатость поверхности в большей степени определяется энергией импульса, чем его длительностью.

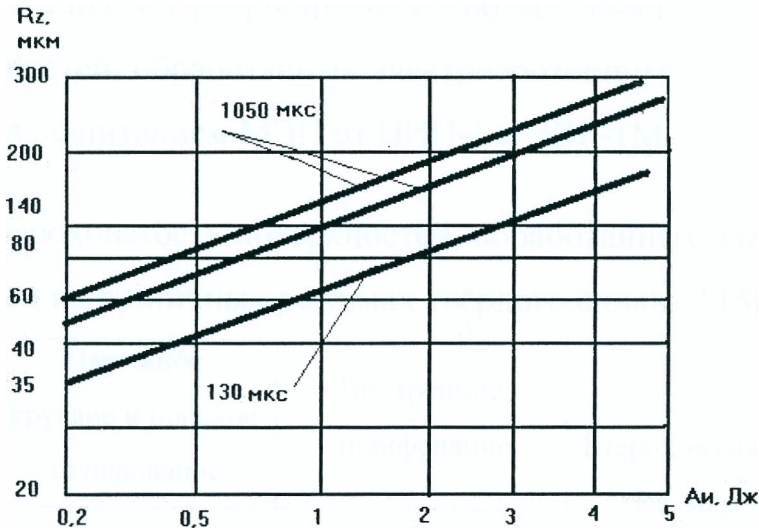


Рисунок 1.7 – Зависимость шероховатости поверхности от энергии импульса

Влияние нормированных электрических режимов универсальных станков на шероховатость поверхности показано в табл. 1.5. [27]

Таблица 1.5 – Влияние нормированных электрических режимов универсальных станков на шероховатость поверхности

Обрабатываемый материал	Электрический режим		Энергия импульсов, Дж	Шероховатость Ra, мкм
	Частота, Гц	Средний ток, А		
Твёрдый сплав	400	10	0,6	10
		20	1,1	20
		30	1,9	40
		501	3,3	40
	7·10 <sup>3</sup>	5	0,02	2,5
		30	0,98	5
	25·10 <sup>3</sup>	5	0,012	2,5...1,25
		20	0,024	5...2,5
	100·10 <sup>3</sup>	5	0,0012	1,25
		10	0,0027	1,25

Чем больше энергия импульса и электроэрозионная обрабатываемость материала, тем большую высоту шероховатости имеет обработанная поверхность. В табл. 1.6 и табл. 1.7 [36] приведены соответственно данные по шероховатости поверхностей, обработанных электроэрозионным шлифованием на различных режимах с питанием МЭИ от НИП-1 и ЭВГ-1М.

Таблица 1.6 – Шероховатость поверхностей, обработанных электроэрозионным шлифованием на различных режимах твёрдого сплава Т15К6

Торцовое шлифование		Наружное круглое и плоское шлифование		Внутреннее шлифование		Шероховатость Ra, мкм
J <sub>кз</sub> , А	g, мм <sup>3</sup> /мин	J <sub>кз</sub> , А	g, мм <sup>3</sup> /мин	J <sub>кз</sub> , А	g, мм <sup>3</sup> /мин	
Обработка твёрдого сплава						
–	–	255	250	104	5,6	20
120	69	74	30	33	8,8	8
29	73	19	3,85	9,8	1,7	5
11	1,95	7	1,2	3,8	0,56	2,5
5,2	0,89	2,9	0,51	–	–	1,25

Таблица 1.7 – Зависимость шероховатости поверхностей твёрдого сплава Т15К6, обработанных электроэрозионным шлифованием, от энергии импульса

Энергия импульса, мДж	Частота следования импульсов, кГц	Длительность импульса, мкс	J <sub>кз</sub> , А	J <sub>р</sub> /J <sub>кз</sub>	g, мм <sup>3</sup> /мин	Высота неровностей, мкм
10	22	4,5	60	0,7	52	28
8	22	4,5	40	0,7	43	18
5	66	2,5	20	0,7	28	8,5
3	66	2,5	10	0,6	19	5
1,5	66	2,5	5	0,5	4,2	2,6

В работе [12] рассматривается влияние электрохимического полирования (ЭХП) рабочих поверхностей шарикоподшипников (ШП). Установлено положительное влияние ЭХП на стойкость изделий к циклическим нагрузкам. При финишной обработке дорожек качения ШП методом ЭХП с упрочненной ППД поверхности удаляется дефектный слой и достигается шероховатость поверхности  $Rz=0,25...0,4$  мкм. График зависимости шероховатость поверхности от времени приведен на рис. 1.8.

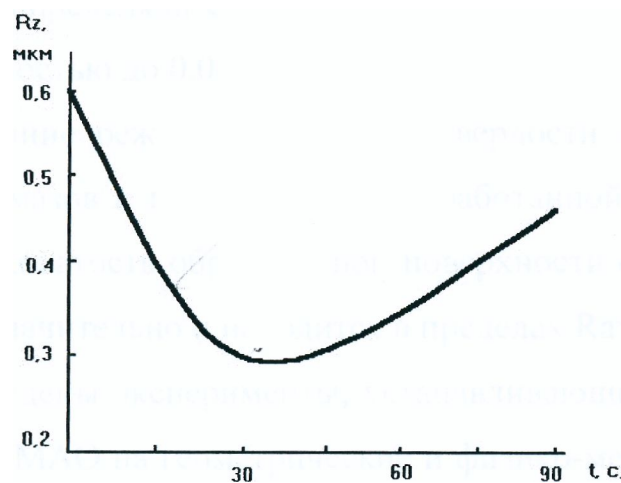


Рисунок 1.8 - Зависимость шероховатости поверхности дорожек качения колец ШП от времени обработки при ЭХП

Влияние магнитных полей на качество поверхностного слоя имеет свои особенности. К настоящему моменту известно большое количество явлений в твердых телах, связанных с изменением структуры поверхностных слоев после воздействия магнитного поля.[3]

Методом МАО производилась обработка поверхности высокоточных шариков из стали ШХ15 после упрочняющего шлифования. Установлено, что производительность увеличивается в 2-3 раза, шероховатость поверхности снижается с  $Ra=1...0,63$  мкм до  $Ra=0,063...0,032$  мкм. [11]



По показателям качества и производительности метод MAO может заменить две доводочные операции после упрочняющего шлифования материалов.

В физико-техническом институте АН РБ приводятся работы по исследованию обрабатываемости износостойких покрытий наплавленных самофлюсующимися сплавами Ni-Cr-B-Si.[9]

Детали в форме брусков с покрытием толщиной 3-4 мм обрабатывали на плоскошлифовальном станке алмазными кругами на металлической связке, износ которых определяли с помощью специального устройства индикаторного типа с точностью до 0,001 мм.

Изучено влияние режимов обработки твердости покрытий и состава СОЖ на расход алмазов и шероховатость обработанной поверхности. Установлено, что шероховатость обработанной поверхности от твердости покрытия изменяется незначительно и находится в пределах  $Ra=0,63... 1,25$  мкм.[38] В статье [23] проведены эксперименты, устанавливающие влияние технологических факторов MAO на геометрические и физико-механические характеристики закаленных инструментальных сталей P6M5 (62...64 HRC) и безвольфрамовой стали 95X6M3Ф3СТ. Определено, что увеличение магнитной индукции приводит к увеличению усилий резания, повышению деформаций поверхностного слоя, увеличению съема дефектного слоя и более интенсивному выглаживанию обрабатываемой поверхности с  $Ra=0,6$  до 0,3 мкм при скорости вращения 47м/мин и времени обработки 40 с. [23]

При обработке импульсным магнитным полем режущего инструмента его стойкость повышается в 1,3 – 2,0 раза. При воздействии импульсного магнитного поля наблюдается изменение твердости и износостойкости быстрорежущих сталей, выделение мелкодисперсных фаз-упрочнителей. [22]

В работе [16, 2] получена математическая модель определяющая характер зависимости шероховатости поверхности от технологических факторов при MAO закалённой стали У10А (58...62 HRC).

При магнитно-абразивной обработке стали У10А зависимость шероховатости поверхности от фактора  $B$  - магнитной индукции в рабочем зазоре показана на рис. 1.9. [16, 2]

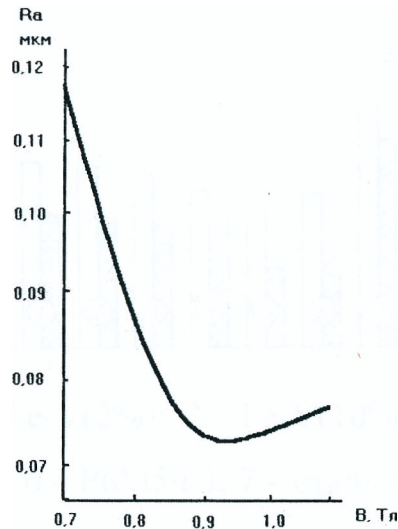
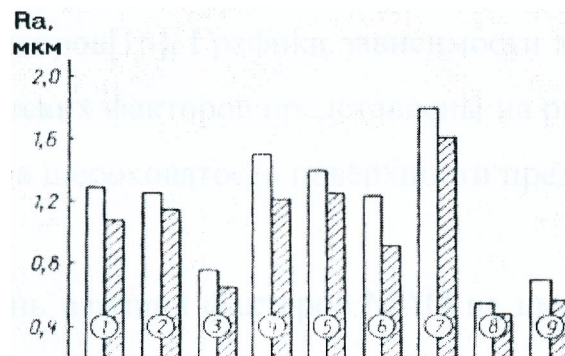


Рисунок 1.9 - Зависимость шероховатости поверхности от фактора  $B$

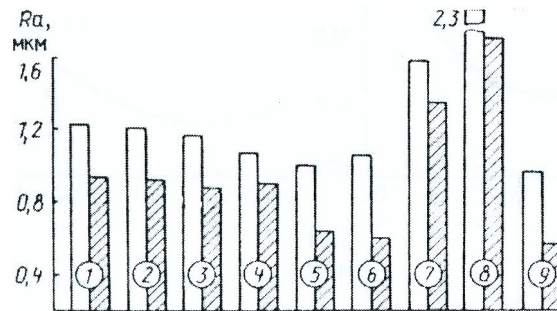
Зависимость шероховатости поверхности от марки шлифовального круга при обработке покрытий из порошка Fe-V(2%) представлена на графике рис. 1.10. [16]



1 – 24A25НСМ17К5; 2 – 25A4НС25К6; 3 – 25A25ПСМ27К6;  
 4 – 91A16ПСМ29К; 5 – 25A40ПС25К6; 6 – 15A40НС27К6; 7 – 13A20НС27В5;  
 8 – 64С40ПМ37К5; 9 – АСР125/100С2100В1

Рисунок 1.10 - Зависимость шероховатости поверхности от марки шлифовального круга при обработке покрытий полученных ЭМН (не заштриховано) и ЭМН с ППД (заштриховано) из материала ферропорошка Fe-V (2%)

На графике рис. 1.11 представлена зависимость влияния материала напыления на шероховатость поверхности.[16]



1 – Fe-V(2%); 2 – Fe-V (10%); 3 – Fe-Ti

4 – С-300; 5 – Р6М5К5; 6 – Р6М5Ф3; 7 – сталь 45-В(1%); 8 – Fe; 9 – ФБ-3

Рисунок 1.11— Зависимость шероховатости поверхности при обработке покрытий полученных ЭМН (не заштриховано) и ЭМН с ППД (заштриховано) из материалов ферропорошков

При обработке покрытия Р6М5К5 с твёрдостью 50...54 НРС получена модель, определяющая характер зависимости шероховатости поверхности от технологических факторов[16]. Графики зависимости шероховатости поверхности от технологических факторов представлены на рис. 1.12. Степень влияния факторов МАО на шероховатость поверхности представлена в табл. 1.8.

Таблица 1.8 - Степень влияния факторов МАО на шероховатость поверхности

Фактор	Обозначение	Степень влияния фактора на Ra
Окружная скорость образца, м/с	V	15,21
Время обработки,с	t	41,32
Амплитуда осциляции, мм	A	7,94
Величина магнитной индукции, Тл	B	8,61
Величина рабочего зазора, мм	$\delta$	26,92

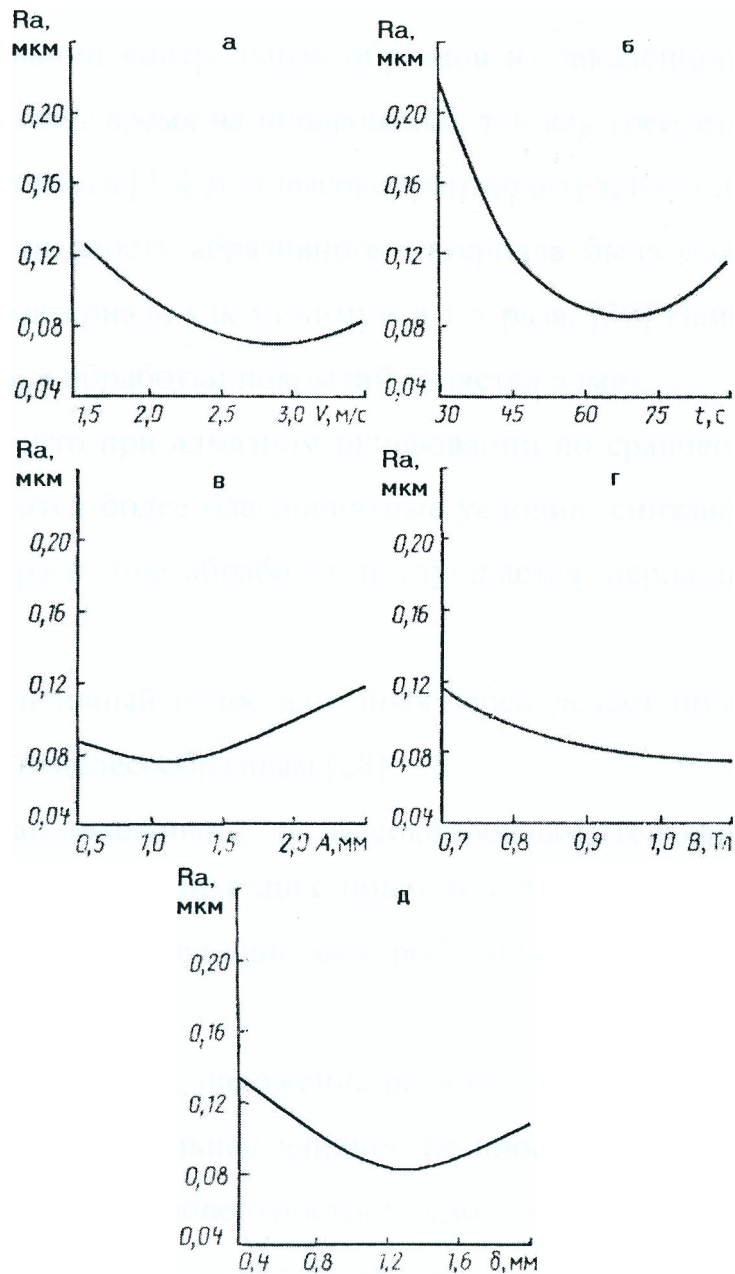


Рисунок 1.12 - Зависимость шероховатости поверхности  $Ra$  от окружающей скорости детали  $V$ (а), времени обработки  $t$ (б), амплитуды осцилляции  $A$ (в), магнитной индукции в рабочем зазоре  $B$ (г), рабочего зазора  $\delta$  (д)

Анализ физико-химических свойств упрочняющих покрытий показывает, что они относятся к труднообрабатываемым материалам.[26,15,19] Поэтому эффективность шлифования во многом определяется свойствами абразивных материалов, используемых в кругах. Исследования показали, что при обработке поверхностей деталей, упрочненных электроферромагнитным спосо-

бом, износ круга, отнесенный к пройденному им пути, в 8–10 раз превышает износ при шлифовании контрольных образцов из закалённой стали 45. Поэтому резко возрастает время на шлифование, так как требуется практически постоянная правка круга.[34] Для высокопроизводительного шлифования необходимо, чтобы твердость абразивного материала была больше твердости обрабатываемого материала как минимум в 1,5 раза. [30] Наиболее подходящим материалом для обработки покрытий является алмаз.

Установлено, что при алмазном шлифовании по сравнению с обычным абразивным создаются более благоприятные условия: снижаются усилия резания и температура в зоне обработки и улучшается шероховатость поверхности.[2]

Однако интенсивный износ алмазных зерен делает процесс шлифования экономически нецелесообразным.[28]

Наиболее рациональными и высокопроизводительными способами шлифования упрочняющих покрытий являются комбинированные способы обработки, использующие электрофизические и электрохимические явления в зоне резания.[9]

Кроме этого, наложение на зону обработки внешних магнитных полей оказывает значительное влияние на производительность процесса шлифования и на качество поверхностного слоя детали.[9, 16, 3]

Для повышения производительности при шлифовании твердых покрытий необходима концентрация дополнительных энергий в зоне шлифования. Наиболее подходящими являются взаимодействие энергий электрического тока, магнитного поля, с энергией механического шлифования упрочнённых поверхностей деталей машин. Сочетание данных энергий находит свое применение в МЭШ.

### 1.3. Постановка задачи

Из вышеприведенного обзора следует, что наложение на зону обработки энергий электрического и магнитного поля при абразивном шлифовании приводит к целому ряду изменений на показатели процесса шлифования.

На производительность процесса МЭШ и качество обработанной поверхности оказывают значительное влияние параметры режимов обработки: совместное механическое резание зернами шлифовального круга, разрядов технологического тока и влияние внешнего магнитного поля. [34,7] Действие абразивных зерен инструмента обуславливает рельеф поверхности, типичный для шлифования.[8] Непосредственное воздействие электрических разрядов формирует на поверхности следы в виде эрозионных лунок и канавок. [8] Под действием сил магнитного поля на расплав тонкого поверхностного слоя происходит его выброс из зоны шлифования или растекание по обработанной поверхности.[9]

Таким образом, большое количество факторов, их различные сочетания и взаимодействие, влияние на качественные показатели и обрабатываемость обуславливает необходимость исследования качества упрочненных поверхностей и производительности при МЭШ.

Исходя из вышеизложенного в настоящей работе решаются следующие основные задачи:

1. Исследование влияния режимов МЭШ, технологического тока и магнитного поля на качество и производительность упрочнённых поверхностей.
2. Определение оптимальных технологических режимов шлифования и разработка опытной установки для осуществления процесса.
3. Оценка перспективного использования комбинированного способа обработки упрочнённых поверхностей.

## 2. ФИЗИКА ПРОЦЕССА МЭШ

Магнитно-электрическое шлифование является способом комбинированной обработки токопроводящих материалов, сочетающим процессы абразивного микрорезания с электроконтактными и/или электроэрозионными явлениями при воздействии на зону обработки магнитного поля. [35] Физическая сущность процесса МЭШ заключается в механическом контакте абразивного токопроводящего инструмента с поверхностью детали, замыкании электродов (инструмент-деталь) продуктами шлифования по локальным пятнам контакта, расплавлении контактных мостиков теплотой электротоков и образовании разрядов с последующими электроэрозионными явлениями, происходящими под воздействием внешнего магнитного поля.[8,6,7]

Разрушение обрабатываемой поверхности при МЭШ происходит в результате микрорезания и пластического оттеснения металла зернами абразива, электроконтактного расплавления стружки и оплавления поверхности, электроэрозионных явлений и воздействий магнитного поля на расплав и продукты эрозии. Сочетание этих процессов определяет специфику формирования микрогеометрии поверхности при МЭШ.

### 2.1. Взаимодействие электрических и магнитных полей с механическим резанием

Магнитное поле создается в зоне обработки между двумя сердечниками электромагнита 3 или постоянными поляризованными магнитами,[9] а технологический ток пропускается через электрод-инструмент 1, выполненный в форме абразивного круга, и обрабатываемое изделие 2. При этом вектор магнитной индукции перпендикулярен вектору технологического тока. Это достигается взаимноперпендикулярным расположением электрода-инструмента и сердечниками электромагнита рис. 2.1.

Технологический ток, проходя через электрод-инструмент и деталь, благодаря микронеровностям в точке контакта будет разогревать место контактирующих поверхностей (за счет джоулева тепла и электроэрозионных явлений) и при достижении определенной температуры в точке контакта (близкой к температуре плавления) металл, находящийся частично в жидкой и частично в пластичной фазе будет вырван и выброшен из зоны контакта за счет механического движения вращения электрода-диска 1 и энергии, возникающей при взаимодействии магнитного поля создаваемого электромагнитами 3 электрического тока и магнитного поля электромагнита.

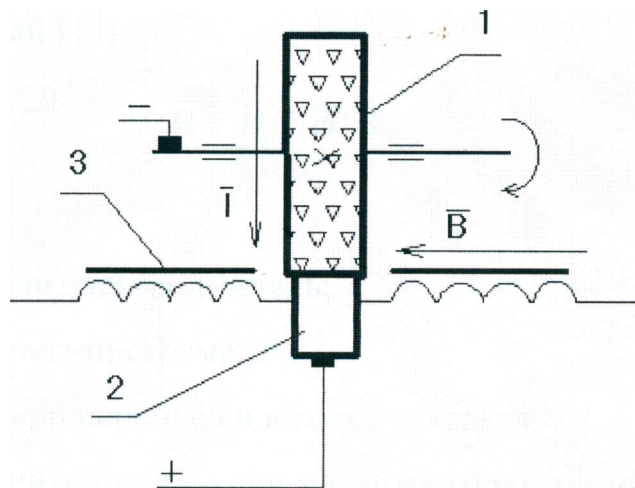


Рисунок 2.1 – Схема обработки детали МЭШ

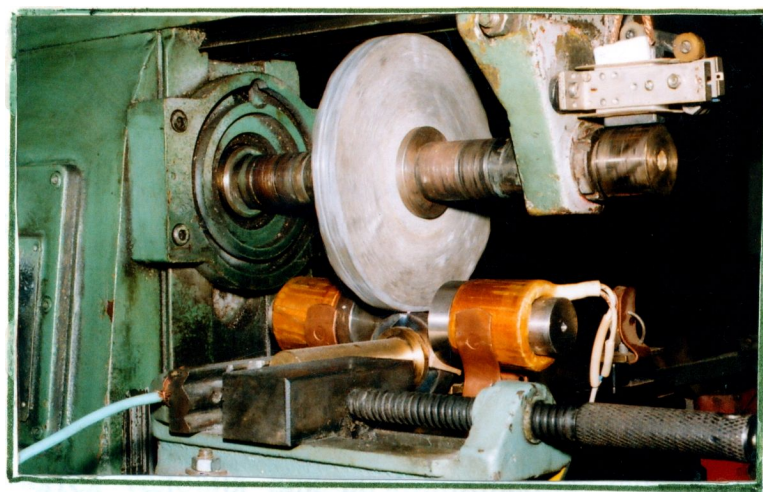


Рисунок 2.2 – Зона обработки МЭШ образца упрочнённого газопламенным напылением порошка СР-4



В момент удаления продуктов расплава в зоне контакта произойдет разрыв электрической цепи электрод-диск-деталь и нарушится процесс обработки. Электрод-диск, вращаясь, войдет в соприкосновение с новой точкой на обрабатываемом изделии, опять разогреется место контакта и вновь в результате комплексного воздействия технологического тока и магнитного поля произойдет удаление продуктов жидкой и пластичной фазы из зоны обработки и т.д.

Согласно законам электромагнетизма, механическая энергия, возникающая при взаимодействии технологического тока и магнитного поля в рассматриваемом случае, идет на образование силы  $F$ , которая создает в точке контакта момент, равный:[13]

$$M = \int_0^R I \cdot l \cdot dl \cdot B \quad (2.1)$$

где  $I$  - сила тока в цепи электрод-деталь;

$R$  - радиус электрода-инструмента;

$l$  - величина жидкой перемычки в точке контакта;

$B$  - величина магнитной индукции магнитного поля в зоне контакта.

Механическая энергия, создающая этот момент, расходуется на удаление разогретого металла из зоны контакта. При вращении электрода-инструмента, расплавленный металл образует жидкую перемычку, которая растягиваясь уменьшается в сечении, поэтому увеличивается ее температура.

Можно с достаточной точностью считать жидкую перемычку проводником с током, находящимся в магнитном поле[7]. Силы, действующие на проводник с током, вызывают разрыв жидкой перемычки еще до момента, когда она перегреется и температура ее достигнет температуры кипения. Если взаимодействие технологического тока и магнитных полей будет недостаточно сильным, то появятся условия для возникновения электрической дуги. Время ее существования будет зависеть от силы тока, протекающего по ней и напряженности окружающего магнитного поля.

Момент разрыва дуги можно рассматривать как длительный импульсный разряд, т.е. часть электронов с катода после прекращения горения дуги еще продолжает свой путь к аноду и, сталкиваясь с ним, оказывает на анод действие, подобное импульсному разряду. Следовательно, и после того, как дуга погаснет, магнитное поле оказывает свое влияние на движение потока электронов (заряженных частиц) и может изменять траектории их движения к детали-аноду, т.е. изменять угол, с которым электроны будут стремиться к детали. В зависимости от этого угла будет меняться эффект эрозионного воздействия электронов на поверхность анода.

Наложение на зону обработки магнитного поля, при определенном расположении векторов технологического тока и индукции магнитного поля, создает силу, способную выбросить из зоны резания продукты шлифования рис. 2.3.

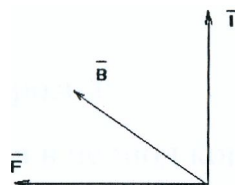


Рисунок 2.3 – Векторная интерпретация магнитно-электрической силы

Мгновенная величина силы в результате взаимодействия магнитных полей и технологического тока определяется по формуле: [ 13 ]

$$F = IBl \sin \alpha, \quad (2.2)$$

где  $I$  - сила тока в цепи круг-изделие;

$B$  - магнитная индукция в зоне контакта;

$l$  - величина проводника в зоне контакта;

$\alpha$  - угол между направлениями векторов полей.

Поскольку величиной проводника является микростружка, поднятая абразивным зерном, по которому возможно протекание тока, она и определя-

ет зазор между изделием и токопроводящей связкой круга, так как электрическое сопротивление цепи на данном участке зависит, в основном, от зернистости абразива и состояния режущей поверхности круга .

Значит, пробой технологического тока будет проходить только по кратчайшему пути[9], а составляющая сила  $F$ , будет нормальна к плоскости проходящей через ось вращения круга и точку контакта его с изделием. Таким образом, формулу (2.2) можно представить в виде:

$$F = IBl \quad (2.3)$$

Скорость выброса продуктов эрозии в момент контакта и прохождения технологического тока: [20]

$$V = \frac{F \cdot t}{m} = \frac{I \cdot B \cdot l \cdot t}{m}, \quad (2.4)$$

где  $m$  - масса продуктов эрозии;

$t$  - время действия тока в период контакта.

В начальный период контакта абразивного зерна с изделием происходит сдвиг металла в виде конуса, приподнятого над основным материалом.[21] Поэтому в первом приближении можно принять стружку в виде цилиндра диаметром  $d$  и высотой  $h$ . Так как электрический ток через стружку не может пройти при  $h < l$ , вводим коэффициент  $k = \frac{l}{h}$ , тогда формула (2.4) примет вид:

$$V = \frac{I \cdot B \cdot t}{\pi \cdot r^2 \cdot \gamma} \cdot k \quad (2.5)$$

где  $r$  - радиус стружки;

$\gamma$  - удельный вес материала стружки.

Скорость, которую могут приобрести продукты эрозии под действием магнитно-движущей силы:[13]

$$V = \sum_{i=1}^n (V_{i-1} + a_i \tau_i), \quad (2.6)$$

где  $V_{i-1}$  – скорость продуктов эрозии, приобретенная в предыдущем интервале времени;

$a_i$  - ускорение продуктов эрозии, на  $i$  интервале времени;

$\tau_i$  - величина  $i$  временного интервала.

Подставляя вместо  $a_i$ , его значение, в формулу (2.6) получаем:

$$V = \sum_{i=1}^n V_{i-1} + \sum_{i=1}^n \tau_i \frac{IB}{\pi \cdot r^2 \gamma} \cdot k. \quad (2.7)$$

Для определения порядка скорости выброса продуктов обработки примем следующие упрощения. Так как стружка движется вместе с образовавшим его зерном, примем начало координат отсчета скорости на периферии круга с начальной скоростью  $V_0 = 0$ .

Среднее значение тока, протекающего через стружку, будет отличаться от технологического тока и будет зависеть от количества одновременно контактирующих стружек и их удельной теплопроводности, т.е. от величины и концентрации зерен в круге и пути резания или площади резания. Поэтому вводим коэффициент зернистости круга  $k_3$  и коэффициент концентрации зерен  $k_K$ .

Тогда среднее значение тока:

$$I = I \cdot k_3 \cdot k_K \cdot \quad (2.8)$$

Время действия магнитно-движущей силы меньше времени резания единичного зерна, потому что в начальный момент времени еще нет контакта

между зарождающейся стружкой и токопроводящей связкой круга. [9] После контакта стружка также не может ускоренно перемещаться, так как ее основание ещё жестко связано с основным металлом изделия. Только после того, как за счет джоулева тепла и эрозионного разрушения основание стружки станет свободным, она станет перемещаться в межзерновом промежутке круга. Введем коэффициент, равный отношению времени перемещения стружки под действием магнитно-движущей силы к времени резания единичным зерном круга  $k_\tau$

Тогда время равно:

$$\sum_{i=1}^n \tau_i = \theta \cdot k_\tau \quad (2.9)$$

где  $\theta = \frac{\arccos \frac{R-\Delta}{R}}{n \cdot 360^\circ}$ , (рис.2.4)

где  $R$  - радиус токопроводящего абразивного круга;

$\Delta$  - глубина снимаемого слоя за проход;

$n$  - частота вращения круга.

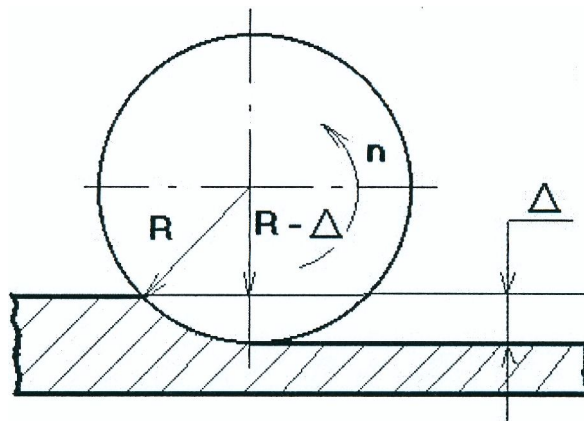


Рисунок 2.4 – Схема расчета времени резания

После всех приведенных выше допущений формулу (2.7) можно написать следующим образом:

$$V = \frac{I \cdot B \cdot \arccos \frac{R - \Delta}{R}}{\pi \cdot r^2 \cdot \gamma \cdot n \cdot 360^{\circ}} \cdot k \cdot k_{\tau} \cdot k_{\text{з}} \cdot k_{\text{К}} \quad (2.10)$$

Подставляя значения параметров при МЭШ можно определить скорость удаления продуктов эрозии из зоны резания и влияние магнитной индукции на производительность процесса.

### 3. ОБЪЕКТЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование производительности и шероховатости упрочненных поверхностей, обработанных при различных технологических режимах производились на модернизированном горизонтально-фрезерном станке модели 6Т80, и горизонтально-фрезерном станке модели Н1Ф рис. 3.1.

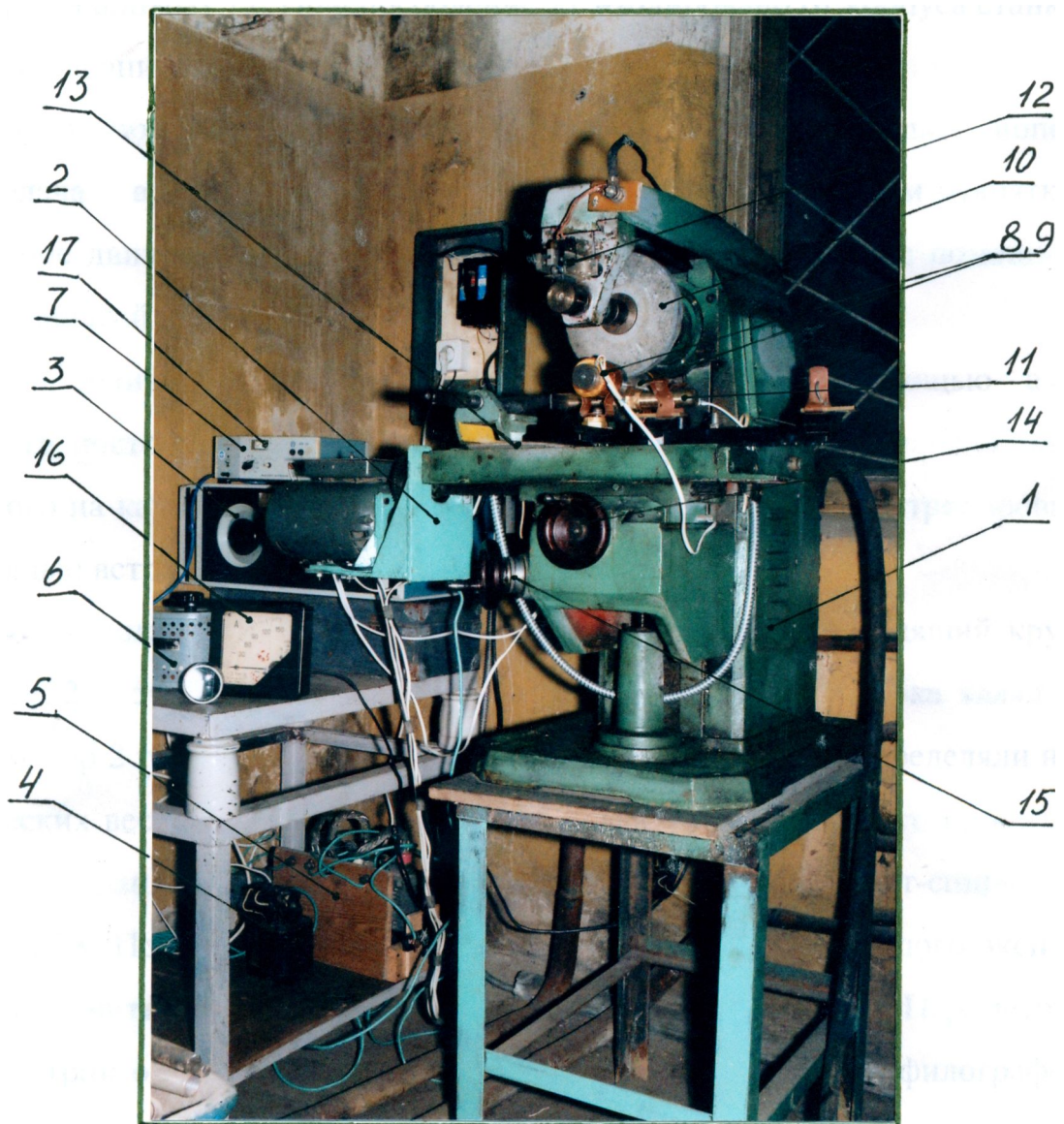


Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка МЭШ на базе горизонтально-фрезерного станка модели Н1Ф

Экспериментальная установка состоит из следующих основных узлов рис. 3.1: горизонтально-фрезерный станок модели Н1Ф - 1; привод продольной подачи с блоком управления - 2; блок управления приводом продольной подачи - 3; блока технологического тока состоящего из понижающего трансформатора - 4, диодного выпрямителя - 5 и ЛАТРа - 6; блока управления электромагнитами состоящего из выпрямителя - 7, электромагнитов - 8, 9; токопроводящего круга - 10; приспособления для базирования исследуемого образца 11. Подвод технологического тока осуществлялся через щеточно-коллекторный аппарат 12. Приспособление 11 изолировано от корпуса станка с помощью паранитовой прокладки 13.

Продольная подача осуществляется с помощью электропривода 2, поперечная подача - вращением рукоятки 14, вертикальная вращением рукоятки 15. Основное движение токопроводящего круга осуществляется с помощью шестиступенчатой коробки скоростей фрезерного станка 1.

Контроль величины технологического тока производят с помощью амперметра 16 постоянного тока класса точности 1,5. Величину напряжения подаваемого на катушки индуктивности электромагнитов 8, 9 контролировали с помощью встроенного в выпрямитель 7 вольтметра 17.

В качестве инструмента применялся абразивный токопроводящий круг ПП250x25x32 – 5С25СТ6КАЛ. Источником технологического тока являлся трансформатор 2 тридцати шести вольт рис. 3.2. Съём металла определяли на аналитических весах АДВ-200 с точностью до  $10^{-4}$  г после каждого прохода. Перед взвешиванием поверхность обработки промывали уайт-спиритом ГОСТ 3134-78. Полученные результаты по отсчету времени каждого эксперимента пересчитывались на минутный съём покрытия  $\text{мм}^3/\text{мин}$ . Параметры микрогеометрии определяли по профилограммам, снятым на профилографе-профилометре модели 201. Образцами служили цилиндрические заготовки из стали 65Г упрочнённой сормайтотом ГН1 и ферробором ФБ-17 контакт-ным магнитно-электрическим способом [25] а также заготовки упрочнённые



газоплазменным напылением порошком СР-4. Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности образца составляла 160...320 мкм.

Обработку поверхностей образцов производили в соответствии со схемой, представленной на рис. 3.2. Токпроводящий абразивный круг 7 через скользящий контакт 6 и обрабатываемый образец подсоединялись соответственно к отрицательному и положительному полюсам выпрямителя 3. Магнитное поле создавалось с помощью индуктивных катушек 5 и магнитопровода 8. Регулирование силы тока в цепи и магнитной индукции производилось ЛАТРом 1 и 9.

Для составления моделей МЭШ поверхностей наплавленных сормайт-ом ГН1 исследования проводились с помощью центрального ротатбельного композиционного плана [14] на основе полного факторного эксперимента  $2^5$ , матрица планирования и результаты опытов представлены соответственно в приложении А, приложении Б и приложении В. Отличие заключается в том, что звездные точки были взяты с учетом кинематических ограничений применяемого оборудования. В качестве параметров оптимизации процесса приняли: шероховатость поверхности  $R_a(Y_1)$  после обработки, мкм и съем материала  $Q(Y_2)$  покрытия, мг. Независимыми переменными являлись следующие факторы: технологический ток  $I$ , А; величина магнитной индукции  $B$ , Тл; скорость резания  $V$ , м/с; глубина шлифования  $H$ , мм; продольная подача  $S$ , мм/с.

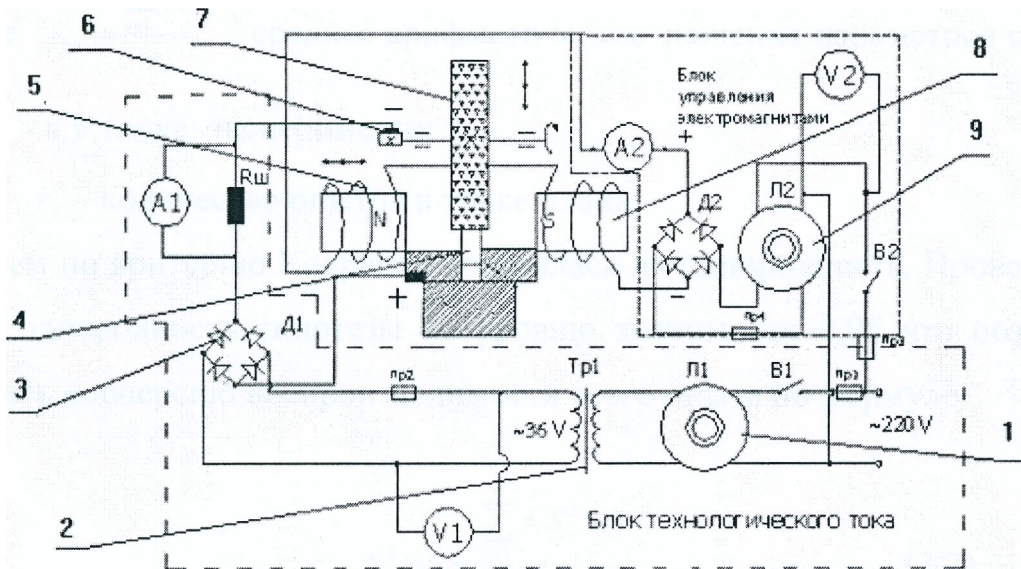


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема магнитно-электрического шлифования

Постоянным фактором в опытах была принята зернистость токопроводящего круга ПП250х25х32 - 5С25СТ6КАЛ. В каждой точке плана проводилось по четыре параллельных опыта. Условия опыта представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Условия опытов

Уровень фактора	1, А	В, Тл	V, м/с	Н, мм	8, мм/с
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
- $\alpha$	2,48	0,20	2,52	0,12	8,417
-1	8	0,14	8,3	0,4	10
0	12	0,24	12,5	0,6	13,33
+1	16	0,34	16,7	0,8	16,67
+ $\alpha$	21,51	0,47	22,48	1,08	16,67

Для каждой точки плана эксперимента вычислялась дисперсия воспроизводимости по формуле:[14]

$$S_u^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^{rv} (y_{vi} - y_{cp})^2}{r_v - 1}, \quad (3.1)$$

где  $y_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{r_v} y_{vi}}{r_v}$  - среднее арифметическое значение параметров оптими-

зации  $y_{vi}$  в  $v$  точке эксперимента;

$r_v$  - количество опытов в точке плана.

Затем по критерию Кохрена проверялась их однородность. Проверка показала однородность гипотезы по уровню значимости 0,05 что позволило вычислить дисперсию воспроизводимости всего опыта по формуле:

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{u=1}^N f_u S_u^2\{y\}}{\sum_{u=1}^N f_u} \quad (3.2)$$

где  $f_u = (r_v - 1)$  - число степеней свободы в  $v$  точке эксперимента;

$N$  - число всех точек плана.

Данные по расчёту дисперсий воспроизводимости приведены в Приложении Б.

Общее уравнение связи выходного показателя и входных независимых управляемых переменных имеет вид:

$$y = b_0 + \sum_1^n b_i X_i + \sum_i^n b_{ij} X_i X_j + \sum_i^n b_{ii} X_i^2 \quad (3.3)$$

Расчет коэффициентов уравнений регрессии функции отклика и их статистический анализ производили с помощью программы Microsoft EXCEL на ЭВМ. Значимость коэффициентов регрессии вычислялась по критерию Стьюдента, а адекватность уравнения регрессии - по критерию Фишера.

Модели вида (3.3) не всегда подходят для математического описания искомой зависимости МЭШ, поэтому использовались комплексы различных порядков.

Комплекс порядка  $\alpha$  равен:

$$K_{\alpha} = \frac{IBH}{S} \left( \frac{V}{S} \right)^{\alpha} \quad (3.4)$$

где  $\alpha$  - произвольное число.

Комплекс порядка 0 и -1 имеет соответственно вид:

$$K_0 = \frac{IBH}{S}; K_{-1} = \frac{IBH}{V}. \quad (3.5)$$

На основе комплексов различных порядков строились модели вида:

$$Y = a_0 + a_1 K_0 + a_2 K_{-1} + \dots + a_{i-1} K_{i-1} \quad (3.6)$$

Модель вида (3.6) учитывает физическую сущность процесса МЭШ и является более адекватной.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

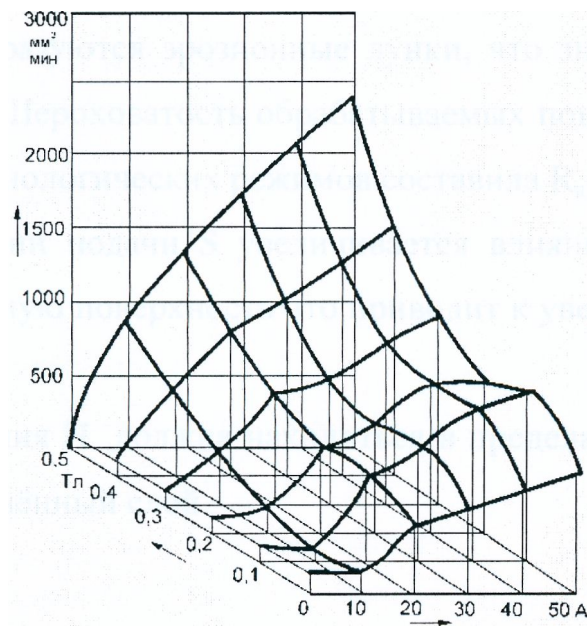
### 4.1. Исследование влияния технологических режимов МЭШ на производительность

Предварительными экспериментами установлено, что на съём материала покрытия основное влияние оказывают технологический ток, магнитная индукция, глубина и продольная подача шлифования. Причём как взаимодействие отдельных факторов, так и их совместное влияние на производительность процесса носит нелинейный характер.

Влияние технологических факторов МЭШ на производительность  $\phi$ ) процесса а также оптимизацию режима производили по полученной математической модели:

$$Y_1 = Q_c = 360 + 95IB - 23 S/IB + 11,5IB/S^2VH^3 - 31,3HS + 5I^2B^2/H^2S^3 \quad (4.1)$$

На основе экспериментальных данных построена диаграмма зависимостей «производительность - технологический ток - магнитная индукция», рис. 4.1.



$$V=12,5 \text{ м/с}; H=0,3 \text{ мм}; S=13,3 \text{ мм/с}$$

Рисунок 4.1 – Зависимость производительности МЭШ поверхностей, наплавленных сормайтотом от силы тока и магнитной индукции

Анализ диаграмм зависимостей показал, что основное влияние на производительность оказывают электрофизические параметры, степень влияния факторов на производительность  $Q=I \Rightarrow B \Rightarrow V \Rightarrow S \Rightarrow H$  в порядке убывания.

При постоянной магнитной индукции 0,2 Тл с увеличением технологического тока от 10 до 40 А производительность растет вследствие реализации больших мощностей в межэлектродном промежутке. Обычно наблюдается линейная зависимость производительности от технологического тока.

С повышением магнитной индукции от 0,05 до 0,4 Тл при постоянном технологическом токе в зоне шлифования происходит ускорение выброса продуктов эрозии, микрорасплава и стружки направленным магнитным полем. В этом случае значительная часть энергии расходуется на плавление микровыступов поверхности детали, а не на плавление стружки и продуктов эрозии, что увеличивает производительность шлифования. Таким образом, пространственная диаграмма зависимостей «производительность - технологический ток - магнитная индукция» имеет максимум производительности  $Q=1500$  мм<sup>3</sup>/мин. При дальнейшем увеличении значений технологического тока более 38 А и магнитной индукции  $B>0,35$  Тл происходят вырывы расплава металла, и образуются эрозионные лунки, что значительно ухудшает качество покрытий. Шероховатость обрабатываемых поверхностей покрытий в зависимости от технологических режимов составила  $R_a= 1,1 \dots 0,35$  мкм.

При уменьшении подачи  $S$  увеличивается влияние технологического тока на обрабатываемую поверхность что приводит к увеличению производительности.

Глубина резания  $H$  должна находиться в пределах 0,05...0,2 мм, чтобы не удалить упрочнённый слой.

## 4.2. Исследование влияния технологических режимов на качество обработки

Получены следующие математические зависимости шероховатости от технологических режимов:

$$Y_2 = R_a = 0,510 + 0,100X_1 - 0,049X_2 + 0,081 X_3 + 0,093X_4 - 0,06X_5 - 1,161 X_1X_2 - 0,008X_1X_3 + 0,062X_1X_4 - 0,079X_1X_5 + 0,046X_2X_3 + 0,019X_2X_4 - 0,124X_2X_5 - 0,177X_3X_4 - 0,047X_3X_5 - 0,105X_4X_5 + 0,266X_1^2 + 0,061 X_2^2 + 0,081 X_3^2 + 0,038X_4^2 + 0,399X_5^2 \quad (4.2)$$

$$Y_2 = R_a = 0,474 + 0,206I^2BV - 0,307IB/VH + 0,161^3/VS + 0,066BS^{0,5}/H^{0,5} \quad (4.3)$$

На рис. 4.2 представлена зависимость шероховатости от электрофизических и кинематических параметров.

Анализ результатов эксперимента показывает, что с увеличением скорости шлифования и магнитной индукции шероховатость увеличивается, но с определенного значения. На диаграмме зависимости рис.4.2 явно прослеживается экстремальная точка шероховатости  $R_a=0,3$  мкм для магнитной индукции 0,15 Тл.

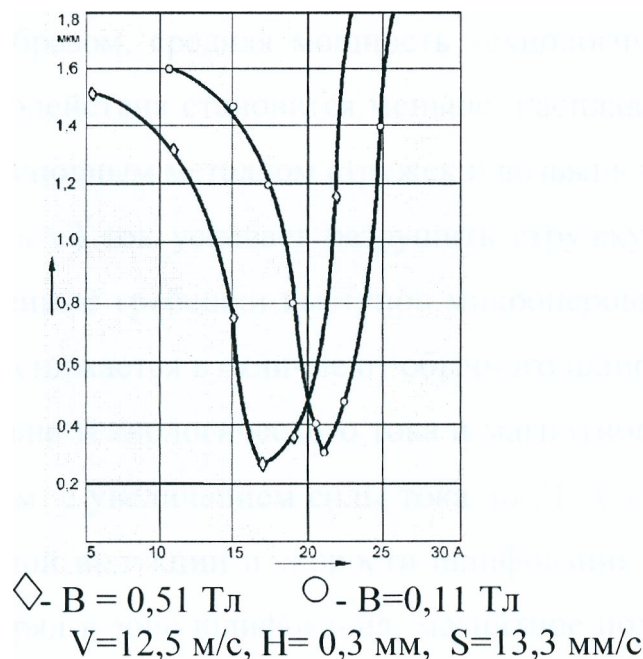


Рисунок 4.2 – Зависимость шероховатости поверхностей, наплавленных сормайтом, от электрофизических и кинематических параметров

Скорость шлифования и его электрофизические величины взаимосвязаны:[6]

$$v = \frac{IBt}{\pi \cdot r^2 \rho}, \quad (4.4)$$

где  $v$  - скорость на периферии круга;

$I$  - сила тока;

$B$  - магнитная индукция;

$t$  - время действия силы;

$r$  - радиус канала разряда;

$\rho$  - плотность материала.

Поэтому, при больших скоростях уменьшается действие силы технологического тока в связи с уменьшением максимальной и средней толщины среза, снимаемые одним шлифующим зерном. Также происходит срыв пятна контакта при направленном взаимодействии магнитной индукции и окружной скорости. Таким образом, средняя мощность технологического тока в зоне контактного взаимодействия становится меньше. Расплавляется только часть приподнятых над основным металлом стружек и возвышенностей. При малых скоростях ( $v = 3 - 5 \text{ м/с}$ ) ток успевает разрушить стружку, а магнитное поле сгладить расплавленные гребешки выступов микронеровностей. В этом случае шероховатость снижается в отличие от обычного шлифования.

Взаимодействие технологического тока и магнитного поля происходит следующим образом: с увеличением силы тока до 21 А зависимость шероховатости от магнитной индукции и скорости шлифования изменяется. Оказывая влияние на разряд в зоне шлифования, магнитное поле в этом диапазоне увеличивает проплавляющую способность тока и локализует его в узкой области. В результате все микронеровности оплавляются и расплав под действием внешнего магнитного поля растекается по поверхности детали умень-



шая шероховатость, что видно на рис. 4.2. Скорость шлифования влияет аналогично.

Профилограммы, полученные на профилометре-профилографе мод. 201 показывают, что шероховатость поверхностей образцов из стали 65Г упрочнённых сормайтотом ГН1 меньше и выступы более пологие, чем шлифование без магнитного поля [9] рис. 4.3.

Таким образом, можно регулировать величину микронеровностей с помощью технологического тока и магнитной индукции. Выявленная закономерность позволяет при помощи электрических параметров управлять требуемой шероховатостью при обработке упрочнённых поверхностей.

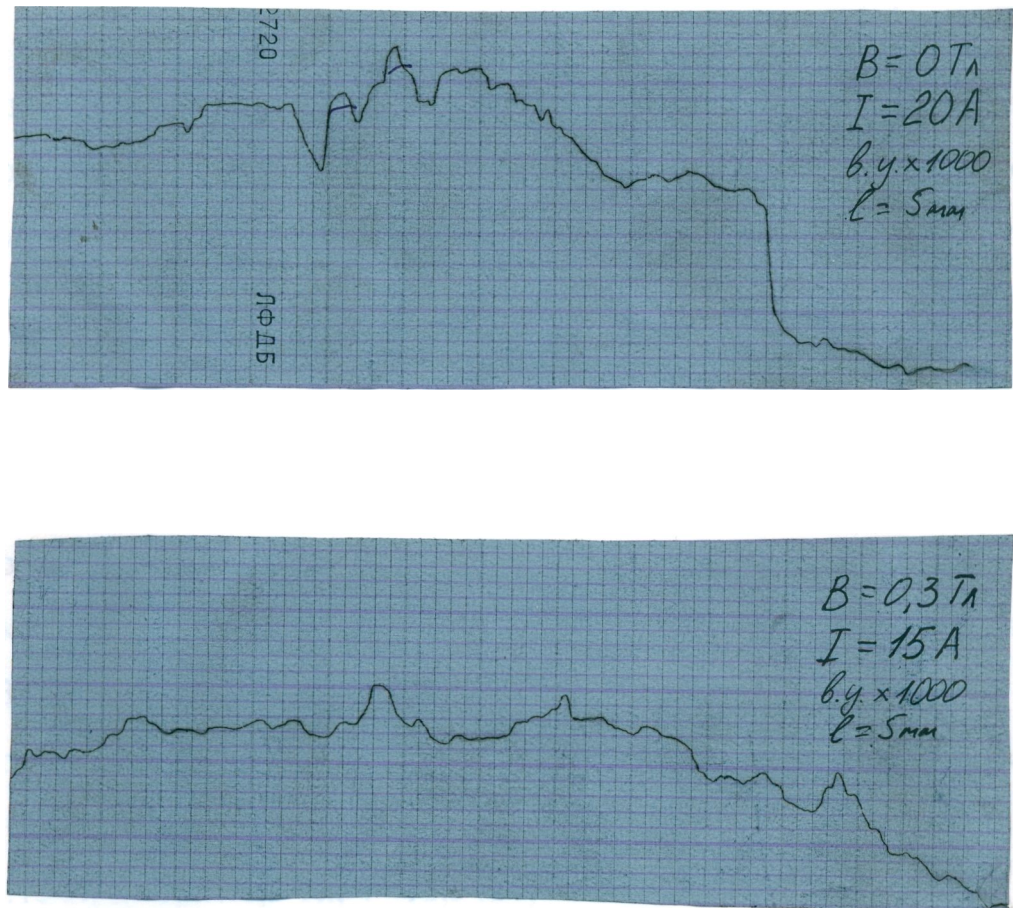


Рисунок 4.3 – Профилограммы поверхностей

Результаты исследований свидетельствуют о сложной зависимости шероховатости поверхности от величины магнитного поля при взаимодействии с технологическим током. Это влияние определяется характером и состоянием образовавшейся среды в зоне обработки и требуют дальнейших исследований.

### 3.3. Выводы

В результате проведённых исследований процесса МЭИ! упрочнённых поверхностей можно сделать следующие выводы:

- технология МЭШ является одним из перспективных способов шлифования износостойких покрытий и упрочнённых поверхностей;
- МЭШ повышает производительность по сравнению с обработкой традиционным шлифованием зёрнами абразивного, алмазного или эльборового материала, ЭЭО, электроалмазного, электрохимического, алмазно-искрового шлифования а также МАО.
- на основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии<sup>^</sup> устанавливающие зависимость производительности и шероховатости поверхности от основных параметров МЭШ;
- установлено влияние электрофизических параметров на производительность процесса МЭШ с рекомендацией следующих режимов обработки  $I=20...38$  А,  $B=0,2...0,35$  Тл,  $V=12,5$  м/с,  $H=0,1...0,3$  мм,  $S=13,3...15,5$  мм/с.
- установлено влияние электрофизических параметров на шероховатость поверхности при МЭШ с рекомендацией следующих режимов  $I=10...15$  А,  $B=0,2...0,3$  Тл,  $V=12,5$  м/с,  $H=0,05...0,2$  мм,  $S=13,3...15,5$  мм/с.

#### 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЭШ ПО ОБРАБОТКЕ УПРОЧНЁННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

1. Возможность применения технологии в промышленных условиях;
2. Не требуется создания специального оборудования;
3. Процесс МЭШ может быть реализован на серийных станках с модернизацией механизмов, которые позволят осуществить выбранный способ обработки.
4. Рекомендуются следующие оптимальные режимы обработки упрочнённых поверхностей таблица 5.1

Таблица 5.1 – Оптимальные режимы МЭШ

Оптимальные режимы МЭШ							
Параметр	Размерность	Упрочнённые поверхности					
		ГН1		ФБ-17		СР-4	
		Производительность	Шероховатость	Производительность	Шероховатость	Производительность	Шероховатость
I	А	20	15	25	15	20	10
B	Тл	0,4	0,25	0,3	0,25	0,4	0,3
V	м/с	10,5	12,5	10,5	12,5	5,6	12,5
H	мм	0,2	0,05	0,2	0,05	0,15	0,05
8	мм/с	13,3	13,3	13,3	13,3	15,5	5,5

## 5. Установка для магнитно-электрического шлифования.

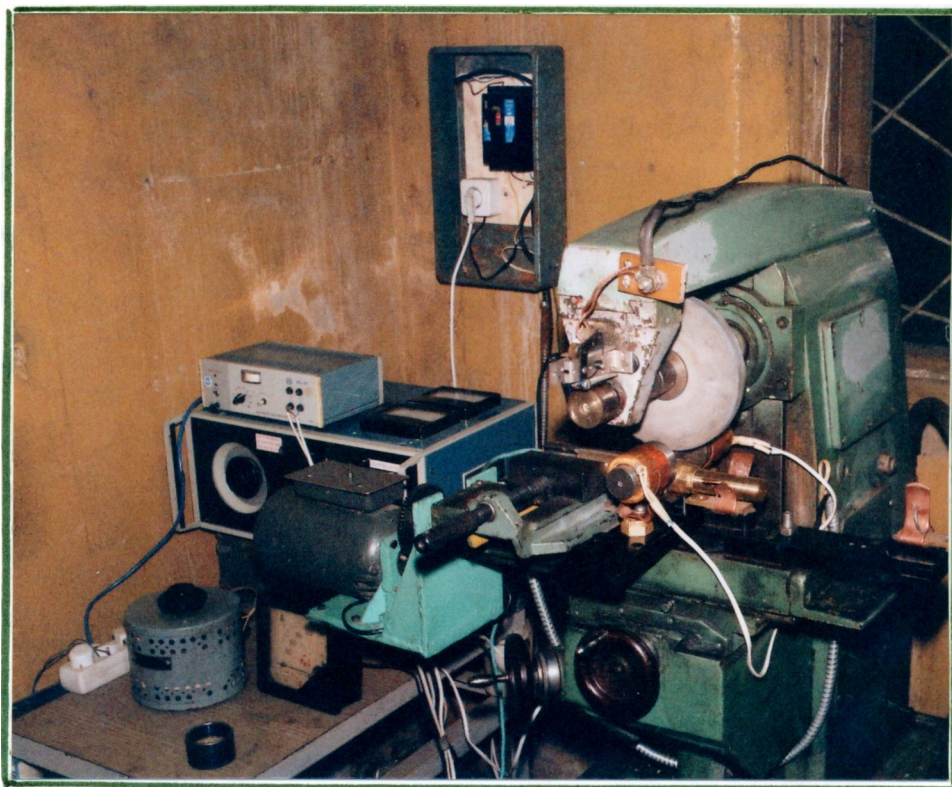


Рисунок 5.1 – Установка для магнитно-электрической обработки

База станка - горизонтально-фрезерный станок модели Н1Ф;

Производительность, мм<sup>3</sup>/мин – 600;

Размеры рабочей поверхности стола:  
(ширина × длина), мм - 60 × 100

Рабочая подача стола:

продольная - бесступенчатая;

поперечная - ручная;

вертикальная - ручная;

Скорость продольной подачи, мм/с – 0,5... 30;

Мощность электродвигателя – 2,2 кВт;

Число ступеней оборотов шпинделя – 6;

Частота вращения шпинделя, мин<sup>-1</sup> – 100 – 1000;

Габаритные размеры, мм :

длина – 1200

ширина – 1500

высота – 1000

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. Под ред. д-ра техн. наук проф. А.Н. Резникова - М.: Машиностроение, 1977. - 391 с.
2. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле // Ящерицын П.И., Забавский М.Т., Кожуро Л.М., Акулович Л.М. - Мн.: Наука и техника, 1988. - 272 с.
3. Барон Ю.М. Магнито-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. - 176с.
4. Бойко Н.И. Шлифование наплавленных деталей// Вестник машиностроения. - М.: Машиностроение, №3, 1990. - 73 с.
5. Де Барр А.Е., Оливер Д.А. Электрохимическая обработка (пер. с англ.). - М.: Машиностроение, 1973. - 184 с.
6. Дмитриченко Э.И. Влияние напряженности магнитного поля в зоне обработки на механизм разрушения стружки при МЭШ. // Тез. док. 6 НТК ГПИ 1992.-28 с.
7. Дмитриченко Э.И., Кульгейко М.П., Дмитриченко Е.Э., К вопросу о механизме разрушения обрабатываемой поверхности при магнитно-электрическом шлифовании// 5 НТК проф.- препод. состава, под ред. М.В. Голуба. - Брест, БПИ, 4.1, 1998. - 54 с.
8. Дмитриченко Э.И., Кульгейко М.П., Дмитриченко Е.Э. Особенности формирования микрогеометрии поверхности при магнитно-электрическом шлифовании.// Материалы. Технологии. Инструменты - Гомель: ИММС НАНБ, №3,2000.- 74
9. Дмитриченко Э.И. Разработка и исследование процесса магнитно-электрического шлифования деталей машин: Автореф. Дис. ... кан-татех. наук: 05.02.08./ Моек, автомобилестроит. ин-т. - 1991. - 17 с.
10. Иванов В.П. Совершенствование организации производства по восстановлению деталей.// Мир технологий- Мн.: Технопринт, 2003. - №1 - 83 с.

11. Калина В.Н., Рыбаков В.Г. Качество поверхности высокоточных шариков при магнитно-абразивной обработке.// Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин и приборов: Тез.докл.конф. - Пенза, 1986. - 97 с.
12. Кащеев В.Д., Филиппенко А.М. Электрохимическое полирование малогабаритных шарикоподшипников.// Электрофизические и электрохимические методы обработки. - М.: НИИмаш, 5 выпуск, 1980. - 13 с.
13. Кибец И.Н., Кибец В.И. Физика: Справочник. - Харьков: Фолио, Ростов н/Д: Феникс, 1997. -479 с.
14. Киреева Л.Е., Огнев В.У., Пучков А.А. Описание и изучение области оптимума методом центрального ротатабельного планирования второго порядка. Метод, указание. - Гомель: ГПИ, 1983. - 53 с.
15. Клубникин В.С., Карасев М. В., Петров Г.К. Плазменное напыление покрытий в активных средах. - Л.: О-во «Знание» РСФСР, ЛО, ЛДНТП, 1990.- 20 с.
16. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле/ Под ред. Н.Н. Подлекарева. - Мн.: Навука 1 тэхнжа, 1995. - 232 с.
17. Константинов В.М., Ресурсо-энергосбережение при восстановлении и упрочнении деталей диффузионно-легированными сплавами.// Мир технологий- Мн.: Технопринт, 2003. - №1 - 83 с.
18. Крымов В.В., Горелов В.А. Алмазное шлифование деталей из титановых сплавов и жаропрочных сталей. - М.: Машиностроение, 1981.-61 с.
19. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. Учебник для вузов. - М.: Металлургия, 1992. - 432 с.
20. Кузнецов Э.Г. Исследование восстановления автомобильных деталей типа «вал-втулка» с использованием электрофизических способов обработки: Автореф. Дис. ... кан-татех. наук: 05.02.08./ Моек, автомобильно-дорожн.. ин-т. - 1979.- 15с.
21. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов.- М.: Машиностроение, 1974.-320 с.

22. Масловский В.М., Постников С.Н. О механизме влияния слабого магнитного поля на структуру конденсированных сред.// Обработка импульсным магнитным полем(метод и техника): Материалы 4 научно-технического международного семинара с международным участием по нетрадиционным технологиям в машиностроении - София - Горький, 1989. - 133 с.
23. Моднов С.И., Лазарев С.А., Исаков А.В., Копейкин А.М. Характеристика поверхностного слоя закалённых инструментальных сталей, обработанных абразивом в магнитном поле.// Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин и приборов: Тез.докл.конф. - Пенза, 1986. - 97 с.
24. Немилев Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. - Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1989. - 164 с.
25. Повышение износостойкости деталей машин комплексным магнитно-электрическим способом. Шулев Г.С., Сысоев П.В., Дмитриченко Э.И., Люцко В.А.// Трение и износ - Мн.: Наука и техника 1987. - №5- 943 с.
26. Проектирование технологических процессов в машиностроении: Учеб, пособ. для вузов/ И.П. Филонов, Г.Я. Беляев, Л.М. Кожуро и др.; Под общ. ред. И.П. Филонова. - Мн.: УП Технопринт, 2003. - 910 с.
27. Размерная электрическая обработка металлов: Учеб, пособие / Б.А.Артамонов, А.Л.Вишницкий, Ю.С. Волков, А.В. Глазков; Под ред. А.В.Глазкова. - М.: Высш. школа, 1978. - 336 с.
28. Румянцев Е.М, Туманов А.В, И.Ю. Шуляева Влияние основных параметров ЭХО стали ЭИ958 при непрерывной подаче электрода-инструмента на производительность процесса// Электрофизические и электрохимические методы обработки. - М.: НИИмаш, 3 выпуск, 1979. - 14 с.
29. Технология конструкционных материалов, Комаров О.С., Данилко Б.М., Ковалевский В.Н., Макаева Г.Г. - Мн.: Дизайн ПРО, 1998. - 405 с.
30. Узунян М.Д., Краснощек Ю.С. Высокопроизводительное шлифование безвольфрамовых твердых сплавов. - М.: Машиностроение, 1988. - 80 с.
31. Управление структурой покрытий при электромагнитной наплавке и использовании порошков быстрорежущих сталей // Ж.А. Мрочек, С.Л. Кожуро,

Л.М.Кожуро, Т.К. Романова.: Машиностроение, Сб. научн. трудов.под ред. И.П.Филонова. - Мн.: УП Технопринт, 2002. - 768 с.

32. Управление устойчивостью процесса электромагнитной наплавки поверхностей// Ж.А. Мрочек, С.Л. Кожуро, М.Л. Хейфец, Л.М. Кожуро.: Машиностроение, Сб. научн. трудов, под ред. И.П.Филонова. - Мн.: УП Технопринт, 2002. - 768 с.

33. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки.- М.: Машиностроение, 1980. - 184 с.

34.,Шулев Г.С. Дмитриченко Э.И. Исследование обрабатываемости упрочнённых поверхностей деталей контактным магнитно-электрическим способом.// Трение и износ -Мн.: Наука и техника 1987. - №8- 938 с.

35. Шулев Г.С. Электромеханические особенности процесса шлифования деталей токопроводящими кругами // Тез. док. МНТК. - Минск, БГПА, 1995. - 34с.

36. ; Шумов Е.Г., Деев Е.А. Электроэрозионное шлифование. - М.: Машиностроение, 1977. -48 с.

37. Юшков В.В. Опыт внедрения абразивной и алмазной обработки при восстановлении деталей машин. - М.: Машиностроение, 1989. -64 с.

38\* Ящерицын П.И., Смоляк В.В., Мойсеенко П.В., Кремко Д.И. Шлифование покрытий^ наплавленных износостойкими самофлюсующимися сплавами.// Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин и приборов: Тез.докл.конф. - Пенза, 1986. - 97 с.



## Матрица планирования

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

№ Экспериментального результата	Уровни факторов				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
1	+ 1	+ 1	+ 1	+1	+1
2	-1	+ 1	+1	+ 1	+ 1
3	+ 1	-1	+ 1	+ 1	+1
4	-1	-1	+1	+ 1	+ 1
5	+ 1	+ 1	-1	+ 1	+ 1
6	-1	+ 1	-1	+1	+ 1
7	+1	-1	-1	+1	+ 1
8	-1	-1	-1	+ 1	+ 1
9	+ 1	+ 1	+ 1	-1	+ 1
10	-1	+ 1	+ 1	-1	+ 1
11	+ 1	-1	+ 1	-1	+ 1
12	-1	-1	-1	-1	+ 1
13	+ 1	+ 1	-1	-1	+1
14	-1	+ 1	-1	-1	+ 1
15	+ 1	-1	+ 1	-1	+1
16	-1	-1	+ 1	-1	+1
17	+ 1	+ 1	+ 1	+ 1	-1
18	-1	+ 1	-1	+ 1	-1
19	+ 1	-1	-1	+ 1	-1
20	-1	-1	-1	+ 1	-1
21	+ 1	+ 1	+ 1	+ 1	-1
22	-1	+ 1	+ 1	+ 1	-1
23	+ 1	-1	+ 1	+ 1	-1
24	-1	-1	-1	+ 1	-1
25	+ 1	+ 1	-1	-1	-1
26	-1	+ 1	-1	-1	-1
27	+ 1	-1	+ 1	-1	-1
28	-1	-1	+ 1	-1	-1
29	+ 1	+ 1	+ 1	-1	-1
30	-1	+ 1	-1	-1	-1
31	+ 1	-1	-1	-1	-1
32	-1	-1	-1	-1	-1
33	+ $\alpha$	0	0	0	0
34	0	+ $\alpha$	0	0	0
35	0	0	+ $\alpha$	0	0
36	0	0	0	+ $\alpha$	0
37	0	0	0	0	+ $\alpha$
38	- $\alpha$	0	0	0	0
39	0	- $\alpha$	0	0	0
40	0	0	- $\alpha$	0	0
41	0	0	0	- $\alpha$	0
42	0	0	0	0	- $\alpha$
43	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0

№ Экспериментального результата	Уровни факторов					Параметры оптимизации	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
1	16,00	0,34	16,70	0,80	16,67	<b>1,210</b>	<b>204</b>
2	8,000	0,34	16,70	0,80	16,67	<b>1,280</b>	<b>221</b>
3	16,00	0,14	16,70	0,80	16,67	<b>1,340</b>	<b>265</b>
4	8,000	0,14	16,70	0,80	16,67	<b>0,935</b>	<b>238</b>
5	16,00	0,34	8,30	0,80	16,67	<b>1,043</b>	<b>190</b>
6	8,000	0,34	8,30	0,80	16,67	<b>1,198</b>	<b>218</b>
7	16,00	0,14	8,30	0,80	16,67	<b>1,838</b>	<b>252</b>
8	8,000	0,14	8,30	0,80	16,67	<b>1,503</b>	<b>299</b>
9	16,00	0,34	16,70	0,40	16,67	<b>1,385</b>	<b>280</b>
10	8,000	0,34	16,70	0,40	16,67	<b>1,855</b>	<b>273</b>
11	16,00	0,14	16,70	0,40	16,67	<b>1,410</b>	<b>182</b>
12	8,000	0,14	16,70	0,40	16,67	<b>1,365</b>	<b>258</b>
13	16,00	0,34	8,30	0,40	16,67	<b>0,603</b>	<b>252</b>
14	8,000	0,34	8,30	0,40	16,67	<b>1,293</b>	<b>272</b>
15	16,00	0,14	8,30	0,40	16,67	<b>1,718</b>	<b>288</b>
16	8,000	0,14	8,30	0,40	16,67	<b>0,845</b>	<b>281</b>
17	16,00	0,34	16,70	0,80	10,00	<b>1,903</b>	<b>305</b>
18	8,000	0,34	16,70	0,80	10,00	<b>1,515</b>	<b>298</b>
19	16,00	0,14	16,70	0,80	10,00	<b>1,708</b>	<b>270</b>
20	8,000	0,14	16,70	0,80	10,00	<b>1,080</b>	<b>185</b>
21	16,00	0,34	8,30	0,80	10,00	<b>2,155</b>	<b>205</b>
22	8,000	0,34	8,30	0,80	10,00	<b>1,943</b>	<b>238</b>
23	16,00	0,14	8,30	0,80	10,00	<b>1,718</b>	<b>242</b>
24	8,000	0,14	8,30	0,80	10,00	<b>0,920</b>	<b>216</b>
25	16,00	0,34	16,70	0,40	10,00	<b>1,648</b>	<b>309</b>
26	8,000	0,34	16,70	0,40	10,00	<b>1,643</b>	<b>201</b>
27	16,00	0,14	16,70	0,40	10,00	<b>1,710</b>	<b>191</b>
28	8,000	0,14	16,70	0,40	10,00	<b>1,240</b>	<b>186</b>
29	16,00	0,34	8,30	0,40	10,00	<b>0,848</b>	<b>213</b>
30	8,000	0,34	8,30	0,40	10,00	<b>1,108</b>	<b>190</b>
31	16,00	0,14	8,30	0,40	10,00	<b>1,031</b>	<b>258</b>
32	8,000	0,14	8,30	0,40	10,00	<b>0,468</b>	<b>262</b>
33	<b>21,51</b>	0,24	12,50	0,6	13,33	<b>2,293</b>	<b>274</b>
34	12	<b>0,47</b>	12,50	0,6	13,33	<b>0,903</b>	<b>315</b>
35	12	0,24	<b>22,48</b>	0,6	13,33	<b>1,083</b>	<b>298</b>
36	12	0,24	12,50	<b>1,08</b>	13,33	<b>0,935</b>	<b>360</b>
37	12	0,24	12,50	0,6	<b>16,67</b>	<b>0,820</b>	<b>368</b>
38	<b>2,480</b>	0,24	12,50	0,6	13,33	<b>1,753</b>	<b>368</b>
39	12	<b>0,200</b>	12,50	0,6	13,33	<b>0,768</b>	<b>315</b>
40	12	0,24	<b>2,520</b>	0,6	13,33	<b>0,858</b>	<b>392</b>
41	12	0,24	12,50	<b>0,12</b>	13,33	<b>0,535</b>	<b>258</b>
42	12	0,24	12,50	0,6	<b>5,417</b>	<b>1,493</b>	<b>316</b>
43	12	0,24	12,5	0,6	13,33	<b>1,213</b>	<b>358</b>
44	12	0,24	12,50	0,6	13,33	<b>0,440</b>	<b>370</b>
45	12	0,24	12,50	0,6	13,33	<b>0,480</b>	<b>372</b>
46	12	0,24	12,50	0,6	13,33	<b>0,300</b>	<b>390</b>
47	12	0,24	12,50	0,6	13,33	<b>0,400</b>	<b>321</b>
48	12	0,24	12,50	0,6	13,33	<b>0,320</b>	<b>343</b>
49	12	0,24	12,50	0,6	13,33	<b>0,380</b>	<b>378</b>
50	12	0,24	12,50	0,6	13,33	<b>0,500</b>	<b>392</b>
51	12	0,24	12,50	0,6	13,33	<b>0,632</b>	<b>269</b>
52	12	0,24	12,50	0,6	13,33	<b>0,452</b>	<b>295</b>

Анализ данных и расчёт коэффициентов регрессии

**Полная квадратичная модель**

План  
 Количество повторностей m  
 Число коэффициентов в уравнении d  
 Число строк плана N  
 Уравнения в матричной форме

Центр. Ротатаб.	
	4
	21
	52
$B=(Xt^*X)^{-1}*(Xt^*Y)$ $\Phi=(Xt^*X)$ $K=s(B)^2*(Xt^*X)^{-1}$	
Дисперсия воспроизводимости $s(B)^2$	0,08999
Дисперсия адекватности $S(ад)^2$	0,13148399
Коэффициент корреляции	0,942559

Проверка  
 однородности  
 дисперсий  
 Критерий Кохрена

G	
n=	52
m=	4

Табличный

0,23 >=

**Проверка адекватности уравнения регрессии**

Критерий Фишера  
 число степеней свободы

$k1=N$ -число факторов  
 $k2=N*(m-1)$

1,55 >  
 47  
 156

**Проверка достоверности коэффициента корреляции**

Критерий Стьюдента  
 число степеней свободы

$k=N-2$

2,57 <=  
 50

**Проверка значимости коэффициентов регрессии**

Критерий Стьюдента  
 число степеней свободы

2,14  
 156

Вывод	
0,227228	Однородны
1,461118	Адекватно
19,95245	Достоверен

Таблица П. 3. 1 – Матрица

Номера строк плана	Опытные значения по повторностям				Среднее	Дисперсия
	1	2	3	4	$\bar{Y}$	$S_y^2$
1	1,18	1,14	1,29	1,23	1,210	0,00420
2	1,18	1,3	1,27	1,37	1,280	0,00620
3	1,47	1,45	1,24	1,2	1,340	0,01953
4	0,9	0,72	0,92	1,2	0,935	0,03930
5	1,31	0,95	1,08	0,83	1,043	0,04223
6	0,75	0,64	0,73	2,67	1,198	0,96596
7	1,79	2,18	1,89	1,49	1,838	0,08102
8	1,51	1,25	1,58	1,67	1,503	0,03263
9	1,14	1,21	1,52	1,67	1,385	0,06337
10	1,88	1,84	1,75	1,95	1,855	0,00697
11	1,54	1,21	1,69	1,2	1,410	0,05980
12	1,85	1,19	1,22	1,2	1,365	0,10470
13	0,58	0,61	0,63	0,59	0,603	0,00049
14	1,27	1,29	1,31	1,3	1,293	0,00029
15	1,54	1,67	1,56	2,1	1,718	0,06829
16	0,92	0,79	0,84	0,83	0,845	0,00297
17	1,87	1,97	1,93	1,84	1,903	0,00343
18	2,21	1,25	1,31	1,29	1,515	0,21530
19	1,56	1,44	1,51	2,32	1,708	0,16916
20	0,89	1,08	1,29	1,06	1,080	0,02687
21	2,06	2,08	2,27	2,21	2,155	0,01030
22	1,97	1,91	1,96	1,93	1,943	0,00076
23	1,23	2,68	1,64	1,32	1,718	0,44269
24	1,2	0,78	0,75	0,95	0,920	0,04260
25	1,68	1,62	1,7	1,59	1,648	0,00263
26	1,68	1,54	1,73	1,62	1,643	0,00669
27	1,32	1,95	1,75	1,82	1,710	0,07447
28	1,15	1,44	1,22	1,15	1,240	0,01887
29	1,25	0,69	0,72	0,73	0,848	0,07229
30	1,02	1,21	1,13	1,07	1,108	0,00669
31	1,41	0,71	1,312	0,69	1,031	0,14731
32	0,34	0,6	0,51	0,42	0,468	0,01263
33	2,52	3,65	1,64	1,36	2,293	1,06329
34	0,89	0,91	0,88	0,93	0,903	0,00049
35	1,78	1,42	0,62	0,51	1,083	0,38069
36	1,25	0,73	0,94	0,82	0,935	0,05150
37	0,87	0,62	0,84	0,95	0,820	0,01993
38	1,74	1,95	1,98	1,34	1,753	0,08703
39	0,85	0,73	0,77	0,72	0,768	0,00349

Продолжение таблицы П. 3. 1

40	0,85	0,85	0,89	0,84	0,858	0,00049
41	0,56	0,53	0,54	0,51	0,535	0,00043
42	0,97	2,22	1,31	1,47	1,493	0,27869
43	1,5	1,02	1,21	1,12	1,213	0,04276
44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,440	0,00000
45	0,48	0,48	0,48	0,48	0,480	0,00000
46	0,3	0,3	0,3	0,3	0,300	0,00000
47	0,4	0,4	0,4	0,4	0,400	0,00000
48	0,32	0,32	0,32	0,32	0,320	0,00000
49	0,38	0,38	0,38	0,38	0,380	0,00000
50	0,5	0,5	0,5	0,5	0,500	0,00000
51	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,00000
52	0,452	0,452	0,452	0,452	0,452	0,00000

Таблица П. 3.3 – Результаты анализа

Код	Коэффициент		Критерий		Условие значимости (0,95)
	значение	ср.кв.отклонение	Стьюдента		
			$t_{расч}$	$t_{табл}$	
	МУМНОЖ(МОБР(X);Xt*Y)	КОРЕНЬ(Кдиаг.)			
b0	0,5104	0,0925	5,5165	2	Значим
b1	0,1009	0,0456	2,2141	2	Значим
b2	0,0495	0,0460	1,0749	2	Не значим
b3	0,0817	0,0456	1,7917	2	Не значим
b4	0,0939	0,0455	2,064	2	Значим
b5	-0,0600	0,0507	1,183	2	Не значим
b12	-0,1611	0,0530	3,0381	2	Значим
b13	-0,0086	0,0530	0,1624	2	Не значим
b14	0,0626	0,0530	1,1812	2	Не значим
b15	-0,0790	0,0530	1,4913	2	Не значим
b23	0,0469	0,0530	0,8842	2	Не значим
b24	0,0191	0,0530	0,3598	2	Не значим
b25	-0,1240	0,0530	2,3419	2	Значим
b34	-0,1778	0,0530	3,3528	2	Значим
b35	-0,0472	0,0530	0,8921	2	Не значим
b45	-0,1053	0,0530	1,9885	2	Не значим
b11	0,2669	0,0393	6,7864	2	Значим
b22	0,0613	0,0422	1,4527	2	Не значим
b33	0,0810	0,0394	2,0566	2	Значим
b44	0,0387	0,0387	0,9993	2	Не значим
b55	0,3991	0,0825	4,8372	2	Значим