

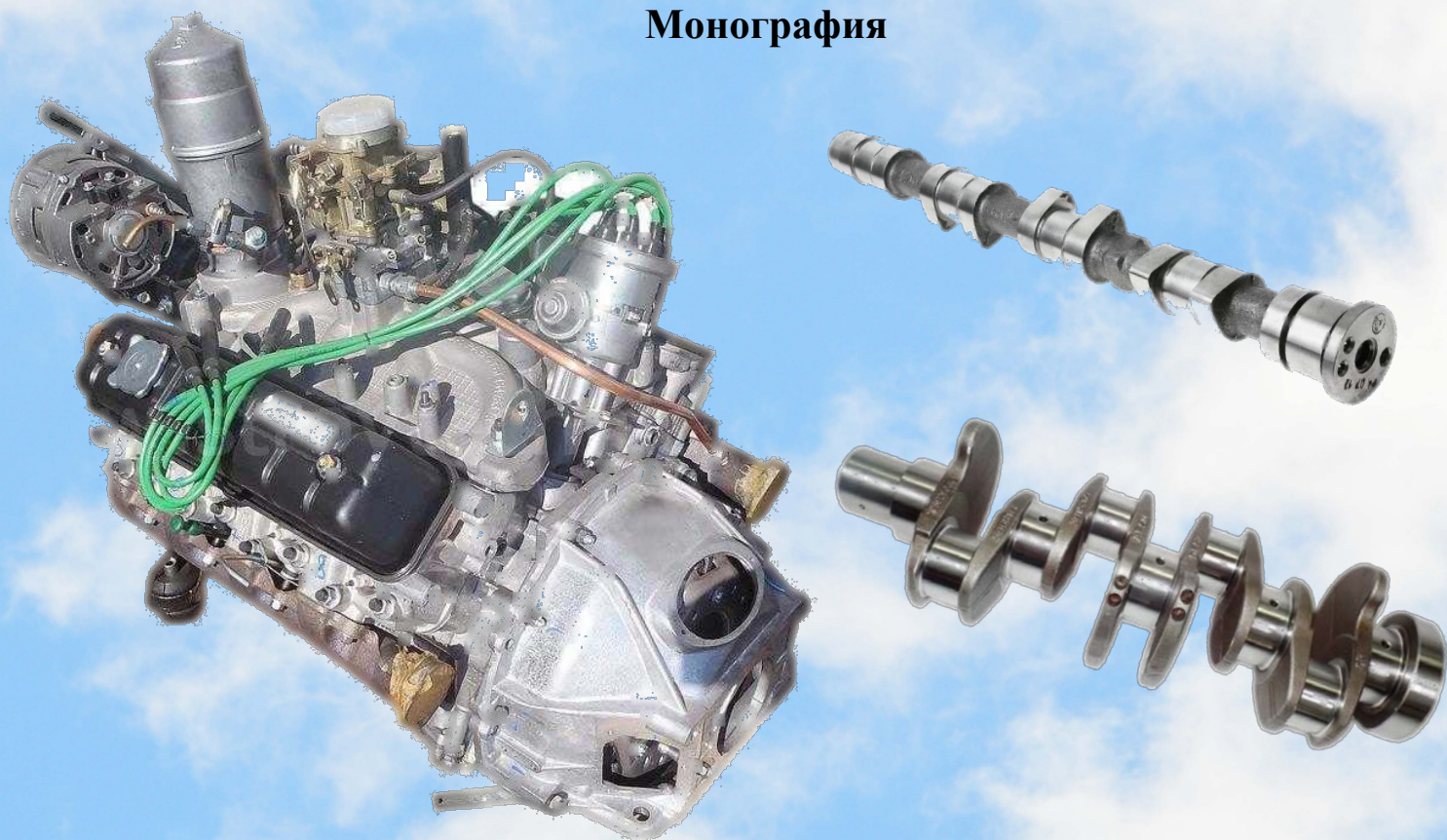


**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»**

Алексеев Н.С., Капорин В.А.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАЛОВ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ
МИКРОПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ**

Монография



Рубцовск 2023

УДК 621.922+621.923.02
А47

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор М.Н. Фархшатов
кандидат технических наук, доцент Е.А. Зверев

Алексеев Н.С., Капорин В.А. Совершенствование технологии восстановления валов сельскохозяйственной техники при размерной обработке микропористых покрытий на железной основе: Монография / Н.С. Алексеев, В.А. Капорин/ Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2023. – 226 с.

ISBN 978-5-6045267-7-4

Монография посвящена изучению комплекса вопросов, связанных с абразивной обработкой труднообрабатываемых микропористых покрытий на железной основе.

Приведены данные исследования процесса микрорезания единичными зернами из электрокорунда, карбида кремния и сверхтвёрдых материалов. Дается анализ механизма износа абразивного зерна в процессе микрорезания и в процессе шлифования.

Рассмотрены особенности износа и засаливания шлифовальных кругов из разных абразивных материалов при обработке микропористых покрытий на железной основе. Описаны результаты экспериментальных исследований и интенсификации процесса шлифования покрытий путём использования различных составов СОЖ. Даны рекомендации по выбору состава СОЖ на операциях шлифования восстанавливаемых валов с микропористыми покрытиями на железной основе.

В книге представлены результаты теоретико-экспериментальных исследований влияния элементов характеристики шлифовальных кругов и режимов резания на силы резания, производительность обработки и качество шлифованных деталей с микропористыми покрытиями.

Работа предназначена для научных и инженерно-технических работников ремонтно-обслуживающих предприятий, специализирующихся на решении проблем шлифования микропористых покрытий восстановленных деталей, и будет полезна аспирантам, магистрантам и студентам технических высших учебных заведений.

УДК 621.922+621.923.02

ISBN 978-5-6045267-7-4

Рубцовский индустриальный институт, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ . .	12
1.1 Техничко-экономическая эффективность восстановления валов сельскохозяйственной техники	12
1.2 Виды и характеристики микропористых покрытий восстановленных валов сельскохозяйственной техники	14
1.3 Возможности различных методов обработки микропористых покрытий восстановленных валов сельскохозяйственной техники . . .	20
1.3.1 Возможности электрических методов при обработке микропористых покрытий	20
1.3.2 Обработка микропористых покрытий точением	22
1.3.3 Обработка микропористых покрытий шлифованием . . .	24
1.4 Износ абразивных зерен при шлифовании и микрорезании покрытий	27
1.5 Стойкость шлифовальных кругов при обработке микропористых покрытий валов сельскохозяйственной техники	30
1.6 Возможности СОЖ в снижении износа и засаливания абразивного инструмента при шлифовании микропористых покрытий валов	34
1.7 Выводы по главе, цель и задачи исследования	36
Глава 2. НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ О ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ МИКРОПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ ВАЛОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ	38
2.1 Характер износа и засаливания кругов при шлифовании микропористых покрытий валов	38
2.2 Теоретическая зависимость для расчёта коэффициента шлифования .	42
2.3 Определение радиальной силы, действующей на абразивное зерно . .	45
2.4 Влияние скорости резания на касательные напряжения, возникающие в абразивных зернах при шлифовании покрытий валов	48
2.5 Влияние глубины резания и вида абразивного материала на	

касательные напряжения, возникающие в зёрнах при шлифовании покрытий валов	51
2.6 Модифицирование смазочно-охлаждающих жидкостей при шлифовании микропористых покрытий восстанавливаемых валов . . .	56
2.6.1 Смазочное действие СОЖ	57
2.6.2 Охлаждающее и смачивающее действие СОЖ	60
2.6.3 Моющее действие СОЖ	61
2.6.4 Диспергирующее действие СОЖ	63
2.6.5 Демпфирующее действие СОЖ	68
2.7 Выводы по главе	69
Глава 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	71
3.1 Общая методика размерной обработки микропористых покрытий восстанавливаемых валов	71
3.2 Описание экспериментальных установок для обработки микропористых покрытий восстанавливаемых валов	73
3.3 Выбор обрабатываемых и абразивных материалов и шлифовальных кругов для исследований	75
3.3.1 Выбор микропористых покрытий для исследований	75
3.3.2 Выбор шлифовальных материалов для проведения опытов по микрорезанию покрытий	77
3.3.3 Выбор шлифовальных кругов для экспериментов по размерной обработке покрытий	78
3.4 Методика испытаний на износостойкость единичных абразивных зерен при микрорезании покрытий	81
3.5 Методика исследований режущей способности шлифовальных кругов при размерной обработке покрытий	89
3.6 Методика измерения износа шлифовальных кругов при размерной обработке покрытий	92
3.7 Методика исследования микрорельефа и химического состава поверхностей абразивов и покрытий	95

3.8 Методика исследования засаливания шлифовальных кругов при размерной обработке покрытий.	97
3.9 Методика исследования шероховатости шлифованных поверхностей покрытий восстанавливаемых валов.	100
3.10 Методика исследования влияния среды на работоспособность шлифовальных кругов при размерной обработке покрытий	102
3.11 Методика измерений сил резания при шлифовании микропористых покрытий	105
3.12 Методика расчетов основных показателей процесса шлифования микропористых покрытий и их статистическая оценка	108
3.13 Методика производственных испытаний экспериментальных шлифовальных кругов и смазочно-охлаждающих жидкостей	112
3.14 Методика оценки себестоимости шлифовальной операции	113
3.15 Методика сравнительной оценки износостойкости микропористых покрытий, обработанных шлифованием	115
3.16 Методика испытаний восстановленных валов в условиях рядовой эксплуатации	119
Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА МИКРОРЕЗАНИЯ И ШЛИФОВАНИЯ ПЛАЗМЕННО-НАПЫЛЁННЫХ ВАЛОВ И ИХ АНАЛИЗ	122
4.1 Исследование кинетики износа корунда и карбида кремния при микрорезании плазменно–напылённых валов	122
4.2 Исследование износа корунда и карбида кремния в зависимости от скорости и глубины микрорезания плазменно-напылённых валов	127
4.3 Исследование износостойкости разных абразивов и их адгезионной активности при обработке плазменно-напылённых валов	134
4.4 Исследование работоспособности кругов и качества поверхностей плазменно-напылённых валов при продольном шлифовании инструментом из электрокорунда и карбида кремния в зависимости от скорости и глубины резания	139

4.5 Исследование работоспособности кругов и качества поверхностей плазменно-напылённых валов при продольном и врезном шлифовании инструментом из разных абразивов	149
4.6 Исследование влияния среды на работоспособность кругов и качество поверхностей плазменно-напылённых валов при шлифовании абразивным инструментом	159
4.7 Выводы по главе	167
Глава 5. РАСЧЁТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ НАРАЩИВАНИЕМ МИКРОПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ	170
5.1 Экономическая оценка кругов и определение рациональных режимов абразивной обработки микропористых покрытий	170
5.2 Результаты сравнительных лабораторных испытаний на износ	175
5.3 Результаты производственных испытаний экспериментальных шлифовальных кругов и СОЖ	177
5.4 Результаты испытаний восстановленных валов в условиях рядовой эксплуатации	178
5.5 Расчет экономической эффективности внедрения кругов и смазочно-охлаждающей жидкости для шлифования микропористых покрытий восстановленных деталей	180
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	187
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.	190
ПРИЛОЖЕНИЯ	207

ВВЕДЕНИЕ

В повышении эффективности ремонта сельскохозяйственной техники большое значение имеет вопрос качественного восстановления изношенных деталей и, в частности, валов как один из основных резервов снижения его себестоимости и увеличения ресурса отремонтированных машин [1-5]. При этом восстановлению подлежат не только размерные параметры детали, но и ее физико-механические и эксплуатационные характеристики, снизившиеся при эксплуатации. Таким образом, восстановление изношенных валов сочетается с их упрочнением.

Восстановленные валы по своим характеристикам не уступают новым, а в некоторых случаях даже превосходят их. По мнению ведущих ученых страны [1,2,4], основными направлениями дальнейшего совершенствования и развития ресурсосберегающих технологий следует считать разработку новых и совершенствование известных способов восстановления изношенных поверхностей деталей.

При восстановлении валов сельскохозяйственной техники большое распространение получают различные способы нанесения микропористых износостойких покрытий электроконтактной приваркой металлических порошков, электродуговой металлизацией, газотермическим напылением (плазменным, газопламенным и др.) [1,2]. Трудности, возникающие при механической обработке таких покрытий, сдерживают широкое распространение этих технологий и снижают эффективность их применения.

Размерная обработка микропористых покрытий чаще всего осуществляется шлифованием с применением тех же характеристик абразивных кругов, режимов резания и смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), что и при ремонте стальных и чугунных деталей. Однако специфические свойства этих покрытий (высокая пористость, наличие оксидов и шлаков, пониженная теплопроводность и т. д.) обуславливают высокую интенсивность износа и засаливания шлифовальных кругов (ШК) и низкую производительность обработки [6]. Так, при обработке

плазменных покрытий из-за повышенного износа ШК удельная производительность q – отношение объема снятого металла к объему изношенного инструмента – в 15-20 раз ниже, чем при шлифовании сталей. Быстрое падение режущей способности абразивного инструмента (АИ) затрудняет получение деталей высокого качества, вследствие чего эффективность применения технологий нанесения микропористых покрытий снижается.

Среди различных методов наращивания износостойких микропористых покрытий при восстановлении валов большое распространение получает плазменное напыление металлических порошков. Плазменно-напыленный слой обладает большинством специфических физико-механических свойств, наиболее затрудняющих шлифование этих покрытий.

Такое состояние объясняется тем, что до настоящего времени не существует научно обоснованных рекомендаций по выбору абразивных материалов кругов, СОЖ и режимов обработки микропористых покрытий. Но достаточно широкое применение этих покрытий и, в частности, на железной основе при восстановлении деталей вызывает необходимость иметь обоснованные сведения относительно технологии их размерной обработки.

В связи с этим исследование процесса восстановления валов сельскохозяйственной техники при размерной абразивной обработке микропористых покрытий на железной основе с выбором износостойких и инертных абразивных материалов, режимов резания и СОЖ, обеспечивающих высокие эксплуатационные показатели деталей, является актуальной задачей.

Существующие в технической литературе рекомендации по выбору абразивного материала и режимов резания носят в основном частный характер, нередко противоречивы и даны без научного и экономического обоснования. Научно-обоснованные рекомендации по использованию СОЖ применительно к микропористым покрытиям в литературных источниках полностью отсутствуют.

Повышение технико-экономических показателей абразивной обработки может быть достигнуто путем применения износостойких шлифовальных

материалов, рациональных режимов резания, а также эффективных составов смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ).

Проблема выбора рационального состава СОЖ особенно важна при шлифовании микропористых покрытий, где высокая теплосиловая напряженность процесса в сочетании с низкими теплофизическими свойствами контактируемых тел является основной причиной быстрой потери абразивным кругом режущих свойств и дефектов поверхностного слоя шлифованных деталей.

Данная работа характеризуется следующими показателями:

- определены параметры микрорельефа микропористых покрытий восстанавливаемых валов сельскохозяйственной техники после их размерной обработки, а также химический состав рабочих поверхностей абразивных зерен на основе широкого использования современных методов электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа;

- установлен комбинированный (смешанный) режим работы кругов с микроскальванием режущих зёрен при шлифовании микропористых покрытий, оказывающий положительное влияние на эксплуатационные свойства обработанных поверхностей восстанавливаемых валов;

- разработан новый состав смазочно-охлаждающей жидкости, позволяющий повысить эффективность технологического процесса шлифования микропористых покрытий и улучшить качество изделий и, в частности, снизить высоту микронеровностей (шероховатость);

- определены закономерности изменения показателей обработки от различных видов и марок абразивных материалов и режимов резания и обоснованы параметры технологического процесса шлифования микропористых покрытий восстанавливаемых валов сельскохозяйственной техники.

Основные положения монографии обсуждались на Всероссийских научно-технических конференциях «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы» (г. Рубцовск, 2011... 2018 г.), на V международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2010 г.), на Всероссийской научно-технической конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых «Проблемы социального и научно-технического развития в современном мире» (г. Рубцовск, 2009... 2019 г.), на Всероссийских научно-практических конференциях с международным участием «Состояние и перспективы развития социально-культурного и технического сервиса» (Бийск, 2013...2014 г.), на IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (Иркутск, 2014 г.), на 16-й международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» (Санкт-Петербург, 2014 г.), на IV Всероссийской научно-технической конференции «Инженерные исследования и достижения – основа инновационного развития» (Рубцовск, 2014 г.).

По материалам монографии опубликовано 28 печатных работ, в том числе 1 статья в журнале, входящем в международную базу цитирования Scopus, 14 статей в изданиях рекомендованных ВАК РФ, получен патент на изобретение и свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Монография состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 152 наименований и приложений. Работа изложена на 226 страницах машинописного текста, содержит 81 рисунок, 24 таблицы.

Целью настоящей работы является совершенствование технологии размерной обработки микропористых покрытий восстанавливаемых валов сельскохозяйственной техники определением наиболее износостойких и инертных абразивных материалов, рациональных режимов резания и эффективной СОЖ.

Достижение поставленной цели было связано с решением следующих задач:

1. Обосновать теоретически и подтвердить экспериментально возможность повышения показателей процесса шлифования микропористых покрытий на железной основе при восстановлении валов сельскохозяйственной техники.

2. Определить основные закономерности технологии абразивной обработки микропористых покрытий восстановленных валов и на их основе установить рациональную характеристику круга по комплексу показателей шлифования.

3. Обосновать рациональные режимы процесса абразивной обработки микропористых покрытий посадочных шеек валов и состав СОЖ, обеспечивающих высокую точность их геометрической формы и низкую шероховатость и исследовать износостойкость восстановленных валов в лабораторных и производственных условиях.

4. Произвести производственную проверку результатов исследований и оценить экономическую эффективность от внедрения новой технологии в производство.

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Технико-экономическая эффективность восстановления валов сельскохозяйственной техники

В настоящее время агрегатный ремонт является основным методом восстановления работоспособности с/х машин на предприятиях, в полевых условиях, в дилерских центрах [7]. Однако для ряда металлоемких, ответственных и дорогих узлов и агрегатов машин (ДВС, ТНВД, трансмиссии и др.), по-прежнему используют традиционную «классическую» технологию ремонта - с разборкой агрегата, дефектовкой, поиском и установлением изношенной детали (сопряжения) [8]. В современных с/х машинах такими деталями являются коленчатые и распределительные валы ДВС и компрессоров, роторы турбокомпрессоров и др., шейки которых обычно работают в условиях граничной смазки, подвергаются абразивному износу и деформации, что приводит к изменению их сопрягаемых размеров, формы и шероховатости [6].

Рост технического оснащения обусловил пересмотр критериев ремонта этих деталей. Огромный парк с/х техники ежедневно требует значительного количества запасных частей и, в частности валов, поставка которых является делом не простым и в настоящее время крайне дорогим. Вот только два примера. До 1992 г. новый коленчатый вал двигателя ЗМЗ-53 стоил 35 руб., сейчас он стоит 15371 руб. – увеличение цены в 439 раз, блок цилиндров этого же двигателя – соответственно 66 и 34900 руб. Примеры непомерного увеличения цен на запасные части можно продолжать называть по каждой марке машины.

Свыше 85 % деталей тракторов, автомобилей, самоходных с/х машин, дорожно-строительной техники, оборудования ЖКХ и других механизмов становятся уже неработоспособными при износах 0,2...0,3 мм, и по исследованиям ФГБНУ ГОСНИТИ их экономически целесообразно восстанавливать. По исследованиям, проведенным этим же институтом до 60 % всех отбракованных деталей экономически выгодно восстанавливать.

Объём восстановления деталей в таких экономически развитых странах как США и Япония составляет от 30 до 40 % от общего расхода запасных частей при ремонте техники, в то время как в России этот показатель не превышает 7 % [9].

В такой ситуации проблема восстановления изношенных валов приобретает уже новое значение. Предлагается более короткая и экономически выгодная технологическая цепочка: изношенная машина – ремонтный завод – потребитель, вместо более дорогой, когда изношенные валы отправляются в переплавку и безвозвратно теряется до 30 % металла [10].

Следует обратить внимание на то, что по сравнению с изготовлением новых валов число операций обработки при восстановлении сокращается в 3...8 раз. На создание соответствующих производств требуется в 2...2,5 раза меньше капитальных вложений, чем на создание производств по изготовлению запасных частей [10].

Рациональность восстановления валов – низкая металлоемкость. На восстановление деталей требуется в 20...30 раз меньше металла, чем на изготовление новых. Так, например, коленчатый вал дизеля ЯМЗ-240Б делают из заготовок массой 340 кг, при этом около 200 кг дефицитной стали идёт в отходы. В то же время на восстановление этого коленчатого вала требуется не более 8 кг наплавочной проволоки. Себестоимость восстановления составляет 30...50 % преysкурантной цены нового [10].

В повышении эффективности ремонта с/х техники большое значение имеет вопрос качественного восстановления изношенных деталей и, в частности, валов как один из основных резервов снижения его себестоимости и увеличения ресурса отремонтированных машин.

В ремонтном производстве особое место занимает упрочнение за счет восстановления деталей машин прочными износостойкими покрытиями, в частности путем нанесения на их поверхность микропористого слоя. В ряде случаев такие покрытия являются более эффективными по сравнению с другими способами наращивания. Особенно это ощутимо при восстановлении деталей с малыми предельными износами, а также деталей, работающих в условиях

граничного трения, например, шейки коленчатых и распределительных валов ДВС [2].

Рассмотрению физико-механических свойств, химического состава и строения микропористых покрытий восстановленных валов с/х техники и будет посвящён следующий параграф.

1.2 Виды и характеристики микропористых покрытий восстановленных валов сельскохозяйственной техники

Наибольшее распространение в последние годы при восстановлении валов с/х техники нанесением микропористых покрытий получили электроконтактная приварка металлических порошков [11-15] и различные способы газотермического напыления: газопламенное [16-18], детонационно-газовое [19, 20], плазменное [21-25] и электродуговая металлизация [26-31].

Применение для наращивания изношенной поверхности того или иного способа определяется эксплуатационными требованиями к качеству слоя, условиями работы детали, а также рациональной толщиной слоя, получаемого при соответствующем способе восстановления.

Указанные способы наращивания позволяют получать для каждого конкретного вида нагружения соответствующие физико-механические свойства нанесенного слоя, обеспечивающие максимальный ресурс работы сопряжений.

Быстрое развитие и применение указанных способов восстановления изношенных деталей явилось следствием особых свойств микропористых покрытий накапливать в порах смазку с последующей подачей ее в зазор сопряжения в период «масляного голодания» [2, 31]. В результате этого в 2...5 раз возрастает износостойкость подшипникового сопряжения, а также стойкость его против схватывания и появления «задиров» [11].

Однако трудности, возникающие при размерной обработке микропористых покрытий, сдерживают широкое внедрение в ремонтное производство этих способов наращивания [1,6].

В зависимости от физико-механических свойств микропористых покрытий их можно разделить на две группы: «мягкие» и «твердые» [6]. К первой группе

относятся покрытия с исходным материалом на основе углеродистых сталей [26-28], композиционных порошков [11] и высокоуглеродистых легированных сплавов на железной основе и различных порошковых композиций из них [24,25] с твердостью 20...55 HRC, а ко второй – покрытия из порошковых сплавов интерметаллидов [32,33], оксидно-металлических порошков [19], композиционных порошков на основе оксидов и карбидов [20] с твердостью более 55 HRC.

С точки зрения эксплуатационных свойств наибольший интерес для ремонтного производства представляют «мягкие» антифрикционные покрытия средней и высокой пористости. Поэтому рассмотрим виды и характеристики «мягких» микропористых покрытий восстановленных деталей с/х техники (таблица 1.1).

Электроконтактная приварка металлических порошков (ЭКП) – эффективная ресурсо- и энергосберегающая технология восстановления деталей с малыми износами. Этот метод используют при восстановлении коленчатых и распределительных валов ДВС [11-15], водяных насосов поилок и компрессоров [13], роторов турбокомпрессоров [15], а также многих других деталей с/х техники.

Для обеспечения высокой износостойкости покрытий, полученных ЭКП, и, в частности, шеек коленчатых валов ДВС, используются порошковые композиции на железной основе в виде порошково–полимерных лент (таблица 1.1) с добавкой порошков высоколегированного чугуна и никелехромового сплава [12], либо антифрикционных присадок – порошков меди или олова [11,13].

Таблица 1.1 - Свойства «мягких» микропористых покрытий восстановленных валов с/х техники

Способы получения покрытий	Исходный материал	Пористость, %	Твердость, HRC (HB)
Электроконтактная приварка металлических порошков	Порошк. композиция: железный порошок ПЖРВ.200.28 (80%) + медный порошок ПМС-Н (20%) + связующий полимер (3%) [11];	3...12	89...96 HB
	Порошк. композиция: желез. порошок ПЖ-3С (50%) + ФБХ-6-2 (30%) + ПГ-СР-2 (20%) [12];	-	50...54 HRC
	Порошок на железной основе ПГ-С1 [14]	4...6	50...55 HRC

Электродуговая металлизация	Стальная проволока Св-10Г2С, Нп85, Х20Н80 [26,28]	-	-
	Порошковая проволока ППЖМ-2, ППЖМ-63, ПП-ТП-1 [31]	11...13	-
	Стальная проволока Св-08Г2С [29]	3...8	-
	Стальная проволока Св-15ГС, Нп-30ХГСА [27]	-	-
	Стальная проволока 1,6Св-08Г2С [36]	1...3	-
Газопламенное напыление	Порошки на железной основе: «Сормайт-1», УС-25 и др. [18]	-	-
	Порошковый сплав на медной основе ПГ-19М-01 [16]	-	-
	Самофлюс. сплав на никелевой основе ПГ-19Н-01 [17]	-	-
Плазменное напыление	Порошк. композиция: высокоуглерод. легиров. сплав на железной основе ПГ-С27 (65 %) +алюминиевая бронза ПГ-19М01 [24,25]	11...13	34...36 HRC
	Порошк. композиция: порошок на железной основе ПРХ18Н9 (75 %) + интерметаллид ПН85Ю15 (25 %) [21]	-	32...34 HRC
	Порошк. сплав на медной основе ПГ-19М-01 [23];	13	360 HV
	Порошок никель-алюминиевого сплава ПН70Ю30 [24]	4...6	-

Установлено, что при этом в покрытиях возрастали: в первом случае- доля карбидных составляющих (до 63...72%), а во втором – твердость до HRB 45...52.

С целью лучшего закрепления и фиксации порошков на поверхности детали при ЭКП применяют [14] металлическую сетку, а порошки смешивают с канифолью. Это не только улучшает прочность сцепления покрытия с основным металлом детали, но и обеспечивает высокую твердость покрытия – HRC 50...55.

Процессы *газотермического напыления (металлизации)* состоят в расплавлении напыляемого материала, распылении его струей сжатого воздуха или газа и осаждении на поверхности изделий путем удара и деформации частиц.

Плавление исходного материала и разбрызгивание расплавленных частиц происходит в струе сжатого воздуха, где возникает химическое взаимодействие распыленных частиц с кислородом и азотом воздуха. Образуется большое количество оксидов и нитридов [34,35]. Часть компонентов исходного материала выгорает, образуя шлаковые пленки. Химический состав исходных материалов претерпевает значительные изменения в зависимости от способа и режимов напыления.

Металлические частицы напыленного материала имеют сложный фазовый состав. В напыленной стали кроме сорбита, присущего структуре исходной стальной проволоки, обнаруживаются составляющие троосто-сорбита, троосто-мартенсита и мартенсита [34]. Фазовые превращения приводят к повышению твердости структурных составляющих исходного материала (таблица 1.2).

Как видно, твердость структурных составляющих напыленной стали повышается до двух раз и более. Повышение твердости вызывается закалкой частиц, происходящей в результате быстрого охлаждения их воздушной струей, а также наклепом металла, который имеет место при ударе, происходящем в момент соприкосновения летящей частицы с напыляемой поверхностью [34,35]. Однако твердость микропористых покрытий в 2...3 раза меньше, чем твердость закаленной стали 45 и покрытий, получаемых наплавкой под легирующим флюсом (таблица 1.2).

Таблица 1.2 - Твердость структурных составляющих напыленной стали

Металл	Структурные составляющие	Твердость, НВ
Исходная стальная проволока	Сорбит	238
	Троосто-сорбит	300
	Троосто-мартенсит	393
Напыленная сталь	Мартенсит	535
	Оксиды	240...265
Сталь 45, закаленная	-	477...601
Наплавка под легирующим флюсом	-	515...555

Металлизационные слои получают пористыми. Пористость весьма резко сказывается на физико-механических свойствах напыленного металла – его упругости, когезионной прочности, твердости, тепло- и температуропроводности и т. д. Изменяя режимы напыления, можно регулировать степень пористости покрытий в довольно широких пределах. При оптимальных режимах напыления пористость составляет 10...18 % [34,35].

Электродуговая металлизация в мировой практике восстановления деталей получила значительное распространение. Этим методом можно восстанавливать около 60 % наименований деталей с износостойкостью выше новых [29].

В последние десятилетия разработаны технологии восстановления электродуговой металлизацией таких деталей с/х техники как шейки коленчатых и распределительных валов ДВС [26,27,28] и компрессоров [29], тормозных барабанов тракторов [36] и др.

Газопламенное напыление отличается от других существующих методов простотой, высокой надежностью и доступностью. К настоящему времени существуют технологии восстановления этим способом шеек коленчатых валов ДВС [18], подшипника ротора турбокомпрессора дизеля СМД-60 [16], пробок молочных кранов [17] и других деталей с/х техники.

Плазменное напыление является одним из перспективных способов получения микропористых покрытий при восстановлении изношенных деталей.

Для плазменных покрытий характерна чешуйчатая, слоистая структура с высокой неоднородностью физико-механических свойств (рисунок 1.1). Это характеризуется развитой поверхностью стыков между частицами и повышенным содержанием оксидных включений [37].

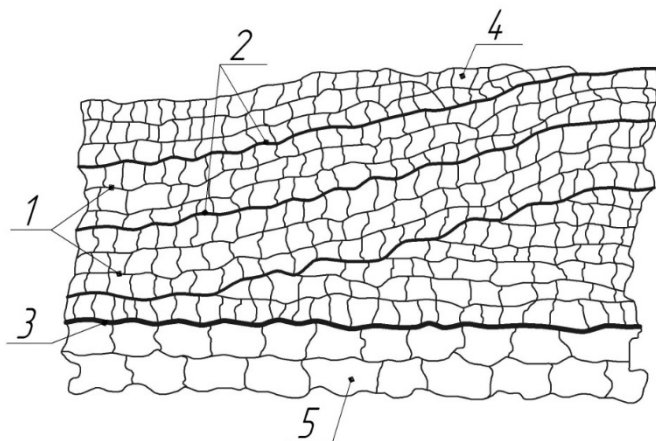


Рисунок 1.1 - Схематическое изображение структуры плазменного покрытия [34]: 1- граница между частицами напыленного материала; 2 – граница между слоями; 3 – граница между покрытием и деталью; 4 – частица напыленного материала; 5 – поверхность детали

Плазменные покрытия обладают повышенной твердостью, хрупкостью и пониженной теплопроводностью из-за оксидных включений и пор. Твердость этих покрытий в зависимости от состава исходного материала может быть получена в пределах 30...60 HRC и с пористостью до 12 % [21].

Перечисленные свойства плазменных покрытий делают их особенно пригодными для восстановления и упрочнения деталей с/х техники, работающих при большом давлении и высокой температуре. К числу их относятся коленчатые валы ДВС [24,25], валики водяного насоса двигателя СМД-14 [25], юбки

алюминиевых поршней [22], нажимной диск коробки передач тракторов К-700 [23] и др. К настоящему времени ВНИИТУВИД «Ремдеталь» и другими организациями разработано свыше 100 технологий восстановления деталей этим способом [21].

При восстановлении деталей рассмотренными способами можно получать покрытия с относительно малым припуском на обработку – 0,5...1,5 мм на сторону [18].

Из вышеперечисленной номенклатуры деталей следует, что наибольший объем работ по наращиванию «мягких» микропористых покрытий приходится на детали типа «вал» и, в частности, шейки коленчатых и распределительных валов ДВС. При этом указанные валы восстанавливают, как правило, покрытиями на железной основе.

Получаемые покрытия являются труднообрабатываемыми. Это связано с теми изменениями в составе и строении, которые вызваны процессами интенсивного окисления частиц металла в процессе наращивания, образованием новых фаз, неоднородностью и пористостью слоя и т.д.

Так, при обработке плазменных покрытий из-за повышенного износа ШК удельная производительность q – отношение объема снятого металла к объему изношенного инструмента – в 15-20 раз ниже, чем при шлифовании сталей. Кроме того происходит интенсивное засаливание круга, т.е. перенос частиц обрабатываемого материала на рабочую поверхность АИ. В этом случае процесс резания резко ухудшается.

Таким образом, рассмотрев физико-механические свойства покрытий при восстановлении валов можно сделать следующие выводы:

1. Микропористые покрытия обладают повышенной твердостью, хрупкостью и пониженной теплопроводностью из-за наличия оксидов и пор.

2. Имеет место значительная химическая и структурная неоднородность распределения нанесенного металла и сложный фазовый состав.

3. Покрытия восстановленных валов, полученные нанесением микропористых слоев, имеют в своем составе неметаллические включения в виде шлаков, нитридов, карбидов, оксидов в прочной вязкой матрице.

Указанные специфические физико-механические свойства «мягких» микропористых покрытий на железной основе (далее просто покрытий) при наращивании изношенных деталей относят их в ряд труднообрабатываемых.

Для обеспечения высоких технико-экономических показателей восстановления валов с/х техники необходимо обосновать и выбрать высокоэффективный метод размерной обработки этих покрытий.

1.3 Возможности различных методов обработки микропористых покрытий восстановленных валов сельскохозяйственной техники

В связи с освоением новых высокопрочных и высокотвердых материалов в машиностроении и ремонтном производстве съём припуска традиционными методами обработки снижается. На смену им приходят электрофизикохимические методы размерной обработки металлов.

1.3.1 Возможности электрических методов при обработке микропористых покрытий

Электрофизикохимические методы дают возможность применять дешевый и несложный обрабатывающий инструмент, широкий диапазон режимов, охватывающий обработку от черновой до отделочной, механизацию, автоматизацию операций и улучшение условий труда.

В зависимости от характера воздействия электрического тока на обрабатываемую деталь эти методы подразделяются на три основные группы: электрохимическая (ЭХО), комбинированная и электроэрозионная.

Эффективность ЭХО заключается в возможности обрабатывать детали сложной формы и с минимальным износом инструмента. К недостаткам метода можно отнести высокую энергоёмкость процесса, зависимость качества обработанной поверхности от макронеровности, коррозионное воздействие

электролита на поверхность пор [38]. Поэтому размерная ЭХО покрытий ни в ремонтном производстве, ни в машиностроении не применяется.

Комбинированный метод характеризуется сочетанием электрохимического, электроэрозионного и механического воздействия на металл обрабатываемой детали [39]. Комбинированную обработку различают по виду используемого инструмента:

а) при применении инструмента из стали и чугуна – имеет место анодно-механическая обработка;

б) когда же используются абразивные (алмазные) токопроводящие круги на металлической основе – имеет место электроабразивная обработка.

Анодно-механическим методом осуществляется съём припуска за счёт анодного растворения, электроэрозионного разрушения и механического удаления окисной плёнки инструментом.

Достоинством этих методов является то, что на одном и том же оборудовании можно выполнять как предварительные, так и чистовые операции.

Однако и при использовании комбинированных методов имеет место интенсивное коррозионное воздействие электролита на покрытия. Кроме того, отмечалось интенсивное растравливание зерен микропористого слоя, что обуславливало получение грубой шероховатости поверхности ($Ra = 2,5 \dots 6,3$ мкм).

Другими недостатками комбинированной обработки являются: слабая технологичность применяемого электролита, большой износ инструмента на форсированных режимах и др. [38].

При электроэрозионной обработке (электроискровая, электроимпульсная, электроконтактная) припуск удаляется в результате теплового действия электрических разрядов на поверхность детали [39].

Для обработки деталей, восстановленных металлопокрытиями, электроискровой и электроимпульсный способы неприемлемы из-за малой производительности и большого износа инструмента [39].

Электроконтактная обработка (ЭКО) обладает более широким технологическим диапазоном по производительности, качеству обработанной

поверхности и по удельному расходу энергии [40]. Однако эти характеристики получены при обработке деталей, восстановленных наплавкой с большими припусками. Применение ЭКО для покрытий с малыми припусками на обработку не рационально из-за повышенной зоны термовлияния и низкого качества обработанной поверхности ($Ra = 25...50$ мкм) [41]. ЭКО может быть использована лишь в качестве предварительной операции при съёме больших припусков (2 мм и более), а также при обработке деталей с шероховатостью поверхности вне класса.

На основании краткого анализа возможностей электрических методов обработки покрытий можно сделать следующие выводы:

1. В связи с получением высокопрочных и высокоизносостойких металлопокрытий деталей машин после их восстановления стало необходимым применение электрофизикохимических методов обработки.

2. Применение этих методов к покрытиям нерационально по следующим причинам:

а) при ЭХО происходит интенсивное коррозионное воздействие электролита как на поверхностный, так и на глубинные слои;

б) ЭКО сопровождается высоким температурным разогревом детали и получением грубой шероховатости поверхности.

3. Всё это обусловило рассмотреть и проанализировать механическую обработку покрытий.

Обработку восстанавливаемых валов с покрытиями чаще всего осуществляют точением и шлифованием.

1.3.2 Обработка микропористых покрытий точением

По уровню достигаемых скоростей резания при 20-ти минутной стойкости инструмента пористые материалы можно отнести к классу труднообрабатываемых. Так, например, скорость резания соответствующая 20-ти минутной стойкости твердосплавного (ВК8) резца, при обработке отожженной

стали 40Х составляет 200 м/мин, из чугуна СЧ15 – 170 м/мин, а из пористого железуграфита (железо + 2 % графита) – только 48 м/мин [42].

Исследования [43] показали, что резцы из быстрорежущих сталей и минералокерамики (ЦМ-332) непригодны для обработки пористых материалов из-за чрезвычайно низкой стойкости этого инструмента. Резцы, оснащенные твёрдыми сплавами группы ТК, также имеют пониженную стойкость [43].

Резцы из эльбора-Р и гексанита-Р обладают более высокой стойкостью, но требуют малых подач и высоких скоростей резания, а следовательно, повышенной частоты вращения детали [40]. Вращение же при обработке таких массивных деталей как коленчатый вал двигателя ЯМЗ-240 массой в 150 кг, да ещё со смещением на величину радиуса кривошипа, производится обычно с частотой не выше 60 мин^{-1} . Кроме того, отсутствует специальное оборудование для обработки шеек коленчатых валов резцами [40].

При обработке точением пористых материалов вследствие чрезмерного затупления режущих инструментов переуплотняются поверхностные слои материала и ухудшаются антифрикционные свойства изделий. В связи с этим износ резцов по задней грани не должен превышать 0,4...0,5 мм [43]. Но при точении пористых поверхностей инструменты изнашиваются намного интенсивнее, чем при обработке литых металлов и сплавов. Это объясняется многими причинами. К числу наиболее существенных относятся следующие:

1. Нестабильность процесса резания обусловленная несплошностью обрабатываемого материала, вследствие чего происходит микровыкрашивание частиц материала и инструмента. Наличие пористости 5 % и выше отрицательно сказывается на стойкости инструмента, так как режущая кромка непрерывно подвергается микроударам, что ускоряет его затупление [43].

2. Пониженная тепло- и температуропроводность пористых материалов (в 2...3 раза ниже, чем компактных), приводящая к концентрации выделяющегося при резании тепла, окислению карбида вольфрама в составе твёрдых сплавов и их повышенному износу [44].

3. Свойство пористых материалов окисляться с образованием твердых частиц оксидов железа, способствующих абразивному изнашиванию режущего инструмента наряду с другими видами износа (адгезионный, диффузионный и др.) [45].

Таким образом, исследования обрабатываемости точением покрытий свидетельствуют о том, что непродолжительные периоды стойкости инструмента из существующих инструментальных материалов, не могут удовлетворить растущие технико-экономические требования. Поэтому обработка точением не может быть принята в качестве рационального способа обработки покрытий.

Отсюда следует, что необходимо изыскать другой способ обработки, позволяющий эффективно обрабатывать микропористые металлопокрытия.

Наибольший интерес из существующих методов обработки покрытий с небольшими допусками и требующих высокой точности и низкой шероховатости является шлифование.

1.3.3 Обработка микропористых покрытий шлифованием

Абразивная обработка пористых металлокерамических материалов оказывает положительное влияние на шероховатость поверхности, а также на изменение их твердости и износостойкости. Так, например, при шлифовании пористых материалов микротвердость поверхности повышается на 20...30 % [46].

При шлифовании пористых спеченных материалов с пористостью 10...30 % в поверхностном слое развиваются растягивающие остаточные напряжения первого рода, которые способствуют повышению износостойкости изделий [47]. Величина этих напряжений на поверхности, достигая 50...60 МПа, превосходит предел прочности покрытий, что объясняется высоким упрочнением поверхностного слоя (наклёп и уплотнение).

Пористые материалы характеризуются повышенной скоростью охлаждения их поверхности, а поэтому, как показали опыты [48], более устойчивы к отпуску исходной структуры поверхностного слоя при шлифовании по сравнению с компактными материалами.

Таким образом, можно констатировать, шлифование – эффективный метод технологического управления эксплуатационными свойствами покрытий. Однако обработка их шлифованием затруднена из-за быстрого износа и засаливания кругов [1,32,33,35]. Абразивные круги из электрокорундов и карбидов кремния при шлифовании покрытий имеют низкий период стойкости, который составляет 1...3 мин [6,33,49-51]. Кроме того, затупление и засаливание кругов вызывают вибрации станка [50] и на обрабатываемой поверхности возникает огранка [33]. Вследствие этого обработанная поверхность становится грубой и температура микропористого слоя резко повышается. Из-за сильного перегрева в покрытиях появляются прижоги и трещины [35,53].

Нашими исследованиями установлено [52], что при шлифовании покрытий электрокорундовыми и карбидкремниевыми кругами адгезионные налипсы появляются уже при первых секундах работы круга, а удельная производительность оказалась в десятки раз ниже, чем при шлифовании сталей.

Имеющиеся в технической литературе рекомендации по выбору абразивов носят в основном частный характер, нередко противоречивы. Так, например, одни авторы рекомендуют производить шлифование покрытий кругами из электрокорунда [29,32,54,55], другие – из карбида кремния [53,55], третьи – из монокорунда [27,28], четвертые из синтетических алмазов [35] и т.д. без указания марок абразивов. Однако известно, что существуют различные модификации электрокорундов, карбидов кремния и других абразивов. При этом эксплуатационные свойства кругов, например, из электрокорундов белого и хромотитанистого или из карбида кремния зеленого и черного существенно различаются [6].

Существующие рекомендации по выбору режимов резания [32,53] также носят укрупненно-ориентировочный характер и зачастую противоречивы. Применение таких режимов в процессе шлифования покрытий приводит к возникновению трещин, сколов и дополнительных термических напряжений.

Рекомендуемые виды абразивных материалов для обработки покрытий и режимы резания даны, как правило, с точки зрения достижения требуемой

шероховатости [1,35,37 и др.], без учета других основных показателей процесса шлифования таких как стойкость и износ круга, производительность и др.

Несколько лучшие результаты были достигнуты при использовании кругов из сверхтвердых материалов (СТМ) - эльбора и алмаза. Так, шлифование напыленных покрытий алмазными кругами на органической и керамической связках [50,51] протекает стабильно: засаливание кругов отсутствует, вибрации станка и огранка не возникают. Однако указанные алмазные круги характеризуются повышенным удельным износом [50,51] – отношение массы изношенного рабочего слоя к массе снятого материала. Применение алмазных кругов на металлических связках уменьшает их удельный износ в 2...5 раз по сравнению с кругами на органической и керамической связках [33], так как достаточно прочная металлическая связка прочно удерживает зерна. Однако исследования показали [33,51], что алмазные круги на металлической связке при обработке покрытий быстро засаливаются.

Из вышеизложенного следует, что в целом алмазные круги хорошо зарекомендовали себя при обработке покрытий, однако они значительно дороже абразивных. Поэтому рекомендуется [50] в каждом конкретном случае производить сравнительный расчет себестоимости обработки при использовании абразивного и алмазного инструмента. Так, например, в работе [50] было доказано, что при обработке покрытий на основе железа твердостью 200...240 НВ использование алмазных кругов взамен абразивных экономически нецелесообразно.

К тому же круги из СТМ необходимого диаметра (600...900 мм) для обработки таких деталей как, например, коленчатые валы автотракторных двигателей, абразивная промышленность не выпускает. Поэтому покрытия в настоящее время обычно обрабатывают абразивными кругами с частой правкой инструмента [32,53].

Приведенные обстоятельства ограничивают возможности широкого применения порошковых материалов и технологий для восстановления большой

номенклатуры деталей, несмотря на высокое качество и послевосстановительный ресурс [3,4].

Таким образом, рассмотрев особенности процесса шлифования покрытий восстанавливаемых валов можно сделать следующие выводы:

1. Шлифование покрытий сопровождается интенсивным износом и засаливанием абразивных кругов, оказывающих существенное влияние на показатели обработки: стойкость инструментов, удельную производительность, силы резания и др.

2. В настоящее время отсутствуют систематизированные данные по сравнительной оценке режущих свойств шлифовальных материалов при обработке покрытий.

3. Для повышения эффективности процесса шлифования микропористых покрытий необходим научно-обоснованный выбор абразивного материала кругов с учетом их износостойкости и адгезионной активности по отношению к этим покрытиям.

В технической литературе в настоящее время отсутствуют публикации по исследованию механизма износа АЗ и адгезионных явлений при шлифовании покрытий. Однако трудности встречающиеся при абразивной обработке покрытий требуют научно-обоснованного выбора шлифовальных материалов. Поэтому рассмотрим известные виды износа кругов при обработке однородных материалов.

1.4 Износ абразивных зерен при шлифовании и микрорезании покрытий

В зависимости от условий шлифования изнашивание АИ происходит в виде [56,57]: а) истирания зёрен, приводящее к возникновению площадок износа (рисунок 1.2,а); б) микроразрушения АЗ в виде поверхностного микроскалывания (рисунок 1.2,б) или объемного разрушения зерна (рисунок 1.2, в); в) полного вырывания зерен из связки (рисунок 1.2,г).

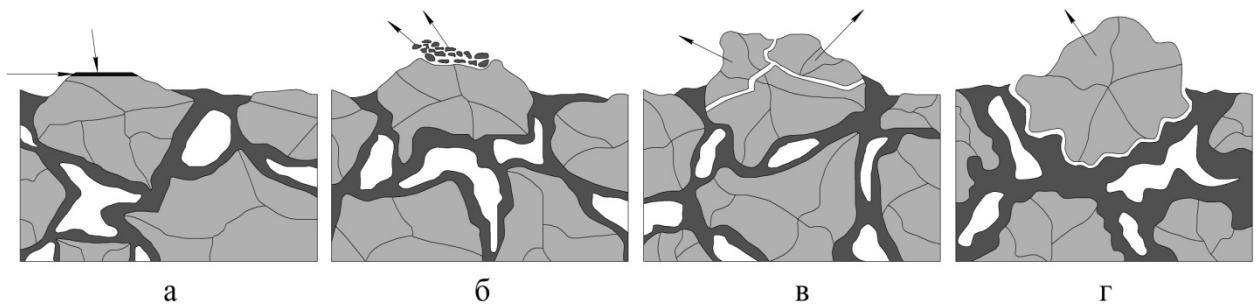


Рисунок 1.2 - Виды износа абразивного зерна [56]: а – появление износных площадок; б – поверхностное выкрашивание; в – объемное разрушение; г – вырывание зерен из связки

В результате проведенных исследований [58,59] установлено, что вершины АЗ (рисунок 1.2,а) подвергаются следующим видам износа: диффузионному, адгезионному, абразивному, химическому и температурному.

Диффузионный износ заключается в растворении абразивного материала в материале обрабатываемой заготовки. Основные причины этого износа: химическое сродство между материалами и высокая контактная температура. При шлифовании, например, стали кругами из карбида кремния диффузионный износ является преобладающим, о чем свидетельствуют гладкие, отполированные площадки на зернах [57-59].

Адгезионный износ развивается при шлифовании адгезионно-активных материалов. Суть его в том, что в контакте абразив-металл происходит схватывание (адгезия) разноименных материалов [59,60]. Этот вид изнашивания определяется интенсивностью адгезионного взаимодействия и микропрочностью абразивов. Адгезионный износ наблюдается, например, при шлифовании титана кругами из карбида кремния [59,61].

Абразивный износ происходит в том случае, когда при шлифовании на высоких скоростях твердые микровключения обрабатываемого материала производят микросрезы на поверхности сильно разогретого зерна [59,62]. Царапины на задней поверхности зерен – свидетельство абразивного износа.

Химический износ происходит в результате протекания химических реакций в зоне шлифования между абразивным, обрабатываемым материалом и средой [63]. Особенно высока вероятность протекания химических реакций при

шлифовании химически активных металлов, например, титана [60,61]. Наличие изъеденных мест на площадке износа – признак химического износа.

В ряде случаев существенное влияние на изнашивание АЗ оказывают тепловые удары – *температурный износ*, особенно при использовании СОЖ, обладающих высокими охлаждающими свойствами [64].

Все рассмотренные виды износа АЗ и соответствующие им состояния рельефа характерны для шлифования однородных материалов. Однако состояние рельефа изношенных поверхностей АЗ при шлифовании покрытий, позволяющего раскрыть механизм износа материала абразива и наметить пути по его снижению, как уже отмечалось, никем не исследовано.

Получение данных об износостойкости абразивных материалов при шлифовании непосредственно кругами позволяет установить лишь самые общие положения об износе абразивов, так как невозможно создать одинаковые условия нагружения разных зерен. Для получения объективных данных об износостойкости абразивных материалов обычно проводятся опыты в условиях микрорезания (микро-царапания) отдельными АЗ [65-69]. В технической литературе нам не встретились работы по микрорезанию покрытий, однако имеются отдельные публикации по исследованию микрорезания однородных материалов.

Так, в работе [65] микрорезание оказалось эффективным при исследованиях изменений микротвердости и микрохрупкости электрокорунда и карбида кремния при резании-царапании титановых сплавов. Используя опыты по микрорезанию удалось исследовать [66] износостойкость АЗ из электрокорундов и эльбора при микроцарапании конструкционной, коррозионностойкой и быстрорежущей сталей. Микрорезание выполнялось также и при резании-царапании закаленной стали 45 АЗ из формокорунда с целью выявления механизма его износа [68] и во многих других случаях [67,69]. Эти опыты значительно упрощают эксперименты и позволяют оценить отдельно, без участия связки, режущие свойства АЗ.

Таким образом, рассмотрев износ АЗ при шлифовании можно сделать следующие выводы:

1. Одним из перспективных путей решения задачи повышения эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов при обработке покрытий восстанавливаемых валов является всестороннее исследование износа АЗ, отыскание особенностей и закономерностей его протекания.

2. Интенсивность износа шлифовального инструмента можно снизить прежде всего путем подбора материала АЗ, в наименьшей степени склонных к адгезионному взаимодействию с материалом покрытия восстанавливаемых валов.

3. Исследование износостойкости шлифовальных материалов путем моделирования процесса резания единичным АЗ является достаточно эффективным методом. Микрорезание позволяет определить износостойкость вершин АЗ, а также исследовать влияние скорости и глубины резания на механизм образования шлифовочных рисок.

1.5 Стойкость шлифовальных кругов при обработке микропористых покрытий валов сельскохозяйственной техники

Для оценки обрабатываемости металлов шлифованием обычно используют различные показатели: производительность, износ круга, шероховатость поверхности и т.д. [56, 57]. Но основным критерием обрабатываемости считается [70] такой показатель как стойкость АИ: во-первых, выбранный критерий имеет физическую основу для оценки обрабатываемости, и, во-вторых, является обобщающим, т.е. связанным с другими показателями процесса и прежде всего с его производительностью и экономичностью.

Трудности при обработке покрытий шлифованием, сказываются прежде всего на стойкости АИ. Низкая обрабатываемость покрытий резко сокращает период стойкости круга [5, 32]. Известно [56, 57, 70], что при обработке материалов наибольшее влияние на стойкость АИ оказывают его характеристика и режимы резания. Однако в технической литературе имеется весьма ограниченное количество работ по исследованию влияния этих технологических факторов на стойкость кругов при шлифовании покрытий.

Так, выполненные комплексные исследования [6] режущей способности кругов из электрокорундов – белого (24А), нормального (14А) и хромтитанистого (91А) - при черновой обработке напеченных слоев показали, что наибольшей стойкостью обладают круги из 91А (рисунок 1.1). Однако эксплуатационные свойства кругов из других абразивных материалов - карбидов кремния и сверхтвердых материалов – при шлифовании покрытий не исследовались.

Зависимости стойкости T кругов от режимных факторов – глубины шлифования t , подачи S и окружной скорости детали V_d обычно получают

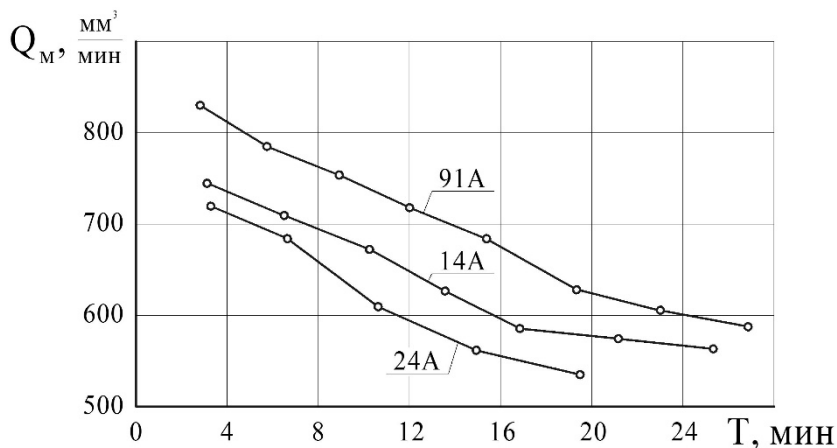


Рисунок 1.3 - Характер изменения съема металла Q_m для кругов из электрокорунда в течение периода их стойкости [6]

в условиях, идентичных условиям проведения экспериментов, и только в том диапазоне элементов режима резания, в котором проводились эксперименты. Кроме того, нет никакой гарантии в том, что математическим выражением зависимости всегда является степенная функция.

Применение методов многофакторного планирования экспериментов и проверка адекватности аппроксимирующих функций [37], а также современных средств вычислительной техники для нахождения коэффициентов формул позволяет более строго подходить к получению эмпирических зависимостей и в то же время уменьшить количество необходимых экспериментов.

Но существует более простой подход к определению влияния режима резания на стойкость круга [70]. Если за основу режимного фактора принять

эмпирическим путем в виде кривых, которые затем аппроксимируют степенными функциями [57, 60, 71, 72].

$$T = C_T t^\alpha S^\beta V_d^\gamma \quad (1)$$

Недостатком таких эмпирических зависимостей является ограниченная область их применения: они пригодны для расчетов только

скорость Q_m съема припуска на обработку, независимо от того, каким сочетанием подач достигается данное значение Q_m , то получение эмпирических зависимостей стойкости круга от режима резания значительно упрощается.

Результаты исследований [56, 70] показывают четкую связь таких показателей, как стойкость T и износ круга Q_a от скорости съема металла, которая выражается степенными функциями:

$$T = C_T / Q_m^n, \quad (1.2) \quad Q_a = C_q Q_m^m, \quad (1.3)$$

где Q_m и Q_a - фактическая средняя скорость съема металла и износа круга соответственно за период стойкости круга, см³/мин;

C_T и C_q - коэффициенты, зависящие от условий обработки, физический смысл которых, соответственно, стойкость и износ круга при $Q_m = 1$ см³/мин;

n и m - показатели степени, выражающие соответственно интенсивность уменьшения стойкости и износа круга от режима резания; зависят от условий обработки.

Зависимость (1.2) позволяет наблюдать работоспособность ШК на всем диапазоне режима резания и может служить показателем обрабатываемости покрытий кругами той или иной характеристики. Критериями обрабатываемости могут служить постоянные зависимости (1.2): коэффициент C_T и показатель степени n . Величины C_T и n зависят от свойств обрабатываемого материала, характеристики круга и среды, в которой идет процесс шлифования. Если известна $T-Q$ характеристика (зависимость 1.2) и задана фактическая скорость съема металла Q_m , то по формуле (1.2) можно определить значение стойкости круга и назначить соответствующие режимы резания.

На рисунке 1.4 показаны $T-Q$ характеристики для кругов на бакелитовой (В) и керамической (V) связке, полученные при круглом наружном шлифовании закаленной стали 45 [70]. Из графиков видно, что в области легких режимов резания ($Q_m < 1,4$ см³/мин) круг на керамической связке имеет более высокую

стойкость, чем на бакелитовой, а при $Q_m > 1,4 \text{ см}^3/\text{мин}$ бакелитовый круг становится более стойким. Значение показателя степени n в $T-Q$ характеристике (угол наклона прямой к оси Q_m) для бакелитового круга меньше. Это говорит о том, что чувствительность бакелитового круга к ужесточению режима резания меньше, чем керамического.

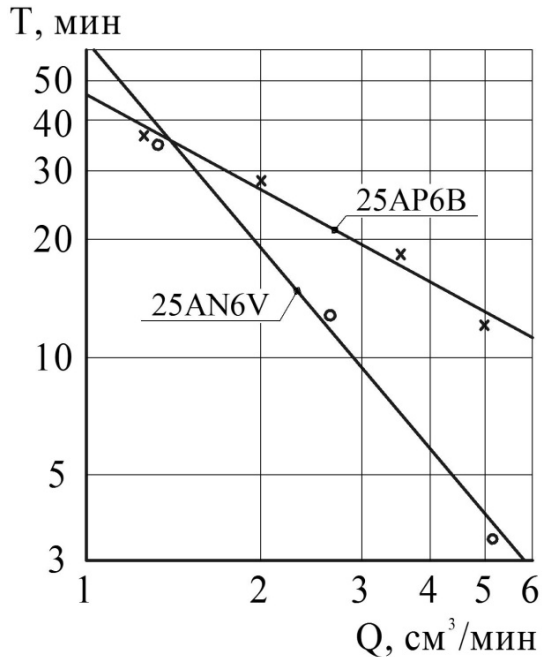


Рисунок 1.4 - $T-Q$ характеристики для случаев шлифования закаленной стали 45 кругами разных характеристик [70]

Для повышения стойкости кругов при обработке покрытий рекомендуется [32] применять так называемый способ шлифования «вподрезку». ШК подают на деталь без продольной подачи и снимают припуск (на глаз) до диаметра на несколько сотых миллиметра превышающего требуемый размер. Затем круг устанавливают рядом и повторяют этот переход пока поверхность не будет обработана по всей ширине. Завершается эта операция включением продольной подачи для удаления оставшегося припуска до заданного размера. Недостатком шлифования «вподрезку» является низкая производительность обработки.

Другие авторы [54], в целях повышения стойкости ШК при шлифовании покрытий разработали специальный метод правки инструмента. Суть этого метода заключается в создании на рабочей поверхности круга гребней и впадин с помощью алмазного карандаша. Засаливание круга с такой поверхностью происходит значительно медленнее по той причине, что адгезионные налипы слабо удерживаются на гребнях, сбрасываются с них и выносятся потоком

охлаждающей жидкости. Это продолжается до тех пор, пока не изнаются гребни. Недостаток этого метода правки круга - повышенный расход АИ.

Реальным средством повышения качества и производительности шлифования покрытий является СОЖ. Однако систематизированные рекомендации по выбору СОЖ отсутствуют. Имеются лишь разрозненные сведения [49, 73] о применении СОЖ для шлифования покрытий без ранжирования их по технологической эффективности.

В связи с этим, следующий параграф посвящен использованию СОЖ, способных предотвратить или замедлить износ и засаливание АИ.

1.6 Возможности СОЖ в снижении износа и засаливания абразивного инструмента при шлифовании микропористых покрытий валов

Смазочно-охлаждающие жидкости вымывают продукты шлифования с поверхности заготовки и инструмента, охлаждают зону резания, пластифицируют обрабатываемую поверхность и предотвращают налипание металла на зерна круга. Правильно подобранный состав СОЖ может увеличить в 2 раза и более период стойкости АИ и уменьшить вероятность возникновения трещин и прижогов [74, 75]. Однако вопросам выбора СОЖ для шлифования покрытий посвящено весьма ограниченное количество исследований.

В работах [33, 49] проводились испытания трех видов СОЖ: синтетической – водный раствор кальцинированной соды и нитрита натрия; эмульсионной – водный раствор эмульсола ЭТ-2 и тринатрийфосфата, а также углеводородной - масло промышленное при врезном и продольном шлифовании покрытий карбидкремниевыми кругами.

Результаты этих экспериментов показали неоднозначное влияние испытанных СОЖ на эффективность обработки и, в частности, на износ и засаливание ШК. Так, при переходе от содового раствора к промышленному маслу износ кругов увеличивался в 3,9 раза, а интенсивность засаливания инструмента снижалась.

Однако, как показывают литературные данные [76, 77], масляные СОЖ обладают рядом серьезных недостатков: пожароопасны; при шлифовании создается масляный туман, который вреден для дыхательных путей; при напряженных режимах резания масляные СОЖ дымят; для отсасывания масляного тумана требуются вентиляционные устройства.

Эффективным способом снижения износа и засаливания ШК является активация СОЖ физическими методами (наложение электрического, магнитного, ультразвукового полей) [78, 79]. Однако реализация такой активации требует создания сложного и дорогостоящего оборудования, например, установки для наложения ультразвуковых колебаний.

Более дешевый метод активации СОЖ - химическая активация с добавкой в ее состав присадок, имеющих непрочные внутримолекулярные связи [80, 81]. При попадании таких присадок на ювенильную поверхность металла происходят химические реакции, в результате которых металл покрывается тонкой пленкой продуктов взаимодействия [63, 82]. Образовавшаяся пленка препятствует непосредственному контакту между инструментом и заготовкой и тем самым предохраняет их от адгезионного взаимодействия.

При введении в СОЖ йода достигается снижение коэффициента трения. Исследованиями [80] установлено, что химические пленки, образованные в результате реакции йода с титаном, имеют в четыре раза более низкий коэффициент трения, чем чистые поверхности титана. Совместное введение в СОЖ йода и мелкодисперсного графита при шлифовании железоуглеродистых сплавов формирует на обработанной поверхности твердый, но с низким коэффициентом трения наноструктурный слой, достаточно прочно связанный с основным материалом детали [81].

Вышеизложенные способы химической активации СОЖ были исследованы при шлифовании однородных материалов – алюминиевых, титановых и железоуглеродистых сплавов. Применительно к микропористым покрытиям подобных исследований не проводилось.

Отсутствие специальной СОЖ приводит к субъективному выбору смазочно-охлаждающих жидкостей при шлифовании покрытий. Однако такой подход отнюдь не решает проблемы повышения стойкости ШК и производительности обработки. Так, по данным ООО «Плазматех» (г. Барнаул) [83], на шлифование одной плазменно-напыленной шейки коленвала двигателя А-01 с использованием серийной СОЖ – водного раствора эмульсола «Экол-3», затрачивается до 0,5 и более часа из-за интенсивного износа и засаливания кругов. При этом качество обработанной поверхности не отвечает техническим требованиям, а из-за частой правки АИ происходит повышенный расход абразива. Следовательно, изыскание и внедрение более эффективных составов СОЖ может улучшить технико-экономические показатели процесса шлифования.

В пользу этой направленности склоняют и проведенные испытания партии различных составов СОЖ [84] с химически активными присадками при обработке плазменных покрытий. Полученные результаты показали, что некоторые экспериментальные СОЖ обеспечивают значительно лучшие показатели по стойкости и производительности при достаточно высоком качестве обработки по сравнению с серийными СОЖ. Это свидетельствует о способности химически активных присадок оказывать эффективное воздействие на снижение износа и засаливания ШК при обработке покрытий восстанавливаемых валов.

1.7 Выводы по главе

Проведенный анализ физико-механических свойств покрытий на железной основе, а также данных по обрабатываемости этих покрытий различными методами дают основание сделать следующие выводы:

1. Покрытия на железной основе, получаемые электроконтактной приваркой металлических порошков и различными способами газотермического напыления являются труднообрабатываемыми. Это связано со спецификой формирования покрытия и особенностями его структуры и свойств (структурная неоднородность, шлаки и твёрдые включения, значительные окисные слои, пористость и т.д.).

2. Выполненный анализ возможностей электрических методов обработки показал, что эти методы не могут быть приняты в качестве эффективных методов обработки покрытий валов из-за высокой энергоемкости процесса (при электрохимической обработке) и получения грубой шероховатости поверхности (при электроконтактной обработке).

3. Обработка точением также не может быть принята в качестве рационального метода обработки покрытий восстановленных валов из-за небольших периодов стойкости резцов из существующих режущих материалов.

4. Наиболее приемлемым методом обработки покрытий, требующих высокой точности и низкой шероховатости является шлифование. Для совершенствования процесса абразивной обработки требуется научно обоснованный выбор шлифовального материала кругов, назначения оптимальных режимов резания и эффективных составов СОЖ на основе всесторонней информации об основных закономерностях и механизме износа абразивов при шлифовании покрытий.

5. В процессе шлифования покрытий на первый план выступают химические реакции, а поэтому исследование концентрации химических элементов на рабочей поверхности абразивного острья, также имеет важное значение.

6. Уменьшение теплосиловой напряжённости шлифования путём формирования на контактирующих поверхностях экранирующих плёнок является радикальным средством снижения засаливания ШК, повышения и стабилизации их режущей способности. Формирование таких плёнок во многом определяется составом СОЖ.

Глава 2. НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ О ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ МИКРОПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ ВАЛОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

2.1 Характер износа и засаливания кругов при шлифовании микропористых покрытий валов

Специфика АИ такова, что в процессе шлифования почти всегда присутствуют все виды его износа, изложенные в п.1.4 (рисунок 1.2). При этом, как правило, один из них является преобладающим [59]. Вид преобладающего износа определяет режим работы ШК: режим затупления, комбинированный режим (частичное самозатачивание) и режим осыпания (полное самозатачивание) [56, 57].

Режим затупления характеризуется поверхностным истиранием абразивных зерен (рисунок 1.2,а); комбинированный режим – поверхностным микроскалыванием (рисунок 1.2, б) или объемным разрушением зерен (рисунок 1.2, в); режим осыпания – полным вырыванием зерна из связки (рисунок 1.2, г).

С учетом вышеизложенного можно предположить, что шлифование покрытий, содержащих высокотвердые неметаллические включения в виде оксидов, карбидов, шлаков и др., приводит к интенсивному износу зерен истиранием. Этот процесс при абразивной обработке покрытий можно представить следующим образом [6].

На рисунок 2.1, а показано схематичное изображение единичного зерна 1, удерживаемого связкой 2 и поры 3. При шлифовании покрытий, вследствие их высокой истирающей способности на вершинах режущих зерен образуется площадка износа 4 (рисунок 2.1,б). При достаточной прочности зерна и связки площадки износа непрерывно возрастают и могут достигнуть значительных размеров [56]. Образование таких площадок способствует увеличению работы трения скольжения, резкому возрастанию силы резания [6] и повышению температуры в контакте круг-деталь, что неизбежно приводит к интенсивному налипанию разогретого металла 5 на площадки износа (рисунок 2.1,в).

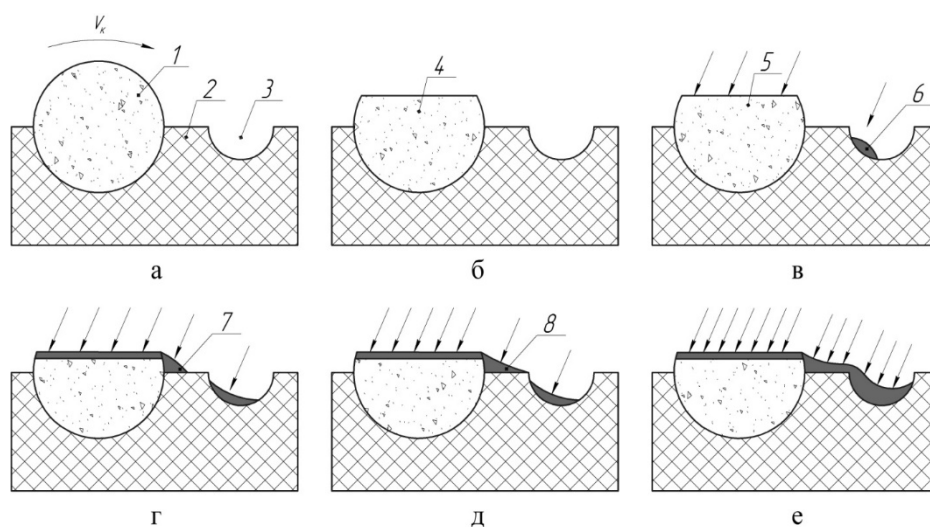


Рисунок 2.1 - Схема износа и засаливания микропрофиля рабочей поверхности ШК (в плоскости вращения) [6]

Из-за низкой пластичности покрытий стружка при микрорезании единственным зерном в момент отрыва от основной массы металла дробится на отдельные микрочастицы с образованием на зернах нароста 7 (рисунок 2.1,г). Вновь прикрепленные частицы покрытия могут вытеснить более ранние металлические слои с передней поверхности АЗ в направлении к связке круга, что приводит к образованию нароста 8 (рисунок 2.1,д), растущего в направлении вектора скорости резания. В поры круга попадают отдельные стружки б (рисунок 2.1,в) и спрессованный металл, сдвигаемый с поверхности АЗ (рисунок 2.1,е). В результате воздействия перечисленных факторов абразивные круги полностью теряют режущую способность и нуждаются в правке.

Л.В. Худобин на основании электронномикроскопических исследований ШК установил [85], что на поверхности АЗ в результате правки формируется специфический микрорельеф с чередующимися выступами и впадинами (рисунок 2.2).

На вершинах микровыступов были выделены и более мелкие неровности, образующие субмикропрофиль поверхности. В работе [85] отмечается, что именно выступы и впадины субмикропрофиля рабочей поверхности АЗ являются первичными очагами засаливания кругов.

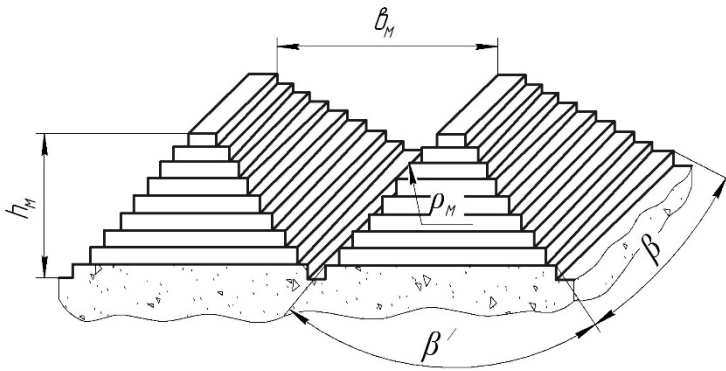


Рисунок 2.2 - Модель исходного микрорельефа поверхности абразивного зерна: $h_m = 2...8$ мкм; $B_m = 5...15$ мкм; $\rho_m = 0,1...2$ мкм; $\beta = \beta' = 90^\circ...110^\circ$

Засаливание начинается с локального схватывания активированного (нагретого и пластически деформированного) металла с выступами субмикропрофиля АЗ при контакте его со шлифуемой деталью [86]. Первичным актом схватывания является механическое защемление микростружек металла в неровностях субмикропрофиля (рисунок 2.3), образовавшегося на рабочей поверхности АЗ в результате правки круга или скалывания зёрен уже в процессе шлифования.

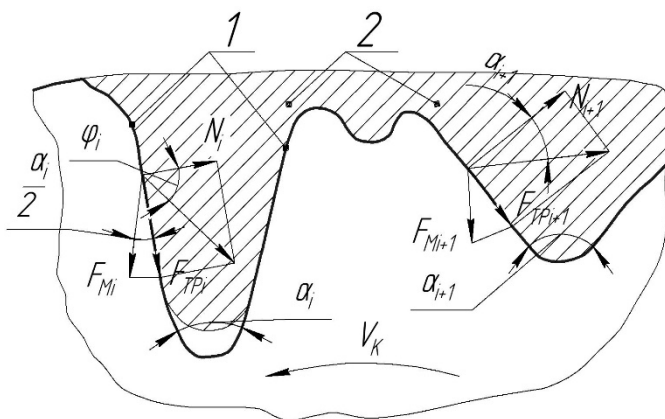


Рисунок 2.3 - Схема защемления металла во впадине субмикропрофиля АЗ: 1- поверхность впадины; 2- металл; V_k – скорость вращения зерна

Условие самоторможения (удерживания металла в микровпадине) описывается неравенством [85]:

$$\alpha_i / 2 < 2\varphi,$$

где $\alpha_i / 2$ - угол скоса i -ой микровпадины;

φ - угол трения, выраженный через коэффициент трения f .

Критический угол впадин субмикропрофиля, рассчитанный в работе [85], равен 56° . Число впадин с углом $\alpha_i < 56^\circ$ очень мало, поэтому и количество металла, удерживаемого неровностями субмикропрофиля, вследствие механического защемления, незначительно. Однако металл, попавший во

впадины субмикрпрофиля, является очагом прогрессирующей адгезии металла к АЗ. После выхода АЗ из контакта со шлифуемой деталью металл может удерживаться в микровпадине под действием составляющей F_m силы трения $F_{тр}$ между зерном и деталью (рисунок 2.3).

При назначении рациональной характеристики круга и, в частности, вида абразивного материала необходимо правильно выбирать режим его работы (износа). При работе в режиме осыпания (интенсивном самозатачивании) круги быстро изменяют свою форму, вследствие чего отклонения от круглости и цилиндричности на деталях выходят за пределы установленных допусков. Поэтому этот режим применяется обычно при обдирочном шлифовании, когда обработка выполняется с большими подачами, вызывающими разрушение зерен и вырывание их из связки.

Работа кругов в режиме затупления сопровождается низким самозатачиванием, интенсивным образованием площадок износа на АЗ (рисунок 1.2,а) при одновременном формировании на них адгезионных наливов (рисунок 2.1, г). Наличие таких площадок при шлифовании покрытий приводит обычно к возникновению вибраций в технологической системе, образованию гранености и прижогов на валах.

При комбинированном режиме работы кругов с объёмным разрушением зёрен (рисунок 1.2,в) по всей вероятности будет наблюдаться повышенный износ АИ и требоваться его частая правка. В случае же комбинированного режима работы инструмента с износом зёрен в виде микроскалывания режущих кромок (рисунок 1.2,б) можно ожидать умеренного износа кругов и хорошего самозатачивания, а с их рабочей поверхности вместе с микросколами будут удаляться адгезионные налипсы с постепенным «выходом» новых слоёв зёрен, способных выполнять работу резания. Поэтому проверке подлежала следующая рабочая гипотеза: эксплуатационные возможности восстановленных валов и шлифовальных кругов будут возрастать при комбинированном (смешанном) режиме работы абразивного инструмента с микроскалыванием режущих зёрен и удалением с их поверхности адгезионных наливов.

В работе [57] установлено, что микроскалывание режущих кромок АЗ обусловлено действием касательных напряжений сдвига. Микросколы образуются при достижении максимальных касательных напряжений, возникающих в зерне, которые определяются по формуле [87]

$$\tau_{\max} = \frac{16 \cdot P_{y_0}}{x^2} \cdot (1 - K_{ш})^2 \cdot K_{ш}^3, \quad (2.1)$$

где P_{y_0} - радиальная составляющая силы резания, действующая на единичное зерно, Н; x - линейный износ зерна, м; $K_{ш}$ - коэффициент шлифования.

Известно [88], что коэффициент шлифования $K_{ш}$ сравнительно мало зависит от абразивного материала кругов. Так, например, при шлифовании быстрорежущих сталей электрокорундовым и карбидкремниевым инструментом $K_{ш} = 0,6 \dots 0,8$. При таких значениях $K_{ш}$ произведение $(1 - K_{ш})^2 \cdot K_{ш}^3$ в формуле (2.1) изменяется также незначительно и составляет $0,020 \dots 0,035$.

Таким образом из формулы (2.1) следует, что обеспечить увеличение τ_{\max} и протекание устойчивого процесса микроскалывания режущих зерен и удаления адгезионных наливов при шлифовании покрытий, можно прежде всего снижением величины износа x и увеличением силы P_{y_0} .

Определив закономерности изменения износа x и силы P_{y_0} в зависимости от режимов резания и вида абразивного материала, можно прогнозировать эксплуатационные возможности восстановленных валов и шлифовальных кругов при обработке микропористых покрытий.

При выборе абразивного материала кругов оптимальным можно считать такой абразив, который обеспечивает стабильное образование микросколов на режущих зернах и в наименьшей степени склонен к адгезионному взаимодействию с обрабатываемым покрытием.

2.2 Теоретическая зависимость для расчёта коэффициента шлифования

Коэффициент шлифования является одним из критериев при оценке обрабатываемости различных материалов и определяется по формуле [88]

$$K_{ш} = P_z / P_y, \quad (2.2)$$

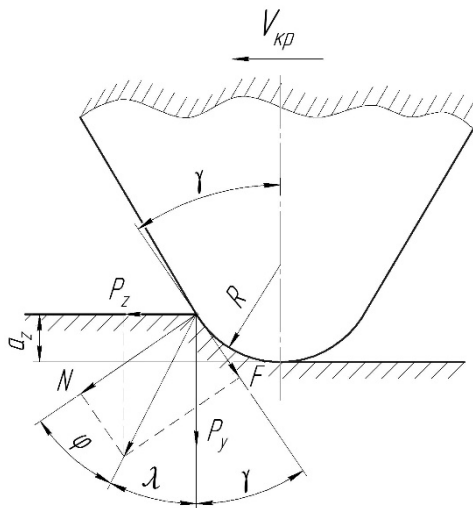
где P_z , P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания в контакте круг-деталь, полученные в эксперименте или рассчитываемые по имеющимся аналитическим зависимостям, Н.

Коэффициент шлифования, как правило, меньше единицы, а при определенных условиях его значение может приближаться к коэффициенту трения пары «притупленный круг - обрабатываемый материал» [89]. При больших значениях коэффициента $K_{ш}$ сила P_z больше, что свидетельствует о преобладании процесса резания над процессом скольжения [90].

Чтобы осветить взаимосвязь коэффициента $K_{ш}$ с другими параметрами процесса шлифования, рассмотрим систему сил, действующих на АЗ (рисунок 2.4).

Из рисунка 2.4 следует, что $\gamma + \lambda + \varphi = 90^\circ$;

$$\gamma = \arcsin(R - a_z) / R; \quad \lambda = \arctg(P_z / P_y) = \arctg k_{ш}; \quad \varphi = \arctg f_{mp},$$



где N - сила, нормальная к передней поверхности зерна, Н; F - сила трения на передней поверхности зерна, Н; a_z - толщина среза единичным зерном, мм; R - радиус округления вершины зерна, мм; γ - передний угол при вершине зерна; φ - угол трения; f_{mp} - коэффициент трения зерна с обрабатываемым материалом; V_k - скорость вращения круга, м/с.

Рисунок 2.4 - Схема сил, действующих на АЗ при шлифовании

В работе [91] приведены аналитические зависимости для определения величин составляющих P_y и P_z силы резания при круглом наружном шлифовании

$$P_y = \frac{0,1\sigma_i V_d S_{под} t (\operatorname{tg} \gamma + f_{mp})}{\sqrt{V_k}}, \quad (2.3)$$

$$P_z = \frac{0,085\sigma_i V_\partial S_{\text{прод}} t (\text{tg}\gamma + f_{\text{мп}}) \cdot (1 - 0,01H_m) \cdot (1 - \eta V_\kappa)}{\sqrt{V_\kappa}}, \quad (2.4)$$

где σ_i – интенсивность напряжений в зоне деформаций, МПа; V_∂ – скорость вращения детали, м/мин; $S_{\text{прод}}$ – скорость продольной подачи, мм/об; t – глубина шлифования, мм/дв. ход; $f_{\text{мп}} = 2,6 \cdot 10^{-3} (176 - V_\kappa)$ – коэффициент трения зёрен о металл; H_m – твердость покрытия, выраженная в HRC; η – поправочный коэффициент; ориентировочно для покрытия $\eta = 0,001$ [92];

Как следует из выражений (2.3) и (2.4) на величину P_y влияют прочностные свойства обрабатываемого материала. А.Я. Артамонов [93] определил закономерные связи между напряжениями и деформациями при сжатии микропористых металлокерамических материалов на основе железа, которые рекомендует использовать и для решения задач, связанных с оценкой деформированного и напряженного состояния этих материалов в условиях обработки резанием. На рисунке 2.5 приведена зависимость характеристических напряжений микропористого железа от пористости Π при его одноосном сжатии [93].

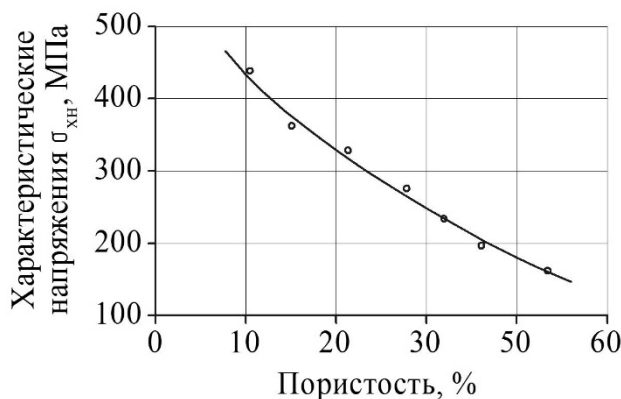


Рисунок 2.5 – Изменение характеристического напряжения микропористого железа в зависимости от пористости [93]

Видно, что в условиях одноосного сжатия микропористого металлокерамического материала на основе железа с исходной пористостью $\Pi = 10\%$ характеристическое напряжение $\sigma_{x.n.} = 450$ МПа. Тогда можно считать, что указанному характеристическому напряжению $\sigma_{x.n.}$ соответствует интенсивность напряжений $\sigma_i = 450$ МПа.

2.3 Определение радиальной силы, действующей на абразивное зерно

В п. 2.1 было выдвинуто предположение о том, что наибольшее влияние на величину касательных напряжений, возникающих в единичном зерне оказывает радиальная сила резания P_{y_0} , действующая на это зерно. Если связать силу резания P_{y_0} , как силу производящую деформацию металла стружки, с физико-механическими свойствами обрабатываемого покрытия, а также с параметрами характеристики кругов и АЗ и размерами срезаемого слоя, можно получить зависимости для расчета силы P_{y_0} .

Для определения силы резания P_{y_0} воспользуемся теоретической зависимостью, предложенной В.И. Пилинским [92]

$$P_{y_0} = P_y \psi / F n_p, \quad (2.5)$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания, возникающая в контакте круг-деталь, полученная в эксперименте или рассчитываемая по имеющимся аналитическим зависимостям, Н; ψ – коэффициент, учитывающий расход энергии на трение связки круга о поверхность обрабатываемой детали; F – площадь контакта круга и детали; n_p – число режущих зерен на единице рабочей поверхности круга.

Определим зависимости для расчета силы резания P_{y_0} , действующей на единичное зерно при круглом наружном продольном шлифовании.

Определение радиальной составляющей силы резания P_y , возникающей в контакте круг-деталь

Вычисление радиальной силы P_y выполним по имеющейся аналитической зависимости (2.3).

Определение площади контакта круга и детали

Площадь контакта F при круглом наружном продольном шлифовании определяется по формуле [92]

$$F = B\sqrt{Ddt / D + d} \quad (2.6)$$

где B – ширина (высота) ШК, мм; D и d – диаметр круга и детали, мм; t – глубина шлифования, мм/дв.ход.

Определение числа режущих зерен

В.И. Пилинский [92], исходя из вероятностного представления о распределении зёрен на рабочей поверхности круга, получил следующую формулу для расчета n_p

$$n_p = \frac{540K_z\beta\sqrt{V_\delta(31-N_c)}\sqrt[4]{t(D+d)}}{N_z^2\sqrt{V_\kappa(1-\varepsilon)}tg\gamma\sqrt[4]{Dd}}, \quad (2.7)$$

где $K_z = 0,36 + 0,011N_z$ – поправочный коэффициент, учитывающий зернистость круга; $\beta = 1 + \Phi(4,2B)$ – коэффициент несимметричности закона распределения вылета вершин зерен на рабочей поверхности круга; $B = 0,05 \dots 0,20$ – смещение центра группирования (математического ожидания) в сторону наружной поверхности круга [92]; $\Phi(4,2B)$ – табулированный интеграл вероятности; приняв $B = 0,15$, находим $\Phi(4,2B) = 0,74$ [94]; N_z – зернистость ШК по ГОСТ 3647-80; N_c – номер структуры круга; ε – коэффициент относительной глубины заделки зерна в связке; рекомендуется [92] $0,5 \dots 0,7$; принимаем $\varepsilon = 0,6$; γ – средневероятные значения передних углов при вершине зерна.

Из формулы (2.7) следует, что число режущих зерен на единице рабочей поверхности круга зависит от режима резания, характеристики АИ, геометрических параметров зерна, диаметров круга и детали.

Определение коэффициента Ψ

Для определения коэффициента Ψ воспользуемся формулой [92]

$$\Psi = \frac{f_{mp}P_y}{(P_y f_a - P_\delta)(1 + \chi)}, \quad (2.8)$$

где $f_{mp} = 2,6 \cdot 10^{-3}(176 - V_\kappa)$ – коэффициент трения зёрен о металл [92]; $f_a = 0,85(1 - 0,01H_m)(1 - \eta V_\kappa)$ – коэффициент абразивного резания [91]; H_m – твердость покрытия, выраженная в HRC; η – поправочный коэффициент;

ориентировочно для покрытия $\eta = 0,001$ [92]; χ – коэффициент, равный отношению нормальных сил, возникающих на участках связки и режущих зернах; ориентировочно для покрытия $\chi = 0,31$ [92]; P_δ – сила пластической деформации, возникающая при резании-царапании металла единичным зерном, Н.

Силу P_δ можно рассчитать по формуле [92]

$$P_\delta = 0,67\sigma_e f n_p K_1 F, \quad (2.9)$$

где σ_e – предел прочности при растяжении обрабатываемого материала, МПа; f – площадь сечения среза единичным зерном, мм²; K_1 – безразмерный геометрический параметр, учитывающий отрицательное значение переднего угла.

Площадь сечения среза f и параметр K_1 вычислим по формулам [92]

$$f = a_z (2N_s \cdot 10^{-3} + a_z \operatorname{tg} \gamma) \quad (2.10) \quad K_1 = \frac{\operatorname{tg} \gamma (1 + \xi)^2}{\xi} + 1 \quad (2.11)$$

где a_z – толщина слоя (среза), снимаемая одним шлифующим зерном, мм;

$\xi = m - cV_\kappa$ – коэффициент усадки стружки; для диапазона скорости вращения круга 10...50 м/с рекомендуется [92] $m = 1,57$, $c = 0,006$.

Толщина слоя, снимаемая одним шлифующим зерном a_z при круглом наружном продольном шлифовании определяется по известной формуле [57]

$$a_z = \sqrt{\frac{V_\delta S_{\text{прод}} t}{20 B n_p V_\kappa \operatorname{tg} \gamma}}, \quad (2.12)$$

где B – ширина (высота) ШК, мм; n_p – число режущих зерен на единице рабочей поверхности круга; $l = \sqrt{Ddt / (D + d)}$ – длина дуги контакта круга с деталью, мм.

Приведенные зависимости позволяют рассчитывать значения радиальной P_{y_0} , а также тангенциальной $P_{z_0} = K_p P_{y_0}$, сил резания, действующих на единичное АЗ для различных технологических условий шлифования покрытия.

Следует отметить, что формулы (2.3 – 2.5) не учитывают изменения усилий

резания, связанные с затуплением кругов. Следовательно, по ним определяются средние за период стойкости кругов значения сил P_{y_0} , P_y и P_z .

Из формула 2.12 следует, что на величину толщины среза a_z , а, значит, и на число режущих зерен n_p (формула 2.7) определённое влияние оказывают такие элементы режима резания как скорость и глубина [57]. Поэтому целесообразно рассмотреть влияние этих технологических факторов на радиальную силу резания P_{y_0} и касательные напряжения τ , возникающие в единичном зерне.

2.4 Влияние скорости резания на касательные напряжения, возникающие в абразивных зернах при шлифовании покрытий валов

Скорость резания является важнейшим технологическим фактором, определяющим многие показатели процесса шлифования. Для определения степени влияния этого режимного параметра на уровень касательных напряжений, возникающих в режущих зернах из электрокорунда и карбида кремния, рассчитаем элементарные силы P_{y_0} и P_{z_0} , при круглом продольном шлифовании по теоретическим зависимостям, изложенным в п. 2.2 и 2.3.

Режим шлифования: скорость резания $V_k = 10, 20, 35$ и 50 м/с; скорость вращения детали и скорость продольной подачи в соответствии со скоростью резания $V_d = 5,46; 10,74; 18,84, 26,94$ м/мин и $S_{прод} = 121; 243; 425, 605$ мм/мин; глубина шлифования $t = 0,010$ мм/дв. ход. Зернистость и структура круга $N_s = 40$ и $N_c = 6$. Поправочный коэффициент, учитывающий зернистость круга $K_s = 0,8$.

Диаметры круга и детали $D = 600$ мм и $d = 60$ мм; высота круга $B = 25$ мм; площадь и длина контакта круга с деталью $F = 18,46$ мм² и $l = 0,74$ мм при шлифовании с глубиной $0,010$ мм/дв. ход.

Коэффициент усадки стружки $\xi = 1,51, 1,45, 1,36$ и $1,27$ и коэффициент трения зерен о металл $f_{mp} = 0,43, 0,40, 0,37, 0,33$ при шлифовании соответственно на скоростях $10, 20, 35$ и 50 м/с.

Средневероятные значения углов 2γ при вершинах зерен зернистостью №40 для различных абразивных материалов берем из работ [95, 96]: для электрокорунда белого и карбида кремния зеленого соответственно $2\gamma = 109^\circ$ и $2\gamma = 105^\circ$. Коэффициент $K_p = 0,51; 0,50; 0,49$ и $0,48$ для электрокорунда белого и карбида кремния зеленого соответственно на скоростях 10, 20, 35 и 50 м/с.

Твёрдость микропористого покрытия на железной основе $H_m = 40$ HRC, а предел прочности при растяжении $\sigma_e = 1200$ МПа [97]. Безразмерный геометрический параметр, учитывающий отрицательное значение переднего угла $K_1 = 9,35; 8,06; 6,68; 6,62$ и $K_1 = 8,75; 7,56; 6,27; 6,22$ соответственно для кругов из электрокорунда и карбида кремния на скоростях 10, 20, 35 и 50 м/с.

Расчетные значения параметров, влияющих на величины P_{y_0} и P_{z_0} приведены в таблице 2.1, а характер изменения сил представлен на рисунке 2.6.

Таблица 2.1 - Значения параметров, влияющих на силы P_{y_0} и P_{z_0} , в зависимости от скорости при шлифовании кругами из 24А и 64С

Скорость резания $V_k, \text{ м/с}$	Силы резания		Число режущих зерен $n_p, 1/\text{мм}^2$	Толщина среза един. зерном $a_z \cdot 10^{-4}, \text{ мм}$	Сечение среза $f \cdot 10^{-4}, \text{ мм}^2$	Сила пластической деформации $P_\partial, \text{ Н}$	Коэффициент ψ
	$P_y, \text{ Н}$	$P_z, \text{ Н}$					
Электрокорунд белый 24А							
10	45,0	22,8	0,25	1,7	1,4	4,86	0,82
20	61,7	30,8	0,25	1,7	1,4	4,19	0,71
35	80,0	39,6	0,25	1,7	1,4	3,47	0,63
50	94,0	45,6	0,25	1,7	1,4	3,43	0,56
Карбид кремния зеленый 64С							
10	43,0	21,5	0,26	1,8	1,5	5,06	0,86
20	58,2	29,1	0,26	1,8	1,5	4,38	0,72
35	76,0	37,3	0,26	1,8	1,5	3,63	0,64
50	88,5	42,9	0,26	1,8	1,5	3,60	0,57

Из рисунка 2.6 следует, что при шлифовании кругами из электрокорунда и карбида кремния элементарные силы резания и, в частности, сила P_{y_0} по мере роста скорости возрастают, что объясняется резким ростом радиальной составляющей силы резания P_y (более чем в 2 раза) в контакте круг-деталь (таблица 2.1) рассчитанной по формуле (2.3).

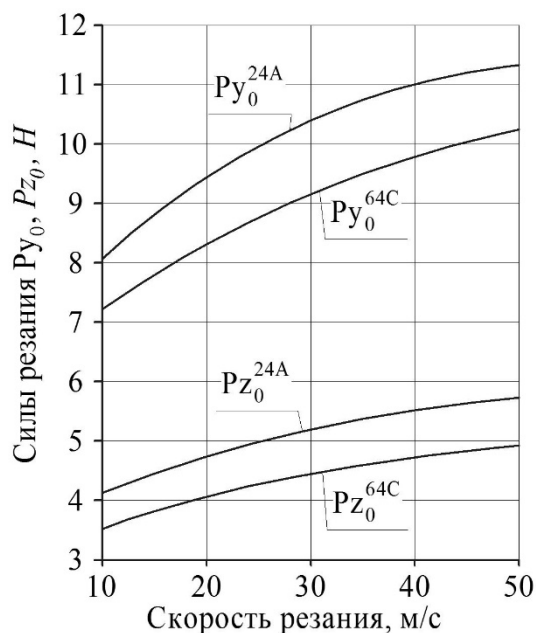


Рисунок 2.6 - Зависимость сил P_{y0} и P_{z0} , действующих на абразивное зерно, от скорости резания при обработке кругами из 24А и 64С

Исходя из характера изменения сил P_{y0}

и P_{z0} и вследствие низких величин последних (рисунок 2.6) при шлифовании на малых скоростях резания можно предположить, что в таких условиях круги будут работать в режиме затупления с поверхностным истиранием АЗ (рисунок 1.2,а), что нежелательно.

Однако при увеличении скорости резания и в связи с ростом сил P_{y0} и P_{z0} (рисунок 2.6), а также касательных напряжений τ (рисунок 2.7) можно ожидать и роста интенсивности образования микросколов. В таких условиях круги перейдут в более благоприятный - комбинированный режим работы (частичное самозатачивание) с поверхностным выкрашиванием АЗ (рисунок 1.2,б).

Таким образом можно констатировать, что при шлифовании покрытий в установленном диапазоне скоростей резания рост касательных напряжений, вызванный возрастанием скорости, может привести к повышению режущей способности кругов.

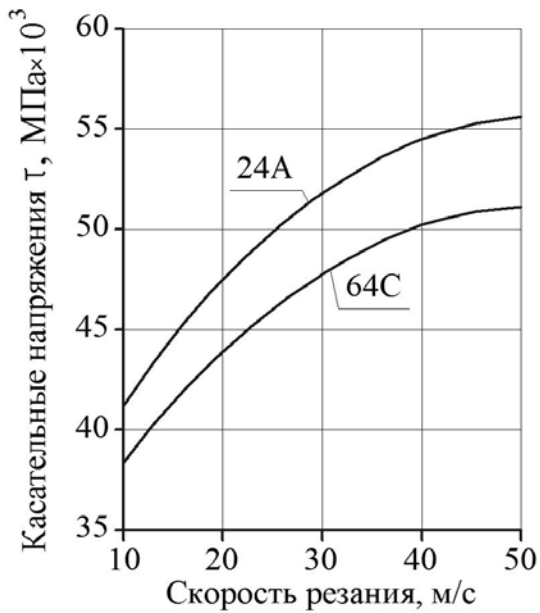


Рисунок 2.7 - Зависимость касательных напряжений, возникающих в зёрнах из электрокорунда белого 24А и карбида кремния зелёного 64С, от скорости резания

2.5 Влияние глубины резания и вида абразивного материала на касательные напряжения, возникающие в зёрнах при шлифовании покрытий валов

Для определения степени влияния глубины резания и вида абразивного материала на уровень касательных напряжений, возникающих в режущих зёрнах из электрокорунда и карбида кремния, рассчитаем элементарные силы P_{y_0} и P_{z_0} при круглом продольном шлифовании по теоретическим зависимостям, изложенным в п. 2.3.

Глубина резания $t = 0,005, 0,010, 0,015$ и $0,020$ мм/дв. ход. Указанным глубинам резания соответствует площадь контакта $F = 13,06, 18,46, 22,61$ и $26,11$ мм² и длина дуги контакта круга с деталью $l = 0,52; 0,74; 0,90$ и $1,04$ мм. Скорость резания $V_k = 35$ м/с; скорость вращения детали $V_d = 18,84$ м/мин; скорость продольной подачи $S_{прод} = 425$ мм/мин.

Коэффициент усадки стружки $\xi = 1,36$ и коэффициент трения зерен о металл $f_{тр} = 0,37$ при шлифовании на скорости 35 м/с.

Остальные исходные данные те же, что и в п. 2.4. Расчетные значения параметров, влияющих на P_{y_0} и P_{z_0} , приведены в таблице 2.2, а характер изменения этих сил представлен на рисунке 2.8.

Таблица 2.2 - Значения параметров, влияющих на силы P_{y_0} и P_{z_0} , в зависимости от глубины резания при шлифовании кругами из 24А и 64С

Глубина резания V_k , м/с	Силы резания		Число режущих зерен n_p , 1/мм ²	Толщина среза единичным зерном $a_z \cdot 10^{-4}$, мм	Сечение среза $f \cdot 10^{-4}$, мм ²	Сила пластической деформации P_o , Н	Коэффициент ψ
	P_y , Н	P_z , Н					
Электрокорунд белый 24А							
0,005	40,0	19,8	0,21	1,6	1,3	1,91	0,63
0,010	80,0	39,6	0,25	1,7	1,4	3,47	0,63
0,015	121,0	59,4	0,28	1,8	1,5	5,10	0,63
0,020	161,0	79,1	0,30	1,9	1,6	6,73	0,63
Карбид кремния зеленый 64С							
0,005	37,9	18,7	0,22	1,6	1,3	1,88	0,64
0,010	75,9	37,3	0,26	1,8	1,5	3,63	0,64
0,015	113,8	56,0	0,29	1,9	1,6	5,29	0,63
0,020	151,7	74,7	0,31	2,0	1,7	6,94	0,63

Из рисунка 2.8 следует, что при обработке кругами из 24А и 64С элементарные силы резания и, в частности, сила P_{y_0} по мере роста глубины резания возрастают, что также объясняется резким ростом силы резания P_y (более чем в 4 раза) в контакте круг-деталь (таблица 2.2), рассчитанной по формуле (2.3).

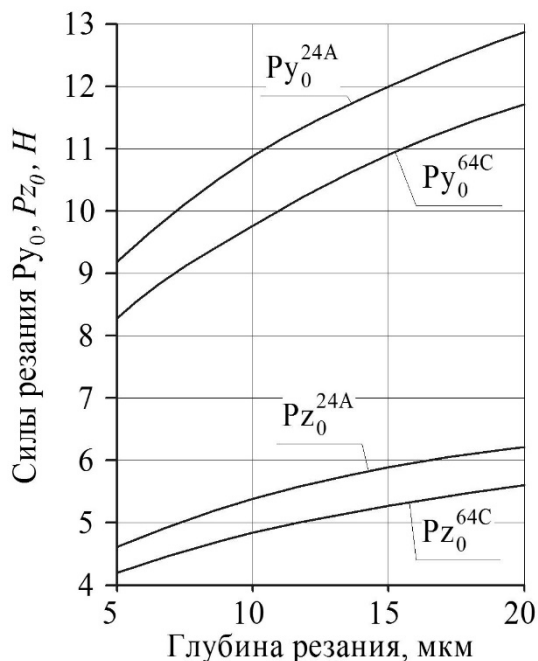


Рисунок 2.8 - Зависимость сил P_{y_0} и P_{z_0} , действующих на абразивное зерно, от глубины резания при обработке кругами из 24А и 64С

Такой характер изменения сил P_{y_0} и P_{z_0} с увеличением глубины резания t приводит к росту касательных напряжений τ , возникающих в зёрнах (рисунок 2.9).

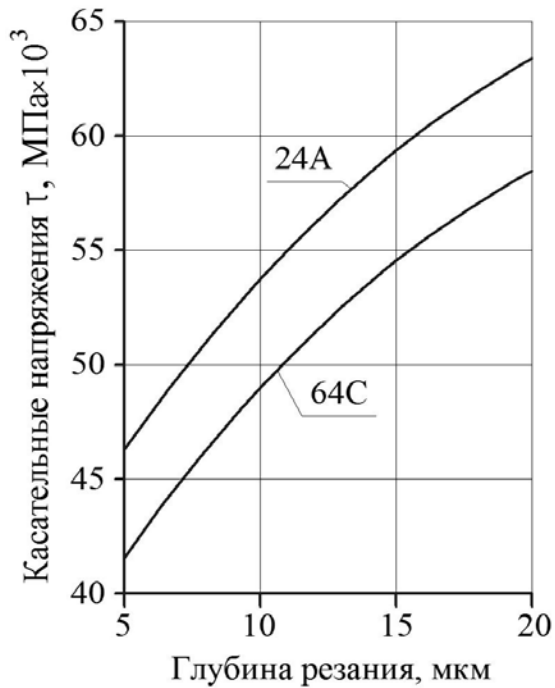


Рисунок 2.9 - Зависимость касательных напряжений, возникающих в зёрнах из электрокорунда белого 24А и карбида кремния зелёного 64С, от глубины резания

Вследствие низких значений сил P_{y_0} и P_{z_0} (рисунок 2.8) на малых глубинах шлифования можно предположить, что в таких условиях круги будут работать в нежелательном режиме - затупление с поверхностным истиранием АЗ (рисунок 1.2, а). Однако при увеличении глубины и в связи с ростом сил P_{y_0} и P_{z_0} (рисунок 2.8), а также касательных напряжений τ (рисунок 2.9) можно ожидать и роста интенсивности образования микросколов, а значит, и перехода кругов к более благоприятному - комбинированному режиму работы (частичному самозатачиванию) с поверхностным микроскалыванием АЗ (рисунок 1.2, б).

На основе вышеизложенного можно предположить, что при шлифовании покрытий в установленном диапазоне глубин резания рост касательных напряжений, вызванный возрастанием глубины, может привести к повышению эксплуатационных свойств кругов.

Поверхностное микроскалывание зёрен в круге вызывается процессом термомеханического разрушения под воздействием импульсных силовых и тепловых ударов [98]. При наличии комплекса показателей, количественно характеризующих способность зёрен подвергаться износу в виде микроскалывания под действием разрушающих нагрузок, можно произвести оценку потенциальных режущих свойств кругов.

В настоящее время абразивная промышленность выпускает круги преимущественно из искусственных абразивных материалов, таких как карбид кремния (зеленый и черный) и различные модификации электрокорунда (таблица 2.3).

Одним из важнейших факторов, влияющих на износ и работоспособность АЗ при шлифовании – способность их противостоять ударным нагрузкам. За показатель такого сопротивления разрушению – ударную вязкость – принято количество энергии, необходимой для получения условной единицы вновь образуемой поверхности [99]. В таблице 2.3 приведены показатели ударной вязкости для различных модификаций карбидов кремния и электрокорундов. Приведенные данные свидетельствуют о том, что карбид кремния обладает значительно меньшей способностью к сопротивлению разрушающим ударным нагрузкам, чем электрокорунд, а, значит, и большей способностью к работе в комбинированном режиме с микроскалыванием режущих кромок зёрен.

Таблица 2.3 - Физико-механические свойства различных абразивных материалов

Абразивный материал	Твердость, ГПа	Ударная вязкость, кгс·см/см ²	Микрохрупкость, Н	Теплопроводность, Вт/МК
	[95]	[99]	[92]	[88]
Карбид кремния:				
зеленый	32,4...35,3	0,908	0,25	155
черный	32,4...35,3	0,883	0,35	155
Электрокорунд:				
нормальный	18,9...19,6	1,544	0,65	19,7
белый	19,6...24,5	1,755	0,80	19,7
хромотитанистый	19,6...22,6	-	0,70	19,7
монокорунд	22,6...23,5	2,287	-	19,7

Существует связь механических свойств абразивов с режущей способностью кругов [100]: чем больше микрохрупкость зёрен, тем большая вероятность протекания их износа в виде микроскалывания, а работа кругов в комбинированном режиме. В работе [101] были проведены исследования микрохрупкости для различных абразивных материалов. Приведенные данные свидетельствуют (таблица 2.3) о том, что абразив из карбида кремния обладает

более высокой микрохрупкостью по сравнению с электрокорундом, а значит зёрна из SiC будут менее устойчивы к импульсным силовым ударам.

Известно [102], что чем меньше теплопроводность материала абразива, тем меньшее количество тепла, образовавшегося за время одного контакта, успеет перейти в зерно. Глубина проникновения тепла в первую очередь зависит от теплопроводности абразивных материалов. Чем больше глубина проникновения тепла в зерно, тем ниже вероятность пластической деформации поверхностных слоев абразива и интенсивность их износа, а, значит, и выше стойкость абразива против импульсных тепловых ударов [102].

Данные по теплопроводности абразивных материалов приведены в таблице 2.3, откуда видно, что теплопроводность карбида кремния в 8 раз выше теплопроводности электрокорунда. Значит, можно ожидать, что режущие зерна ШК из Al_2O_3 в процессе обработки будут подвергаться интенсивному локальному разогреву, вследствие чего возрастут пластические свойства этого абразива и интенсивность его адгезионного взаимодействия с покрытием. Можно предположить, что в результате этого взаимодействия механические свойства поверхностных микрообъемов электрокорунда снизятся и интенсивность его износа возрастёт.

Глубина проникновения тепла в зерна из карбида кремния выше чем у электрокорунда, а, значит, физико-механические свойства поверхностных слоёв абразива из SiC в процессе обработки будут оставаться стабильными. Это будет способствовать работе кругов в комбинированном режиме.

Следовательно, с точки зрения лучших температурных условий работы зёрен эксплуатационные свойства кругов из карбида кремния будут несколько выше по сравнению с кругами из электрокорунда.

Таким образом, можно ожидать, что на зёрнах из карбида кремния микроскалывание режущих кромок будет протекать более интенсивно, чем на зёрнах из электрокорунда, так как абразив из SiC обладает меньшей ударной вязкостью, большей хрупкостью и теплопроводностью.

Рассмотрев физико-механические свойства карбида кремния и электрокорунда, можно сделать вывод о том, что ШК из карбида кремния обладают большими возможностями работать в комбинированном режиме с образованием микросколов на режущих зернах, что подтверждается графиками, приведенными на рисунок 2.10. Видно, что на зёрнах из карбида кремния при одних и тех же величинах износа x развиваются меньшие касательные напряжения τ , по сравнению с зёрнами из электрокорунда, а значит, и образование микросколов на зёрнах из 64С будет происходить при меньших максимальных касательных напряжениях τ_{\max} (формула 2.1), чем на зёрнах из 24А.

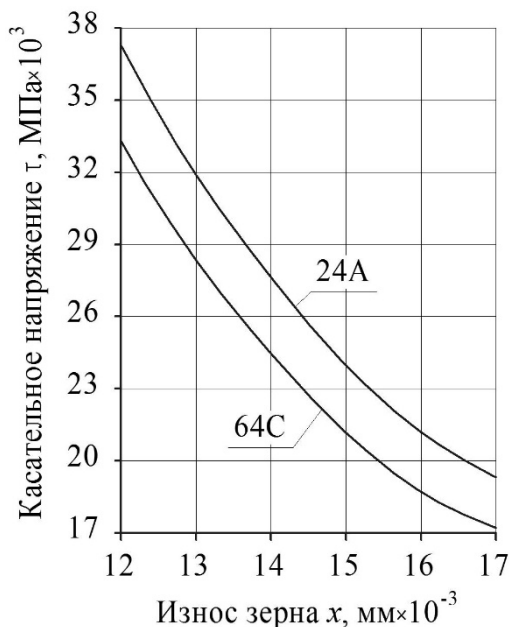


Рисунок 2.10 - Зависимость касательных напряжений, возникающих в зёрнах из электрокорунда и карбида кремния, от их износа

На основании вышеизложенного можно ожидать, что круги из карбида кремния при шлифовании покрытий будут раньше «входить» в комбинированный режим работы, а, следовательно, обеспечат больший период стойкости, чем круги из электрокорунда.

2.6 Модифицирование смазочно-охлаждающих жидкостей при шлифовании микропористых покрытий восстанавливаемых валов

В п. 1.1 показано, что из-за низкой теплопроводности и высокой адгезионной активности покрытий их шлифование характеризуется более высокой контактной температурой и более интенсивным засаливанием кругов,

чем при обработке однородных материалов. Это требует разработки и применения средств снижения теплосиловой напряженности процесса, среди которых одним из приоритетных, следует выделить смазочно-охлаждающие жидкости. При правильно выбранном составе СОЖ можно резко уменьшить износ, затупление и засаливание круга, повысить его работоспособность, достигнуть существенного роста производительности обработки и улучшения качества изделий [103,104]. СОЖ оказывает влияние на процесс шлифования металлов через свои функциональные свойства: смазочные, охлаждающие, смачивающие, моющие, диспергирующие и демпфирующие.

При наличии комплекса показателей, количественно и качественно характеризующих способность различных СОЖ и присадок к ним проявлять свои функциональные свойства, можно оценить их пригодность и эффективность при шлифовании покрытий.

2.6.1 Смазочное действие СОЖ

Условия работы СОТС в зоне резания труднообрабатываемых покрытий можно отнести к наиболее жесткому режиму с граничным трением [81, 105]. В рамках молекулярно-механической теории трения вводится понятие о «третьем теле», формирующемся в контакте двух тел при трении. Под третьим телом подразумевается граничный смазочный слой. Наличие смазки в контакте отражается как на динамике процесса, так и на характере реакций в приповерхностных слоях.

При наличии СОЖ на поверхностях контакта зерна с материалом заготовки создаются смазочные (адсорбционные) пленки, которые в значительной степени снижают коэффициенты трения на контактных площадках и экранируют зону сдвига от остальных областей резания. Смазочное действие СОЖ заключается в уменьшении силы трения и вероятности возникновения схватывания и адгезии контактирующих поверхностей инструмента и заготовки вследствие образования на них вторичных структур (плёнок), предотвращающих непосредственный контакт абразивного и обрабатываемого материала. Смазочное действие СОЖ

проявляется в следующем: уменьшении реакционной способности образующихся в процессе резания ювенильных поверхностей; снижении количества и прочности адгезионных связей между контактирующими поверхностями; образовании граничной плёнки, защищающей абразивный и обрабатываемый материалы от физико-химической и механической деструкции.

Смазочное действие характеризуется тем, что образующиеся на площадках трения замкнутые полости заполняются СОЖ. При этом достаточно толстые пленки (что наиболее характерно для СОЖ с жировыми присадками) обладают высокой упругостью формы и способны воспринимать большие контактные нагрузки. Для условий образования таких плёнок существенно важной является вязкость СОЖ, которая для операций шлифования покрытий должна иметь свой оптимум.

Известно [103], что при шлифовании однородных металлов для изменения вязкости СОЖ широко используют серо-, хлор- и фосфорноорганические присадки. Можно полагать, что и при абразивной обработке покрытий вязкость СОЖ может быть компенсирована добавлением в её состав вышеуказанных присадок.

Когда в состав СОЖ входят твёрдые вещества (например, дисульфид молибдена) или когда твердые полимеры трения возникают в результате превращений под действием высоких температур и давлений в зоне резания, появляются дискретные плёнки, образованные твердыми веществами (механические плёнки) [103, 105].

Примером такой смазочно-охлаждающей жидкости может быть СОЖ ПОА-2м [106], состоящая из водорастворимого полимера (полиэтиленоксида) и различных добавок (антикоррозионной, антибактериальной и специальной). СОЖ ПОА-2м, представляющая собой 0,7 % - ный водный раствор, испытывали на операции резания образцов из сендаста в сравнении с другими охлаждающими средами: 3 % - ными водными растворами эмульсола НГЛ-205 и кальцинированной соды.

На рисунке 2.11 показана зависимость относительного износа абразивного круга от продольной подачи при резании заготовок из сендаста с использованием указанных СОЖ [106]. Видно, что при использовании в качестве СОЖ 3 %-ных водных растворов эмульсола и соды относительный износ инструмента характеризуется зависимостями, близкими к линейным (возрастающим износом).

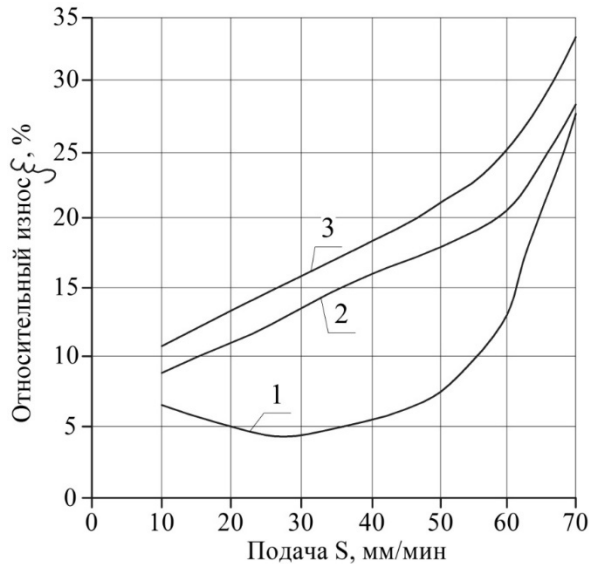


Рисунок 2.11 - Зависимость относительного износа круга от подачи для различных СОЖ: 1,2,3 – соответственно водные растворы ПОА-2м, эмульсола и кальцинированной соды

При использовании же СОЖ ПОА-2м износ АИ уменьшается в среднем в 2...4 раза (на подачах 10...50 мм/мин), а связь относительного износа и подачи характеризуется кривыми экстремального вида.

Эффект повышения износостойкости круга при определенном увеличении подачи объясняется [106] уникальным свойством водорастворимого полимера полиэтиленоксида - при повышении температуры он выпадает из раствора (теряет растворимость в воде). Известно, что в процессе резания происходит повышение температуры в зоне обработки, способствующее локальному выпадению полимера из раствора и образованию молекулярного защитного слоя между поверхностями круга и детали. А это, в свою очередь, уменьшает износ инструмента, причем с ростом температуры плотность молекулярного слоя увеличивается.

Таким образом, достигнутый эффект СОЖ на основе полиэтиленоксида может открыть новые возможности широкого практического использования этой среды в ремонтном производстве при шлифовании покрытий.

2.6.2 Охлаждающее и смачивающее действие СОЖ

Охлаждающее действие СОЖ заключается в интенсивном отводе теплоты от нагретых поверхностей обрабатываемой заготовки и инструмента. Охлаждающие свойства СОЖ оказывают влияние на стойкость инструмента, точность обработки, шероховатость поверхности и на остаточные напряжения в поверхностном слое и зависят от их состава, физико-химических и теплофизических параметров [103,104]: теплопроводности, удельной теплоёмкости, теплоты испарения и вязкости.

Необходимой предпосылкой для оказания охлаждающего действия СОЖ является смачивание ею поверхностей детали и инструмента. СОЖ, хорошо смачивающая поверхность металла, обеспечивает большую площадь теплопереноса при его шлифовании и пузырьковый режим кипения жидкости. Если жидкость плохо смачивает охлаждаемую поверхность, то возможен только плёночный режим кипения. В этом случае у поверхности металла образуется паровая плёнка, которая играет роль теплового барьера и резко ухудшает теплопередачу.

Известно [104], что при шлифовании однородных металлов для уменьшения устойчивости паровой плёнки и изменения температуры перехода из пузырькового режима кипения жидкости к плёночному высокую эффективность показали присадки в виде органических и минеральных солей. Можно предположить, что и при шлифовании покрытий будет целесообразным использовать для этих целей водные растворы минеральных солей, например, фосфата калия K_3PO_4 .

Степень смачивания жидкостью поверхности твердого тела оценивают по поверхностному натяжению жидкости $\sigma_{т.жс}$ на границе разделов фаз «твердое тело-жидкость» и по краевому углу смачивания θ [104]. Хорошее смачивание обеспечивается при низких значениях поверхностного натяжения и небольших краевых углах смачивания.

В исследованиях [107] по микрорезанию закаленной стали 40X индентором из электрокорунда с использованием различных СОЖ установлено, что наилучшей смачивающей способностью обладают углеводородные СОЖ, затем идут эмульсионные и, наконец, синтетические и полусинтетические.

Повышение смачивающих свойств углеводородных СОЖ способствует снижению коэффициента трения [107] абразива по металлу (рисунок 2.12). Уменьшение коэффициента трения в среде углеводородных СОЖ по сравнению с водными жидкостями есть следствие различий механических свойств граничных плёнок смазки.

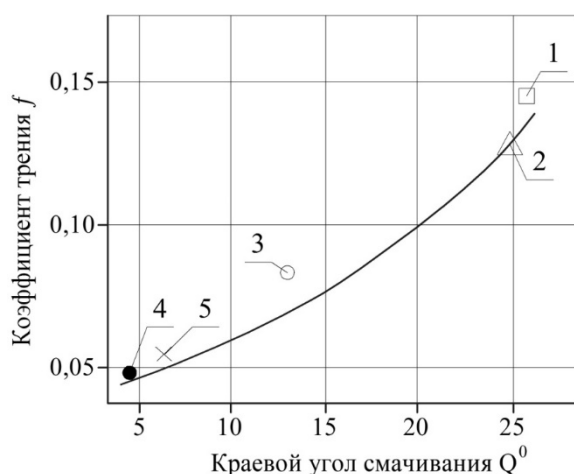


Рисунок 2.12 - Зависимость коэффициента трения зёрен из электрокорунда по стали 40X от краевого угла смачивания СОЖ: 1 – вода дистиллированная; 2 – синтетическая СОЖ Аквол-10; 3 – водный раствор эмульсола ИХП-45Э 5 % - ной концентрации; 4 – 85 % керосина и 15 % масла индустриального; 5 – масляная СОЖ ОСМЗ.

Однако необходимо принимать во внимание, что при абразивной обработке покрытий в силу их низкой теплопроводности в зоне резания развиваются высокие локальные температуры. Поэтому применение высоковязких масляных СОЖ при черновом шлифовании покрытий на жёстких режимах резания и со съёмом больших припусков нецелесообразно, так как непосредственное охлаждающее действие таких жидкостей невелико.

В связи с этим можно полагать, что в данных условиях наиболее эффективными по охлаждающему и смачивающему действию будут эмульсионные СОЖ.

2.6.3 Моющее действие СОЖ

Моющее действие СОЖ заключается в физико-химических, механических и гидродинамических процессах, направленных на обеспечение непрерывной

эвакуации (отделения) из зоны обработки продуктов износа инструмента, мелкой стружки и др., стабилизации продуктов диспергирования и предотвращения их последующей десорбции заготовкой и инструментом.

Для того, чтобы СОЖ обладала хорошим моющим действием, она должна иметь следующие свойства:

- высокую поверхностную активность или низкое поверхностное натяжение на поверхностях раздела, что улучшает смачиваемость твердых частиц;

- способность создавать вокруг твердых частиц агрегатно-смачивающие пленки, результатом чего является отделение частиц от поверхностей инструмента и заготовки. Пленки должны быть достаточно упругими и прочными для создания устойчивой суспензии твердых частиц в СОЖ.

При шлифовании покрытий образуются мельчайшие частицы шлама, которые легко проникают в микронеровности инструмента и самого покрытия и прочно удерживаются на их поверхности. Поэтому в процессах абразивной обработки покрытий моющее действие СОЖ может стать доминирующим как средство предотвращения засаливания инструмента.

При шлифовании однородных металлов моющую способность СОЖ повышают изменением в ней состава ПАВ [103, 104]. При этом используют три группы моющих присадок: анионные, катионные и неионогенные. К анионным присадкам относятся сульфаты, сульфоналы, алкилсульфонаты, соли жирных кислот (мыла), которые диссоциируют в воде с образованием ионов. Катионоактивные присадки вследствие их высокой токсичности реже используются в СОЖ, чем анионоактивные. Наименее токсичны длинноцепочные молекулярные растворы: полиэтиленгликоли, алкилоламиды, синтанолы, синтамиды, оксиэтилированные высшие жирные спирты. Изменяя состав и количество ПАВ, можно варьировать моющими свойствами СОЖ в широких пределах.

Можно полагать, что и при шлифовании покрытий для повышения моющих свойств СОЖ могут оказаться весьма эффективными присадки из эфиров жирных

кислот и модифицированных производных кислот жирных рядов, содержащих активные хлор и серу, а также оксиэтилированный нонилфенол [103, 104].

2.6.4 Диспергирующее действие СОЖ

В условиях значительных нормальных и сдвиговых напряжений, возникающих при перемещении АЗ по металлу, имеются предпосылки для активного взаимодействия с ним среды. Диспергирующее (режущее) действие СОЖ заключается в ее способности облегчать пластическое деформирование обрабатываемого материала и разрыв связей (разрушение) в нем при внедрении АИ. Оно проявляется в основном в зоне контактного взаимодействия инструмента с заготовкой и определяется высокой поверхностной активностью СОЖ – способностью эффективно снижать поверхностную энергию (работу образования новой поверхности) обрабатываемой заготовки.

В основе механизма диспергирующего действия СОЖ лежат различные проявления эффекта П.А. Ребиндера, представляющего собой совокупность процессов, заключающихся в изменении механических свойств твердых тел при снижении их поверхностной энергии под влиянием физико-химических процессов. Физический смысл этих процессов сводится к следующему:

- поверхностно-активная внешняя среда облегчает выход на поверхность дислокаций, движение которых составляет сущность пластической деформации. Этому препятствуют плёнки оксидов. В результате дислокации скапливаются под плёнкой;

- в ходе разрушения металла обнажаются и перестраиваются его внутренние связи. Эти связи ослабляются и их разрыв облегчается в том случае, когда удастся уменьшить силы взаимодействия атомов кристаллической решетки металла обрабатываемой заготовки путем внедрения на межатомных связях подвижных атомов ПАВ.

Уменьшение поверхностной энергии твердого тела, приводящее к изменению его механических свойств, может быть достигнуто различными путями [103, 104]:

- физической адсорбцией при использовании органических ПАВ, поскольку наблюдается облегчение разрушения материалов с малой энергией связи в решетке (молекулярных соединений некоторых кристаллов легкоплавких металлов и полимеров);

- хемосорбцией, так как энергия взаимодействия твердого тела и ПАВ при хемосорбции существенно выше, чем при физической адсорбции. Этим можно объяснить эффективность применения при резании олеиновой кислоты, четыреххлористого углерода, органических кислот, эфиров, спиртов, серо-, хлор-, йод- и фосфорсодержащих компонентов СОЖ, расплавов некоторых металлов, аминов и др.;

- посредством смачивания обрабатываемой поверхности заготовки родственными по физико-химической природе жидкостями (расплавами легкоплавких металлов).

Степень проявления эффекта П.А. Ребиндера зависит от следующих факторов [103, 104]: химического состава металла и СОЖ, определяющего характер и интенсивность межатомных взаимодействий; структуры, характера и количества дефектов на поверхности обрабатываемой заготовки; условий деформации и разрушения (для проявления эффекта необходимо растяжение, а не сжатие) и др.

Диспергирующее действие включает эффекты пластифицирования (пластификации) и адсорбционного понижения прочности (охрупчивания) металла. Относительно слабая поверхностно-активная среда обеспечивает пластифицирующее действие, вследствие которого пластическая деформация локализуется в тонком поверхностном слое материала, выполняющем при резании роль смазочного материала и препятствующем налипанию обрабатываемого материала на инструмент. Сильная поверхностно-активная среда производит «режущее действие», охрупчивая металл заготовки. При проявлении диспергирующего действия облегчается развитие пластической деформации в зоне стружкообразования, что уменьшает силу резания и теплосиловую напряженность процесса в целом [103, 104].

Поверхностная активация приводит к развитию микродефектов в деформируемых объемах металла, образованию трещин, выходу на поверхность трения дислокаций. Так, путем микроиндентирования обнаружено [107], что вследствие взаимодействия стали 40Х с различными СОЖ её микротвердость изменяется (рисунок 2.13). Углеводородные СОЖ (ОСМЗ и керосино-масляная смесь) обеспечивают снижение микротвердости на 5...7, а эмульсионные (ИХП-45Э и ИХП-175Э) - на 3...5 %. Синтетическая СОЖ Аквол-10 практически не повлияла на микротвердость металла.

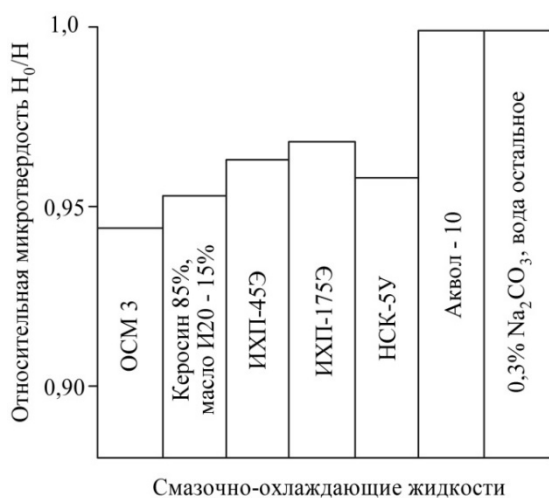


Рисунок 2.13 - Влияние состава СОЖ на микротвёрдость стали 40Х при микроиндентировании: H_0 – исходная микротвердость (1,0); N – микротвёрдость, определяемая при наличии СОЖ.

Для объяснения причин данного явления рассмотрим силы, действующие на алмазную пирамиду при её вдавливании в металл (рисунок 2.14). Нормальная составляющая силы N характеризует сопротивление пластической деформации металла, а составляющая T - сила трения, возникающая на грани пирамиды при её скольжении. Адсорбционное снижение прочности твердого тела происходит лишь при определённых условиях [107].

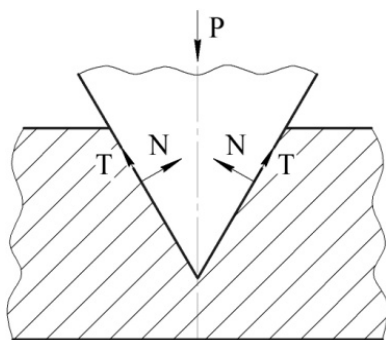


Рисунок 2.14 - Схема контакта алмазной пирамиды с поверхностью металла при микроиндентировании.

Важное значение приобретает характер и интенсивность действия напряжений в деформируемом объеме. В условиях сжатия металла,

прилегающего к грани алмазной пирамиды, молекулы ПАВ среды не могут проникнуть в его объем и взаимодействие происходит в контактном поверхностном слое. Внедрение пирамиды в металл сопровождается также и перемещением по его граням прилегающих слоев материала. Это приводит к развитию в поверхностном слое значительных сдвиговых напряжений и создает условия для проявления адсорбционного эффекта снижения прочности металла.

Благодаря высокой смачивающей и проникающей способности жидкостей молекулы ПАВ проникают в зону контакта грань-металл и далее в микродефекты деформируемого слоя металла. Вследствие этого перемещение дислокаций в прилегающем к пирамиде слое металла облегчается, напряжение сдвига падает, а следовательно, уменьшается составляющая силы T . Эмульсии ИХП-45Э и ИХП-175Э с худшими, чем у углеводородных СОЖ, ОСМЗ и керосино-масляной смеси, смачивающими свойствами в меньшей мере способны мигрировать в контакте грань-металл, а, следовательно, их влияние на микротвердость металла менее значительно [107]. Синтетическая СОЖ Аквол-10 плохо смачивает металл, что практически исключает её проникновение в зону предразрушения металла.

Увеличение глубины внедрения пирамиды в металл при его микроиндентировании (т.е. снижении микротвердости) есть результат уменьшения силы трения в контакте грань-металл вследствие адсорбционного снижения прочности и облегчения сдвига его поверхностного слоя. Данный вывод соответствует известному положению о том, что глубина внедрения индентора в металле зависит от качества смазки на его поверхности [107].

В других исследованиях [108] в качестве поверхностно-активных присадок, входящих в состав СОЖ, применялись: калиевое мыло, олеиновая кислота и эмульсол Э2. Исследование воздействия этих смазочных сред при царапании поверхности металла инденторами из электрокорунда нормального 14А осуществлялось сначала без СОЖ, а затем с различными ПАВ в водном растворе. Исследованиями [108] установлено, что глубина рисков, образовавшихся в присутствии смазочных сред, во всех случаях оказалась больше, чем при микрорезании без СОЖ. Это совершенно определённо свидетельствует об

образовании тонкого адсорбционно-пластифицирующего слоя в процессе деформации металла под воздействием смазочной среды.

Проведенные исследования показали, что увеличение концентрации ПАВ целесообразно лишь до определённого предела (рисунок 2.15), который составляет: для олеиновой кислоты – 1,5 %, для калиевого мыла – 0,5 %, а для эмульсола – 1,5...3,5 %. Дальнейшее увеличение содержания ПАВ в СОЖ приводит к уменьшению глубины резания-царапания, а следовательно, и интенсивности съема металла.

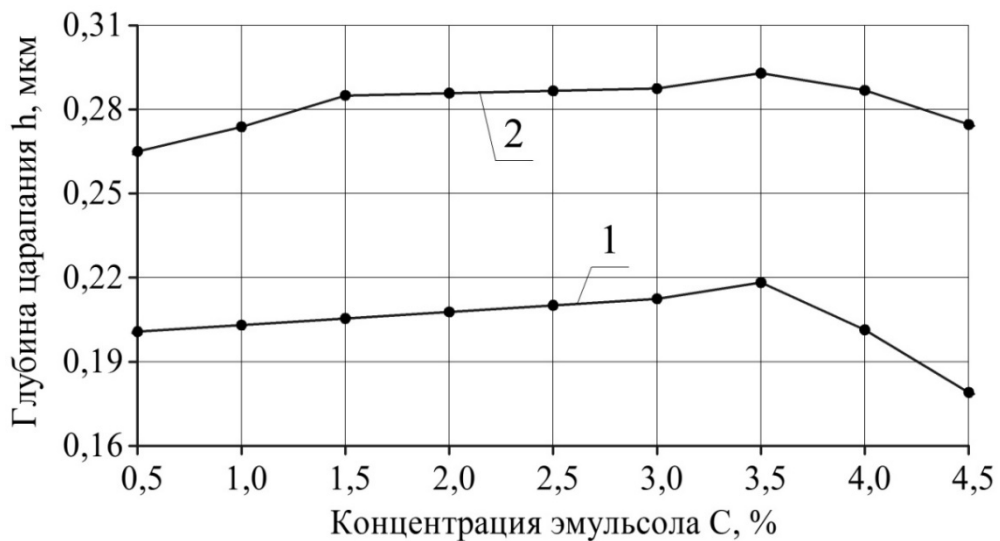


Рисунок 2.15 - Зависимость глубины царапания от концентрации эмульсола в водном растворе: 1 – закаленная сталь 45; 2 - отожжённая сталь 45.

Из вышеизложенного следует, что при абразивной обработке покрытий весьма важной задачей является правильный выбор жидкой среды не только по составу, но и по процентному соотношению.

Из-за наличия пор на поверхности покрытия площадь её больше по сравнению с компактными материалами и, следовательно, большее количество жидкости адсорбируется на ней. И можно ожидать, что объём СОЖ, участвующей в резании, при шлифовании покрытий, также будет возрастать, что приведет к усилению её влияния на процесс диспергирования материала. Это действие при шлифовании покрытий позволит повысить период стойкости ШК и производительность обработки.

2.6.5 Демпфирующее действие СОЖ

Заключается в уменьшении амплитуд колебаний сил резания, а также обрабатываемой заготовки. Аналитически и экспериментально доказано [103, 104], что СОЖ, попадающая в контакт ШК с заготовкой, способна заметно изменить динамическое состояние технологической системы. На этой основе было выдвинуто положение о демпфирующем действии СОЖ при шлифовании (смазочном действии на макроуровне): увеличив вязкость СОЖ, можно существенно уменьшить амплитуду колебаний в технологической системе.

Из всех СОЖ, освоенных в промышленном масштабе, наибольшей вязкостью обладают углеводородные (масляные) жидкости. Однако, углеводородные СОЖ и, в частности, масло И-20А представляет собой жидкость в 20 раз более вязкую, чем водные растворы эмульсионных и синтетических СОЖ [109]. Она образует на поверхности зерна и заготовки толстые адсорбционные плёнки, что приводит к режиму гидродинамической смазки и более продолжительному скольжению зерна по поверхности заготовки. При этом глубина внедрения зерна меньше, чем при использовании других СОЖ [109].

В условиях гидродинамического режима изменение объемных реологических свойств в сторону увеличения вязкости нежелательно ещё и потому, что это повлечет за собой повышенный расход мощности на шлифование вследствие возрастания гидродинамической составляющей силы P_y . Кроме того, применение масляных СОЖ вместо водных повышает упругие отжатия в технологической системе и погрешности формы шлифуемой заготовки [103, 104], а также оказывает неблагоприятное влияние на экологию производства.

Поэтому в связи с изложенным можно полагать, что при черновом шлифовании покрытий следует использовать водосмешиваемые СОЖ – эмульсионные или синтетические. А для повышения их вязкости, а следовательно, и демпфирующих свойств использовать хлор - и серосодержащие присадки [103, 104].

Одновременно, как рассмотрено выше, от состава СОЖ зависит её смазочное действие, обеспечивающее снижение составляющих сил резания P_y и

P_z . Экспериментально установлено [103], что амплитуда колебаний A заготовки в зависимости от состава СОЖ изменяется в 2 раза, а сил P_y и P_z – в 1,5 раза.

Изменение физических показателей процесса резания A , P_y и P_z обуславливает соответствующее изменение технологических показателей – шероховатости шлифованных поверхностей и стойкости ШК. Всё это открывает возможности по управлению процессом шлифования.

Таким образом, при шлифовании покрытий в условиях граничного трения модификация СОЖ с использованием различных добавок и поверхностно-активных веществ может позволить реализовать желаемые реологические режимы и способствовать решению проблем связанных как с формированием приповерхностной плёнки, так и формированием заданных свойств поверхностного слоя. Следовательно, это направление является перспективным в проведении научных исследований процесса абразивной обработки покрытий.

2.7 Выводы по главе

Для определения истинного характера абразивной обработки покрытий восстанавливаемых валов, а также наиболее износостойких абразивных материалов и эффективной СОЖ и подтверждения некоторых теоретических предпосылок, необходимо провести ряд экспериментальных работ (от сугубо лабораторных до производственных проверок). Именно:

1. Определить закономерности изменения режущих свойств ШК из электрокорунда и карбида кремния и их влияния на эксплуатационные возможности восстановленных валов при круглом продольном шлифовании от режимных факторов - скорости и глубины резания.

2. Установить закономерности изменения режущих свойств кругов из разных абразивных материалов и их влияния на эксплуатационные показатели восстановленных валов при круглом продольном и врезном шлифовании.

3. Исследовать влияние среды на работоспособность ШК и послевосстановительный ресурс плазменно-напылённых валов.

В качестве выходных параметров процесса шлифования должны служить: а) стойкость кругов; б) удельная производительность; в) коэффициент режущей способности кругов; г) удельная мощность шлифования; д) шероховатость поверхности; е) точность геометрической формы (овальность, конусность); ж) износостойкость обработанных поверхностей.

Глава 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Общая методика размерной обработки микропористых покрытий восстанавливаемых валов

На первом этапе работы были высказаны предположения о целесообразности совершенствования абразивной обработки микропористых покрытий восстановленных деталей.

На втором этапе предусматривались теоретические исследования процесса абразивной обработки, при этом были определены условия повышения эффективности шлифования покрытий, рассмотрено влияние режимных факторов – скорости и глубины резания - на силу резания единичным зерном и на величину касательных напряжений возникающих в зёрнах.

Третий этап работы заключался в экспериментальной проверке и изучении влияния технологических факторов на износостойкость абразивных материалов при микрорезании и при обработке непосредственно шлифовальными кругами.

Методикой исследования износостойкости шлифовальных материалов предусматривалось выполнение следующих работ: определение количественных закономерностей износа корунда и карбида кремния при микрорезании реальными зёрнами из этих абразивов; сравнительная оценка износостойкости реальных зёрен из различных абразивных материалов при микрорезании; исследования по механизму износа абразивов; проверка полученных закономерностей при шлифовании в лабораторных и производственных условиях с выбором эффективного состава СОЖ.

Решению задач, связанных с оценкой влияния технологических факторов на износостойкость абразивных материалов при микрорезании и шлифовании, предшествовали подготовительные работы общего назначения. Это – обоснование и выбор формы, размеров и материала образцов, шлифовальных материалов, характеристик ШК, проектирование, изготовление и испытание экспериментальной установки и др.

Общей методикой предусматривалась определенная последовательность в экспериментальном решении поставленных задач. Для проведения работ по

определению области оптимального сочетания факторов при микрорезании и шлифовании необходимо было выявить:

1. Возможные границы изменения переменных факторов процессов микрорезания и шлифования, в которых обеспечивались бы высокие показатели, характеризующие эффективность обработки.

2. Зависимость износостойкости АЗ при микрорезании и шлифовании от технологических факторов.

Для решения задач, связанных с оценкой процесса шлифования, была разработана соответствующая блок-схема (рисунок 3.1), учитывающая переменные факторы этого процесса, например, материал АЗ, скорость и глубина резания, состав СОЖ при фиксированных на постоянном уровне параметрах (физико-механические свойства покрытий, диаметр образцов и инструмента и др.).



Рисунок 3.1 - Блок-схема входных и выходных параметров процесса шлифования.

При микрорезании в зависимости от переменных факторов необходимо было определить износостойкость АЗ, а при шлифовании (рисунок 3.1) – стойкость кругов, удельную производительность, коэффициент режущей способности ШК, удельную мощность шлифования и качество шлифованной поверхности (шероховатость, точность формы).

Для окончательной оценки работоспособности опытных ШК и технологической эффективности новых составов СОЖ требовалось провести:

- лабораторные испытания кругов и СОЖ при обработке покрытий и закаленной стали 45;
- изучение рельефа рабочей поверхности кругов путем ее фотографирования с многократным увеличением;
- производственные испытания кругов и СОЖ при обработке натуральных деталей, восстановленных нанесением покрытий;
- лабораторные и эксплуатационные износные испытания модельных и натуральных образцов восстановленных коленчатых валов.

Существующие конструкции станков, включая и выпускаемые серийно, не позволяли провести исследования в заданном объеме. Поэтому для решения поставленных задач в настоящей работе была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, на которой представилась бы возможность воспроизвести все изучаемые уровни переменных факторов.

3.2 Описание экспериментальных установок для обработки микропористых покрытий восстанавливаемых валов

Анализ существующих схем установок для микрорезания и шлифования конструкционных материалов [57, 64, 98] и выводы, вытекающие из 2 главы, позволили сформулировать и разработать технические требования на проектирование экспериментальных установок и их изготовление.

Экспериментальные установки для проведения исследований по микрорезанию и шлифованию были смонтированы на базе круглошлифовального полуавтомата высокой точности с ЧПУ модели 3М152МВФ2, модернизированного в соответствии с техническими требованиями.

Для проведения исследований по определению износостойкости абразивных материалов при микрорезании (рисунок 3.2) на шпинделе станка вместо шлифовального круга был установлен стальной диск 1 диаметром 390 мм. На этом диске закреплялась специальная металлическая державка (индентор) 2 в которую, с помощью медной амальгамы, заделывали единичное АЗ. На планшайбе передней бабки приклеивалось бумажное делительное кольцо 3 для равномерного поворота вала-образца 4 на центрах. Поворот вала-образца на

центрах через хомутик 5 на одно деление шкалы делительного кольца обеспечивало расстояние между рядами рисок на образце, равное 2...3 мм. Для привода главного движения, обеспечивающего скорости резания 10, 20, 35 и 50 м/с, были изготовлены сменные ведомые шкивы.

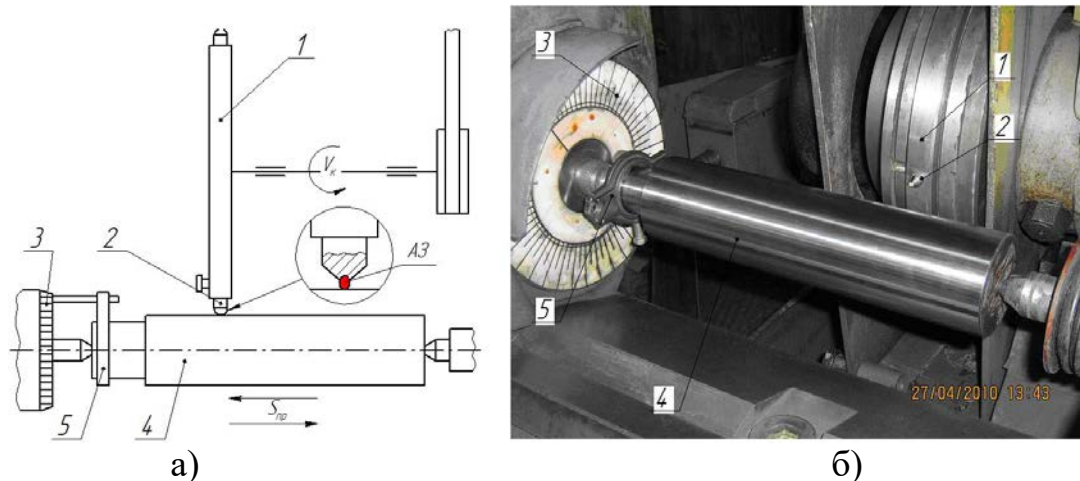


Рисунок 3.2 - Экспериментальная установка для исследования износостойкости абразивных материалов при микрорезании: а – принципиальная схема; б – общий вид рабочей зоны станка при микрорезании

Для проведения исследований при круглом наружном шлифовании (рисунок 3.3) монтировались устройства для измерения радиальной P_y и тангенциальной P_z составляющих силы резания [110], состоящие из двух тензометрических центров 1, служащих одновременно и для установки обрабатываемых образцов 2 на оправке 3.

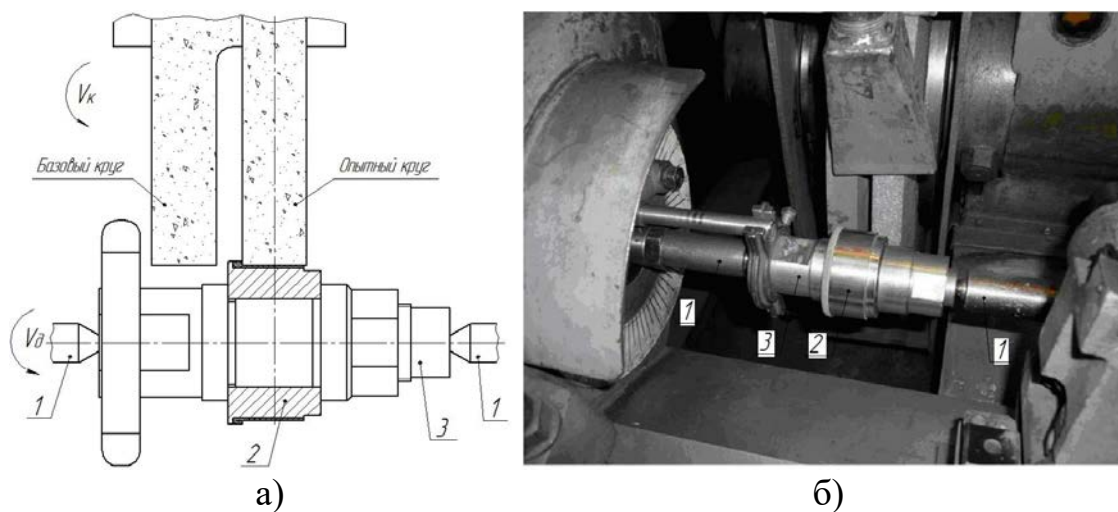


Рисунок 3.3 - Экспериментальная установка для проведения исследований по шлифованию: а – принципиальная схема; б – общий вид рабочей зоны станка

Для измерения сил резания P_y и P_z и синхронной их записи во время каждого опыта тензометрические датчики подключались (рисунок 3.4) к анализатору спектра 1 модели ZET A17-U2 через тензометрический усилитель 2 модели ZET 412. Тензометрические датчики были защищены от воздействия СОЖ и окружающей среды эпоксидной смолой, а от воздействия магнитных полей – металлическим экраном и экранированными сигнальными проводами.

Все полученные показания регистрировались и обрабатывались на компьютере 3, подключенном к анализатору спектра.



Рисунок 3.4 - Контрольно-измерительная аппаратура

Кроме того, при проведении опытов по шлифованию осуществлялся периодический контроль за следующими параметрами:

- частота вращения детали (образца) – указателем частоты вращения изделия на пульте управления станком;
- давление в магистрали СОЖ – манометром.

Таким образом, экспериментальная установка позволяла проводить исследование процесса микрорезания и шлифования в широком диапазоне изменения выбранных переменных факторов.

3.3 Выбор обрабатываемых и абразивных материалов и шлифовальных кругов для исследований

3.3.1 Выбор микропористых покрытий для исследований

Наиболее широкое распространение в последние годы для восстановления изношенных валов получили плазменные покрытия на железной основе [4, 5, 32].

Поэтому в качестве обрабатываемого материала при исследованиях по микрорезанию и шлифованию использовалось плазменное покрытие из порошковой композиции на железной основе состоящей из 10 % по массе порошка интерметаллида марки ПВ – Н85Ю15, 10 % самофлюсующего порошкового сплава ПР-НХ17СР4, остальное – железный порошок ПЖРВ 2.200.26. Химический состав полученного покрытия, вес. %: Fe – 68,7; O – 12,6; C – 11,9; Ni – 5,9; Cr – 1,1. Твердость – 40...42 HRC. Пористость 8...10 %.

Металлографический и рентгеноструктурный анализ показал, что структура покрытия состоит из легированного твердого раствора и сложной эвтектики на железной основе с различными включениями в виде оксидов железа и никеля, а также интерметаллидов типа FeNi.

Образцы с плазменно-напыленными покрытиями для микрорезания (рисунок 3.5) представляли собой валы из стали 45 диаметром около 75 мм и длиной 300 мм с шероховатостью $Ra \leq 0,20$ мкм и отклонениями от круглости и



Рисунок 3.5 - Образцы для исследований износостойкости абразивных материалов при микрорезании

цилиндричности не более 0,002 мм, а для шлифования (рисунок 3.6, а) - втулки из стали 45 диаметром $60 \pm 0,1$ мм и высотой 32 и 70 мм, имитирующие соответственно коренные и шатунные шейки коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53. Для шлифования в центрах образцы устанавливались на жесткую оправку (рисунок 3.6, б).



а)

б)

Рисунок 3.6 - Образцы для исследований по шлифованию: а – плазменно-напыленные образцы; б – образец на оправке.

Напыление образцов для микрорезания и шлифования производили на установке УПУ-3Д в ООО «Плазматех» (г. Барнаул) по существующей там технологии восстановления коленчатых валов ДВС. Толщина напыленного слоя составляла 1...1,5 мм.

Поскольку при черновом шлифовании ремонтных плазменных покрытий нередко захватывается и основной материал ремонтируемых деталей, оценка микрорезания и шлифования напыленных слоев проведена в сравнении с базовым конструкционным материалом – сталью 45. Поэтому микрорезанию и шлифованию подвергали также образцы из закаленной стали 45 твердостью 45...50 HRC тех же геометрических размеров (рисунок 3.5 и 3.6).

3.3.2 Выбор шлифовальных материалов для проведения опытов по микрорезанию покрытий

Из п. 1.3 следует, что для обработки покрытий восстановленных деталей обычно используют ШК из электрокорундов, карбидов кремния и сверхтвердых материалов – эльбора и алмаза синтетического. Поэтому для проведения исследований износостойкости этих абразивов при микрорезании использовались классифицированные по форме серийные абразивные зерна № 40 по ГОСТ 3647-80 из отечественных шлифовальных материалов: электрокорундов – нормального (13А), белого (24А) и хромотитанистого (95А) производства ОАО «Юргинские

абразивы», карбидов кремния – зеленого (64С) и черного (54С) производства ОАО «Волжский абразивный завод», а также абразивные зерна из кубического нитрида бора поликристаллического (ЛКВ40) и алмаза синтетического (АС4) размером 250/200 по ГОСТ 9206-80 производства ООО «Петербургский абразивный завод «Ильич».

Известно [57], что эффективную обработку металлов можно производить при условии, если твердость абразива не менее чем в 2 раза выше твердости обрабатываемого материала. Оценивая с этих позиций эксплуатационные показатели представленных абразивов для обработки покрытия, следует признать, что принцип оптимального соотношения твердостей выполняется, так как твердость этого покрытия в исходном состоянии в 4...5 раз и более ниже, чем наименее твердого абразивного материала - электрокорунда.

Таким образом, для исследований были отобраны те виды шлифовальных материалов, производство которых освоено абразивной промышленностью, но нет систематизированных данных по сравнительной оценке их режущих свойств при обработке покрытий.

3.3.3 Выбор шлифовальных кругов для экспериментов по размерной обработке покрытий

С целью проверки закономерностей износа абразивов, выявленных при микрорезании единичным зерном и установления частных зависимостей работы кругов от материала АЗ, а также от скорости и глубины резания было решено провести лабораторные исследования процесса шлифования покрытий. Такая методика позволяет проследить характер связей марок абразивных материалов кругов и режимов резания с показателями, характеризующими эффективность процесса шлифования.

Для этих исследований применялись ШК из электрокорундов и карбидов кремния формы 1 600 x 25 x 305 мм ГОСТ Р52781-2007 производства ОАО «Волжский абразивный завод», а также из СТМ – эльбора ЛКВ40 формы 1А1 ГОСТ 17123-79 и алмаза синтетического АС4 формы 1А1 ГОСТ 16167-90

производства ООО «Петербургский абразивный завод «Ильич» по принятой на этих заводах технологии и рецептуре.

ШК из электрокорундов – белого 24А, нормального 13А и хромотитанистого 95А, а также из карбидов кремния – зеленого 64С и черного 54С были изготовлены зернистостью F46, твердостью N, 6-й структуры на керамической связке (V). Абразивный инструмент из СТМ был произведен зернистостью 250/200, твердостью СТ2 на керамической связке. Характеристики ШК, отобранных для исследований, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Характеристики шлифовальных кругов, отобранных для исследований

Исследуемый абразивный материал	Характеристика кругов
1.Электрокорунд белый (24А)	24А F46N6V
2.Электрокорунд нормальный (13А)	13А F46N6V
3.Электрокорунд хромотитанистый (95А)	95А F46N6V
4. Карбид кремния зеленый (64С)	64С F46N6V
5. Карбид кремния черный (54С)	54С F46N6V
6. Эльбор поликристаллический ЛКВ40	ЛКВ40 250/200КСТ2
7. Алмаз синтетический АС4	АС4 250/200КСТ2

Зернистость шлифовальных кругов из электрокорундов и карбидов кремния (F46) и из СТМ (250/200) была выбрана из соображений обеспечения размеров абразивных зерен в составе ШК соизмеримыми с размерами единичных АЗ используемых при микрорезании. Кроме того, ШК выбранных зернистостей рекомендуется [111] применять как для чернового, так и для чистового круглого наружного шлифования.

Влияние твердости АИ на его износ и затупление состоит в том, что она определяет режим работы (изнашивания) круга - равномерное самозатачивание, комбинированный режим (частичное самозатачивание) и преимущественное затупление [112]. Можно предположить, что при шлифовании покрытий, обладающих повышенной адгезионной и химической активностью, наиболее благоприятным режимом работы кругов будет комбинированный режим. Этот

режим работы АИ может быть обеспечен, по всей вероятности, при использовании кругов средней твердости. Поэтому круги из электрокорундов и карбидов кремния были изготовлены с твердостью N.

При назначении твердости кругов из СТМ руководствовались возможностями производителя – ООО «Петербургский абразивный завод «Ильич», где круги на керамической связке изготавливают твердостью СТ2 и тверже. К тому же из пункта 1.3 следует, что «мягкие» круги из СТМ на керамической связке применять при шлифовании покрытий не рекомендуется по причине их повышенного износа.

Выбор структуры АИ из электрокорундов и карбидов кремния был предопределен результатами исследований [113] при шлифовании напеченных микропористых слоев, где было установлено, что наибольшую режущую способность показали круги средних номеров структур (5, 6 и 7 структуры). Поэтому для наших исследований круги из электрокорундов и карбидов кремния были изготовлены 6-й структуры, а круги из СТМ – 100 % - й концентрации шлифовального материала.

Назначение вида связки продиктовано её возможностями противостоять износу и засаливанию АИ. Так, применение кругов из СТМ на металлической связке снижает их износ, но вызывает интенсивное засаливание инструмента [50, 51]. Использование ШК из СТМ на органической связке, наоборот, приводит к повышенному их износу. В случаях применения кругов из эльбора и алмаза на керамической связке наблюдался умеренный износ инструмента, засаливание кругов незначительно, процесс шлифования протекал стабильно без вибраций и шлифовочных дефектов [50, 114]. Поэтому при назначении связующего материала предпочтение было отдано керамической связке как для кругов из традиционных абразивных материалов, так и для инструментов из СТМ.

Представленные на испытания ШК были изготовлены при тщательном контроле за соблюдением принятого на заводах технологического процесса их изготовления со стороны работников лаборатории эксплуатации абразивных инструментов. Гранулометрический состав зерен этих кругов был строго

одинаков, благодаря чему исключалось влияние его нестабильности на процесс шлифования.

Все опытные ШК перед установкой на станок проходили следующую подготовку:

1. Испытания на разрыв по ГОСТ 12.3.028-82.
2. Проверка твердости, геометрических размеров и дисбаланса.
3. Статическая и динамическая балансировка в сборе с планшайбой.

Твердость кругов оценивали по фактической глубине лунки, измеренной на пескоструйном приборе «Калибр». Для опытов были отобраны круги, имеющие фактические глубины лунок, лежащие в середине диапазона для каждой степени твердости в соответствии с ГОСТ Р 52587-2006.

После установки на станок ШК окончательно правились.

3.4 Методика испытаний на износостойкость единичных абразивных зерен при микрорезании покрытий

Исследования основных закономерностей износа абразивных материалов при микрорезании покрытий выполнялись в два этапа. На первом этапе проводились исследования износа корунда и карбида кремния, являющихся представителями двух групп соединений - оксидов и карбидов. Они отличаются друг от друга типом кристаллической решетки, видом связи, а следовательно, механическими и химическими свойствами. Кроме того, эти абразивы наиболее широко применяются при обработке компактных (монокристаллических) материалов.

Исследования проводились при прерывистом микрорезании единичными АЗ по схеме круглого наружного шлифования с продольной подачей по известной методике [115]. Этот метод хорошо моделирует процесс шлифования, позволяет определить износ вершин АЗ, упрощает наблюдение за изменением рельефа их контактных поверхностей в процессе износа, а также проследить за влиянием режимных факторов на механизм образования шлифовочных рисок, исключив влияние связки АИ.

На первом этапе исследования выполнялись с целью установления общих закономерностей износа абразивов в зависимости от режимных факторов – скорости и глубины микрорезания - проведением однофакторных экспериментов.

Для определения влияния скорости резания на износ абразивов эксперименты выполнялись при постоянной глубине резания $t = 10$ мкм в диапазоне скоростей 10...50 м/с – наиболее применяемых в практике шлифования. Скорость продольной подачи стола рассчитывалась таким образом, чтобы обеспечить расстояние между соседними рисками-царапинами не менее 0,4...0,5 мм для того, чтобы образующие наплывы покрытия по краям предыдущей царапины не исказили профиль соседней царапины. Поэтому с увеличением скорости резания V_p пропорционально изменяли скорость продольной подачи стола V_S , отношение $V_p/V_S = 4930$. Для скоростей резания 10, 20, 35 и 50 м/с скорость V_S равнялась соответственно 122, 275, 425 и 610 мм/мин.

Для исследования влияния глубины резания на износ абразивов микрорезание выполняли на глубинах 5, 10, 15 и 20 мкм при постоянных скорости 35 м/с и продольной подаче стола 425 мм/мин. Эти режимные условия были установлены нами на основе предварительных экспериментов и с учетом рекомендаций [37].

Для получения зависимостей износа от режимов микрорезания использовался метод наименьших квадратов. Вначале были построены однофакторные зависимости. Результаты аппроксимации показали, что влияние скорости и глубины резания наиболее точно описывается линейной зависимостью. В дальнейшем по этим же табличным данным строили двухфакторные зависимости в предположении, что взаимное влияние V и t носит аддитивный эффект. Аппроксимация производилась в среде табличного процессора «Excel» с использованием настройки «Поиск решения».

На втором этапе исследования выполнялись с целью изыскания шлифовальных материалов, обладающих повышенной износостойкостью из числа абразивов, представленных в п. 3.3. Эти исследования выполняли при

микрорезании со скоростью 35 м/с, продольной подаче стола 425 мм/мин и глубине резания 10 мкм.

Перед началом каждого опыта на планшайбу 1 круглошлифовального станка (рисунок 3.7) устанавливалась державка 2 с закрепленным на ней индикатором 3 с ценой деления 0,001 мм. С помощью этого индикатора контролировалась параллельность поверхности опытного вала 4 относительно траектории движения стола.

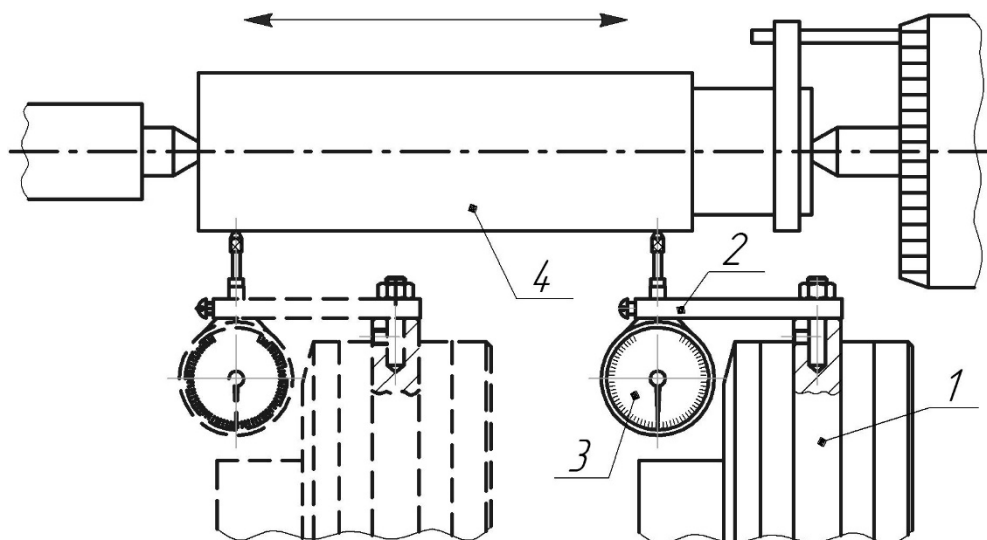


Рисунок 3.7 - Схема контроля и корректировки положения вала-образца

Момент касания АЗ с валом-образцом определялся при их постепенном сближении до появления рисок на поверхности заготовки. опыты показали, что

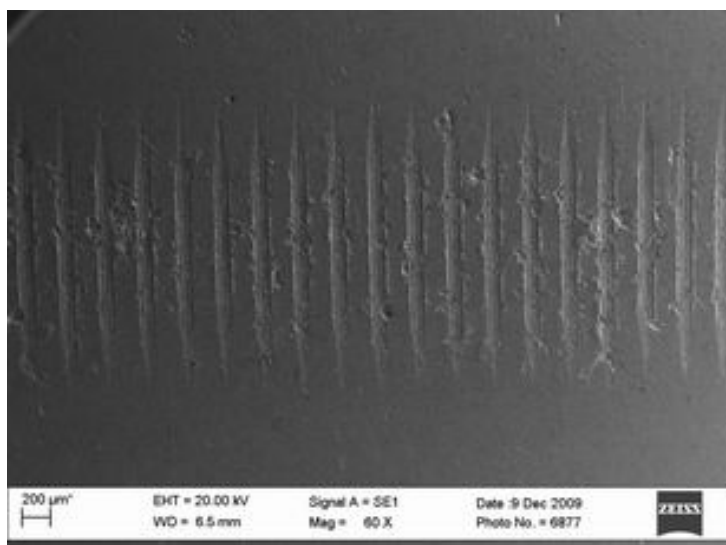


Рисунок 3.8 - Риски на плазменном покрытии после микрорезания

при некотором навыке визуально можно заметить появление рисок глубиной порядка 1 мкм и менее. После определения момента касания в соответствии с программой опыта задавали требуемую глубину микрорезания. Начало опыта определялось от момента включения продольной подачи стола. В процессе опыта

риски наносились (рисунок 3.8) по всей длине образца. Параллельно первому ряду рисок наносились последующие до износа зерна на величину, равную заданной глубине микрорезания, вследствие чего обработка прекращалась. Окончание опыта определялось от момента прекращения микрорезания.

Требуемую глубину микрорезания отсчитывали по лимбу станка с ценой деления 0,0005 мм. Подача шлифовальной бабки на глубину микрорезания контролировалась индикатором с ценой деления 0,001 мм.

Таким образом, испытание единичных зерен на износ проводилось в условиях, приближенных к реальным условиям их эксплуатации при шлифовании. Это позволило достаточно надежно выделить физико-химические процессы в контакте абразив-покрытие и наиболее строго смоделировать скоростные и температурные условия, создающиеся при шлифовании, исключая при этом влияние трения связки круга.

Исследования износа абразивов в условиях микрорезания выполняли без смазочно-охлаждающей жидкости, так как при этом особенно четко выявляются свойства материалов, связанные с их сопротивлением износу. Привод вращения изделия во время опытов также отключался.

Вследствие некоторой разницы геометрии зёрен и физико-механических свойств отдельных образцов наблюдался разброс опытных данных. Поэтому в проведенных исследованиях принимали среднеарифметическое значение двукратного испытания не менее десяти зерен каждой исследуемой пробы.

Как показала практика исследования износостойкости, такое количество зерен является вполне достаточным, увеличение их числа не изменяет существенным образом значение статистического среднего. Так, при сравнении результатов испытания с двукратной повторностью 10 и 25 зерен электрокорунда хромотитанистого изменение статистического среднего значения износостойкости составляет не более 9 %, что для такого рода испытаний является допустимым.

Количественным показателем износостойкости различных АЗ была принята суммарная длина рисок, нанесенных на образце до износа зерна на величину

глубины микрорезания (10 мкм), т.е. до прекращения обработки.

Определение износостойкости (длины пути резания) зерен из электрокорундовых и карбидкремниевых материалов в каждом опыте производили по формуле [116]:

$$L_3 = \left(\frac{l_0 + l_1}{2} \cdot N_1 \right) + \left(\frac{l_1 + l_2}{2} \cdot N_2 \right) + \dots + \left(\frac{l_i + l_{i+1}}{2} \cdot N_{i+1} \right), \quad (3.1)$$

где L_3 – износостойкость, м;

l_0 – длина начальной риски, м;

l_i – длина риски в начале и в конце определенного промежутка, м;

N_i – число нанесенных рисок на определенном промежутке.

Применение формулы (3.1) связано с неравномерным износом АЗ, наибольшая интенсивность которого наблюдается в первоначальный момент резания на глубинах более 5 мкм. На рисунке 3.9 показана схема алгоритма нахождения длины пути резания из которой видно, что весь путь разбит на трапеции, боковые стороны которых максимально приближаются к плавной кривой, проведенной по краям рисок.

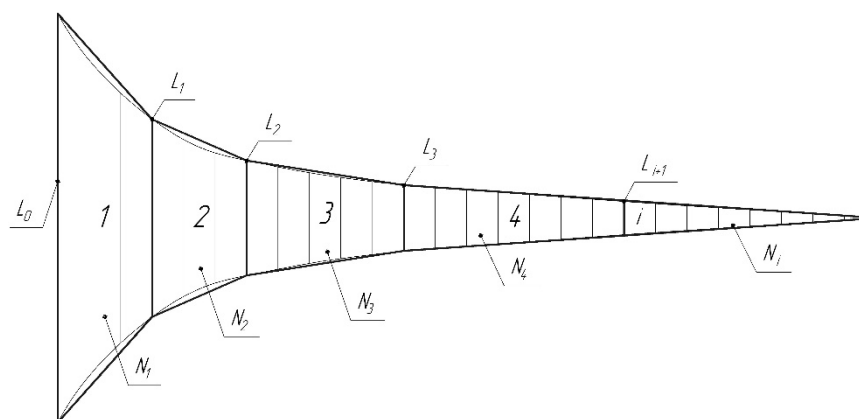


Рисунок 3.9 - Схема алгоритма расчета длины пути резания

Определение износостойкости зерен из СТМ производили в два этапа. На первом этапе в каждом опыте определялась длина пути резания частично износившегося АЗ по формуле [116]

$$L_3^1 = \left(\frac{l_0 + l_k}{2} \right) \cdot N_{\text{общ}}, \quad (3.2)$$

где L_3^1 – длина пути резания частично износившегося АЗ, м;

l_0 – длина начальной риски, м;

l_k – длина конечной риски, м;

$N_{общ}$ – общее количество нанесенных рисок, шт.

На втором этапе вычислялась теоретическая износостойкость по формуле [116]

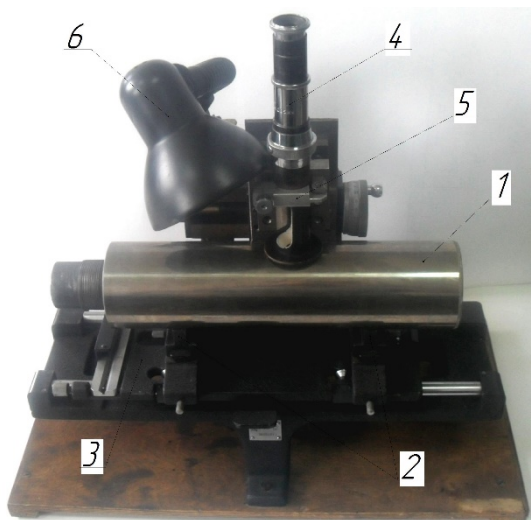
$$L_3 = \frac{L_3^1 \cdot U_T}{U_\phi}, \quad (3.3)$$

где U_T – теоретический износ острия, мкм (равнялся 10 мкм);

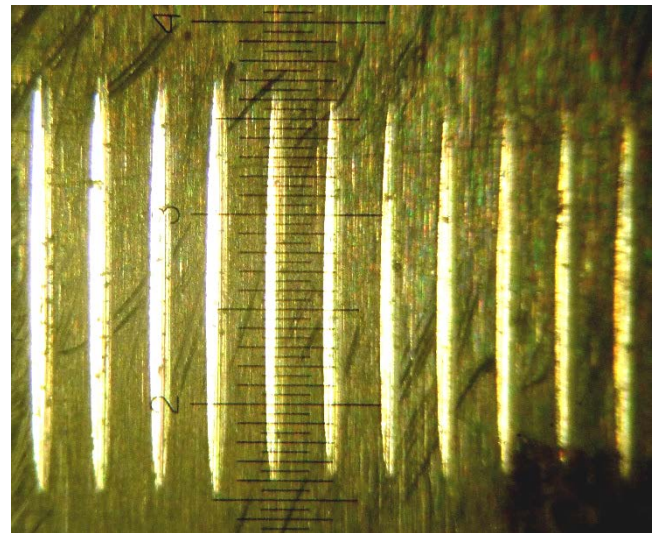
U_ϕ – фактический износ острия, мкм.

Такой подход к определению длины пути резания АЗ из СТМ вызван высокой износостойкостью последних и нехваткой, в связи с этим, подготовленных плазменно-напыленных образцов.

Для измерения длины рисок (рисунок 3.10,а) использовали отсчетный микроскоп 4 МПБ-2, закрепленный в приспособлении с помощью кронштейна 5. Вал-образец 1 с нанесенными рисками устанавливался на призмы 2, закрепленные на подвижном столе 3. Дополнительная подсветка обеспечивалась лампой 6. Цена деления отсчетной шкалы микроскопа МПБ-2 составляла 0,05 мм.



а)



б)

Рисунок 3.10 - Замер длины нанесенных рисок на образце: а – общий вид измерительной установки; б – вид рисок и отсчетной шкалы в микроскопе МПБ-2.

Сфокусировав объектив на «дорожку» рисунок (рисунок 3.10,б), определяли их длину по количеству делений отсчетной шкалы. Для снижения погрешности измерения длин рисок на конкретном участке «дорожки» определялась средняя длина не менее 5 рисок. Практика показала, что предложенный метод измерений обеспечивает достаточно высокую точность.

При исследовании кинетики износа абразивного острья о его величине судили по уменьшению глубины наносимых рисок в зависимости от пройденного в металле пути L :

$$U = h_0 - h_i = f(L), \quad (3.4)$$

где U – износ абразивного острья, мкм;

h_0 – начальная глубина первой риски, мкм;

h_i – глубина i – й риски ($i = 100, 200, 300$ и т.д.).

Фактическую глубину рисок определяли путем обработки профилограмм измеренных поверхностей с помощью специально разработанной программы «Анализ и обработка профилограмм и осциллограмм» [117, 118]. Снятие профилограмм с вала-образца производилось на профилографе-профилометре АБРИС ПМ-7 с последующим сохранением на компьютере. Указанная программа и встроенный в неё конвертер производили построение профилограммы в графической зоне (рисунок 3.11, а). Манипулируя указателем мыши, указывалась

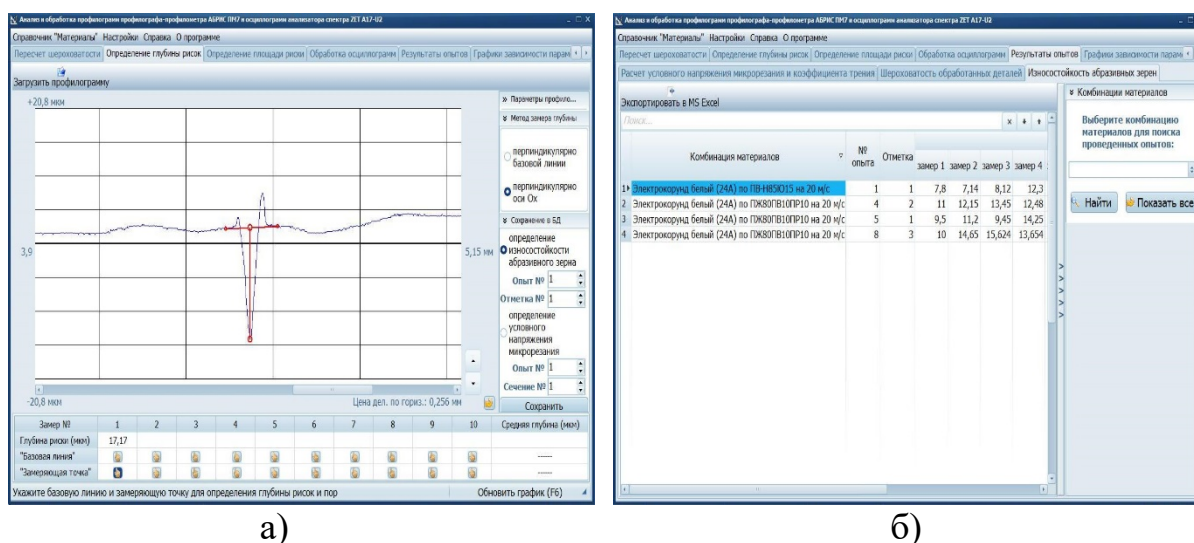


Рисунок 3.11 - Внешний вид специальной программы: а – вкладка «Определение глубины рисок»; б – вкладка «Результаты опытов» - «Износостойкость абразивных зерен».

«базовая линия», имитирующая реальную поверхность до опыта, и точка на профилограмме от которой необходимо рассчитать расстояние до этой поверхности. Все производимые измерения фиксировались в сводной таблице с последующим нахождением среднеарифметического значения глубин не менее 10 замеренных рисок (рисунок 3.11,б).

Разработанная программа позволяет выбрать метод замера глубины рисок, определить вид эксперимента и сохранять результаты произведенных замеров в базе данных с сортировкой комбинаций пар абразив-обрабатываемый материал (рисунок 3.11, б).

Замер износа абразивного острия после опыта производили на инструментальном микроскопе ИМЦЛ 100 x 50, А с точностью до 0,0001 мм. Этот же микроскоп применяли для периодического наблюдения за режущей кромкой АЗ в течение опыта. Полученные после микрорезания образцы изношенных АЗ рассматривались под указанным микроскопом и фотографировались через него при 50-ти кратном увеличении цифровой фотокамерой. Фотографии получали в трех проекциях: параллельно вектору скорости резания для рассмотрения передних и задних углов (рисунок 3.12); перпендикулярно вектору скорости

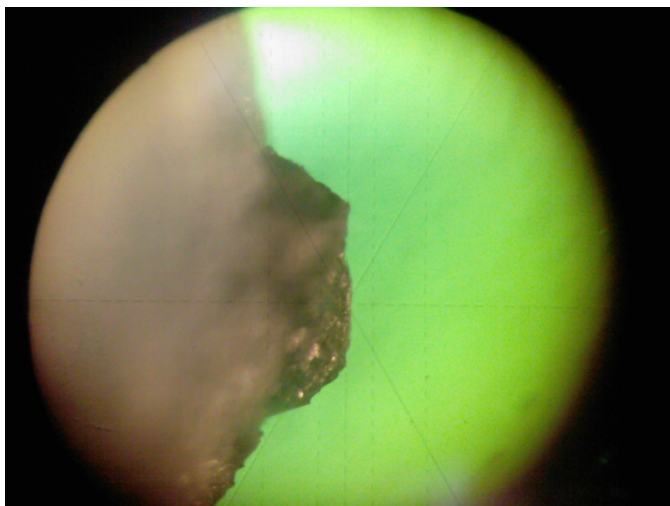


Рисунок 3.12 - Профиль абразивного зерна после микрорезания в плоскости, параллельной вектору скорости резания

резания для рассмотрения передней поверхности; на виде сверху для определения величины площадки износа. Для дальнейшей компьютерной обработки у полученных цифровых фотоснимков увеличивалась контрастность и четкость.

3.5 Методика исследований режущей способности шлифовальных кругов при размерной обработке покрытий

С целью апробирования лабораторных исследований износа единичного зерна в реальных условиях эксплуатации были проведены исследования процесса шлифования покрытий.

Исследования основных закономерностей износа ШК выполнялись в два этапа: на первом - проводились испытания кругов из электрокорунда белого 24А и карбида кремния зеленого 64С для установления общих закономерностей их износа в зависимости от режимных факторов, а на втором - выполнялись исследования с целью изыскания АИ, обладающего повышенной износостойкостью из числа кругов, представленных в п. 3.3.

С целью установления влияния режимов резания и материала АЗ на показатели шлифования ряд факторов были приняты постоянными, такие как диаметры образцов и инструмента, состав и расход СОЖ и т.д., которые определялись из априорной информации или условий реализации эксперимента (рисунок 3.1).

Исследования по шлифованию плазменно-напыленных образцов производились по схемам круглого наружного шлифования с продольной (продольное шлифование) и радиальной (врезное шлифование) подачей. Это было продиктовано тем, что в условиях производства наращенные покрытия деталей, в частности шейки коленчатых валов, обычно обрабатываются по указанным схемам.

На первом этапе при продольном шлифовании в качестве варьируемых режимных факторов приняты скорость резания $V_p = 10...50$ м/с и глубина резания $t = 0,005...0,02$ мм/дв. ход при толщине припуска в пределах 1,0...1,25 мм на сторону. Снятие основного припуска производилось за несколько продольных перемещений стола с заготовкой в зависимости от глубины резания. Завершалась обработка процессом выхаживания: снятие металла покрытия происходило за счет выборки упругих отжатых детали.

Для определения влияния скорости резания на режущие свойства ШК на первом этапе обработка выполнялась на скоростях 10, 20, 35 и 50 м/с. Для обеспечения постоянства мгновенного сечения стружки с увеличением скорости резания V_k пропорционально изменяли другие параметры режима обработки: скорости продольной подачи $S_{прод}$ и вращения детали V_d , отношения $V_k / S_{прод} = 4950$ и $V_k / V_d = 110$. Режимы резания при продольном шлифовании представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Режимы резания при продольном шлифовании на первом этапе исследований

Скорость резания V_k , м/с	Скорость продольной подачи $S_{прод}$, мм/мин	Скорость вращения детали V_d , м/мин	Глубина шлифования t , мм/дв.ход
10	121	5,46	0,01
20	243	10,74	0,01
35	425	18,84	0,01
50	605	26,94	0,01

Принятая методика позволила более строго оценить влияние скорости шлифования, исключив влияние дополнительной составляющей скоростей подачи стола и вращения детали.

Для исследования влияния глубины резания при продольном шлифовании на первом этапе обработку выполняли на глубинах 0,005, 0,01, 0,015 и 0,02 мм/дв. ход при постоянных скоростях резания 35 м/с, продольной подачи - 425 мм/мин и вращения детали - 18,84 м/мин.

На втором этапе исследований при изыскании ШК, обладающих повышенной износостойкостью, продольное и врезное шлифование выполняли на режимах резания представленных в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Режимы резания при продольном и врезном шлифовании на втором этапе исследований

Виды шлифования	Скорость резания V_k , м/мин	Скорость вращения детали V_d , м/мин	Скорость продольной подачи $S_{прод}$, м/мин	Скорость радиальной подачи $S_{рад}$, мм/мин	Глубина резания t , мм/дв.ход	Продолжительность периода врезания $\tau_{обр}$, мин
Продольное	35	18,84	425	-	0,01	-
Врезное	35	18,84	-	0,105	-	1

Выбранные режимные условия были установлены нами на основе предварительных экспериментов и с учетом практики шлифования [111, 119].

Для оценки работоспособности ШК после каждого опыта определяли стойкость круга T . Для энергетической оценки процесса измерялись составляющие P_y и P_z силы резания. Затем определялись расчетные показатели шлифования: объемный сьем металла Q_m и износ круга Q_a , удельная производительность q , коэффициент режущей способности круга K_p и удельная мощность шлифования $N_{уд}$. Кроме того, контролировали шероховатость обработанной поверхности по критерию Ra, а также интенсивность засаливания АИ. Теплонапряженность процесса оценивалась косвенно по наличию прижогов на обработанной поверхности. Такая комплексная оценка ШК позволит более полно учесть их эксплуатационные показатели, проявляющиеся в разных технологических условиях.

Начало процесса шлифования определялось от момента начала роста осциллограмм сил резания на мониторе компьютера, т.е. от момента начала силового воздействия ШК на образец, а окончание - от момента падения осциллограмм на мониторе компьютера до начального значения, т.е. от момента прекращения силового воздействия ШК на образец.

Длительность каждого опыта равнялась периоду стойкости круга, который определялся по появлению на обработанной поверхности шлифовочных дефектов - прижогов и огранки, сопровождающихся вибрациями и металлическим звуком в зоне резания. Затем производился замер износа инструмента и круг правился.

Правка кругов из электрокорунда и карбида кремния осуществлялась алмазным карандашом (типоразмер 3308-0054 ГОСТ607-80) методом обтачивания. Для обеспечения постоянного рельефа рабочей поверхности ШК с увеличением скорости резания V_k пропорционально изменяли скорость продольной подачи правящего инструмента S_{nu} , отношение $V_k/S_{nu}=15000$. Режимы правки ШК из электрокорунда и карбида кремния представлены в таблице 3.4.

Правка АИ из сверхтвердых материалов производилась методом шлифования кругом 54CF46R6V (шарошкой) с размерами 125x25x32 мм.

Скорость вращения шарошки равнялась 40 м/мин. Параметры режима правки ШК из сверхтвердых материалов также представлены в таблице 3.4 и назначались в соответствии с известными рекомендациями [95, 119].

Таблица 3.4 - Режимы правки шлифовальных кругов

Шлифовальные круги	Скорость круга V_k , м/с	Скорость продольной подачи правящего инструмента $S_{пи}$, мм/мин	Глубина обтачивания t , мм	Количество рабочих ходов	Количество чистовых ходов (без поперечной подачи)
24А, 64С	10	40	0,03-0,04	4	2
24А, 64С	20	80	0,03-0,04	4	2
13А, 24А, 95А, 64С, 54С	35	140	0,03-0,04	4	2
24А, 64С	50	200	0,03-0,04	4	2
ЛКВ40, АС4	35	140	0,015-0,02	10-15	5-10

Экспериментальная установка была оснащена системами подачи СОЖ и очистки ее от шлама с помощью магнитного сепаратора и бака-отстойника. В качестве СОЖ применялся 3%-й водный раствор эмульсола «ЭПМ-1ш», который подавали в зону шлифования свободно падающей струей через клиновый насадок с расходом 12 л/мин. Предварительные опыты показали, что указанный раствор обладает хорошей охлаждающей и смазывающей способностью, не вызывает коррозии станкооборудования.

При испытании кругов опыты проводили с трехкратной повторностью. По каждой серии опытов определялись средние значения показателей. Сводные данные по установленным показателям для всех испытанных кругов представлены в таблицах приложения. Графически результаты испытаний показаны на рисунках.

3.6 Методика измерения износа шлифовальных кругов при размерной обработке покрытий

Важным элементом программы экспериментов является методика измерения износа ШК. Известны различные методы этих измерений [120-123].

Прямое измерение размера диаметра кругов практически чрезвычайно неудобно, да и погрешность такого измерения достаточно велика [120].

Известен способ измерения размерного износа круга по лимбу поперечной подачи [120]. Недостаточная точность измерений, обусловленная большим количеством факторов, влияющих на величину погрешности измерения, не позволяет рекомендовать этот метод в наших исследованиях.

Известен также [120] способ измерения размерного износа круга путем подвода его к неподвижному упору. Однако этот метод сравнительно трудоемок и требует применения специальных приспособлений.

Используется способ измерения размерного износа инструмента путем копирования его профиля на тонкой пластине [121]. Для реализации этого способа на периферии круга протачивается уступ или канавка. Несмотря на высокую точность измерения этот метод обладает рядом недостатков, основными из которых следует считать невозможность использования всей ширины круга из-за наличия уступа и большую трудоемкость опытов, так как измерения уступа на пластине выполняются обычно вне станка.

Учитывая вышесказанное для измерения радиального износа кругов был



Рисунок 3.13 - Устройство для измерения радиального износа кругов

выбран способ определения расстояния его рабочей поверхности от измерительной базы [122, 123]. Для реализации этого способа разработано специальное устройство (рисунок 3.13), включающее в себя индикатор 1 с ценой деления 0,001 мм, закрепленный через державку 3 на люнете 2.

При проведении экспериментов по схеме

врезного шлифования радиальный износ опытного круга 4 определялся измерением расстояния от базы до поверхности ШК до и после шлифования. В качестве измерительной базы использовалась периферия базового круга 5, закрепленного совместно с опытным кругом на шпинделе станка. Схема измерения радиального износа кругов при врезном шлифовании представлена на рисунок 3.14,а.

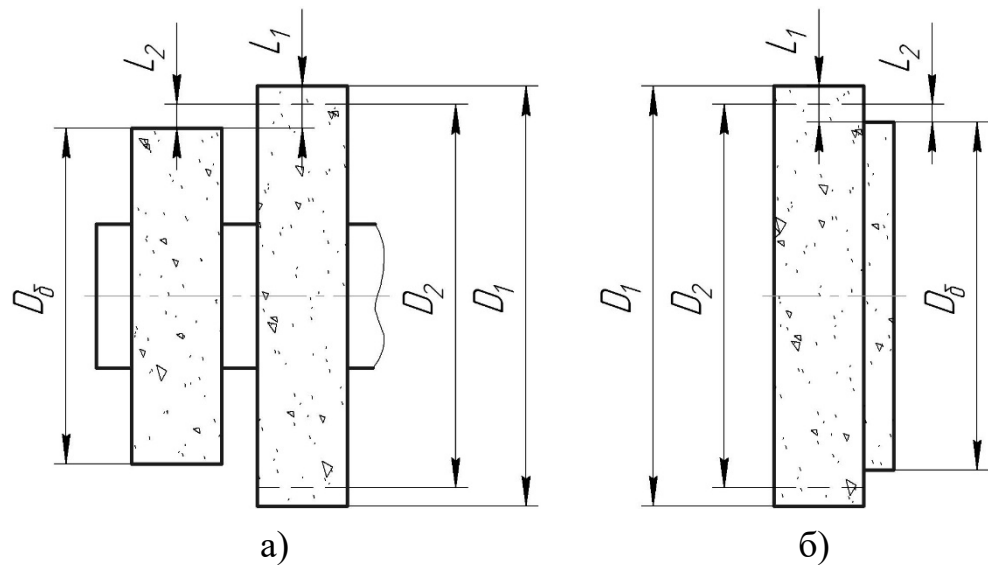


Рисунок 3.14 - Схема измерения радиального износа опытного круга при врезном (а) и продольном шлифовании (б): D_0 – диаметр базового круга или уступа; D_1, D_2 - диаметр опытного круга до и после шлифования; L_1, L_2 - расстояние от базового круга или уступа до опытного круга до и после шлифования

При проведении опытов по схеме продольного шлифования в качестве измерительной базы использовалась специально создаваемая с помощью правящего инструмента цилиндрическая поверхность диаметром D_0 , оформленная в виде уступа (рисунок 3.14,б), высота которого была на 0,01...0,02 мм больше ожидаемого размерного износа ΔR . Ширина уступа - 4...5 мм.

Размерный износ ΔR опытного круга определяется по формуле

$$\Delta R = L_1 - L_2, \text{ мм.} \quad (3.5)$$

Погрешность определения размерного износа опытного круга $\omega_{\Delta R}$ рассчитывается по формуле

$$\omega_{\Delta R} = 2\omega_L, \text{ мм} \quad (3.6)$$

где ω_L - погрешность измерения расстояния L .

Для получения сравнимых результатов измерения производили в одних и тех же осевых сечениях круга. Для этого на круге делали шесть меток (рисок) через 60° , по которым и производили повторные измерения. Затем определяли среднеарифметическое значение радиального износа.

Использование в качестве измерительных баз периферии базового круга и цилиндрической поверхности уступа значительно снижает погрешность измерений. При этом обеспечивается постоянство измерительной базы и исключается влияние положения шпинделя на точность измерений.

3.7 Методика исследования микрорельефа и химического состава поверхностей абразивов и покрытий

Для качественной оценки явлений сопровождающих износ шлифовальных материалов предусматривалось исследование микрорельефа поверхностей абразива и покрытия после микрорезания и шлифования.

В настоящее время при фрактографических исследованиях объектов применяют микроскопы различных типов. Наибольшее применение получили световые (оптические), просвечивающие электронные (ПЭМ) и растровые электронные микроскопы (РЭМ) [124].

Световые микроскопы формируют изображение поверхностей исследуемого объекта в отраженном свете. Недостатком этих микроскопов является низкая разрешающая способность и малая глубина фокуса.

В основе метода просвечивающей электронной микроскопии лежит воздействие на исследуемый объект электронного луча. К недостаткам ПЭМ относят высокую стоимость, необходимость помещения образцов в вакуум и сложность их изготовления, недостаточно высокую глубину фокуса.

РЭМ формирует изображение объекта при сканировании его поверхности электронным зондом. Это один из наиболее универсальных и перспективных

приборов для исследования структурного состояния материалов на микромасштабном уровне.

Выделяют [124] следующие преимущества РЭМ:

- высокая разрешающая способность;
- большая глубина фокуса дающая возможность исследовать объекты с ярко выраженным рельефом поверхности;
- простота подготовки объектов исследования, обеспечивающая высокую производительность и исключая артефакты;
- простота изменения увеличений от малых до больших крат, гарантирующая высокую прицельность исследования;
- возможность проведения рентгеноспектрального анализа;
- электронно-зондовая система и принцип формирования изображения, позволяющие использовать ЭВМ для автоматизации обработки результатов измерений.

С учетом вышесказанного для изучения микрорельефа поверхностей абразива и покрытия после микрорезания применяли растровый электронный микроскоп модели *Carl Zeiss EVO 50 XVP* с дополнительным изучением характера поверхности на базе комплекса изучения топографии модели *Zygo New View 7300*.

Наличие протекания химических реакций в зоне взаимодействия абразива с покрытием оценивалось по изменениям химического состава их поверхностных слоев толщиной 5...10 мкм. Для количественной оценки этих изменений использовался метод микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) [125] с помощью приставки *JNCA x – act* к вышеупомянутому растровому электронному микроскопу.

В настоящее время МРСА получил широкое применение, что объясняется рядом его характерных особенностей. Наиболее важной является высокая локальность метода, возможность эффективного исследования малых объемов материала. Этот метод позволяет быстро и достаточно точно оценить характер распределения химических элементов в каком-либо направлении и на заданной площадке анализируемого объекта.

3.8 Методика исследования засаливания шлифовальных кругов при размерной обработке покрытий

Процесс шлифования покрытий характеризуется весьма специфической особенностью – интенсивным засаливанием АИ. В практике обработки металлов шлифованием степень засаливания АИ и момент их правки определяется субъективно самим исполнителем операции по внешнему виду рабочей части круга или по состоянию шлифуемой поверхности. При выполнении исследований процесса шлифования применяются различные методы количественной оценки степени засаливания АИ [126-128].

Простейшим является метод визуального наблюдения поверхности круга с помощью бинокулярного микроскопа. Количественно засаливание может быть выражено отношением площади пятен засаливания к общей площади рабочей поверхности круга. Недостатком этого метода является невысокая точность и субъективный характер измерений.

Известна методика оценки степени засаливания АИ с помощью радиоактивных изотопов [126]. Однако ее применение носит ограниченный характер, так как для исследований необходимы образцы с радиоактивными присадками и довольно сложная аппаратура.

Разработана методика оценки степени засаливания с определением количества налипшего металла путем химического исследования [127]. Однако, несмотря на высокую точность измерения, этот метод характеризуется большой

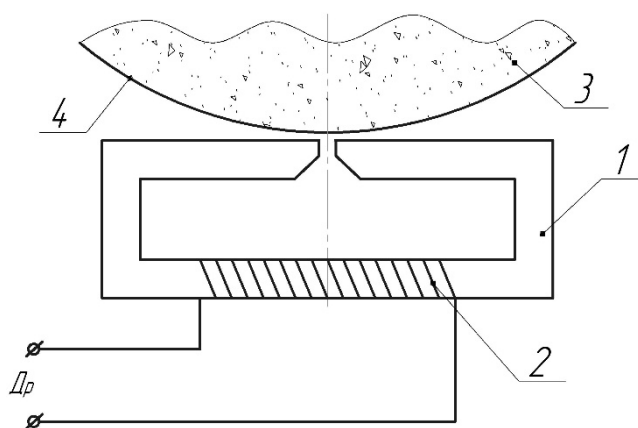


Рисунок 3.15 - Схема измерения засаливания круга

трудоемкостью, так как исследования засаливания АИ выполняются вне станка.

Учитывая вышесказанное, в наших исследованиях для измерения засаливания ШК при обработке плазменного покрытия на железной основе и стали 45 применялся прибор

конструкции Ивановского текстильного института [128], основными частями которого являются два индуктивных датчика – рабочий и калибровочный. При измерении засаливания (рисунок 3.15) рабочий датчик, состоящий из сердечника 1 и катушки индуктивности 2, устанавливается вблизи рабочей поверхности ШК 3 с адгезионными налипками 4 на периферии круга.

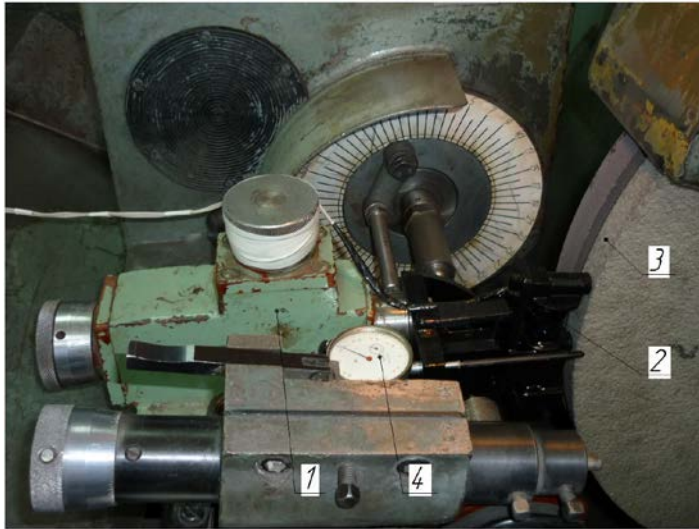
При появлении вблизи зазора сердечника металлических частиц магнитный поток в катушке меняется, что приводит к изменению общего электрического сопротивления датчика. Величина этого изменения пропорциональна количеству металла, находящегося вблизи зазора. Сопротивление калибровочного датчика остается неизменным, так как он изолируется и не подвергается возмущающему действию металлических частиц. При нарушении равенства сопротивлений рабочего и калибровочного датчика электрическая схема разбалансируется и в измерительной цепи её появляется ток, величина которого зависит от количества металла вблизи зазора рабочего датчика.

Эта зависимость определялась путем тарировки измерительного прибора, которая заключалась в равномерном нанесении на рабочую поверхность ШК железного порошка разной концентрации. Предельные значения концентрации определялись по результатам предварительных опытов.

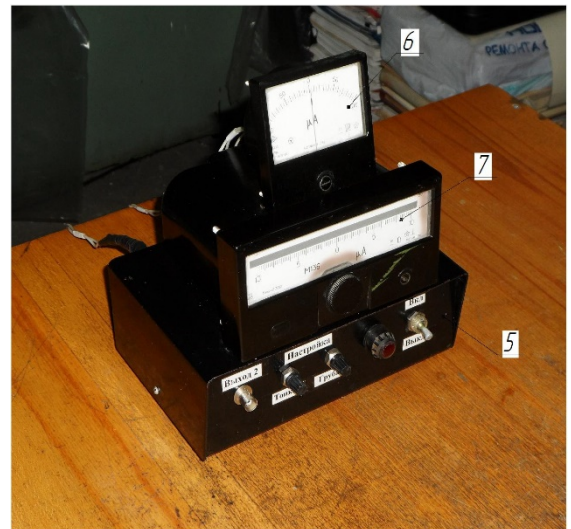
После произведенных измерений по средним показаниям прибора были построены тарировочные графики. Сравнение результатов этих измерений показало, что изменение статистического среднего значения силы тока по прибору составляет не более 5%, что для такого рода испытаний является вполне приемлемым.

Для использования описанного прибора в наших исследованиях было разработано специальное приспособление (рисунок 3.16, а), базовой деталью которого служил люнет 1 с закрепленным на нем рабочим индуктивным датчиком 2. Приспособление оснащалось индикатором 4 с ценой деления 0,01 мм для обеспечения постоянного зазора между рабочим датчиком прибора и опытным ШК 3 в пределах 0,08...0,12 мм. Установка прибора на нуль осуществлялась с помощью блока управления 5 (рисунок 3.16,б) и двух миллиамперметров - грубой

6 и тонкой 7 настройки. Второй миллиамперметр использовался также для регистрации силы тока при измерениях во время проведения опытов.



а)



б)

Рисунок 3.16 - Приспособление для измерения засаливания шлифовальных кругов (а) и контрольно - измерительная аппаратура (б)

После правки круга приспособление устанавливалось на станок и производились предварительные измерения для установки нуля прибора с учетом влияния металлических частей станка и оставшихся частичек металла в порах АИ. Эти измерения производились в восьми нумерованных точках на периферии круга. Затем приспособление снималось со станка и производилось шлифование образцов.

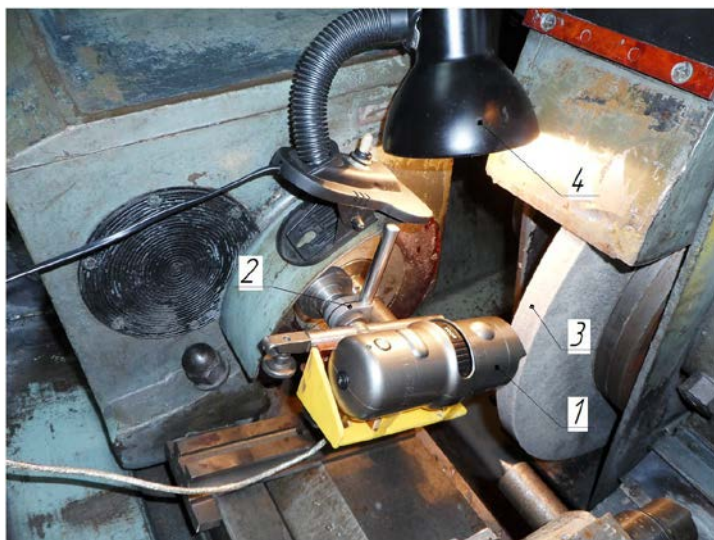


Рисунок 3.17 - Установка для микрофотографирования рабочей поверхности кругов

образцов.

После потери кругом режущей способности приспособление снова устанавливалось и производился замер силы тока по прибору в тех же нумерованных точках. Разница средней силы тока по прибору до

эксперимента и после определяла количество налипшего металла на

круг в соответствии с тарировочным графиком.

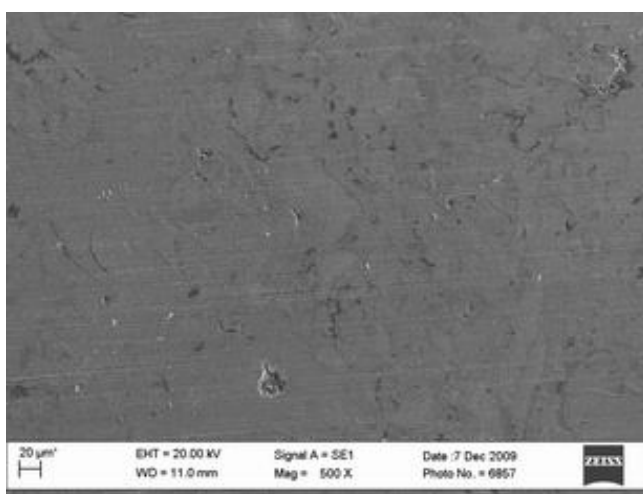
Для дополнительного наблюдения за режущей поверхностью опытных ШК на разных стадиях их затупления использовалась установка (рисунок 3.17), состоящая из лабораторного цифрового микроскопа 1 модели Digital Blue QX7, закрепленного на стойке 2. Эта установка монтировалась на столе станка напротив опытного ШК 3. Дополнительное освещение рабочей поверхности кругов обеспечивалось лампой 4. С помощью разработанной установки производилось микрофотографирование рабочих поверхностей ШК с 60 и 200 кратным увеличением.

Для исследования характера разрушения АЗ в процессе микрорезания и шлифования собирались отходы. По размерам исходного зерна и полученных осколков можно судить о характере его разрушения на разных стадиях затупления кругов.

3.9 Методика исследования шероховатости шлифованных поверхностей покрытий восстанавливаемых валов

Шероховатость, как один из важнейших показателей качества поверхности, во многом предопределяет эксплуатационный ресурс валов сельскохозяйственных машин.

Измерение шероховатости шлифованных поверхностей производили на профилографе-профилометре АБРИС-ПМ07, а также на базе комплекса изучения



топографии модели Zygo New View 7300 с дополнительным изучением характера поверхности на РЭМ модели Carl Zeiss EVO 50 XVP. Замеры шероховатости проводились в пяти случайных положениях образцов с определением ее среднего значения.

Рисунок 3.18 - Поверхность микрорельефа поверхности покрытий после шлифования

Механизм формирования микрорельефа поверхности покрытий

при шлифовании заметно отличается от процессов протекающих при обработке однородных материалов. Важная роль в формировании шероховатости в этом случае принадлежит таким дефектам, как поры. На снимке (рисунок 3.18), полученном на РЭМ, видно, что типовая поверхность плазменно-напыленного покрытия после шлифования обладает открытой пористостью. На типовой профилограмме поверхности, изображенной на рисунке 3.19, отчетливо виден «провал», обусловленный наличием поры. Вследствие этого, при измерении такой шероховатости на профилографе-профилометре алмазная игла попадает в поры, что приводит к получению недостоверных (завышенных) результатов.

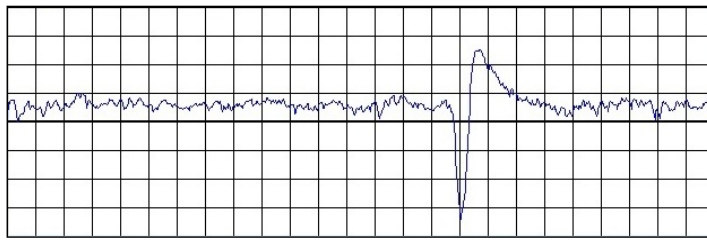
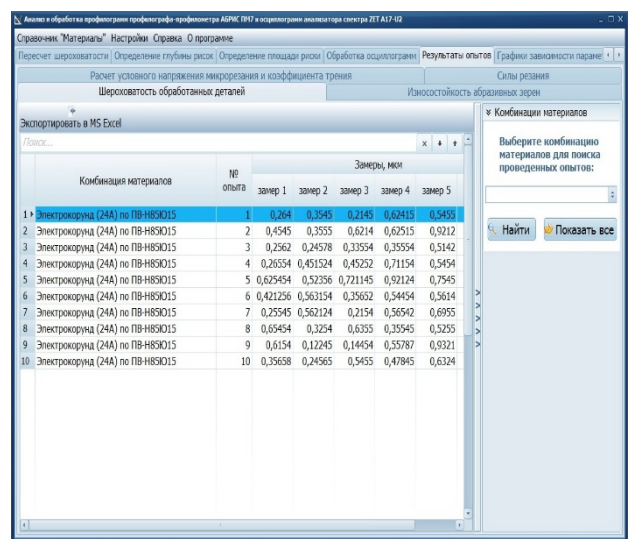


Рисунок 3.19 - Шероховатость поверхности покрытия после шлифования

Для получения более точных измерений в программе «Анализ и обработка профилограмм и осциллограмм» реализована задача по пересчету шероховатости (рисунок 3.20,а), позволяющая исключить участки профилограммы в случае присутствия на них пор. Данная задача решается во вкладке «Пересчет шероховатости».



а)



б)

Рисунок 3.20 - Внешний вид специальной программы: а – вкладка «Пересчет шероховатости»; б – вкладка «Результаты опытов» - «Шероховатость обработанных деталей»

На профилографе-профилометре АБРИС-ПМ7 выполнялось измерение шероховатости на шлифованном образце с сохранением результатов на компьютере. С помощью вышеупомянутой программы и встроенного в неё конвертера производилось построение профилограммы в верхней графической зоне с предварительным расчетом шероховатости по критерию Ra (рисунок 3.20,а). Затем указателем мыши отмечались участки профилограммы на которых присутствуют поры. После выделения всех таких участков выполнялось построение новой профилограммы в нижней графической зоне с последующим пересчетом параметра шероховатости по Ra (рисунок 3.20,а).

Программа позволяет определить вид эксперимента и сохранять произведенные замеры в базе данных с сортировкой комбинации пары абразивный круг – обрабатываемый материал (рисунок 3.20,б).

3.10 Методика исследования влияния среды на работоспособность шлифовальных кругов при размерной обработке покрытий

На операциях шлифования сохранить длительное время высокие режущие свойства АИ можно, подобрав не только соответствующую его характеристику и режимы резания, но и марку смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС).

Исследования влияния среды на эффективность шлифования покрытий в лабораторных условиях выполнялись в два этапа. На первом этапе испытывались серийные СОЖ: углеводородная - масло индустриальное И-20А (ГОСТ 20799-88), синтетическая – водный раствор концентрата ПОА-2м ТУ0258-006-11850138-02 и эмульсионная – водный раствор эмульсола ЭПМ-1ш ТУ0258-004-11850138-01, а также проводились эксперименты по шлифованию плазменных покрытий всухую (без СОЖ), затем в водопроводной воде и в химически активной среде с добавлением в воду фосфата калия (K_3PO_4)- основного компонента специальной «титановой» СОЖ [129].

В итоге на первом этапе были подготовлены следующие составы:

- **Состав №1** – шлифование всухую (без СОЖ);
- **Состав №2** – водопроводная вода;

- Состав №3 – 4 % - й водный раствор фосфата калия;
- Состав №4 – масло индустриальное И-20;
- Состав №5 – 3 % - й водный раствор концентрата «ПОА-2м»;
- Состав №6 – 3 % - й водный раствор эмульсола «ЭПМ-1ш».

Концентрацию серийных СОЖ в составах №5 и №6 выбирали в соответствии с рекомендациями их производителей.

Масляные СОЖ дольше сохраняют остроту режущих кромок АЗ, уменьшают интенсивность схватывания обрабатываемого материала с режущими зернами, в результате чего снижаются силы трения [119]. Они обладают высокими смазывающими, смачивающими и проникающими свойствами. Уменьшение сил резания и тепловыделений при применении масляных СОЖ способствует снижению остаточных напряжений.

Продукты ПОА-2м и ЭПМ-1ш это новые марки рекомендуемые для замены отечественных и импортных СОЖ различной природы [106]. Эмульсол «ЭПМ-1ш» содержит: сольвент рафината минерального масла, щелочные мыла натуральных жирных кислот, амиды жирных кислот, алкилполигликольэфир, нефтяные сульфонаты натрия, метилен-бис-тетрагидрооксазин, бутилдигликол.

На первом этапе исследований испытания СОТС проводились на экспериментальной установке, описанной в п. 3.2, по схеме круглого наружного продольного шлифования. Шлифовали образцы - втулки из стали 45 диаметром $60 \pm 0,1$ мм и высотой 70 мм с плазменно-напыленными покрытиями (рисунок 3.6). Образцы обрабатывали серийными кругами с характеристиками 24AF46N6V и 64CF46N6V формы 1 600 x 25 x 305 мм ГОСТ P52781-2007. Режимы шлифования: скорость резания $V_p = 35$ м/с, скорость продольной подачи $S_{prod} = 425$ мм/мин, скорость вращения детали $V_d = 19$ м/мин, глубина резания $t = 0,01$ мм/дв. ход. Остальные условия испытаний СОТС на первом этапе выдерживались такими же, что и при испытаниях ШК на износостойкость (см. п. 3.5...3.9).

На втором этапе исследований испытывали составы СОЖ с добавкой различных присадок и поверхностно-активных веществ (ПАВ). Из литературных источников [103, 104] следует, что при шлифовании труднообрабатываемых

материалов наиболее эффективны присадки на основе хлора и серы. Поэтому для химической активации СОЖ в их состав добавляли присадки ML - RM 20 и ML-5331, а также ПАВ неонол.

Присадка марки ML - RM 20 состоит из сложных эфиров жирных кислот, хлорпарафина и ингибитора коррозии, а присадка марки ML - 5331 является модифицированной производной кислот жирного ряда, содержащей активную серу. Обе указанные присадки производятся компанией ML LUBRICATION GMBH (Германия).

ПАВ неонол - оксиэтилированный нонилфенол, техническая смесь изомеров оксиэтилированных алкилфенолов на основе тримеров пропилена следующего состава: $C_9H_{19}C_6H_4O(C_2H_4O)_nH$. Оксиэтилированные моноалкилфенолы на основе тримеров пропилена являются высокоэффективными неионогенными поверхностно-активными веществами.

Испытания СОЖ на втором этапе проводили по схеме круглого наружного продольного шлифования с использованием серийного ШК с характеристикой 24AF46N6V формы 1 600 x 80 x 305 мм ГОСТ P52781-2007. Образцы представляли собой валы из стали 45 диаметром около 75 мм и длиной рабочей части 300 мм с плазменно-напыленными покрытиями (рисунок 3.5). Образцы шлифовали в жестких центрах на следующих режимах: скорость резания $V_p = 50$ м/с, скорость продольной подачи $S_{prod} = 425$ мм/мин, скорость вращения детали $V_d = 24$ м/мин, глубина резания $t = 0,01$ мм/дв. ход.

В качестве выходных (оценочных) показателей процесса шлифования при испытаниях СОЖ на этом этапе были приняты: период стойкости кругов T , мин, объем снятого материала за период стойкости Q_m , мм³, и шероховатость поверхности по критерию Ra , мкм. Остальные условия испытаний СОЖ на втором этапе сохранялись такими же, что и при испытаниях ШК на износостойкость (см. п. 3.5...3.9).

Каждую серию испытаний повторяли не менее трех раз, что обеспечивало достоверность полученных результатов с вероятностью $P = 0,95$. По каждой серии

опытов определялись средние значения показателей. Сводные данные по принятым показателям для всех испытанных СОЖ представлены в таблицах.

3.11 Методика измерений сил резания при шлифовании микропористых покрытий

При проведении экспериментов по шлифованию в течение каждого опыта приборами силоизмерительной установки регистрировались и записывались значения величин составляющих P_y и P_z силы резания. На рисунке 3.21 приведен пример обработки записи изменения величины радиальной силы P_y в одном из опытов при врезном и продольном шлифовании.

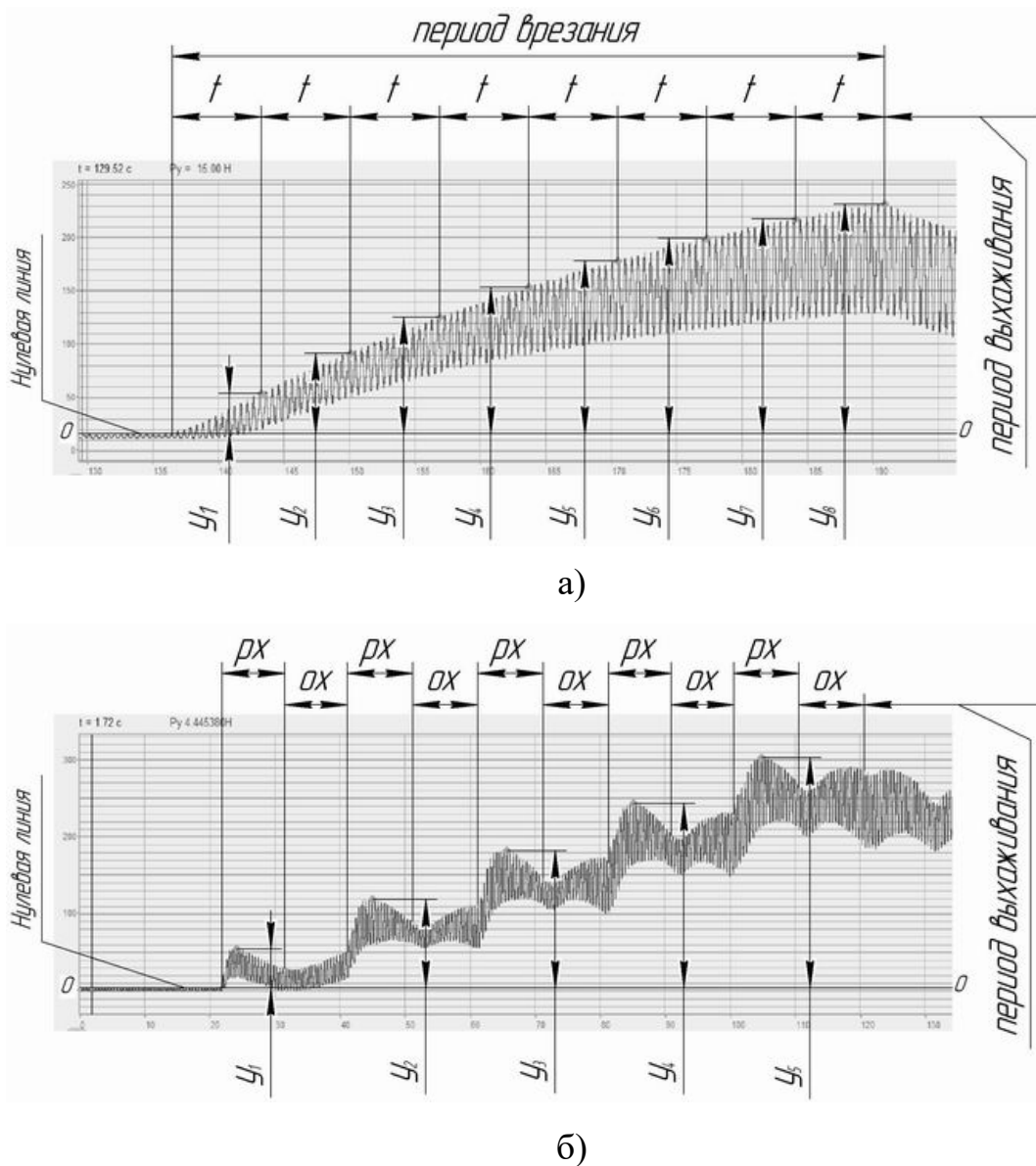


Рисунок 3.21 - Обработка записи радиальной силы P_y регистрирующим прибором силоизмерительной установки при врезном (а) и продольном (б)

шлифовании: РХ - рабочий ход; ОХ - обратный ход.

За начало отсчета ординат принимается прямая ОО, соединяющая начало и конец записи («нулевая» линия). Каждая ордината Y_i , соответствующая определенному моменту процесса шлифования, заканчивается на вершине пика. «Пики» получаются вследствие создания напряженно-деформированного состояния центров, неточности установки шлифуемого образца и его формы, несбалансированности поводкового хомутика.

При врезном шлифовании (рисунок 3.21,а) продолжительность периода врезания и периодичность t замеров ординат на каждой осциллограмме определялись скоростью резания (таблица 3.5), а количество замеров для всех скоростей оставалось постоянным и равнялось 11. Среднее значение силы P_y за время опыта при врезном шлифовании определялось по формуле

$$P_y = \sum_{i=1}^n P_{y_i} / n, \text{ Н} \quad (3.7)$$

где P_{y_i} – среднее значение силы P_y за i -й период врезания;

n – количество периодов врезания за опыт.

Таблица 3.5 – Периодичность производимых измерений ординат на одной осциллограмме при врезном шлифовании

Скорость резания, м/с	Продолжительность периода врезания, с	Периодичность замеров t , с	Количество замеров
50	42	4,2	11
35	60	6	11
20	105	10,5	11
10	210	21	11

При продольном шлифовании (рисунок 3.21,б) количество замеров ординат равнялось количеству рабочих ходов, так как замерялись максимальные значения ординат на каждой осциллограмме для всех рабочих ходов в течении всего опыта. Среднее значение силы P_y за время опыта при продольном шлифовании рассчитывалось по формуле

$$P_y = \sum_{j=1}^m P_{y_j} / m, \text{ Н}, \quad (3.8)$$

где P_{y_j} – значение силы P_y за j -й рабочий ход;

m – количество рабочих ходов за опыт.

Аналогично обрабатывалась запись изменения величины тангенциальной силы P_z .

Величина каждой ординаты Y_i на рисунок 3.21 оценивалась при помощи тарировочного графика. Тарировка силоизмерительного устройства производилась на специальном приспособлении (рисунок 3.22), корпус 2 которого устанавливался на столе 1 круглошлифовального станка. Нагружение центров производилось грузами 6 через тросики 5, ролики 4 и установленный на оправку образец 3 в любой его точке, лежащей в горизонтальной (для P_y) или вертикальной (для P_z) осевой плоскости. Тарировка может быть произведена как при неподвижном, так и при вращающемся образце. Результаты обоих видов тарировок хорошо совпадают, что свидетельствует о незначительном влиянии на величину значений P_y и P_z силы трения, возникающей при вращении заготовки (образца) на тензометрических центрах. Поэтому динамическая тарировка не проводилась.

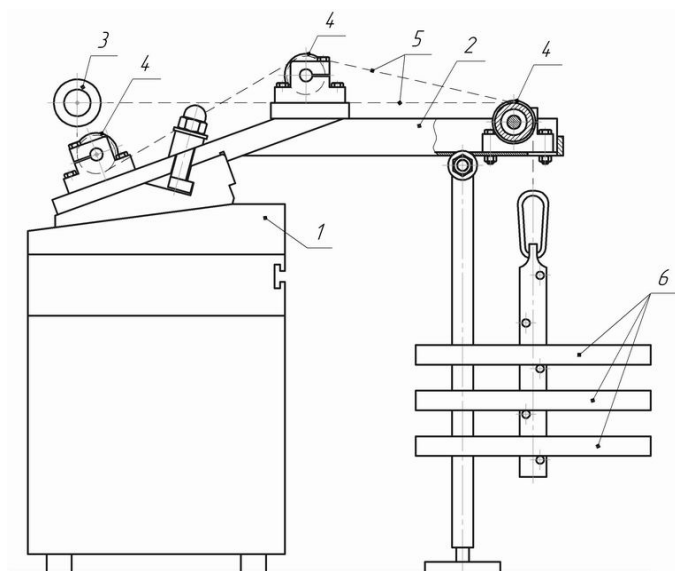


Рисунок 3.22 - Приспособление для тарировки силоизмерительного устройства

Для снижения трудоемкости обработки осциллограмм составляющих P_y и P_z силы резания и повышения точности измерений использовалась вышеназванная программа для ЭВМ «Анализ и обработка профилограмм и осциллограмм» во вкладке «Обработка осциллограмм» (рисунок 3.23). Эта вкладка содержит два

графических поля, отображающих загружаемые осциллограммы сил P_y и P_z , а также специальные инструменты для определения разности средних значений их колебаний в равновесном состоянии измерительной системы и под воздействием нагрузки. Полученные значения милливольт колебаний осциллограмм, с помощью тарировочных коэффициентов автоматически переводятся в силы.

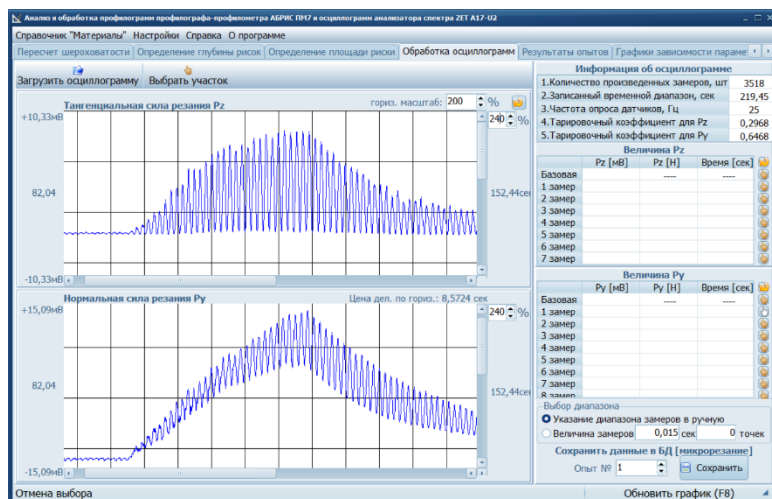


Рисунок 3.23 - Внешний вид специальной программы - вкладка «Обработка осциллограмм».

Интерфейс пользователя в программе предусматривает вывод сопроводительной информации о загружаемой осциллограмме: количество произведенных замеров, записанный временной диапазон, частоту опроса датчиков, а также установленные пользователем тарировочные коэффициенты. Все произведенные измерения сохраняются и обрабатываются во вкладке «Результаты опытов».

3.12 Методика расчетов основных показателей процесса шлифования микропористых покрытий и их статистическая оценка

Объемы снятого слоя металла и изношенного слоя ШК подсчитывались:

- объем снятого металла за опыт при врезном шлифовании [95]:

$$Q_M = \sum_{i=1}^n Q_{M_i}, \text{ мм}^3, \quad (3.9)$$

где Q_{M_i} – объем снятого металла при выполнении i -го цикла врезания, мм³;

n – количество циклов врезания за время опыта;

$$Q_{M_i} = \pi d_u h_u B, \text{ мм}^3, \quad (3.10)$$

где $d_u = \frac{d_1 + d_2}{2}$ - средний диаметр шлифуемого образца в i -м цикле

врезания, мм;

d_1 и d_2 - диаметры образца до и после проведения i -го цикла врезания, мм;

$h_u = \frac{d_1 - d_2}{2}$ - толщина слоя, снятого с образца за время i -го цикла врезания,

мм;

B - высота шлифовального круга, мм.

- объём снятого металла за опыт при продольном шлифовании [95]:

$$Q_m = \pi d_u h_u L, \text{ мм}^3, \quad (3.11)$$

где L - длина шлифуемого образца, мм.

- объём израсходованного абразива за опыт при врезном и продольном шлифовании [95]:

$$Q_a = \pi d_k h_k B, \text{ мм}^3, \quad (3.12)$$

где d_k - средний диаметр ШК, определяемый расчетом от исходного по данным износа за опыт, мм;

h_k - толщина слоя ШК, изношенная за опыт по показаниям измерительного устройства, мм;

- объём снятого металла в минуту при врезном шлифовании [95]:

$$Q_m^\tau = \pi d_u h_u B / \tau, \text{ мм}^3/\text{мин}, \quad (3.13)$$

где $\tau = (\tau_{обр} + \tau_{вых})$ - время опыта, мин;

$\tau_{обр}$ - время обработки с поперечной (продольной) подачей, мин;

$\tau_{вых}$ - длительность выхаживания, мин;

- объём снятого металла в минуту при продольном шлифовании [95]:

$$Q_m^\tau = \pi d_u h_u L / \tau, \text{ мм}^3/\text{мин}, \quad (3.14)$$

- объём изношенной части ШК в минуту при врезном и продольном шлифовании [95]:

$$Q_a^r = \pi d_k h_k B / \tau, \text{ мм}^3/\text{мин}, \quad (3.15)$$

Удельная производительность обработки q за опыт определялась по формуле

$$q = Q_m / Q_a, \text{ мм}^3/\text{мм}^3, \quad (3.16)$$

Коэффициент режущей способности кругов K_p вычислялся по формуле [56]

$$K_p = Q_m^r / P_y, \frac{\text{мм}^3}{\text{мин} \cdot \text{Н}}, \quad (3.17)$$

где P_y – средняя радиальная составляющая силы резания за опыт, Н.

Удельная мощность шлифования рассчитывалась по формуле

$$N_{y\partial} = \frac{P_z \cdot V_k}{102 \cdot Q_m^r}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{мин}}{\text{мм}^3}. \quad (3.18)$$

Точность геометрической формы обработанных поверхностей определялась путём измерения отклонений диаметров в поперечном и продольном сечениях, а именно: величины овальности и конусности.

Измерение диаметров образцов производили в двух сечениях и двух взаимноперпендикулярных плоскостях. В самом начале экспериментальных исследований измеряли диаметры первого обработанного образца и рассчитывались значения овальности и конусности, которые были приняты за исходную погрешность системы СПИД и при дальнейших экспериментах вычитались из получаемых значений овальности и конусности.

Величины овальности Δ_o и конусности Δ_k обработанных поверхностей рассчитывались по формулам

$$\Delta_o = (d_{\max} - d_{\min})/2 \quad (3.19) \quad \Delta_k = (d_I - d_{II})/2 \quad (3.20)$$

где d_{\max} , d_{\min} – максимальные и минимальные диаметры образцов, измеренных в двух взаимноперпендикулярных плоскостях, мм;

d_I , d_{II} – измеренные диаметры образцов в I и II сечениях, мм.

Измерение диаметра образцов до и после шлифования производилось гладким микрометром Din 863 (пр-во фирмы «Микрон», Чешская Республика) с ценой деления 0,01 мм. Замеры точности геометрической формы (овальность и

конусность) обработанных образцов производились при помощи рычажной скобы модели 01002 (ТУ2-034-0221197-012-91) с ценой деления 0,001 мм.

При проведении опытов по врезному шлифованию время обработки и величина снимаемого припуска контролировались блоком управления системы ЧПУ круглошлифовального полуавтомата.

Для качественного анализа экспериментальных данных, полученные результаты обрабатывались методами математической статистики [130, 131]. Для расчета статистических характеристик испытаний АЗ и ШК: среднеарифметических значений, дисперсий случайных величин, средних квадратических отклонений и др. использовалась программа «Анализ и обработка профилограмм и осциллограмм» (рисунок 3.20). Во вкладке «Результаты опытов» (рисунок 3.20,б) оценивались данные измерений, полученные с грубой ошибкой. В этом случае в программе была предусмотрена возможность проверки основных условий измерения и, в частности, условия

$$\tau > \tau_{кр}, \quad (3.21)$$

где τ – расчетное значение;

$\tau_{кр}$ – табличное значение параметра τ , вычисленное по доверительной вероятности.

Если выполненная проверка не обнаруживала ошибки, то измерения, у которых $\tau_{кр} > \tau$, выбраковывались и автоматически пересчитывались все полученные параметры. Данная программа позволяла ещё на стадии предварительных экспериментов оценить точность исследований и выявить основные пути повышения качества получаемых данных. Дополнительно программа позволяет экспортировать в «Excel» в виде таблиц результаты измерений для дальнейшего оформления.

Для исключения лишних операций экспортирования и быстрого просмотра результатов измерений во вкладке «Просмотр результатов измерений» для наглядности предусмотрено графическое представление полученных данных с возможностью аппроксимировать полученные результаты линейной, степенной, экспоненциальной или полиномиальной функцией с получением регрессионной

функции и, относящейся к ней, средней ошибки аппроксимации и коэффициента детерминации.

3.13 Методика производственных испытаний экспериментальных шлифовальных кругов и смазочно-охлаждающих жидкостей

Сравнительные испытания экспериментальных кругов и СОЖ в производственных условиях ООО «Плазматех» (г. Барнаул) проводились с целью проверки результатов лабораторных исследований и для получения окончательной оценки их технологической эффективности.

Необходимость в этом возникает в связи с тем, что, например, диаметр шлифуемых шеек коленчатого вала двигателя ЯМЗ-240 значительно больше (в 1,8 раза), чем диаметр образцов и шеек коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53, условия выноса стружки и абразива из зоны резания значительно ухудшаются и показатели по производительности, стойкости кругов, силовой напряженности процесса шлифования и т. д. могут сильно изменяться.

Экспериментальные ШК и СОЖ испытывались на операции чернового шлифования шатунных шеек коленчатых валов двигателя ЯМЗ-240, восстановленных плазменным напылением порошковой композиции на железной основе, с размерами шлифуемой части диаметром 93,75...94,00 мм и высотой (шириной) 83 мм. Испытания проводились на специальном круглошлифовальном станке ЗА423. Припуск на обработку шатунных шеек составлял 1...1,5 мм.

Обрабатывали плазменные покрытия серийными кругами формы 1 900 x 25 x 305 мм ГОСТ Р52781-2007. Обработка производилась вначале по схеме врезного шлифования, а затем в результате одного – двух проходов с продольной подачей добивались получения нужного размера, оставляя 0,25...0,30 мм припуска для окончательной (чистовой) обработки.

Шлифование шеек производилось по принятым на предприятии режимам, а именно:

- скорость вращения шлифовального круга (скорость резания) $V_p = 35$ м/с;
- скорость вращения детали (коленчатого вала) $V_d = 9$ м/мин.

Продольную и поперечную подачу круга осуществляли вручную периодическим вращением соответствующих маховичков по мере ослабления искры в зоне резания.

Основными показателями оценки процесса шлифования являлись период стойкости круга T – по времени и по количеству снятого металла Q_m (мм³), объём изношенного абразива Q_a (мм³). Кроме того, контролировали шероховатость шлифованной поверхности и точность геометрической формы (отклонения от круглости) обработанных шеек.

Период стойкости круга по времени определялся по появлению на обработанной поверхности следов дробления (огранки) и прижогов. Объём снятого металла за период стойкости устанавливался в результате замеров диаметра шейки до (d_1) и после (d_2) шлифования при помощи гладкого микрометра и рассчитывался по формуле (3.9). Объёмный износ шлифовального круга определяли в результате замеров радиального износа круга $h_{кр}$ в конце периода его стойкости при помощи индикатора часового типа с ценой деления 0,002 мм и рассчитывали по формуле (3.12).

Шероховатость обработанной поверхности устанавливалась сравнением с имеющимися на предприятии образцами шероховатости (ГОСТ 9378-75). Точность геометрической формы обработанных шеек определялась с помощью гладкого микрометра. Остальные условия испытаний были приняты такими же, что и при проведении лабораторных исследований (см. п. 3.5).

Все данные, полученные в результате замеров и расчетов, сведены в таблицу приложения П14.

3.14 Методика оценки себестоимости шлифовальной операции

Стойкость круга и режимы резания являются основными факторами, определяющими себестоимость шлифовальной операции. От стойкости круга зависят время, затрачиваемое рабочим на правку, и расход режущего инструмента [62, 70]; от режима резания – основное время, необходимое для снятия припуска. Таким образом, зависимость (1.1) между стойкостью круга и скоростью съема

металла является базой для экономической оценки шлифовальной операции. Основным критерием такой оценки является себестоимость обработки [70].

Чтобы определить рациональный режим резания с точки зрения минимума себестоимости обработки нужно знать количественные зависимости стойкости круга от режима резания. Для этого в работе [70] себестоимость C операции шлифования выражена как функция стойкости круга и скорости съема припуска и представлена в виде уравнения:

$$C = C_3 M Q_M^{-1} + C_3 M \left(\frac{t_{np}}{C_T} \right) Q_M^{n-1} + k M C_q Q_M^{m-1} + k M \left(\frac{\pi D_{cp} B h_{np}}{1000 C_T} \right) Q_M^{n-1}, \text{ руб / опер}, \quad (3.20)$$

где C_3 – тарифная ставка рабочего с учётом накладных расходов, руб/мин;

M – припуск на обработку в единицах объёма металла, см³;

t_{np} – время, затрачиваемое на правку круга, мин;

k – стоимость 1 см³ полезного объёма круга, руб/см³;

D_{cp} – средний диаметр круга, равный полусумме начального (до работы) и конечного (после полного износа) диаметров круга, мм;

h_{np} – припуск на правку круга, мм;

B – высота шлифовального круга, мм.

В формуле (3.20) первое слагаемое C_1 выражает зарплату станочника за основное время работы. Второе слагаемое C_2 – это зарплата станочника за время, затраченное на правку круга. Третье слагаемое C_3 – это затраты, связанные с расходом круга в процессе шлифования. И, наконец, четвертое слагаемое C_4 выражает затраты, связанные с расходом круга на правку. Три последние слагаемые выражают непроизводительные затраты, приходящиеся на операцию.

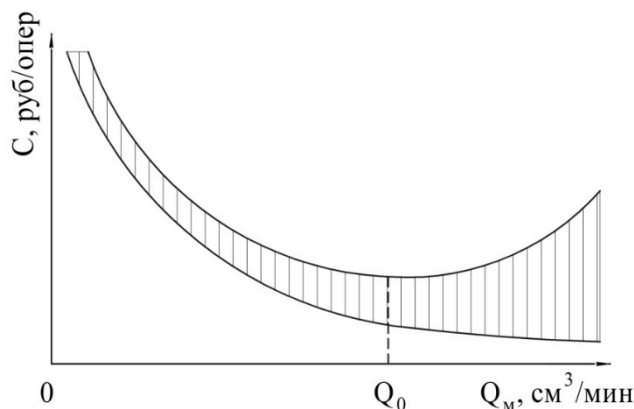


Рисунок 3.24 - Кривые себестоимости шлифовальной операции как функции скорости съема металла [70]

Уравнение себестоимости можно изобразить в виде типичной кривой [70], показанной на рисунке 3.24 сплошной линией.

При увеличении режимов резания, т.е. при увеличении Q_m , первое слагаемое себестоимости уменьшается (штриховая линия), но зато растёт доля непроизводительных затрат (заштрихованная часть графика). При каком-то значении Q_0 наступает равновесие, соответствующее минимуму себестоимости, затем себестоимость, несмотря на увеличение режимов резания, начинает расти (восходящая, правая ветвь кривой), так как в этой области преобладают непроизводительные затраты. Большая часть непроизводительных затрат (второе и четвертое слагаемые) определяются стойкостью круга. В уравнении себестоимости стойкость круга отражена коэффициентом C_T и показателем степени n . С увеличением коэффициента C_T второе и четвертое слагаемые пропорционально уменьшаются.

Для практического пользования формулой (3.20) необходимо экспериментально определить для данной операции постоянные C_T и n и зависимость (1.2) износа круга от съема металла.

В наших исследованиях оценка себестоимости обработки опытными кругами производилась на операции черного шлифования плазменно-напыленных шатунных шеек коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53 на ООО «Плазматех» (г. Барнаул).

3.15 Методика сравнительной оценки износостойкости микропористых покрытий, обработанных шлифованием

Моторесурс коленчатых валов главным образом предопределяется износом их шатунных и коренных шеек. В связи с этим при разработке технологии восстановления этих деталей особое внимание уделяется обеспечению повышенной износостойкости изнашиваемых поверхностей.

Долговечность восстановленных валов зависит не только от способа восстановления, но и от метода обработки. Наиболее достоверные сведения по износостойкости можно получить в условиях рядовой эксплуатации, но это требует значительных затрат времени и средств. Поэтому обычно используют

ускоренный метод предварительной (сравнительной) оценки износостойкости испытуемой поверхности.

Такая оценка была необходима не только для предварительного определения работоспособности восстановленного коленчатого вала, но и для сравнения его по этим показателям с новыми валами, а также с валами восстановленными и обработанными по другим, ранее разработанным технологиям восстановления коленчатых валов автотракторных двигателей.

Исследования износостойкости покрытий проводились на образцах, вырезанных из шеек коленвалов, восстановленных плазменным напылением металлического порошка на железной основе с учетом ГОСТ 23.224-86 «Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей».

Испытанию на износостойкость были подвергнуты три группы образцов:

1. Чугунные образцы, вырезанные из шеек нового коленчатого вала – эталоны, обработанные кругом рациональной характеристики до шероховатости по параметру $Ra = 0,20$ мкм.

2. Образцы, вырезанные из шеек плазменно-напыленного коленчатого вала, обработанные до шероховатости $Ra = 0,20$ мкм по технологии ООО «Плазматех».

3. Образцы, вырезанные из шеек плазменно-напыленного коленчатого вала, обработанные кругом рациональной характеристики на рациональных режимах и с использованием эффективной марки СОЖ, до шероховатости $Ra = 0,20$ мкм.

Исследования проводились на машине трения СМЦ-2, позволяющей приблизить условия испытаний к реальным условиям работы сопряжения шейка-подшипник, по схеме «диск-колодка». Смазка трущихся тел обеспечивалась тем, что образец вращался в масляной ванне и масло постоянно вовлекалось в зону трения.

Форма и размер образцов и контртел обусловлены техническими данными машины трения. Образцы для испытания представляли собой диски шириной 10 ± 1 мм и диаметром $59,5 \pm 0,013$ мм. Выбор диаметров дисков, соответствующего второму ремонтному размеру шатунных шеек коленчатого вала двигателя ЗМЗ-

53, обусловлен целью оценки износостойкости плазменно-напыленного слоя на промежуточном этапе эксплуатации. В качестве контртела, работающего в паре с изношенным образцом, использовались тимплеты, вырезанные из вкладыша шатунных подшипников вала второго ремонтного размера. Площадь поверхности трения контробразца составляла $1 \cdot 10^{-4}$ м². Перед испытанием контртело проверялось на прилегаемость к образцу по пятну контакта и на просвет.

Предварительные износные испытания шлифованных плазменно-напыленных образцов проводили в абразивно-масляной среде. В этих условиях температура в зоне трения достигала 160...170 °С, что приводило к задиру сопряжения. Обеспечение более интенсивного теплоотвода из зоны сопряжения за счет установки объемной камеры и усиления циркуляции масла ощутимого эффекта не дали, так как при этом не происходило уравнивания теплового баланса. Достигнутые результаты хорошо согласуются с данными полученными в работе [6]. Это позволило сделать вывод о том, что микропористые покрытия нельзя испытывать на износостойкость в условиях абразивного изнашивания. Об этом свидетельствует и ГОСТ 23.208-79 «Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы».

Руководствуясь тем, что в условиях эксплуатации износостойкость плазменно-напыленных шеек превышает износостойкость чугуновых коленчатых валов [3-5], а также рекомендации ГОСТ 23.208-79, дальнейшие износные испытания микропористых поверхностей проводились на чистом масле без добавления в него абразивной пыли. Стараясь максимально приблизить условия испытаний к натурной эксплуатации, в качестве смазки было взято моторное масло типа М-8В ГОСТ 10541-78, используемое в двигателях ЗМЗ-53А.

Для оценки величины износа наибольшее распространение получили методы микрометража, взвешивания, искусственных баз и др. [132, 133]. Наиболее приемлемыми для сопряжения (шейка-вкладыш) является метод искусственных баз и метод взвешивания, потому что с помощью этих методов можно оценить за короткое время интенсивность изнашивания по очень малым величинам износа сопряжений. Для определения наиболее подходящего метода

для наших исследований, проводилась серия предварительных опытов, после которых износ определялся обоими указанными методами.

Существует несколько разновидностей метода искусственных баз [132]. Это методы, основанные на вырезании, высверливании всевозможных лунок; методы отпечатков, полученных при вдавливании в рабочую поверхность детали инденторов различной формы. Нами была использована в качестве индентора алмазная пирамида прибора «Виккерса» ТП-3. На поверхности образцов наносились четыре отпечатка (ромба) при нагрузке 245 Н (25 кгс), расположенные по винтовой линии через 90°. Но поскольку плазменно-напыленный слой характеризуется прежде всего высокой пористостью, то при рассмотрении через оптический прибор базовый отпечаток не имел четкой конфигурации из-за наличия пор. И более того, уже при проведении первого цикла испытаний (2 часа) грани отпечатка затирались и сам отпечаток имел расплывчатую форму, что затрудняло измерение диагонали отпечатка с достаточной точностью.

При использовании метода взвешивания износ определялся с помощью электронных весов РА214С с точностью до 0,0005 г. А поскольку износ образцов и контртел после каждого цикла измерялся миллиграммами, поэтому сравнительную оценку износостойкости испытуемых образцов давали по методу взвешивания.

При проведении испытаний в абразивно-масляной среде нагрузка на пару трения устанавливалась равной 539 Н (55 кгс), что соответствует удельному давлению на шатунную шейку двигателя ЗМЗ-53 5,64 МПа [134]. В ходе исследований на чистом масле для интенсивности процесса изнашивания, нагрузка между контробразцом и испытуемой поверхностью была увеличена в 1,5 раза и составила 813 Н (83 кгс).

Запись момента трения осуществлялась потенциометром на пульте оператора ПО-4, а наработка пары трения фиксировалась счетчиком на пульте управления. На протяжении всего опыта измерялась температура трущихся пар с помощью хромель-копелевой термопары и потенциометра КСП-4. Перед каждым опытом проводилась тарировка момента трения и прилагаемой нагрузки.

Испытание каждого образца осуществлялось по 8-ми часовой программе и состояло из четырех циклов по два часа при трехкратной повторности. Масса образцов и контрообразцов определялась до и после каждого цикла взвешивания на электронных весах РА214С. Образцы и контрообразцы перед взвешиванием промывались в ацетоне. Плазменно-напыленные образцы перед испытаниями пропитывались в масляной ванне в течение 24 часов с целью насыщения микропористого слоя.

По результатам взвешивания образцов и контрообразцов определяли среднеарифметическое значение потери массы образца и контрообразца. После обработки результаты исследований представлены в таблице П15.

3.16 Методика испытаний восстановленных валов в условиях рядовой эксплуатации

В условиях рядовой эксплуатации восстановленных коленчатых валов имеется ряд факторов, которые не могут быть созданы при проведении лабораторных испытаний. Это, например, изменение температурного и смазочного режима двигателя, а соответственно, и вала; нагрузка и изменение её во время эксплуатации автомобиля; рельеф дорожного покрытия и возникающие при этом вибрации двигателя; квалификация водителя и т. д. Все эти факторы не позволяют произвести оценку качества и долговечности восстановленного коленчатого вала лабораторными стендовыми испытаниями.

Поэтому данный этап оценки качества и долговечности восстановленных плазменно-напылённых валов является завершающим и должен подтвердить достоверность результатов испытаний, проведённых в лабораторных условиях.

Испытания валов в условиях рядовой эксплуатации осуществлялись по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 17510-79 «Надёжность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений».

Сравнительную оценку по износостойкости плазменно-напылённых шеек чугунных коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53А проводили с шейками коленчатых валов этого же двигателя, перешлифованных под ремонтные размеры. Учитывая, что износ коренных шеек валов в 2...2,5 раза интенсивнее износа

шатунных шеек [135], считали наиболее целесообразным сравнивать интенсивность износа плазменно-напыленных валов и перешлифованных валов по коренным шейкам.

Испытанию на износостойкость в условиях рядовой эксплуатации были подвергнуты две группы валов:

1. Коленчатые валы с коренными шейками второго ремонтного размера и с шероховатостью по параметру $Ra = 0,20$ мкм, обработанными серийным шлифовальным кругом при использовании серийной СОЖ.

2. Коленчатые валы с плазменно-напыленными коренными шейками второго ремонтного размера и с шероховатостью $Ra = 0,20$ мкм, обработанными шлифовальным кругом рациональной характеристики на рациональных режимах при использовании установленной эффективной марки СОЖ.

Выбор коренных шеек коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53, соответствующих второму ремонтному размеру, продиктован целью оценки износостойкости плазменно-напыленного слоя на промежуточном этапе эксплуатации.

Все отобранные для испытаний коленчатые валы проходили процесс перешлифовки и восстановления в ООО «Плазматех» и передавались в эксплуатацию в КФХ «Егорова» Егорьевского района Алтайского края в марте 2018 года.

Наблюдения за испытываемыми валами осуществлялись автором данной работы с участием представителя от ООО «Плазматех». Методикой предусматривалось проведение контроля за пробегом опытных автомобилей периодическим опросом организации, эксплуатирующей данные машины. При достижении требуемого пробега производили замеры величин износа коренных шеек испытываемых валов. Замеры шеек производились согласно технических условий на дефектовку коленчатых валов при ремонте. Относительная погрешность измерений не превышала $\pm 0,009$ %.

Обработку результатов испытаний проводили в следующей последовательности:

- определяли величину износов шеек;
- определяли скорости изнашивания шеек в мкм/1000 км пробега.

Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА МИКРОРЕЗАНИЯ И ШЛИФОВАНИЯ ПЛАЗМЕННО-НАПЫЛЁННЫХ ВАЛОВ И ИХ АНАЛИЗ

4.1 Исследование кинетики износа корунда и карбида кремния при микрорезании плазменно–напылённых валов

Сравнивался износ абразивного острья из электрокорунда белого 24А и карбида кремния зеленого 64С (см. п. 3.3) в зависимости от продолжительности его работы, выраженной длиной пройденного в металле пути (кинетика износа) при микрорезании покрытия и стали 45 на скорости 35 м/с. Результаты этих исследований [136, 137] по каждому опыту представлены в таблице П1 приложения, статистические характеристики – в таблице П2, а усредненные результаты опытов – в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Усредненные результаты исследования износостойкости корунда и карбида кремния при резании-царапании на скорости 35 м/с

Абразив	Обрабатываемый материал	Количество нанесенных рисков, шт	Длина пути резания (износостойкость), м
Корунд	Покрытие	2253	1,28
	Сталь 45, закаленная	7470	5,01
Карбид кремния	Покрытие	11539	8,14
	Сталь 45, закаленная	2920	1,61

На рисунке 4.1 показаны графики зависимости износа абразивного острья от длины пути резания. Математическая обработка экспериментальных данных показала, что величина износа U изменяется по степенной зависимости:

$$U = aL^b \quad (4.1)$$

Полученные данные показывают, что интенсивность износа корунда по покрытию значительно выше, чем карбида (рисунок 4.1,а), а по стали 45, наоборот, интенсивность износа карбида выше, чем корунда (рисунок 4.1,б). Наблюдаемое различие в износе корунда и карбида объясняется различным характером его протекания, о чем свидетельствуют электронно-микроскопические исследования и МРСА микрорельефа рабочих поверхностей этих абразивов.

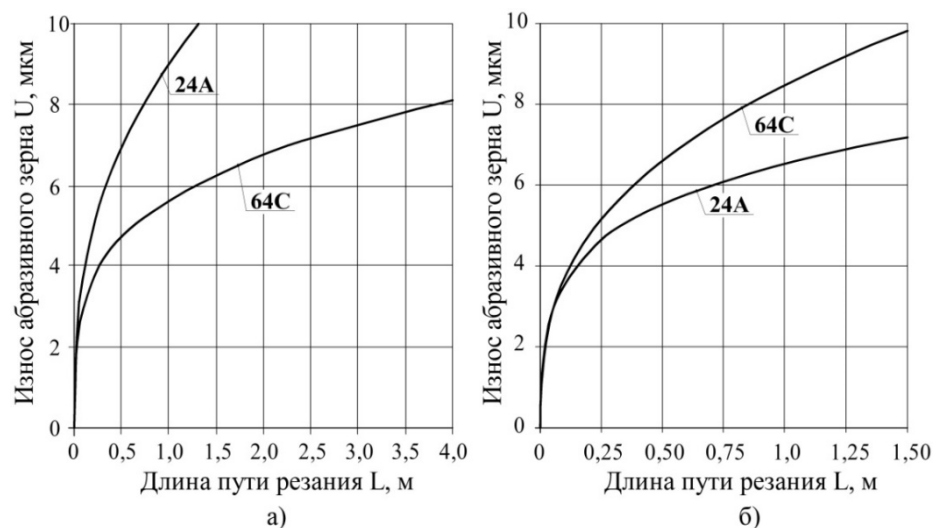


Рисунок 4.1 – Зависимость износа абразивного острья из 24А и 64С от длины пути резания-царапания покрытия (а) и стали 45 (б). Скорость 35 м/с, глубина 10 мкм.

Зерна корунда при резании-царапании покрытия изнашиваются в виде объемного микроразрушения с образованием площадок износа (рисунок 4.2,а). Формирование таких площадок вызывает рост работы трения и температуры в контакте абразив-покрытие, вследствие чего возрастает интенсивность образования адгезионных налипов.

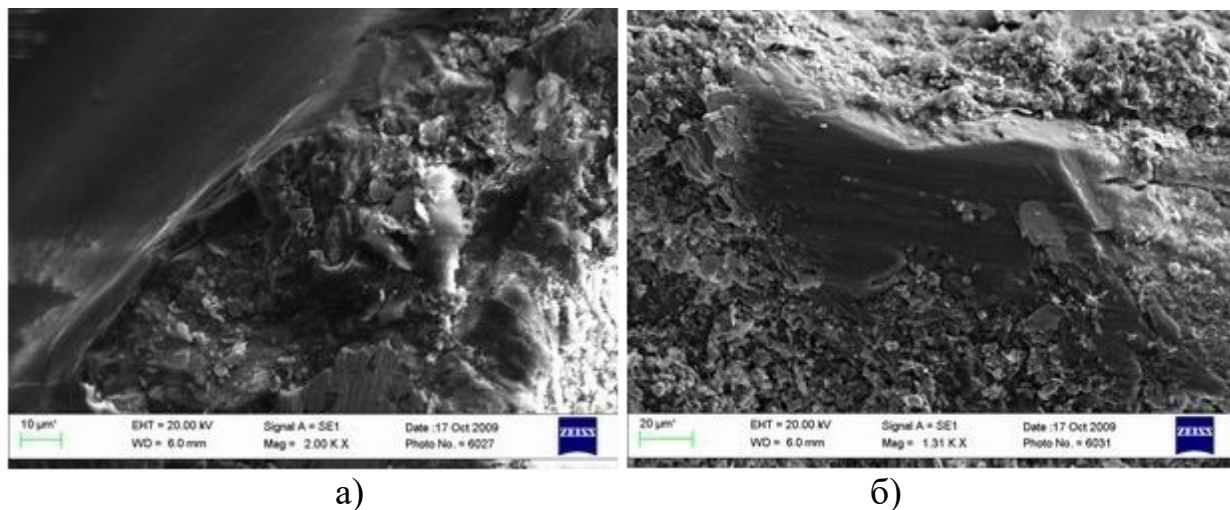


Рисунок 4.2 - РЭМ-изображения рабочих поверхностей корунда (а) и карбида (б) после микрорезания покрытия на скорости 35 м/с. Глубина 10 мкм. Увеличение $2000\times$ и $1310\times$ соответственно.

Наблюдаемые явления указывают на адгезионно-усталостный износ корунда [58, 59], вызванный ослаблением связи микрочастиц его поверхностных слоев с основным объемом абразива вследствие многократного адгезионного взаимодействия с покрытием.

В результате интенсивной адгезии происходит контактирование налипшего металла и металла образца. Известно [138], что образование металлического контакта приводит к возрастанию износа абразива (таблица 4.1). Такой характер износа абразивного острия корунда будет обеспечивать комбинированный режим работы АИ с объёмным разрушением режущих зёрен, повышенным износом кругов и низким периодом их стойкости.

МРСА абразивного острия из корунда позволил обнаружить в нем достаточно высокую концентрацию железа (около 15 вес. %), перенесенного с покрытия. Кроме того, в поверхностных микрообъемах корунда наблюдалось резкое изменение содержания кислорода и алюминия по сравнению с их исходным состоянием.

Зерна карбида кремния при микрорезании покрытия изнашиваются в виде поверхностного микроскалывания кромок на вершинах которых образуются небольшие разрозненные адгезионные налипы (рисунок 4.2,б). Наблюдаемые явления свидетельствуют о том, что для карбида также характерен адгезионно-усталостный износ. Однако масштабного формирования адгезионных налипов не происходит и интенсивность износа карбида значительно ниже корунда (рисунок 4.1). Такой характер износа абразивного острия карбида кремния будет способствовать комбинированному режиму работы АИ с микроскалыванием режущих зёрен и удалением с их поверхности налипших частиц покрытия, а также обеспечивать хорошее самозатачивание кругов и высокий период их стойкости.

МРСА поверхностных микрообъемов острия из карбида показал наличие железа (около 10 вес. %). Существенных изменений содержания углерода и кремния по сравнению с исходным состоянием этого абразива не обнаружено.

Анализ состояния поверхности рисок после микрорезания зернами из корунда и карбида выявил существенные различия в характере их образования. Так, при микрорезании покрытия единичным зерном из корунда (рисунок 4.3,а) риска получается с резко выраженными навалами по ее краям, специфичными для деформации металла при адгезии. Кроме того, на поверхности единичной

царапины видны мелкие риски, которые появились в результате субмикрорезания металла микровыступами, образующимися на рабочей поверхности корундового острья в процессе его износа. При использовании же абразивного острья из карбида риска образуется с более гладкими и ровными краями, что характерно для резания металла без адгезии (рисунок 4.3,б).

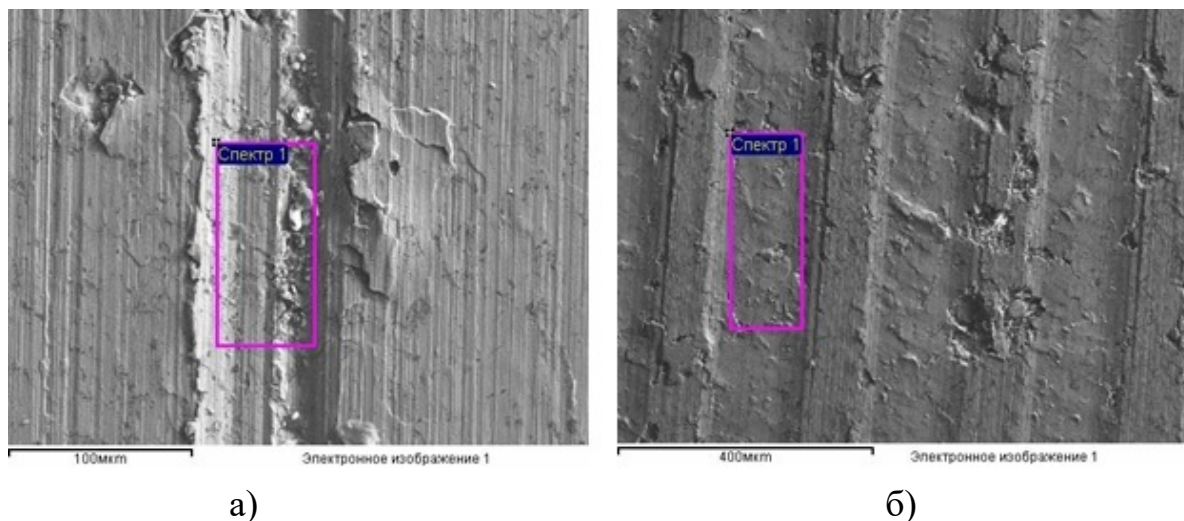


Рисунок 4.3 – Состояние поверхности рисок после микрорезания покрытия острием из корунда (а) и карбида (б). Скорость 35 м/с, глубина 10 мкм. Увеличение 2190^x

Проведенные исследования по микрорезанию стали 45 позволили установить, что состояние поверхности трения корунда (рисунок 4.4,а) характеризуется ярко выраженными следами разрушения – микросколами и наличием больших участков с налипшим металлом, что указывает на адгезионно-усталостный характер износа этого абразива [58, 59]. МРСА поверхностных слоев корунда, проведенный после микрорезания стали 45, свидетельствует о наличии железа в пределах 30...50 вес. %, а на отдельных участках около 60 вес. %.

Состояние абразивного острья из карбида после микрорезания стали 45 (рисунок 4.4,б) характеризуется точечными адгезионными налипками, которые пластически деформируются в направлении вектора скорости резания, а наличие гладких, отполированных площадок указывает на преобладание диффузионного износа [58].

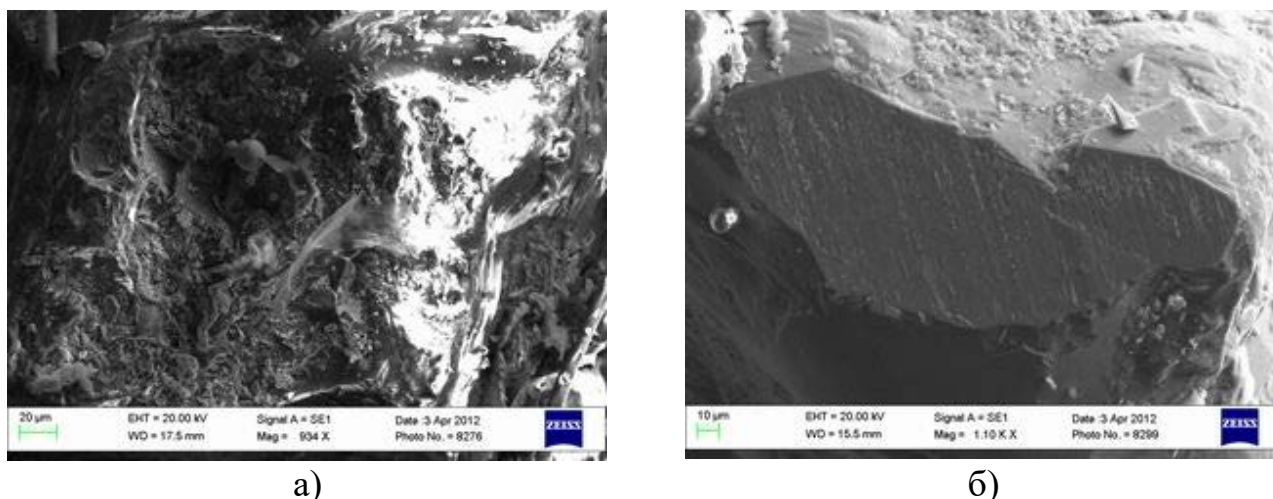


Рисунок 4.4 – РЭМ-изображения рабочих поверхностей абразивного острия из корунда (а) и карбида (б) после микрорезания стали 45. Скорость 35 м/с, глубина 10 мкм. Увеличение 934^x и 1100^x соответственно.

Наличие химического сродства карбида со сталью [59] вызывает интенсивное растворение атомов этого абразива в материале обрабатываемой заготовки и приводит к его повышенному износу (таблица 4.1). МРСА поверхностных слоев карбида показал, что содержание в них железа весьма незначительно и составляет 2...5 вес. %.

Таким образом электронно-микроскопические исследования и МРСА показывают, что износ абразивного острия из корунда при микрорезании покрытия протекает в виде объемного разрушения (рисунок 1.2,в) с одновременным интенсивным адгезионным взаимодействием с обрабатываемым материалом. Можно предположить, что в результате этого взаимодействия механические свойства поверхностных микрообъемов корунда снижаются и интенсивность его износа возрастает (рисунок 4.1, а).

При взаимодействии карбида с покрытием при микрорезании доминирующими являются процессы поверхностного микроскалывания абразива (рисунок 1.2, б) с незначительным образованием адгезионных налипков. Полученные данные свидетельствуют о существенной инертности карбида по отношению к покрытию.

Можно ожидать, что с изменением режимных факторов – скорости и глубины микрорезания-изменится и характер износа исследуемых абразивов.

Поэтому влияние скорости и глубины на износ корунда и карбида кремния при резании-царапании покрытия исследовано более подробно.

4.2 Исследование износа корунда и карбида кремния в зависимости от скорости и глубины микрорезания плазменно-напылённых валов

Сравнивался износ электрокорунда белого 24А и карбида кремния зеленого 64С (см. п. 3.3.) при микрорезании покрытия. Результаты этих исследований [139, 140] по каждому опыту представлены в таблицах ПЗ и П4, статистические характеристики – в таблицах П5 и П6, а усредненные результаты опытов – в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Усредненные результаты исследования влияния скорости и глубины микрорезания покрытия на износ абразивных материалов

Абразив	Скорость микрорезания, м/с	Глубина микрорезания, мкм	Количество рисунок, шт	Износостойкость, м	Износ абразива на 1 м пути, мкм/м
Корунд	10	10	2555	1,54	6,49
	20		2425	1,44	6,94
	35		2253	1,28	7,81
	50		1938	1,08	9,26
	35	5	2260	1,20	4,17
		10	2253	1,28	7,81
		15	2459	1,35	11,11
		20	2591	1,40	14,29
Карбид кремния	10	10	12234	8,71	1,15
	20		11960	8,54	1,17
	35		11540	8,14	1,23
	50		10558	7,22	1,29
	35	5	7334	3,87	1,29
		10	11540	8,14	1,23
		15	18199	15,18	0,99
		20	29861	27,56	0,73

Проведенные эксперименты по исследованию влияния скорости V и глубины резания t на износ абразивов из электрокорунда и карбида кремния позволили получить двухфакторные аддитивные зависимости следующего вида:

$$\text{для корунда } U_{24A} = 0,06V + 0,66t - 0,99, \quad (4.2)$$

$$\text{для карбида } U_{64C} = 0,003V - 0,04t + 1,51. \quad (4.3)$$

Погрешность аппроксимации в зависимостях (4.2) и (4.3) не превышала 9,4 и 8,5 % соответственно.

Экспериментальные данные, полученные как среднее арифметическое значений результатов не менее двадцати опытов в одной точке, обрабатывались в среде табличного процессора «Excel» с использованием настройки «Поиск решения».

Исследования показали (таблица 4.2), что в принятом диапазоне режимов микрорезания покрытия износ карбида оказался в 5,7...11,1 раза ниже по сравнению с корундом и достигал 1,3 и 14,3 мкм/м соответственно.

Графические зависимости износа корунда и карбида кремния от скорости и глубины микрорезания, построенные на базе уравнений (4.2) и (4.3), показаны на рисунке 4.5. Видно, что с повышением скорости на всем установленном диапазоне глубин резания износ корунда интенсифицируется (рисунок 4.5,а), что объясняется ростом температуры процесса и усилением адгезионных явлений.

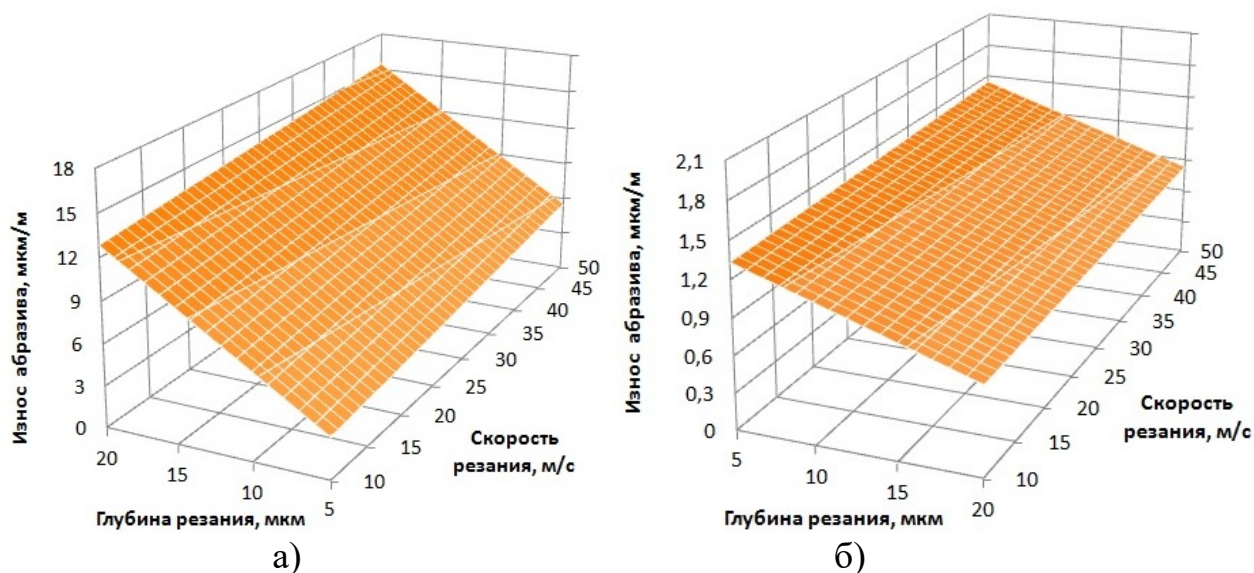


Рисунок 4.5 – Влияние режимов микрорезания покрытия на износ абразивов из корунда (а) и карбида кремния (б).

При микрорезании покрытия на малой (10 м/с) скорости поверхность корунда (рисунок 4.6,а) подвергается объёмному разрушению в виде крупных сколов с образованием площадки износа. Проведенный МРСА поверхностных микрообъемов корунда позволил обнаружить в них небольшое количество железа (2,8 вес. %).

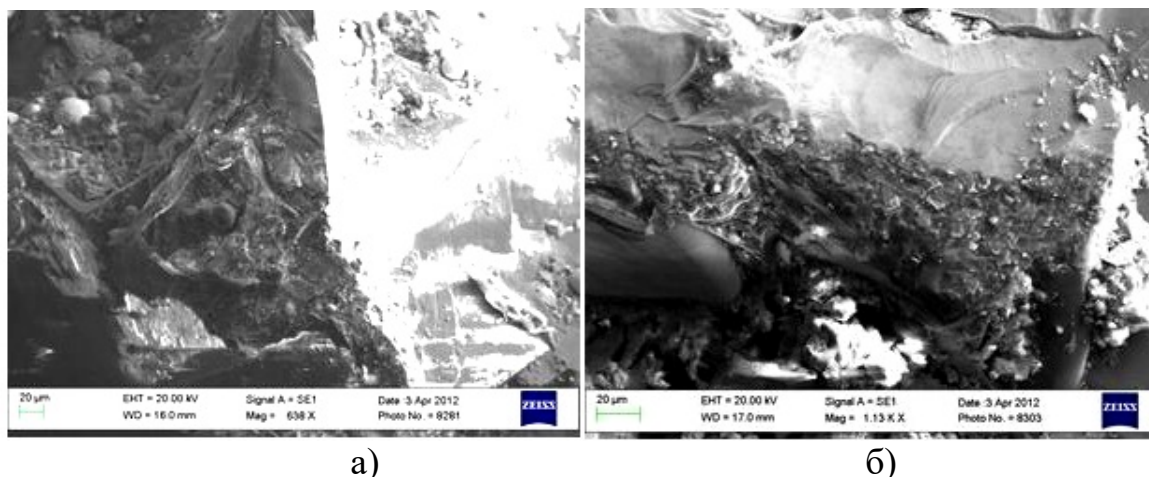


Рисунок 4.6 – РЭМ-изображения рабочих поверхностей корунда (а) и карбида (б) после микрорезания покрытия на скорости 10 м/с. Глубина 10 мкм. Увеличение 628^{\times} и 1130^{\times} .

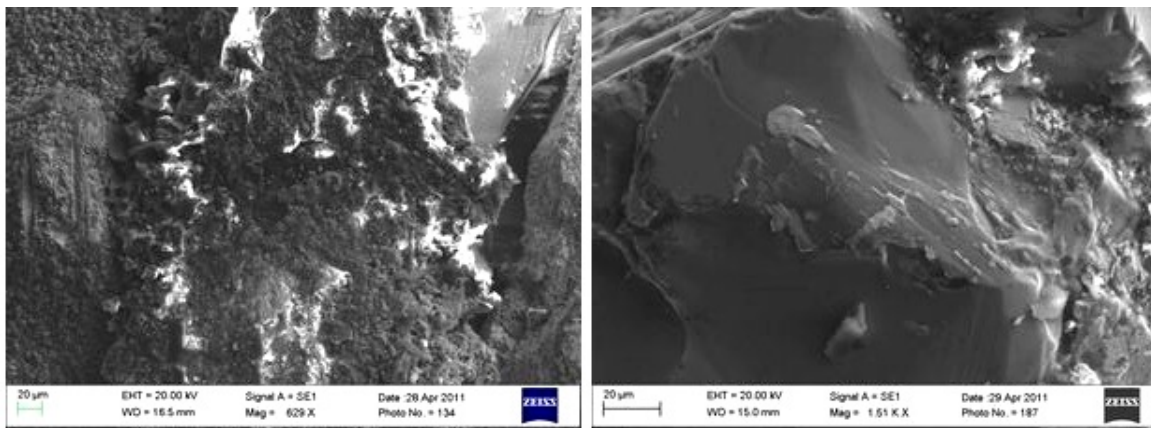
На поверхности карбида (рисунок 4.6,б) при скорости 10 м/с также формируется площадка износа с образованием мелких сколов и углублений (щелей). С помощью МРСА здесь также обнаружено весьма незначительное количество железа (1,5 вес. %). Следовательно, на малых скоростях износ корунда и карбида определяется в основном физико-механическими свойствами (высокой хрупкостью) этих абразивов и сопровождается явлениями характерными для низкотемпературных условий взаимодействия.

С увеличением скорости до 50 м/с температура в контакте абразив-покрытие возрастает, что является «катализатором» адгезионных процессов [141]. Вследствие этого впадины микрорельефа режущего острия из Al_2O_3 интенсивно заполняются частицами покрытия (рисунок 4.7,а), способствуя возникновению металлического контакта поверхностей налипшего металла и металла образца. В этом случае силы, действующие на отдельные микрообъемы зерен, возрастают [141], что вызывает интенсификацию их износа (рисунок 4.5,а).

МРСА поверхностей корунда после микрорезания на скорости 50 м/с показал наличие в них железа 23,9 вес. %, что в 8,5 раз больше чем при микрорезании на скорости 10 м/с. В этих условиях, очевидно, в износе корунда возрастает роль процессов физико-химического взаимодействия с покрытием.

Поверхность абразивного острия из SiC после микрорезания покрытия на скорости 50 м/с (рисунок 4.7,б) имеет более плавный рельеф со следами

разрозненных адгезионных налипков, пластически деформированных в направлении вектора скорости резания. МРСА поверхностей карбида позволил установить, что на скорости 50 м/с количество железа возросло незначительно и составило 2,2 вес. %.

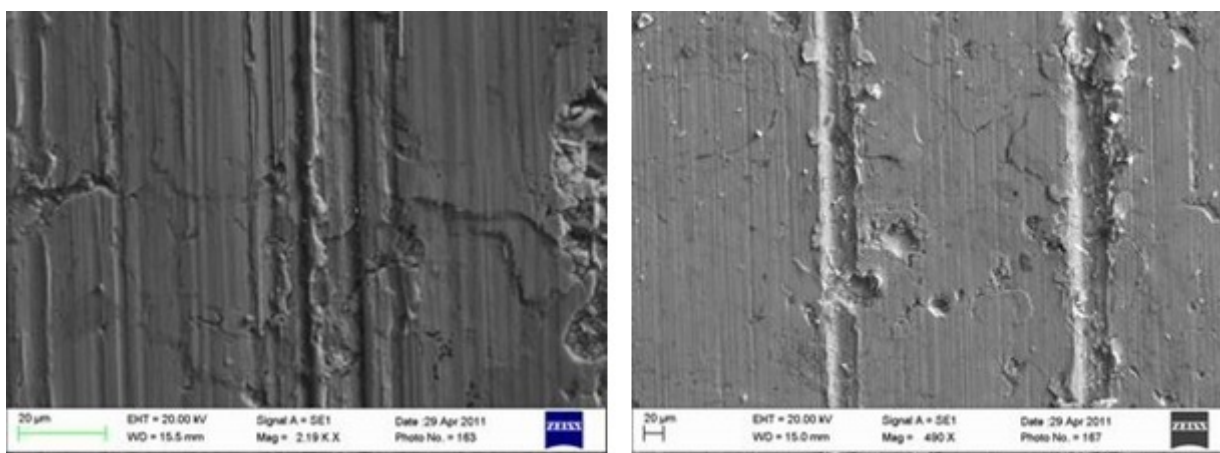


а)

б)

Рисунок 4.7 – РЭМ-изображения рабочих поверхностей корунда (а) и карбида (б) после микрорезания покрытия со скоростью 50 м/с. Глубина 10 мкм. Увеличение 628^{\times} и 1510 .

Исследованиями деформаций покрытия в зоне единичной царапины обнаружено, что в случае микрорезания острием из Al_2O_3 риски формируются размазанными, без четкой формы и с рваными краями, специфичными для деформации металла при схватывании (рисунок 4.8,а). При использовании острия из SiC риски образуются с более ровными краями и гладкой поверхностью, что характерно для резания металла без адгезии (рисунок 4.8,б).



а)

б)

Рисунок 4.8 – Состояние поверхности рисков после микрорезания покрытия острием из корунда (а) и карбида (б) на скорости 50 м/с. Глубина 10 мкм. Увеличение 2190^{\times} и 490^{\times} .

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о повышении интенсивности адгезионного взаимодействия корунда с покрытиями при возрастании скорости обработки. Можно предположить, что в результате этого взаимодействия механические свойства поверхностных микрообъемов корунда снижаются и интенсивность его износа возрастает (рисунок 4.5,а). Эти явления позволяют объяснить, почему более вязкий абразив – корунд показал износ значительно больший, чем карбид. В этом случае, по всей вероятности, более сильное влияние на износ корунда оказывает химическая активность к покрытиям.

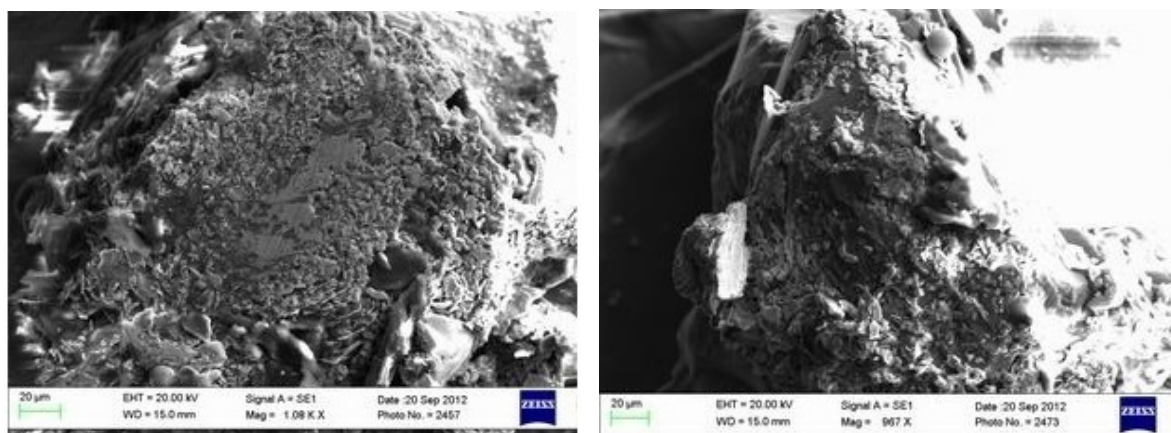
И в то же время слабое влияние скорости микрорезания на износ карбида (рисунок 4.5,б) указывает на существенную инертность этого абразива по отношению к покрытию. При малой скорости, когда температурное воздействие и химические реакции ослаблены различие в износе корунда и карбида менее значительно.

С ростом глубины микрорезания износ корунда резко интенсифицируется (рисунок 4.5,а), что объясняется возрастанием нагрузки на АЗ в связи с увеличением толщины среза (таблица 2.2). Для карбида кремния, наоборот, увеличение глубины резания приводит к снижению износа (рисунок 4.5,б), что объясняется преобладанием процесса резания над процессом скольжения [92] и большей его прочностью (твердостью) по сравнению с корундом.

На рабочей поверхности корунда после микрорезания на малой (5 мкм) глубине формируется площадка износа со значительными адгезионными налипками (рисунок 4.9,а). Проведенный МРСА поверхностей корунда позволил обнаружить в них весьма значительное количество железа (37,6 вес. %) [140]. Это свидетельствует об активном адгезионном взаимодействии корунда с исследуемым покрытием даже на малой глубине микрорезания.

Анализ поверхности трения карбида после микрорезания на глубине 5 мкм позволил установить, что на ней формируются участки с мелкими сколами при одновременном формировании разрозненных адгезионных наливов (рисунок

4.9,б). С помощью МРСА поверхностей карбида установлено [140], что в отдельных его микрообъемах концентрация железа составляла около 15 вес. %, что в 2,5 раза меньше по сравнению с корундом.

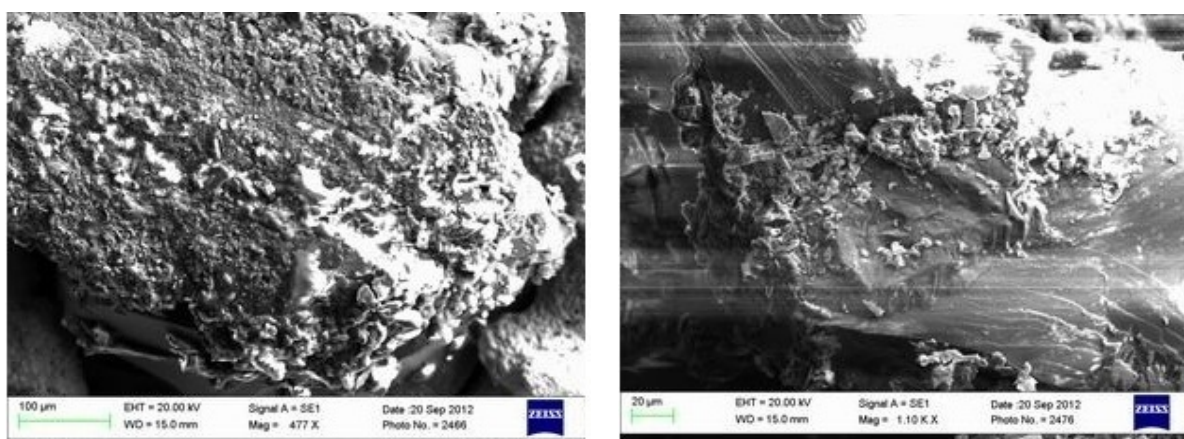


а)

б)

Рисунок 4.9 – РЭМ-изображения рабочих поверхностей корунда (а) и карбида (б) после микрорезания покрытия с глубиной 5 мкм. Скорость 35 м/с. Увеличение 1080^{\times} и 967^{\times} .

После микрорезания покрытия на большой (20 мкм) глубине обнаружено, что поверхность режущего острия корунда представляет собой площадку износа почти сплошь покрытую налипшим металлом (рисунок 4.10,а). С помощью МРСА в поверхностных слоях корунда обнаружены весьма значительная концентрация железа (более 41 вес. %).



а)

б)

Рисунок 4.10 – РЭМ-изображения рабочих поверхностей корунда (а) и карбида (б) после микрорезания покрытия с глубиной 20 мкм. Скорость 35 м/с. Увеличение 477^{\times} и 1100^{\times} .

Для поверхности карбида после резания-царапания на глубине 20 мкм характерно наличие ярко выраженной площадки износа, формируемой в результате поверхностного микроскалывания кромок и небольших участков с налипшим металлом (рисунок 4.10,б). Данные МРСА поверхностных слоев карбида показывают, что содержание железа в них составляет около 20 вес. %.

Таким образом, закономерности изменения износа корунда и карбида при увеличении глубины микрорезания покрытия предопределяются с одной стороны возрастанием нагрузки на АЗ, а с другой - повышением температуры в контакте абразив-покрытие.

Рост нагрузки вызывает образование площадок износа: у корунда за счет объёмного разрушения АЗ, у карбида – за счет поверхностного микроскалывания режущих кромок. Но и в том, и в другом случае износ зерен сопровождается протеканием адгезионных процессов на границе зерно-покрытие: для корунда с большей интенсивностью, для карбида – с меньшей.

Интенсивное микроразрушение корунда под действием возрастающих нагрузок с ростом глубины и при одновременном формировании адгезионных налипов определяет адгезионно-усталостный износ этого абразива. Можно предположить, что при взаимодействии с покрытием происходит резкое охрупчивание поверхностных слоев корунда с уменьшением их микротвердости. Это обуславливает повышенный износ корунда при микрорезании покрытия на больших глубинах (рисунок 4.5,а), хотя в исходном состоянии корунд менее хрупок, чем карбид [61].

Потери карбида при микрорезании покрытий с ростом глубины происходят за счет поверхностного микроскалывания режущих кромок с одновременным незначительным налипанием металла на поверхности трения этого абразива. При малой глубине, когда температурное воздействие и нагрузки на АЗ ослаблены, различие в износе корунда и карбида менее значительно (рисунок 4.5,а и б).

Одновременное же повышение скорости и глубины микрорезания вызывает резкий рост износа (до 5 раз) АЗ как из корунда (рисунок 4.5,а), так и из карбида

(рисунок 4.5,б). Это объясняется одновременным повышением температуры в зоне контакта абразива с металлом и возрастанием нагрузки на абразивное остриё.

Проведенное исследование показало, что основной причиной низкой обрабатываемости покрытий и малой стойкости ШК является высокий износ АЗ, обусловленный а) высокой истирающей способностью покрытий по сравнению со сталью 45 по причине наличия в них твердых включений в виде оксидов, карбидов, шлаков и др., б) активным образованием адгезионных налипов на поверхности абразива даже при малой скорости и глубине резания, в) влиянием процессов адгезионного взаимодействия абразивов с покрытиями, особенно при высоких скоростях и глубинах резания.

Поэтому одним из основных путей совершенствования процесса шлифования покрытий является изыскание абразивов, обладающих повышенной износостойкостью и низкой адгезионной активностью к этим покрытиям, чему и посвящен следующий параграф.

4.3 Исследование износостойкости разных абразивов и их адгезионной активности при обработке плазменно-напылённых валов

Сравнивалась износостойкость шлифовальных материалов, представленных в п. 3.3. при микрорезании покрытия со скоростью 35 м/с. Результаты этих исследований по каждому опыту показаны в таблицах П7 и П8, а статистические характеристики – в таблице П9.

Усредненные результаты опытов представлены в виде диаграмм на рисунке 4.11. В соответствии с полученными данными [136], исследованные абразивные материалы по износостойкости можно разделить на три группы. К группе наиболее износостойких абразивов относятся сверхтвердые материалы – алмаз синтетический и эльбор поликристаллический, ко второй группе относятся карбиды, и наименьшей износостойкостью обладают корундовые материалы.

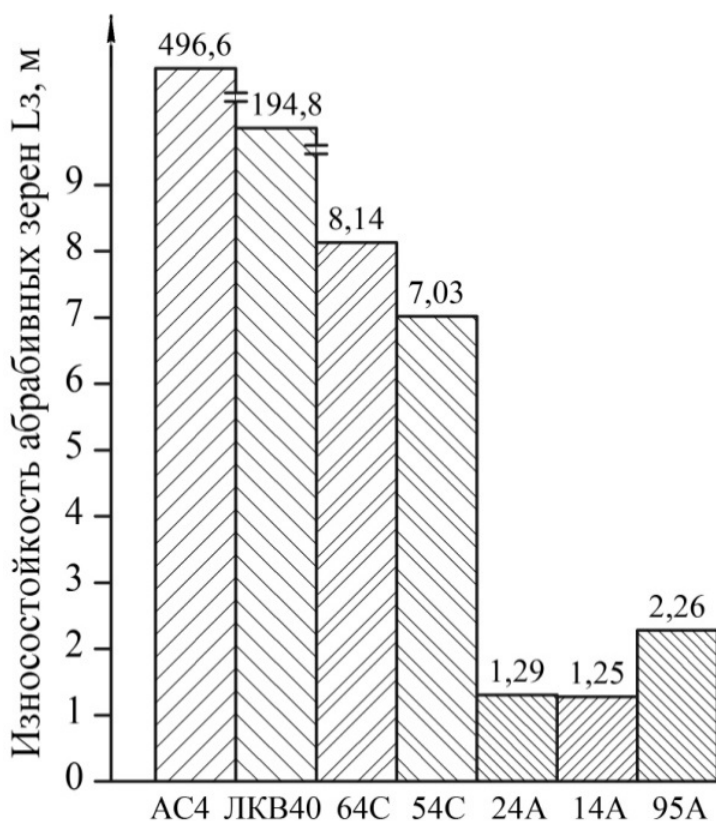
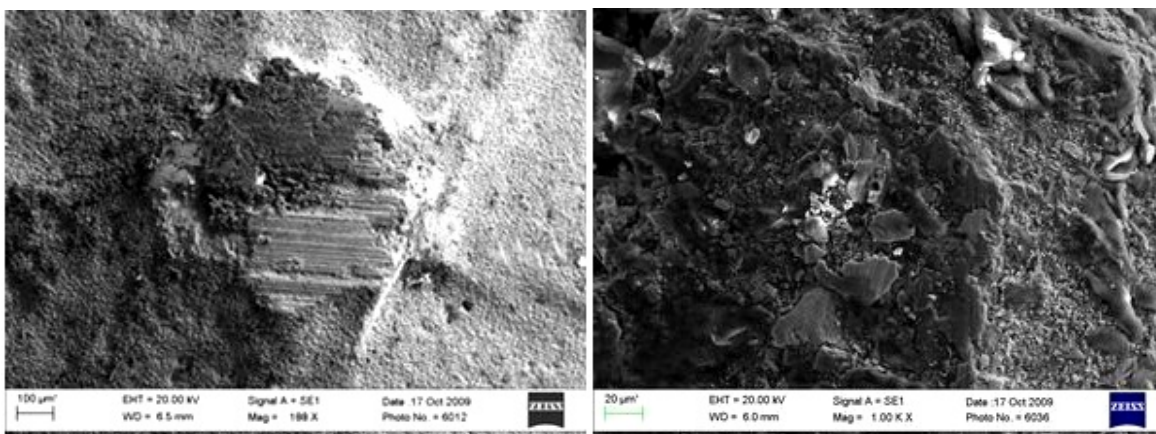


Рисунок 4.11 – Износостойкость различных абразивных материалов при микрорезании покрытия со скоростью 35 м/с. Глубина 10 мкм

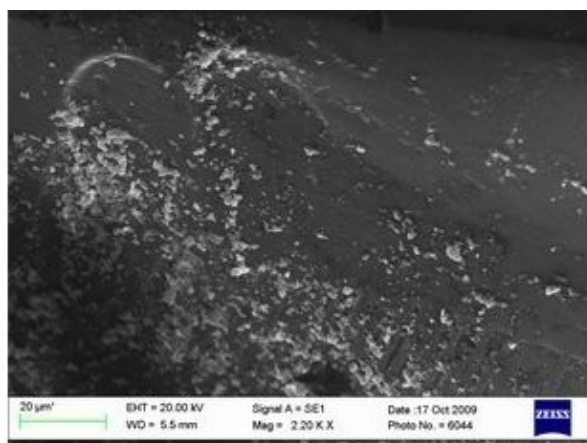
Поликристаллы кубического нитрида бора (эльбора) по износостойкости в 2,6...2,8 раза ниже, чем монокристаллы алмаза синтетического, однако на порядок выше, чем зерна карбида кремния. Износостойкость корундов на порядок ниже, чем карбида кремния [142].

Проведенные наблюдения показали, что при контакте с покрытием абразивов из третьей группы износостойкости адгезионные налипсы появляются после нанесения первых же рисок и со временем увеличиваются. Об этом свидетельствует снимок (рисунок 4.12,а) рабочей поверхности абразивного остря из электрокорунда хромотитанистого (95А). Видно, что на рабочей поверхности этого абразива после микрорезания покрытия образуется сплошной слой налипшего металла. В результате интенсивной адгезии происходит контактирование налипшего металла и металла образца, способствующего значительному росту силы микрорезания и соответственно снижению износостойкости абразива [141].



а)

б)



в)

Рисунок 4.12 – РЭМ-изображения рабочих поверхностей электрокорунда хромтитанистого (а), карбида кремния черного (б) и алмаза синтетического (в) после микрорезания покрытия на скорости 35 м/с. Глубина 10 мкм. Увеличение 108^x , 1000^x и 2200^x соответственно

МРСА поверхностных слоев острия из 95А позволил обнаружить в них более 50 вес. % железа и резкое изменение содержания кислорода и алюминия по сравнению с исходным состоянием [137, 151]. Эти данные свидетельствуют об активном химическом взаимодействии абразивов из третьей группы износостойкости с покрытием, что согласуется с результатами исследования влияния скорости и глубины на адгезионную активность электрокорунда (п. 4.2).

На рисунке 4.12,б показан снимок рабочего микрорельефа АЗ из второй группы износостойкости - карбида кремния черного 54С. Видно, что наряду с мелкими сколами на зерне видны менее существенные, по сравнению с 95А, следы адгезии. Выполненный МРСА поверхностных слоев острия из 54С показал наличие в них около 17 вес. % железа. Резкого изменения содержания углерода и кремния в этих слоях по сравнению с исходным не установлено.

Полученные данные показывают, что по степени насыщения железом остриё из 95А почти в три раза превосходит поверхность трения острия из 54С

[137]. Это указывает на существенную инертность абразивов из второй группы износостойкости по отношению к покрытию, что также согласуется с результатами исследования влияния скорости и глубины на адгезионные свойства карбида кремния (п. 4.2).

На рисунок 4.12,в показан снимок рабочей поверхности единичного зерна из первой группы износостойкости - алмаза синтетического АС4. Видно, что на поверхности этого острия образуются лишь небольшие разрозненные адгезионные налипсы. Выполненный МРСА поверхности трения алмаза показал наличие небольшого количества железа (около 4 вес. %). Резкого изменения содержания углерода в составе алмаза по сравнению с исходным состоянием не наблюдалось.

Полученные данные свидетельствуют о более значительной инертности абразивов из первой группы износостойкости по отношению к покрытию по сравнению с корундом и карбидом [142].

При анализе состояния поверхности риск после микрорезания зернами из абразивов разных групп износостойкости обнаружены существенные различия. Так, при микрорезании покрытия единичным зерном из 95А (рисунок 4.13,а) риска получается с резко выраженными навалами и рваными краями, что характерно для резания с адгезией. Кроме этого, на поверхности единичной царапины видны мелкие риски, появившиеся в результате субмикрорезания металла микровыступами, образующимися на рабочей поверхности корундового острия в процессе его износа.

При использовании режущего острия из 54С риска образуется с более ровными краями и гладкой поверхностью, что характерно для резания металла с незначительной адгезией (рисунок 4.13,б).

После микрорезания покрытия острием из алмаза навалы по краям риска отсутствуют, поверхности царапин более гладкие и ровные, специфичные для деформации металла при резании без адгезии (рисунок 4.13,в).

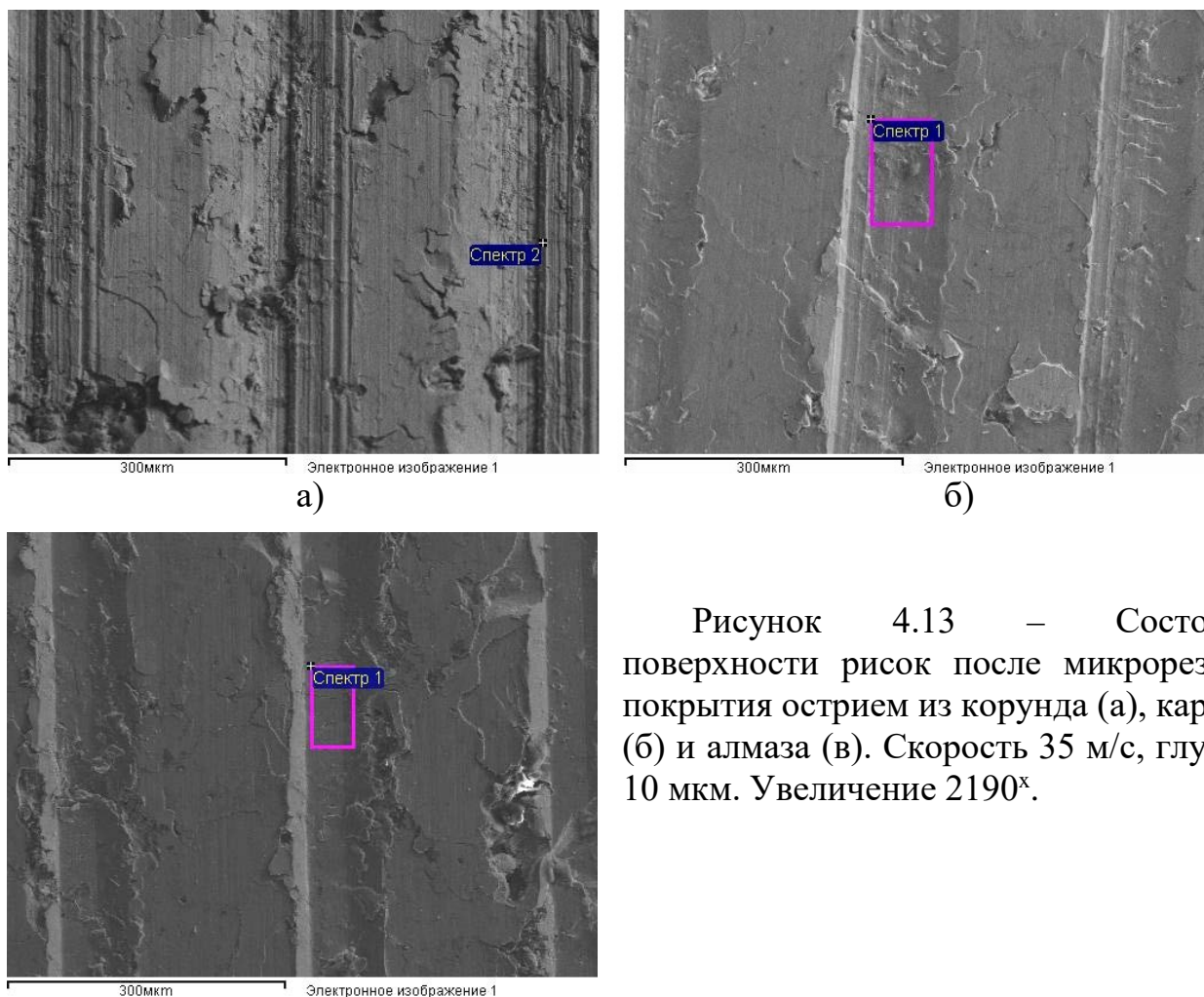


Рисунок 4.13 – Состояние поверхности рисок после микрорезания покрытия острием из корунда (а), карбида (б) и алмаза (в). Скорость 35 м/с, глубина 10 мкм. Увеличение 2190^x.

Таким образом, в результате электронно-микроскопических и микрорентгеноспектральных исследований микрорельефа рабочих поверхностей абразивного острья и царапины установлено, что шлифовальные материалы обладают различной адгезионной активностью по отношению к исследуемому покрытию: наименьшей адгезионной активностью обладает алмаз, затем идет эльбор, далее карбиды и, наконец, корунды.

Сопоставление абразивов трех групп износостойкости - корундов, карбидов и сверхтвердых материалов - при микрорезании микропористых покрытий свидетельствует о различном характере их взаимодействия в зависимости от природы контактируемых пар, что является основополагающим при выборе абразивных материалов для шлифования этих покрытий.

4.4 Исследование работоспособности кругов и качества поверхностей плазменно-напылённых валов при продольном шлифовании инструментом из электрокорунда и карбида кремния в зависимости от скорости и глубины резания

Исследование эксплуатационных свойств АИ в зависимости от скорости и глубины резания при круглом продольном шлифовании осуществлялось кругами зернистости F46, твердости N, 6-й структуры на керамической связке (V) из электрокорунда белого (24А) и карбида кремния зеленого (64С) [143, 144]. Усредненные результаты экспериментов по влиянию режимных факторов на показатели шлифования покрытия представлены в таблице П10 и П11, а некоторые типичные зависимости на рисунках.

Одним из основных свойств шлифовального инструмента, определяющим его работоспособность, является стойкость. Проведенные эксперименты по исследованию влияния скорости V и глубины резания t на стойкость кругов из электрокорунда и карбида кремния позволили получить двухфакторные аддитивные зависимости следующего вида:

$$\text{для корунда } T_{24A} = 9891V^{-1,15} t^{-1,08}, \quad (4.4)$$

$$\text{для карбида } T_{64C} = 8712V^{-1,03} e^{-0,13t}. \quad (4.5)$$

Погрешность аппроксимации в зависимостях (4.4) и (4.5) не превышала 2,45 и 5,67 % соответственно.

Экспериментальные данные, полученные как среднее арифметическое значений результатов трех опытов в одной точке, обрабатывались в среде табличного процессора «Excel» с использованием настройки «Поиск решения».

Исследования показали, что в принятом диапазоне режима шлифования покрытия кругом из карбида кремния достигаемые периоды стойкости оказались 2,4...3,4 раза выше по сравнению с инструментом из электрокорунда и составляли 410 и 122 мин. соответственно.

Графические зависимости стойкости кругов от скорости и глубины резания, построенные на базе уравнений (4.4) и (4.5) показаны на рисунке 4.14.

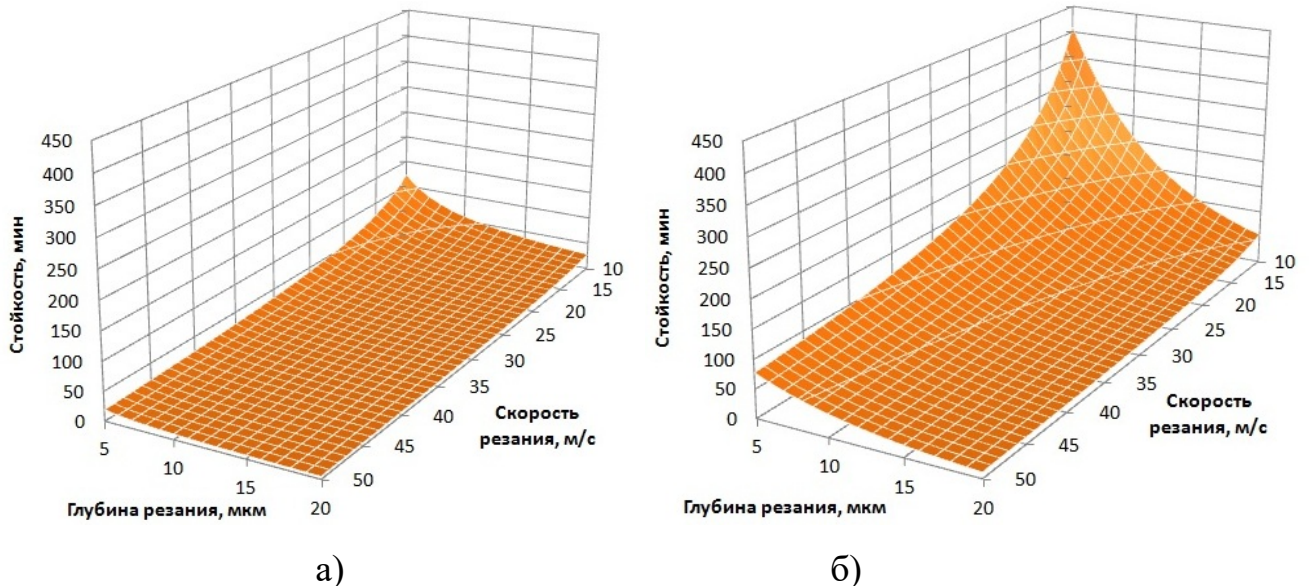


Рисунок 4.14 – Влияние режимов резания на стойкость кругов из электрокорунда (а) и карбида кремния (б)

Представленные зависимости наглядно отражают влияние скорости и глубины резания на период стойкости АИ. В частности, уменьшение глубины в диапазоне высоких скоростей, а также снижение скорости при больших глубинах, не сопровождается заметным ростом стойкости кругов. Одновременное же снижение скорости и глубины вызывает резкий рост периодов стойкости как для кругов из корунда (рисунок 4.14,а), так и для инструмента из карбида (рисунок 4.14,б).

Периоды стойкости исследуемых кругов уменьшаются при одновременном повышении скорости и глубины резания. Это объясняется возрастанием износа инструментов (рисунок 4.5) под действием теплового фактора [145] и физико-химических явлений на поверхностях контакта, способствующих интенсивному засаливанию кругов, о чем свидетельствуют микрофотографии (рисунок 4.15) и графики (рисунок 4.16).

Полученные данные по стойкости кругов при шлифовании покрытия хорошо согласуются с результатами микрорезания (рис. 4.5).

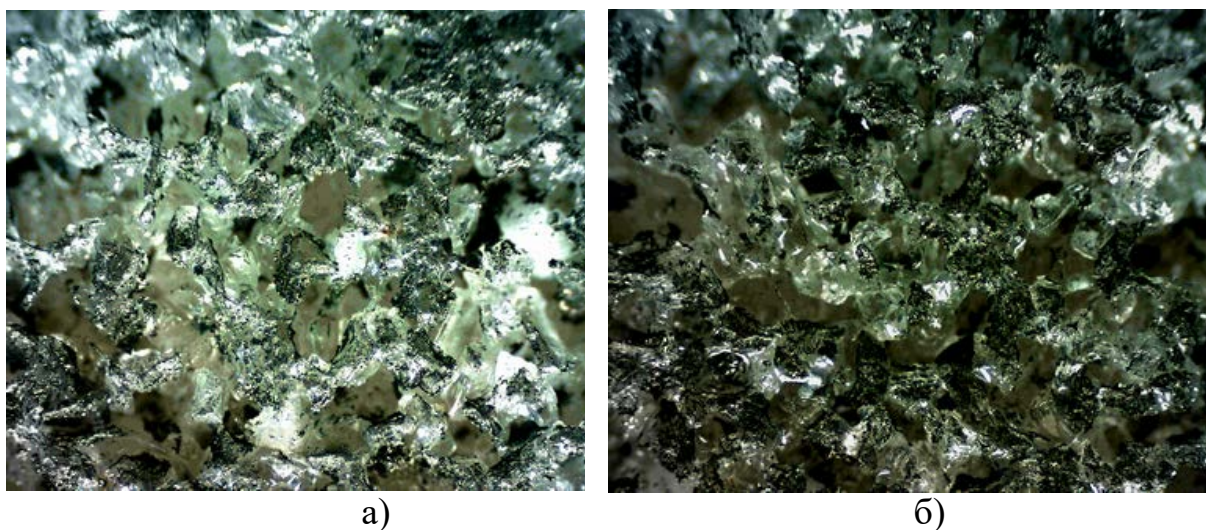


Рисунок 4.15 – Микрофотографии рабочей поверхности круга из 24А в конце периода его стойкости при шлифовании покрытия на скорости 10 (а) и 50 м/с (б). Увеличение $60\times$.

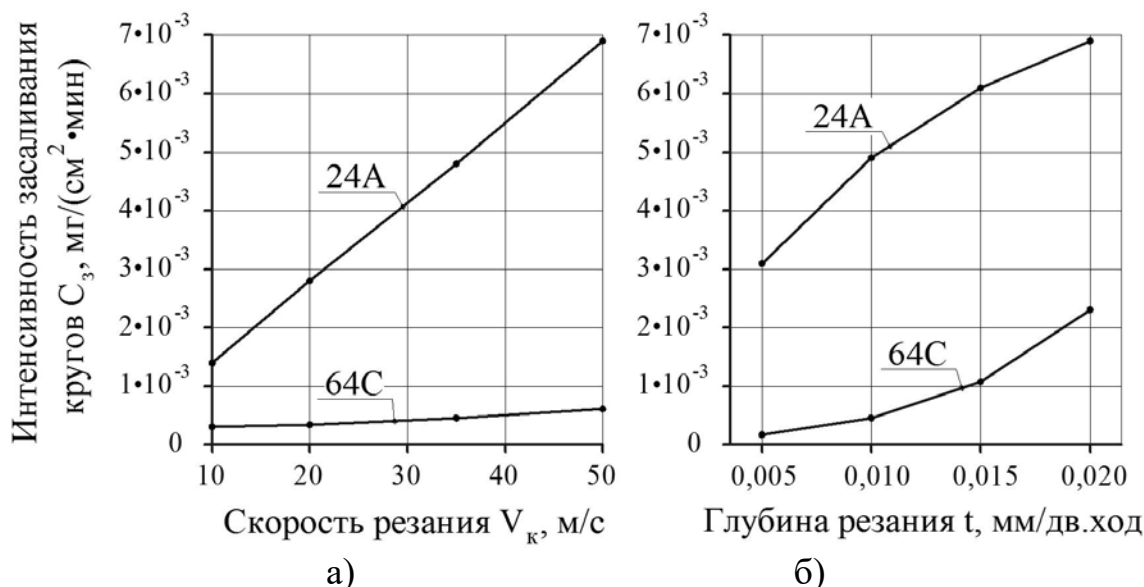


Рисунок 4.16 – Зависимость интенсивности засаливания кругов от скорости (а) и глубины (б) при шлифовании покрытия кругами из электрокорунда и карбида кремния.

Проведенные эксперименты по исследованию влияния режимных факторов на радиальный износ кругов ΔR и удельную производительность q при шлифовании инструментами из 24А и 64С позволили получить двухфакторные аддитивные зависимости следующего вида:

$$\text{для круга из корунда } \Delta R_{24A} = 1,29 + 0,25t + 15,51V^{0,01}, \quad (4.6)$$

$$\text{для круга из карбида } \Delta R_{64C} = 23,42 - 0,77t + 37,85V^{-1,01}, \quad (4.7)$$

$$\text{для круга из корунда } q_{24A} = 10,29 - 0,05V + 0,17t, \quad (4.8)$$

$$\text{для круга из карбида } q_{64C} = 22,37 + 0,03V + 1,12t. \quad (4.9)$$

Погрешности аппроксимации в зависимостях (4.6...4.9) составляли соответственно 2,55, 2,32, 1,65 и 4,65 %.

Исследования показали, что в принятом диапазоне режима шлифования покрытия радиальный износ круга из карбида кремния оказался значительно меньше по сравнению с кругом из электрокорунда и достигал 8,7 и 18,4 мкм соответственно.

Графические зависимости радиального износа кругов от скорости и глубины резания, построенные на базе уравнений (4.6) и (4.7) показаны на рисунке 4.17. Видно, что для кругов из 24А (рисунок 4.17,а) и 64С (рисунок 4.17,б) возрастание скорости резания не сопровождается заметными изменениями в их износе. Однако с ростом глубины резания износ электрокорундового круга возрастал в 1,3 раза, а карбидкремниевое, наоборот, снижался почти в три раза, что объясняется, в отношении первого, резким усилением нагрузки на режущие зерна и меньшей прочностью электрокорунда, а в отношении второго, увеличением толщины среза единичным АЗ, а значит, и возрастанием роли резания по сравнению с трением.

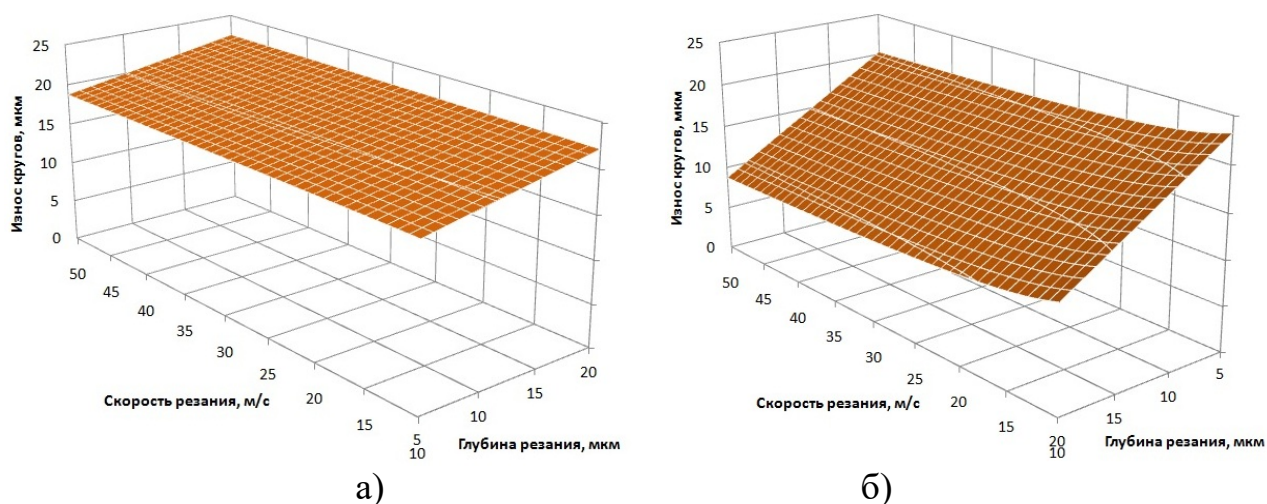


Рисунок 4.17 – Влияние режимов резания на радиальный износ кругов при шлифовании кругами из электрокорунда (а) и карбида кремния (б)

Удельная производительность $q = Q_M / Q_A$ оценивает процесс взаимодействия круга с покрытием с двух позиций: с одной стороны - это сьем материала, а с другой – износ инструмента.

Исследования показали (таблица П10), что с ростом скоростей резания удельная производительность при обработке кругом из электрокорунда снижалась от 8,3 до 6,1 мм³/мм³, а при шлифовании инструментом из карбида кремния, наоборот, возрастала от 31,6 до 35,6 мм³/мм³.

Отмеченную закономерность можно объяснить результатами микрорезания. Так, электрокорундовый круг на малой (10 м/с) скорости работал в режиме затупления с образованием площадок износа (рисунок 4.6, а), а с ростом скорости переходил к комбинированному режиму с объемным разрушением зёрен и интенсивным засаливанием (рисунок 4.7,а), вследствие чего возрастал его износ и удельная производительность снижалась.

Карбидкремниевый круг как на малой (рисунок 4.6, б), так и на большой (рисунок 4.7,б) скорости работал в комбинированном режиме с поверхностным микроскалыванием зёрен и формированием небольших адгезионных налипов. По этой причине обеспечивался умеренный износ кругов, хорошая самозатачиваемость и удельная производительность возрастала, что подтверждает выдвинутую гипотезу о повышении режущих свойств кругов при их работе в комбинированном режиме с микроскалыванием зёрен.

Присутствие вида изнашивания АЗ – поверхностное микроскалывание или объемное разрушение – определяется величиной радиальной силы P_{y_0} , действующей на единичное зерно и касательными напряжениями τ . При шлифовании покрытия кругом из 24А на его единичных зернах развиваются большие силы P_{y_0} , по сравнению с инструментом из 64С (рисунок 4.18) на всём установленном диапазоне скоростей резания.

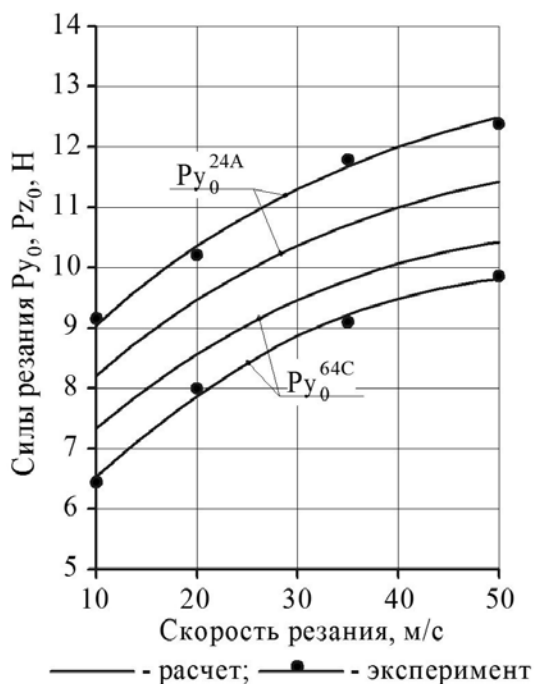


Рисунок 4.18 – Зависимость силы P_{y_0} от скорости резания при шлифовании кругами из 24А и 64С

Большие значения силы P_{y_0} , в свою очередь, вызывают увеличение касательных напряжений τ , возникающих в абразивных зернах из 24А (рисунок 4.19), а, значит и интенсивность их объёмного разрушения. Это хорошо согласуется с теоретическими предпосылками о том, что с увеличением скорости сила резания P_{y_0} , действующая на единичное зерно (рисунок 2.6) и касательные напряжения τ (рисунок 2.7) будут возрастать.

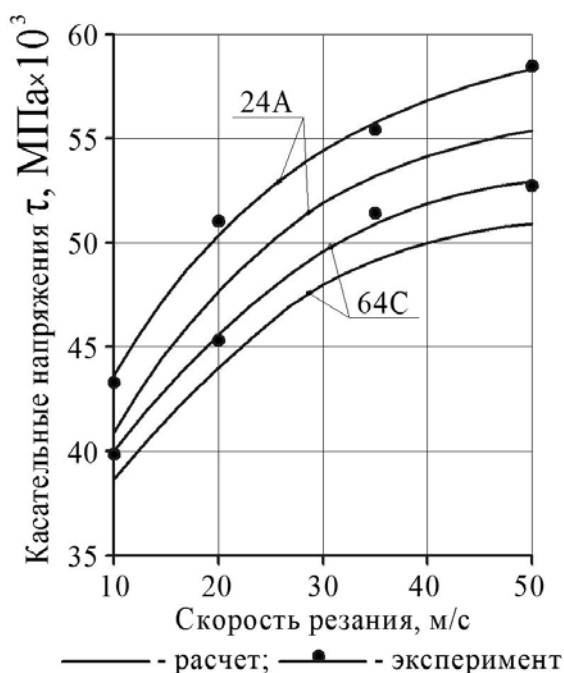


Рисунок 4.19 – Зависимость касательных напряжений, возникающих в абразивных зернах из 24А и 64С, от скорости резания

Каждая точка на экспериментальной кривой изменения P_{y_0} (рисунок 4.18) получена расчетом по формуле (2.5), где фактическая сила резания P_y принималась средней за периоды стойкости кругов по табл. П10. Сравнение расчетных, выполненных по формуле (2.3), с экспериментально измеренными усилиями P_y (табл. П10) при шлифовании покрытия кругами из 24А и 64С на разных скоростях резания показывают среднюю сходимость результатов в пределах 15 %.

Проведенные исследования показали (таблица П11), что с ростом глубины резания удельная производительность при обработке кругом из электрокорунда снижалась с 7,6 до 5,0 мм³/мм³, а при шлифовании инструментом из карбида кремния, наоборот, возрастала с 31,1 до 46,3 мм³/мм³.

Выявленную закономерность также можно объяснить опираясь на результаты микрорезания. Так, электрокорундовый круг на малой (5 мкм) глубине работал в комбинированном режиме с объемным разрушением зёрен и образованием площадок износа (рисунок 4.9,а); с ростом глубины площадки износа ещё более увеличивались, а интенсивность засаливания усиливалась (рисунок 4.10, а), вследствие чего режущая способность этого инструмента снижалась.

Карбидкремниевый круг как на малой (рисунок 4.9, б), так и на большой (рисунок 4.10,б) глубине работал в комбинированном режиме с поверхностным микроскалыванием зерен и формированием небольших адгезионных налипов, вследствие чего самозатачивание и работоспособность этого круга возрастали, что также подтверждает выдвинутую гипотезу о повышении эксплуатационных свойств кругов при их работе в комбинированном режиме с микроскалыванием зерён.

Отмеченный характер износа АИ также можно объяснить величиной радиальной силы P_{y_0} , действующей на единичное зерно. Шлифование покрытия на выбранных глубинах кругом из 24А сопровождалось большими силами P_{y_0} по сравнению с инструментом из 64С (рисунок 4.20).

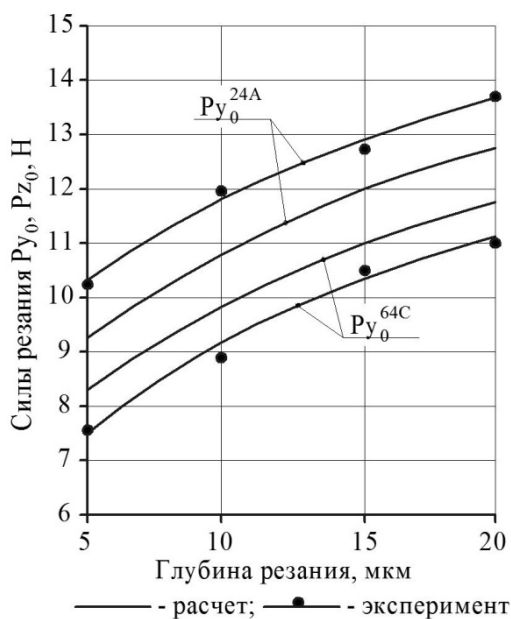


Рисунок 4.20 – Зависимость силы P_{y0} от глубины резания при шлифовании кругами из 24А и 64С.

Большие силы P_{y0} , развиваемые на зернах из 24А вызывали рост касательных напряжений τ (рисунок 4.21) и, следовательно, интенсивность объёмного разрушения зёрен.

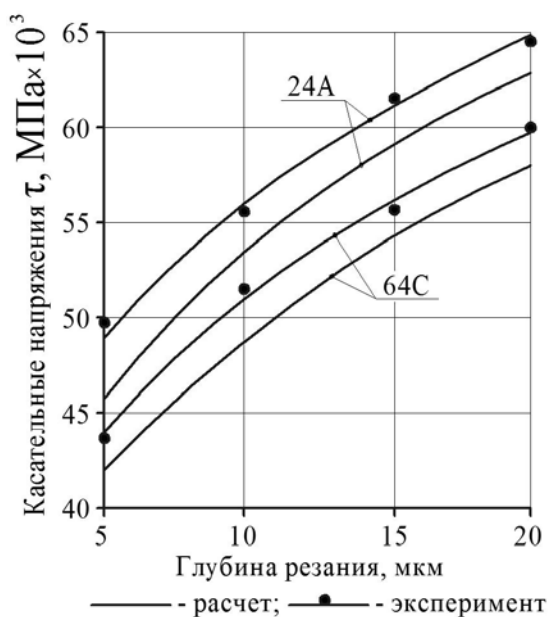


Рисунок 4.21 – Зависимость касательных напряжений, возникающих в абразивных зернах из 24А и 64С, от глубины резания

Коэффициент режущей способности кругов K_p также может служить для сравнительной оценки эксплуатационных характеристик АИ [56]. На рисунке 4.22 показаны графики изменения значений K_p в зависимости от скорости и глубины резания. Видно, что при обработке покрытия кругом из 64С достигались большие значения K_p по сравнению с инструментом из 24А. При этом характер зависимостей K_p от скорости и глубины резания для обоих типов кругов идентичен. Различия в режущей способности кругов из 24А и 64С следует

объяснить разной износостойкостью абразивов и степенью их адгезионно-химического взаимодействия с покрытиями.

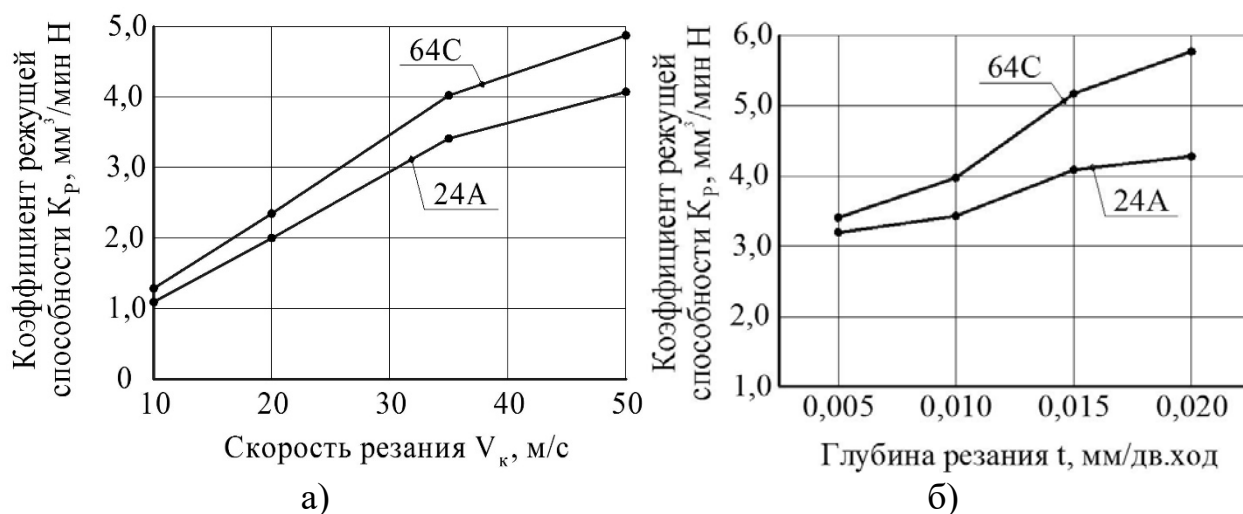


Рисунок 4.22 – Зависимость коэффициента режущей способности кругов из 24А и 64С от скорости (а) и глубины (б) при круглом продольном шлифовании покрытия.

Из рисунка 4.22 также следует, что с увеличением скорости и глубины резания величина K_p для обоих исследуемых инструментов повышается, что объясняется, в отношении скорости, разупрочнением материала покрытий под действием возрастающих температур, а в отношении глубины, увеличением толщины среза единичным зерном (таблица 2.2) и соответственно возрастанием объема снятого материала.

При малой скорости и глубине шлифования, когда температурное воздействие и химические реакции, а также нагрузки на АЗ ослаблены, различие в коэффициентах режущей способности кругов из 24А и 64С менее существенно (рисунок 4.22).

Удельная мощность шлифования $N_{yд}$ оценивает уровень энергетических затрат при обработке покрытий инструментом из 24А и 64С. Установлено, что при переходе от карбидкремниевому кругу к электрокорундовому энергозатраты возрастают в 1,3...1,4 раза.

Закономерности изменения удельной мощности шлифования в зависимости от скорости и глубины резания показаны на рисунке 4.23. Характер кривых свидетельствует о том, что при обработке покрытия величина $N_{yд}$ для обоих

исследованных кругов почти не зависит от скорости резания в установленном диапазоне (рисунок 4.23,а). С увеличением глубины резания величина $N_{уд}$ снижается (рисунок 4.23,б), что объясняется уменьшением затрат на трение за счёт увеличения толщины среза единичным зерном (таблица 2.2).

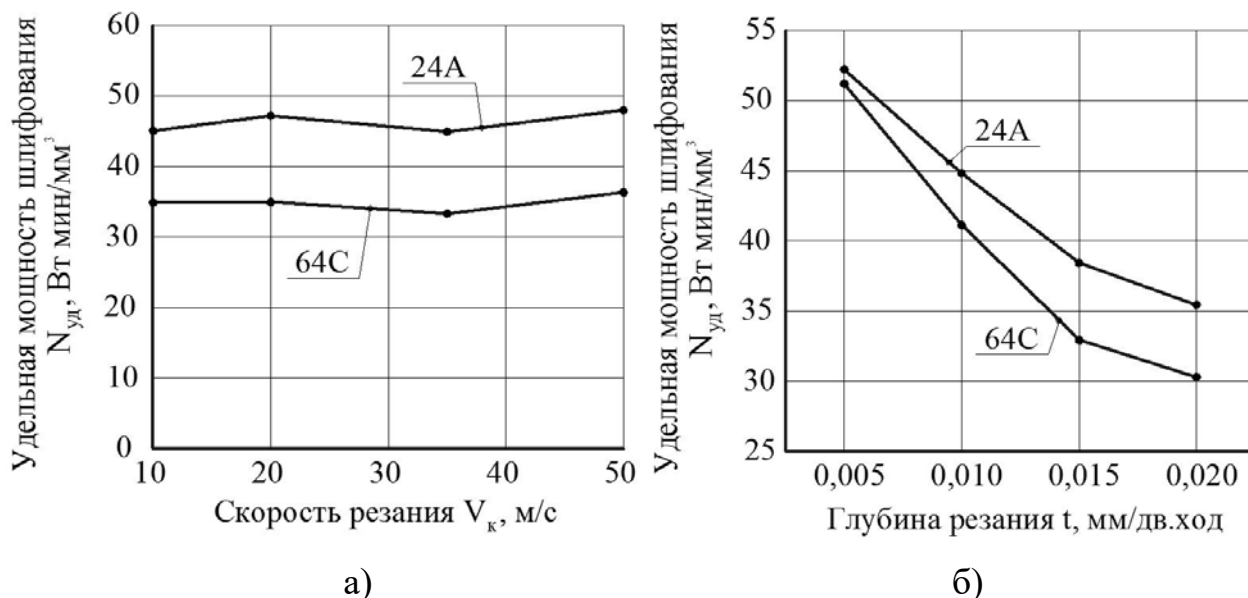


Рисунок 4.23 – Зависимость удельной мощности $N_{уд}$ от скорости (а) и глубины (б) резания при круглом продольном шлифовании покрытия кругами из 24А и 64С.

Известно, что в соответствии с техническими требованиями шероховатость шеек коленчатых валов должна соответствовать по критерию $Ra = 0,16...0,32$ мкм. Высота микронеровностей обработанных поверхностей сравнительно мало зависела от скорости и глубины резания на выбранных пределах их варьирования (таблицы П10 и П11). Так, с увеличением скорости величины Ra снижались для круга из 24А от 0,39 до 0,15 мкм, а для инструмента из 64С от 0,45 до 0,22 мкм. При увеличении глубины, наоборот, значения Ra незначительно возрастали и не превышали для кругов из 24А и 64С 0,21 и 0,31 мкм соответственно. Установленные закономерности изменения высоты микронеровностей от скорости и глубины резания хорошо согласуются с результатами исследований других авторов [49-51].

В соответствии с техническими требованиями овальность и конусность шеек коленчатого вала при ремонте и восстановлении не должна превышать 0,02 мм. Из таблиц П10 и П11 следует, что с учётом постоянной погрешности системы

СПИД, точность геометрической формы (овальность и конусность) обработанных образцов во всех опытах с кругами из 24А и 64С на разных скоростях и глубинах резания соответствует техническим требованиям: для обоих кругов она не превышала 0,008 мм.

Достигнутые высокие показатели по шероховатости и точности геометрической формы можно объяснить комбинированным режимом работы кругов из 24А и 64С: для первого круга с объёмным разрушением зёрен, а для второго – с их микроскалыванием.

Можно ожидать, что столь низкие значения высоты микронеровностей и высокая точность геометрической формы обработанных образцов обеспечат снижение износа сопрягаемых поверхностей, а особенно в период приработки, что также подтверждает гипотезу о повышении эксплуатационных возможностей восстановленных валов при обеспечении комбинированного (частичного самозатачивания) режима работы ШК.

Таким образом проведённый анализ эксплуатационных свойств кругов из 64С и 24А и качества обработанных поверхностей плазменно-напылённых валов при продольном шлифовании на разных скоростях и глубинах резания позволяет сделать заключение о том, что в рассмотренных условиях обработки ШК из карбида кремния зеленого по совокупности принятых показателей значительно превосходят инструмент из электрокорунда белого.

4.5 Исследование работоспособности кругов и качества поверхностей плазменно-напылённых валов при продольном и врезном шлифовании инструментом из разных абразивов

Сравнивалась эффективность шлифования кругами, представленными в п. 3.3. Усредненные результаты продольного и врезного шлифования покрытия и стали 45 на скорости 35 м/с по выбранным критериям [146, 147] показаны в таблицах П12 и П13, а некоторые типичные зависимости на рисунках.

Стойкость в количестве снятого материала Q_m у кругов из СТМ на обоих схемах шлифования значительно выше, чем у кругов из электрокорундов и карбидов кремния (рисунок 4.24). По этому критерию преимущество имел круг из

алмаза АС4. Инструмент из эльбора ЛКВ40 также показал высокую стойкость, однако величина Q_M для этого круга оказалась менее значительной, чем у круга из АС4 [146].

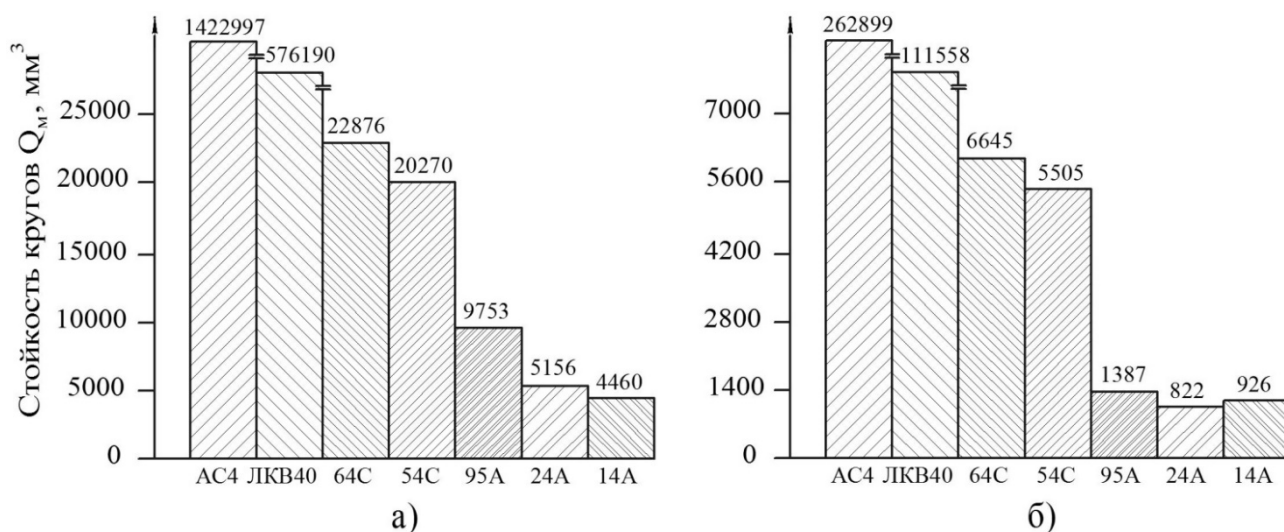


Рисунок 4.24 – Сравнительная стойкость различных кругов при продольном (а) и врезном (б) шлифовании покрытия.

Сравнение стойкости кругов из электрокорундов и карбидов кремния при продольном и врезном шлифовании покрытия привело к заключению, что по этому показателю преимущество имели инструменты из SiC - их стойкость была в 2...8 раз больше [146].

Сверхтвердые материалы, благодаря высокой микротвердости и инертности к покрытию, обеспечивают при шлифовании кругами из эльбора и алмаза повышенную удельную производительность q на обеих принятых схемах шлифования по сравнению с кругами из электрокорунда и карбида кремния (рисунок 4.25). Так, например, значения q достигнутые кругом из АС4 превосходили величины q , полученные для круга из 24А при продольном шлифовании покрытия в 223 раза.

По достигаемым значениям q электрокорундовые и карбидкремниевые круги проявили себя по-разному (рисунок 4.25): в случае использования инструментов из карбида кремния при продольном и врезном шлифовании покрытия удельная производительность оказалась в 2,7...6,8 раза больше по сравнению с кругами из электрокорундов [146].

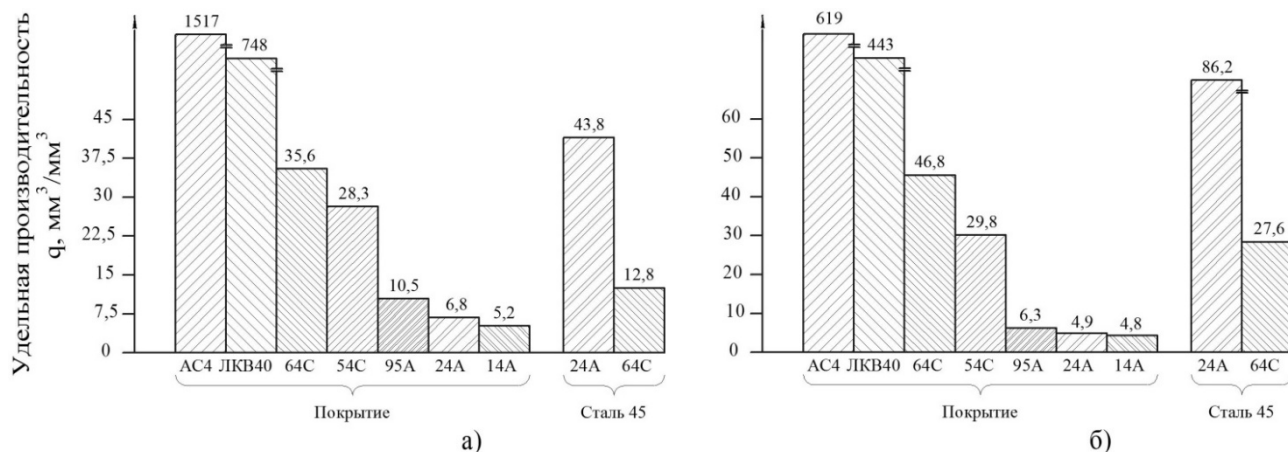


Рисунок 4.25 – Влияние вида абразивного материала на удельную производительность при продольном (а) и врезном (б) шлифовании покрытия и стали 45.

При продольном и врезном шлифовании стали 45 кругом из 24А удельная производительность составляла 43,8 и 86,2 $\text{мм}^3/\text{мм}^3$ соответственно (рисунок 4.25), а при обработке этой стали кругом из 64С – 12,8 и 27,6 $\text{мм}^3/\text{мм}^3$. Достигнутые значения q для кругов из 24А и 64С при шлифовании стали 45 хорошо согласуются с результатами экспериментов по микрорезанию (см. п. 4.1), а также с исследованиями других авторов [57, 71].

Была исследована динамика процесса шлифования покрытия кругами из разного абразива [147]. Закономерности изменения составляющих P_y и P_z силы резания в зависимости от времени шлифования представлены на рисунке 4.26. Видно, что при шлифовании кругом из 24А силы P_y и P_z характеризовались значительным ростом (более чем в пять раз); при обработке инструментом из 64С возрастали незначительно (не более чем в два раза) и оставались стабильно низкими при использовании алмазного круга.

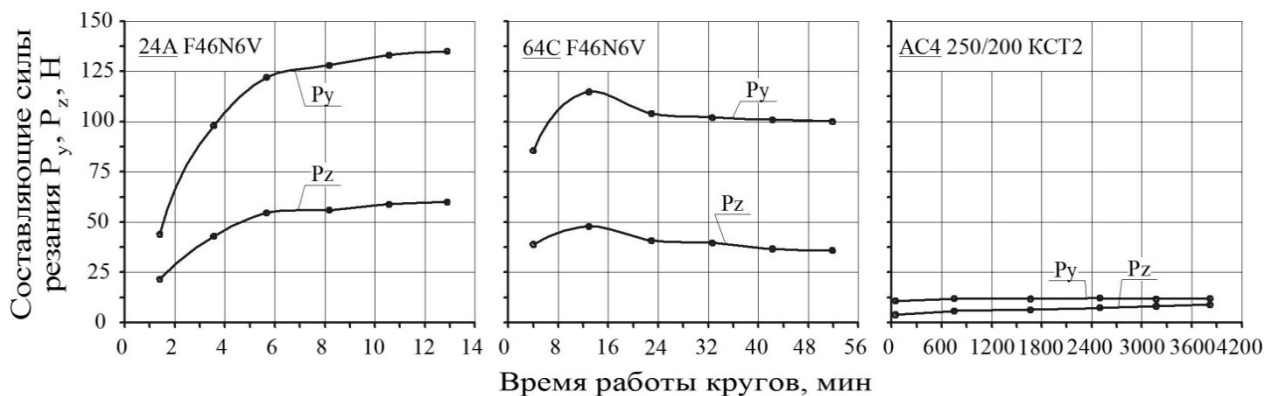


Рисунок 4.26 – Характер изменения составляющих P_y и P_z силы резания при продольном шлифовании покрытия кругами в зависимости от времени их работы.

Интенсивный рост сил в начальный период шлифования кругами из 24А и 64С вызван образованием адгезионных налипков на поверхности «затупившихся» зерен. С процессом налипания конкурирует процесс самозатачивания – разрушения зерен. Адгезионные налипсы формируются особенно интенсивно во второй период работы, когда глубина резания несколько стабилизируется. В этот период рост сил P_y и P_z происходит за счет «затупления» и, главным образом, за счет налипания частиц покрытия на поверхность круга. Налипание прогрессирует до тех пор, пока не возникнут вибрации станка, вызывающие вырывание целых зерен из круга и неравномерность его разрушения [147].

На рис. 4.27 показаны профилограммы режущей поверхности острого круга в начальный период шлифования и в период, когда инструмент уже «затуплен». Из приведенных профилограмм видно, что в процессе «затупления» круга на его режущей поверхности появляются вырывы зерен (указаны стрелками) на глубину до 0,2...0,5 мм.

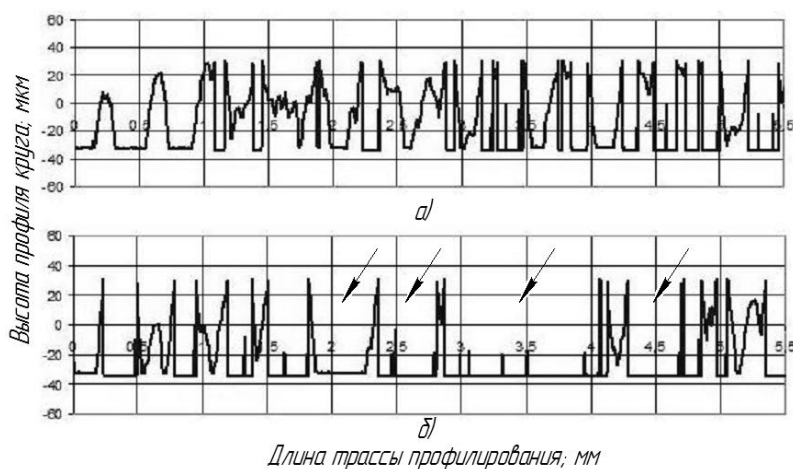
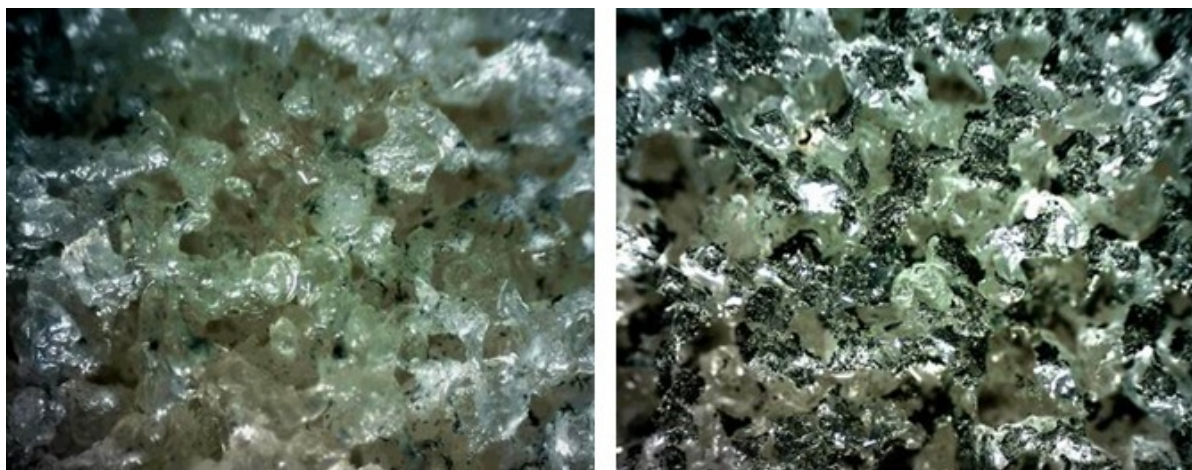


Рисунок 4.27 – Профилограммы режущей поверхности: а – острого круга (после правки); б – после 10 – ти минутного шлифования

Налипшие частицы покрытия хорошо просматриваются под микроскопом. На рисунке 4.28 представлены микрофотографии рабочей поверхности круга после правки и в конце периода его стойкости. Видно (рисунок 4.28,б), что с потерей режущей способности круга его рабочая поверхность покрыта адгезионными налипками (указаны стрелками), размазанными в направлении вектора скорости резания.

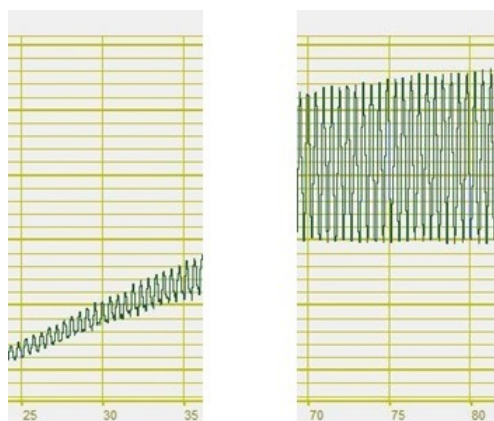


а)

б)

Рисунок 4.28 – Микрофотографии участка рабочей поверхности круга 24AF46N6V после правки (а) и в конце его стойкости (б). Увеличение $60\times$.

По мере «затупления» кругов в связи с локальным разрушением их режущей поверхности нарушается геометрия окружности инструмента, возникают вибрации и так называемая «рубка» покрытия. Приведенные на рисунке 4.29 фрагменты осциллограмм с записью сил, полученных при шлифовании кругом после его правки и после «затупления», свидетельствуют о характере изменения сил и вибраций в разные периоды работы инструмента.



а)

б)

Рисунок 4.29 – Фрагменты осциллограмм с записью силы P_y при шлифовании: а – острым кругом; б – кругом, проработавшим 10 мин.

Анализ размеров осколков зерен, собранных на второй и десятой минутах работы круга, подтверждает описанные изменения режущей поверхности инструментов. В начальный период обработки при самозатачивании круга происходит разрушение зерен на мелкие осколки; по мере «затупления» инструмента зерна разрушаются с образованием осколков больших размеров, близких к размерам исходных зерен (рисунок 4.30, показано стрелкой).

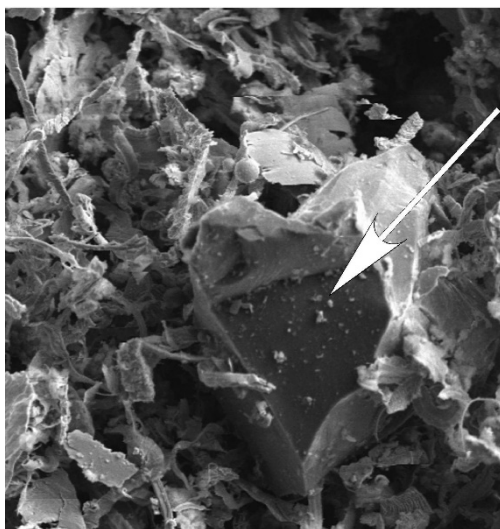


Рисунок 4.30 – Абразивное зерно в шлифовальном шлеме.

В табл. 4.3 приведены значения силы резания $P = \sqrt{P_y^2 + P_z^2}$ в период шлифования без вибраций и время T до возникновения «рубки» покрытия для ШК из разных абразивных материалов.

Таблица 4.3 – Силы резания и время шлифования без вибраций для кругов из разных абразивных материалов

Характеристика кругов	Показатели шлифования		
	Сила резания P , Н	Время шлифования без вибраций T , мин	Интенсивность засаливания кругов C_3 , г/см ² ·мин
24AF46N6V	121	13,9	$4,8 \cdot 10^{-3}$
14AF46N6V	130	13,1	$5,7 \cdot 10^{-3}$
95AF46N6V	131	25,6	$3,1 \cdot 10^{-3}$
64CF46N6V	110	56,1	$0,46 \cdot 10^{-3}$
54CF46N6V	112	50,0	$0,66 \cdot 10^{-3}$
ЛКВ40 250/200КСТ2	40	1507	$0,22 \cdot 10^{-3}$
АС4 250/200КСТ2	13	3824	$0,021 \cdot 10^{-3}$

Из таблицы видно, что при обработке покрытия силы резания, возникающие при использовании кругов из Al_2O_3 в 1,1...1,2 раза больше, а время шлифования без вибраций (стойкость кругов) в 2...4 раза меньше по сравнению с кругами из SiC. С увеличением сил шлифования в зоне резания развиваются высокие температуры и возрастает интенсивность засаливания АИ. Интенсивность засаливания электрокорундовых инструментов в 5...12 раз выше по сравнению с карбидкремниевыми кругами (таблица 4.3).

Рост силовой напряжённости процесса шлифования микропористого материала, как показали исследования [46], вызывает уплотнение тонкого поверхностного слоя покрытия и уменьшает его пористость, вследствие чего

ухудшаются условия смазки в сопряжении «шейка вала - подшипник скольжения». Следовательно, при шлифовании кругами из 64С можно ожидать понижения степени уплотнения поверхностного слоя, а значит гипотеза о повышении эксплуатационных возможностей восстановленных валов при обеспечении комбинированного режима работы кругов с микроскалыванием зёрен также подтверждается.

Наиболее предпочтительными с точки зрения динамики шлифования являются круги из сверхтвёрдых материалов и прежде всего круги из алмаза. Так, период времени работы без вибраций у круга из АС4 оказался более чем в 2 раза выше по сравнению с кругом из ЛКВ40 и в десятки, а в некоторых случаях и в сотни раз больше, чем у кругов из электрокорундов и карбидов кремния (таблица 4.3). Силы резания, возникающие при шлифовании инструментом из алмаза были в 2...3 раза меньше, чем у кругов из эльбора и в 4...10 раз ниже по сравнению с инструментом из электрокорундов и карбидов кремния. Интенсивность засаливания круга из АС4 ничтожно мала вследствие его повышенной инертности по отношению к покрытию.

Изменение коэффициента шлифования в процессе работы АИ представлено на рисунке 4.31. Круги из 24А и 64С при обработке покрытия работают в режиме затупления и комбинированном режиме соответственно. Коэффициент шлифования по мере затупления этих кругов снижается.

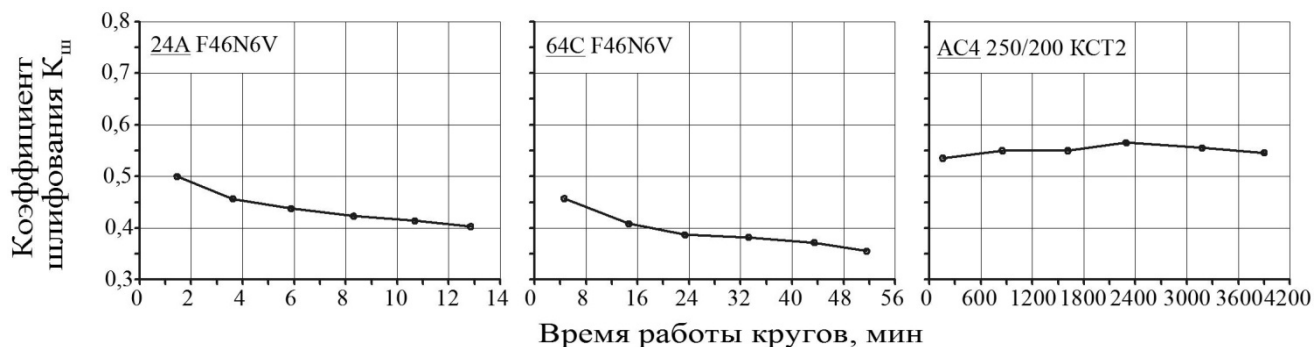


Рисунок 4.31 – Изменение коэффициента шлифования при обработке покрытия.

Алмазный круг по сравнению с инструментами из электрокорунда и карбида кремния изнашивается меньше, его режущие кромки острее, стойкость выше. Этот круг в течение первых 10...15 мин почти не затупляется. Такая

стабильная работа круга из АС4 наглядно отражается постоянством коэффициента шлифования. Можно считать, что величина $K_{ш}$ в процессе работы алмазного круга практически не изменяется.

Установлено, что при продольном и врезном шлифовании покрытия по достигаемым величинам коэффициента режущей способности K_p инструмент из алмаза превосходил круг из эльбора в 2,3...3,0 раза (рисунок 4.32) и на порядок круги из электрокорундов и карбидов кремния.

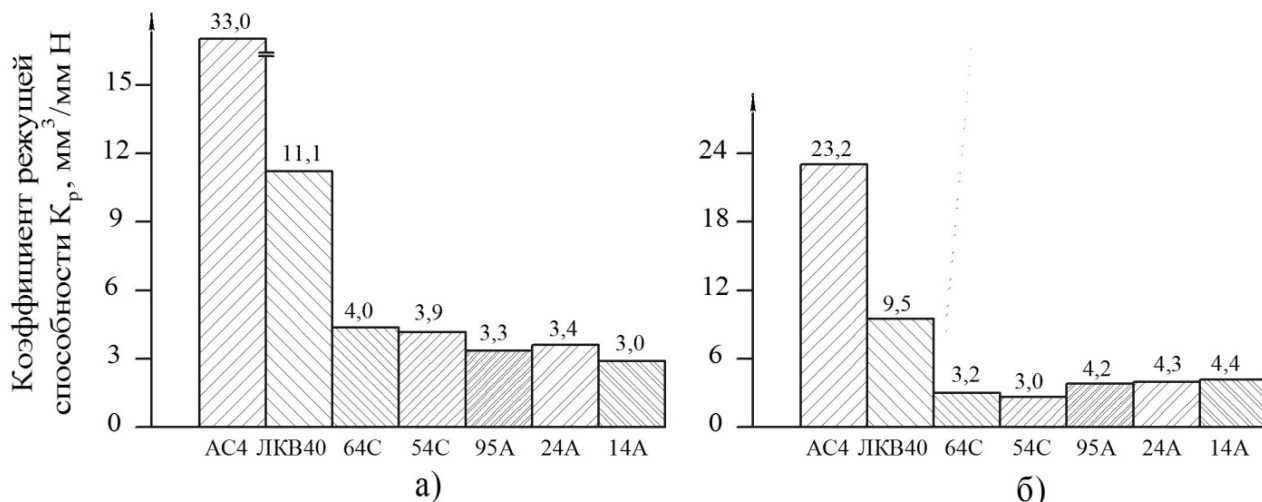


Рисунок 4.32 – Влияние вида абразивного материала на коэффициент режущей способности кругов при продольном (а) и врезном (б) шлифовании плазменно-напылённых валов на скорости 35 м/с.

Сравнивая электрокорундовые и карбидкремниевые круги между собой следует отметить, что при продольном шлифовании покрытия инструмент из карбидов кремния по достигаемым значениям K_p в 1,2...1,3 раза превосходил круги из электрокорундов. При врезном шлифовании, наоборот, более высокие значения K_p достигались в случае использования кругов из электрокорундов – их коэффициент K_p был в 1,3...1,5 раза выше по сравнению с карбидкремниевым инструментом.

Диаграммы на рисунке 4.33 свидетельствуют о различном влиянии вида абразивных материалов на уровень энергетических затрат. Исследование показало, что круглое продольное и врезное шлифование покрытия кругами из СТМ характеризуется значительно меньшими энергозатратами по сравнению с инструментами из электрокорундов и карбидов кремния. Так, например, при продольном шлифовании алмазным кругом достигаемые значения $N_{уд}$ оказались

7...10 раз меньше по сравнению с электрокорундовыми инструментами. Отмеченная закономерность, по-видимому, обуславливается более высокой инертностью алмаза по отношению к покрытию и его более высокой прочностью по сравнению с электрокорундом и карбидом кремния.

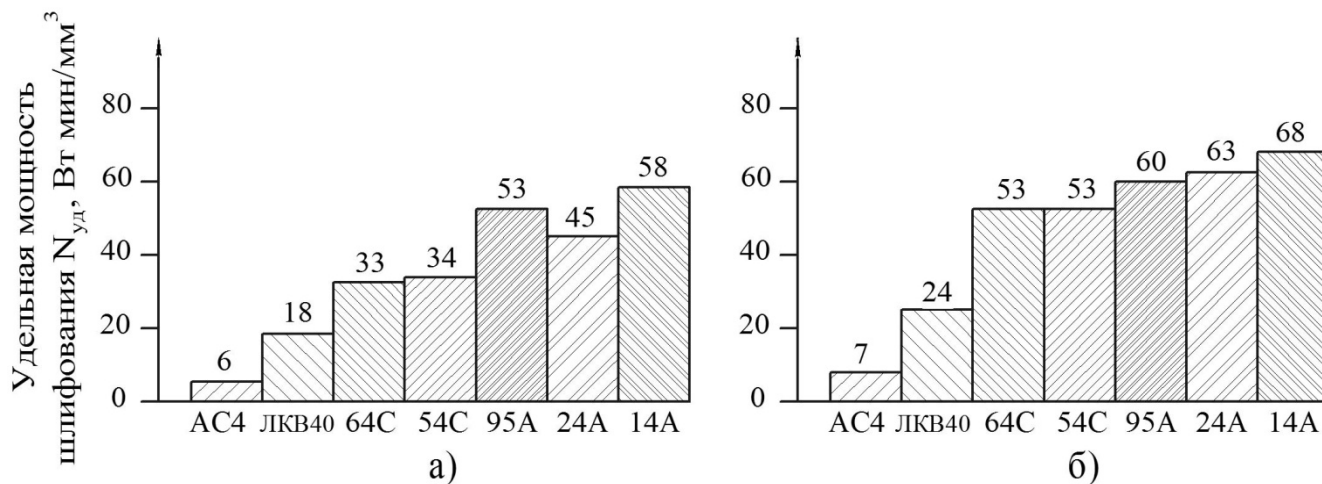


Рисунок 4.33 – Влияние вида абразивного материала на удельную мощность при продольном (а) и врезном (б) шлифовании плазменно-напылённых валов на скорости 35 м/с.

Из совместного анализа энергозатрат для кругов из Al_2O_3 и SiC следует, что при продольном и врезном шлифовании покрытия круги из карбида кремния обеспечивают меньшие (на 50...70 %) величины $N_{уд}$ по сравнению с электрокорундовыми инструментами. Отмеченное различие, по-видимому, обуславливается меньшими значениями сил резания, достигаемыми при шлифовании кругами из SiC по сравнению с кругами из Al_2O_3 (таблица 4.3).

Влияние вида абразивного материала на шероховатость поверхности при продольном и врезном шлифовании покрытия показано на рисунке 4.34. Видно, что максимальная высота микронеровностей на выбранных схемах шлифования была получена кругом из алмаза АС4, несколько меньшая шероховатость достигалась инструментом из эльбора ЛКВ40 и минимальная – кругами из электрокорундов и карбидов кремния.

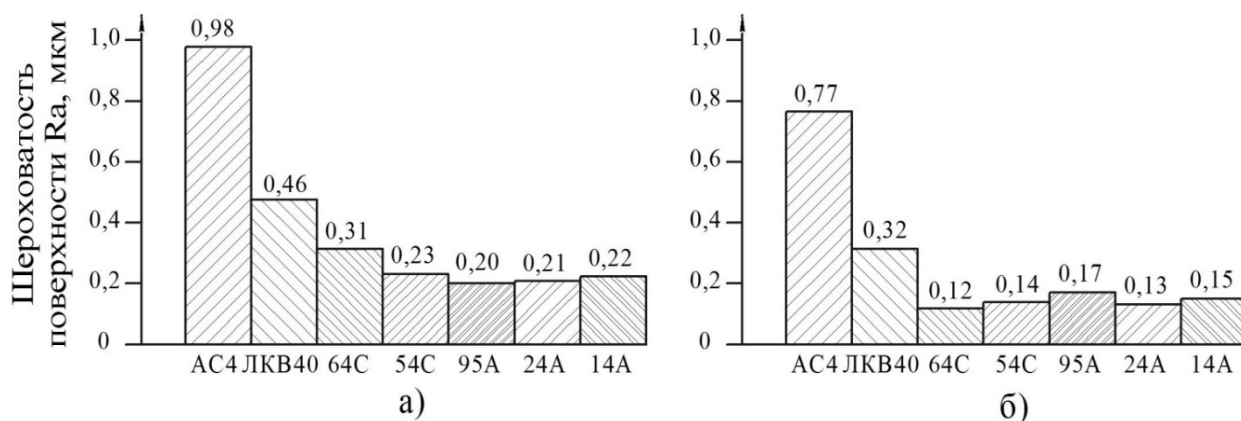


Рисунок 4.34 – Влияние вида абразивного материала на шероховатость поверхности при продольном (а) и врезном (б) шлифовании плазменно-напылённых валов на скорости 35 м/с.

Достижимые значения высоты микронеровностей при обработке кругами из СТМ в 1,5...3 раза превышают технические требования к шероховатости шеек коленчатых валов при их ремонте и восстановлении, что вызывает введения дополнительной операции чистового шлифования.

Шероховатость поверхностей, обработанных инструментом из 24А и 64С соответствуют этим техническим требованиям, исключая при этом необходимость дополнительного чистового шлифования.

Такие результаты объясняются тем, что ШК из сверхтвёрдых материалов характеризуются низким самозатачиванием, а обработка инструментом из Al_2O_3 и SiC сопровождается интенсивным микроразрушением зерен (микроскалывание или объёмное разрушение), что приводит к обработке кругом как бы с меньшей зернистостью. Это ещё раз подтверждает выдвинутую гипотезу о возрастании эксплуатационных возможностей шлифовальных кругов при обеспечении комбинированного (смешанного) режима их работы.

Из таблиц П12 и П13 следует, что точность геометрической формы (овальность и конусность) обработанных образцов для всех испытанных кругов на обоих схемах шлифования соответствует техническим требованиям: при продольном шлифовании она не превышала 0,009 мм, а при врезном – 0,006 мм.

Низкие значения шероховатости при шлифовании покрытия кругами из 24А и 64С в совокупности с достигаемой высокой точностью геометрической формы образцов могут обеспечить рост послевосстановительного ресурса плазменно-

напыленных деталей. Это также подтверждает гипотезу о повышении эксплуатационных возможностей восстановленных валов при обеспечении комбинированного (смешанного) режима работы АИ с микроскалыванием режущих зёрен и удалением с их поверхности налипших частиц покрытия.

Таким образом проведённый анализ эксплуатационных свойств кругов из разного абразивного материала и качества обработанных поверхностей плазменно-напылённых валов при продольном и врезном шлифовании позволяет вывести заключение о том, что ШК из сверхтвёрдых материалов по совокупности принятых показателей обработки значительно превосходят инструменты из других абразивных материалов – электрокорундов и карбидов кремния. Следовательно, основными абразивами для размерной обработки микропористых покрытий на железной основе на рассмотренных схемах шлифования следует рекомендовать эльбор поликристаллический и алмаз синтетический.

4.6 Исследование влияния среды на работоспособность кругов и качество поверхностей плазменно-напылённых валов при шлифовании абразивным инструментом

Сравнивалась технологическая эффективность различных СОТС (составы №1-№6), представленных в п. 3.10. Результаты испытаний [148, 149] этих технологических средств на первом этапе показаны в таблице 4.4.

Видно, что при обработке покрытия всухую (состав №1) кругами из 24А и 64С достигались минимальные периоды их стойкости, что объясняется существующей картиной протекания износа этих инструментов и, в частности, образованием шапкообразных налипов на режущих зёрнах..

При обработке всухую кругами из 24А и 64С наблюдается наибольшая интенсивность их засаливания (таблица 4.4). Однако при этом значение C_3 для круга из 64С почти в 10 раз меньше по сравнению с кругом из 24А, что хорошо согласуется с результатами микрорезания (см. п. 4.1) и объясняется хорошей самозатачиваемостью первого и более высокой адгезионно-химической активностью второго круга. Высокая интенсивность засаливания круга из 24А при

шлифовании всухую вызывает наибольшие энергозатраты и минимальные значения q и K_p .

Применение состава №1 при обработке покрытия кругами из 24А и 64С позволяет получить малые значения шероховатости Ra. Низкая шероховатость при шлифовании всухую объясняется интенсивными адгезионными процессами. Абразивные зерна с налипшим металлом начинают выступать в роли «микророликов», деформируя и выглаживая обработанную поверхность, что в свою очередь вызывает возрастание времени выхаживания. Чем выше интенсивность засаливания ШК, тем продолжительнее время выхаживания и ниже шероховатость поверхности.

При обработке покрытия кругами из 24А и 64С с использованием водопроводной воды (состав №2) интенсивность засаливания этих инструментов снизилась соответственно на 18 и 15 % (таблица 4.4) по сравнению со шлифованием всухую. В частности, на зернах карбида кремния шапкообразные налипы, характерные при шлифовании всухую, не обнаружены, на электрокорундовых зернах налипы стали настолько тонкими, что сквозь пленку металла хорошо просматривается рельеф площадки износа. Очевидно, действие воды заключается в механическом удалении образовавшегося налива.

Таблица 4.4 – Усредненные показатели продольного шлифования плазменных покрытий с использованием различных СОЖ на первом этапе исследований

Составы СОЖ	$T, \text{ мин}$	Объём- ный съём металла $Q_m, \text{ мм}^3$	Объём- ный износ круга $Q_a, \text{ мм}^3$	Удельная производи- тельность $q,$ $\text{мм}^3/\text{мм}^3$	Танген- циальная сила резания $P_z, \text{ Н}$	Радиаль- ная сила резания $P_y, \text{ Н}$	Режущая способность кругов $K_p, \frac{\text{мм}^3}{\text{мин} \cdot \text{Н}}$	Удельная мощность шлифования $N_{уд}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{мин}}{\text{мм}^3}$	Шерохо- ватость $Ra, \text{ мкм}$	Степень засалива- ния кругов $C_z,$ $\text{мг}/\text{см}^2$
<i>Результаты, полученные при шлифовании покрытия кругом 24AF46N6V</i>										
№1	9,3	3464	678	5,1	62	132	2,8	57,6	0,24	$6,7 \cdot 10^{-3}$
№2	11	4201	771	5,3	54	117	3,2	49,6	0,25	$5,7 \cdot 10^{-3}$
№3	11,9	4112	812	5,5	54	118	3,4	42,8	0,25	$5,3 \cdot 10^{-3}$
№4	7,4	2182	432	5,8	28	115	2,6	31,8	0,31	$5,1 \cdot 10^{-3}$
№5	16	5839	840	6,9	55	111	3,2	51,5	0,24	$4,3 \cdot 10^{-3}$
№6	14	5156	761	7,2	49	112	3,3	45,5	0,21	$4,9 \cdot 10^{-3}$
<i>Результаты, полученные при шлифовании покрытия кругом 64CF46N6V</i>										
№1	36	13067	404	30,4	56	116	3,1	52,6	0,24	$0,61 \cdot 10^{-3}$
№2	47	17398	468	37,4	51	112	3,3	46,8	0,30	$0,53 \cdot 10^{-3}$
№3	48	16880	540	41,4	51	109	3,2	49,9	0,35	$0,51 \cdot 10^{-3}$
№4	50	17492	283	62,0	30	112	3,2	28,9	0,39	$0,49 \cdot 10^{-3}$
№5	59	21109	695	32,4	49	111	3,2	47,1	0,31	$0,47 \cdot 10^{-3}$
№6	56	22876	646	35,6	40	103	4,0	33,5	0,31	$0,46 \cdot 10^{-3}$

Обработка кругом из 24А при охлаждении водопроводной водой повышает период его стойкости и удельную производительность в 1,2 и 1,1 раза. Применение состава №2 характеризуется меньшими силовой напряженностью и энергозатратами по сравнению с обработкой всухую (таблица 4.4).

Уменьшение интенсивности засаливания кругов, повышение периода их стойкости и удельной производительности свидетельствуют об улучшении обрабатываемости покрытия при охлаждении водой по сравнению со шлифованием всухую.

Добавление в водопроводную воду присадки K_3PO_4 (состав №3) значительно увеличивает ее противoadгезионную способность. Эта присадка, вступая во взаимодействие с ювенильными поверхностями покрытия, образует в зоне резания изолирующую пленку. Образовавшаяся пленка уменьшает возможность непосредственного контакта абразивного материала с обрабатываемым покрытием, вследствие чего повышается период стойкости кругов и уменьшается их износ, что подтверждается ростом удельной производительности. Так, например, при шлифовании кругом из 24А с использованием состава №3 достигалось значение $q = 5,5 \text{ мм}^3/\text{мм}^3$ против $q = 5,3 \text{ мм}^3/\text{мм}^3$, полученного при обработке с использованием водопроводной воды. Применение состава №3 обеспечивает также снижение энергозатрат на шлифование и рост значений K_p (таблица 4.4). Это подтверждает теоретические предпосылки о том, что добавление в состав СОЖ фосфорноорганических присадок повышает её вязкость и смачивающее действие.

При использовании масляной СОЖ (состав №4) шлифование покрытия кругами из 24А и 64С осуществляется с наименьшими энергозатратами и силовой напряженностью. Однако эти результаты получены при существенно меньших периодах стойкости, что, по нашему мнению, объясняется недостаточным вымыванием стружки и выкрошившихся абразивных частиц с поверхности заготовки и инструмента, вследствие чего происходит засаливание последнего и потеря его режущей способности. При подаче в зону шлифования масляной СОЖ была зафиксирована низкая интенсивность изнашивания АИ, о чем

свидетельствуют высокие значения q для кругов из 24А и 64С. Применение состава №4 характеризуется высоким значением параметра Ra и малой величиной K_p (таблица 4.4).

При использовании состава №4 проявились и его серьезные недостатки: в процессе шлифования вокруг рабочей зоны создавался масляный туман, который вреден для дыхательных путей и пожароопасен; наблюдалось также дымление масляной СОЖ.

Наилучшие результаты по технологической эффективности показали составы №5 и №6 [84]. При шлифовании покрытия с подачей в зону резания продуктов ПОА-2м и ЭПМ-1ш периоды стойкости кругов из 24А и 64С возрастали в 1,5 и 1,3 раза соответственно по сравнению с результатами в присутствии водопроводной воды (таблица 4.4).

Полученные данные показывают, что состав №5 по достигаемому периоду стойкости имеет некоторое преимущество перед составом №6. Эффект повышения стойкости круга при использовании продукта ПОА-2м можно объяснить локальным выпадением полимера из раствора в зоне обработки и образованием молекулярного защитного слоя между поверхностью круга и детали. Это подтверждает теоретические предпосылки о превращении твердых полимеров в зоне резания в дискретные плёнки под действием высоких температур и давлений, что также усиливает смазочное действие СОЖ.

Однако использование состава №6 обеспечивает меньшую интенсивность изнашивания абразивных кругов, о чем свидетельствуют большие значения удельной производительности (таблица 4.4). При оценке технологической эффективности по величине K_p также выявляется преимущество состава №6, что подтверждает теоретические предпосылки об эффективности присадок из эфиров жирных кислот, содержащих активные хлор и серу, и повышающих моющее действие эмульсионных СОЖ.

По параметру Ra и интенсивности засаливания кругов C_3 составы №5 и №6 обеспечивали близкие значения.

Очевидно для практических целей оценка СОЖ по одному критерию неприемлема, а по нескольким критериям одновременно затруднен выбор её рационального состава. Однако можно избежать затруднения, если использовать рейтинговый метод оценки результатов испытаний [75]. В таблице 4.5 представлены результаты оценки испытаний при ранжировании составов СОЖ по принятым в п. 3.1 критериям. Число баллов, характеризующее каждый критерий, равно единице для состава, имеющего по данному критерию наименьшую технологическую эффективность и максимальное значение для СОЖ, показавшей лучшие результаты.

Из таблицы 4.5 видно, что при шлифовании покрытия к наиболее эффективной СОЖ относится эмульсия из эмульсола ЭПМ-1ш (состав №6) – 25 и 22,5 баллов соответственно для кругов из 24А и 64С.

Таблица 4.5 – Рейтинговая оценка различных СОЖ при шлифовании плазменно-напылённых валов на первом этапе исследований.

Составы СОЖ	Число баллов, характеризующих критерии					Суммарное число баллов
	периода стойкости K_T	износа круга K_q	режущей способности круга K_{kp}	энергозатрат $K_{N,yo}$	качества K_{Ra}	
<i>Результаты, полученные при шлифовании кругом 24AF46N6V</i>						
№1	2	2	2	1	4,5	11,5
№2	3	4	3,5	3	2,5	16
№3	4	2	6	5	2,5	19,5
№4	1	2	1	6	1	11
№5	6	6	3,5	2	4,5	22
№6	5	5	5	4	6	25
<i>Результаты, полученные при шлифовании кругом 64CF46N6V</i>						
№1	1	1	1	1	6	10
№2	2	4	5	4	5	20
№3	3	5	3	2	2	15
№4	4	6	3	6	1	20
№5	6	2	3	3	3,5	17,5
№6	5	3	6	5	3,5	22,5

На втором этапе исследований на основе эмульсола «ЭПМ-1ш» были подготовлены и испытаны 3 % - е водные растворы следующих составов:

Состав №6 – эмульсол ЭПМ-1ш как базовая СОЖ для получения сравнительных показателей шлифования;

Состав №7 – «ЭПМ-1ш» (80 %) + присадка ML-RM20 (20 %);

Состав №8 – «ЭПМ-1ш» (80 %) + ML-5331 (20 %);

Состав №9 – «ЭПМ-1ш» (80 %) + ML-RM20 (18 %) + ПАВ неонол (2 %);

Состав №10 – «ЭПМ-1ш» (78 %) + ML-5331 (20 %) + ПАВ неонол (2 %);

Состав №11 – «ЭПМ-1ш» (66 %) + ML-RM20 (27 %)+ ML-5331 (3 %) + ПАВ неонол (4 %);

Состав №12 – «ЭПМ-1ш» (80 %) + ML-RM20 (18 %)+ ML-5331 (2 %)

Состав №13 – «ЭПМ-1ш» (70 %) + ML-RM20 (27 %)+ ML-5331 (3 %).

Результаты испытаний СОЖ на втором этапе исследований при круглом наружном продольном шлифовании покрытия представлены в таблице 4.6. Видно, что смазочно-охлаждающие жидкости с присадками (составы №7...13) оказались более эффективными, чем базовая СОЖ №6. Так, период стойкости абразивного круга в случае использования составов №7...13 составляет 19,3...38,4 мин против 18,8 мин, достигаемых при шлифовании с применением состава №6. Максимальные значения периода стойкости T были получены при использовании состава №12.

Таблица 4.6 – Усредненные показатели продольного шлифования покрытия с использованием различных СОЖ на втором этапе исследований.

Составы СОЖ	Показатели шлифования		
	Стойкость круга T , мин	Объем снятого материала за период стойкости Q_m , мм ³	Шероховатость Ra , мкм
№6	18,8	9060	0,46
№7	32,9	16070	0,32
№8	32,9	16066	0,50
№9	19,3	9659	0,46
№10	31,5	15735	0,47
№11	19,3	9420	0,45
№12	38,4	16891	0,41
№13	33,4	16689	0,36

Очевидным преимуществом СОЖ с присадками является значительно больший по сравнению с базовой СОЖ №6 объем снятого материала Q_m за период стойкости абразивного круга. Так, при шлифовании с применением СОЖ №7...13 достигаемые значения Q_m составляли 9420...16891 мм³, тогда как при использовании СОЖ №6 - 9060 мм³. При шлифовании покрытия максимальное

значение Q_m также было достигнуто при использовании состава №12, а минимальный параметр шероховатости Ra был зафиксирован при подаче составов №7 и №12 ($Ra = 0,32$ и $0,41$ мкм).

Из вышеизложенного следует, что при шлифовании покрытия использование СОЖ с присадками предпочтительно по сравнению с базовой СОЖ №6, а наиболее эффективным следует считать состав №12.

Более высокая технологическая эффективность составов СОЖ с присадками, по нашему мнению, объясняется тем, что присадки вступают в химическую реакцию с обрабатываемым материалом при высокой температуре и давлении. В результате химических реакций атомы хлора и серы, входящие в состав присадок, реагируют с поверхностью покрытий, а затем в условиях высоких давлений и температур диффундируют в их поверхностные слои, образуя слои сплавов - пленки с более низкими сдвиговыми сопротивлениями и температурами плавления. Это подтверждает теоретические предпосылки о том, что введение в состав смазочной среды присадок на основе серы и хлора и поверхностно-активных веществ способствует образованию тонкого адсорбционно-пластифицирующего слоя и повышает смачивающее и диспергирующее действие эмульсионных СОЖ.

Для исследования влияния концентрации состава №12 на его технологическую эффективность были подготовлены новые составы СОЖ: состав №14 и состав №15 соответственно 1,5 и 5 % - й концентрации. Нижний и верхний пределы концентрации были установлены по результатам предварительных экспериментов.

Нижний предел концентрации СОЖ обусловлен тем, что дальнейшее уменьшение её приводит к интенсивному образованию адгезионных наливов, а следовательно, к снижению стойкости ШК и производительности обработки. Выбор верхнего предела продиктован образованием плотного маслянистого тумана вокруг зоны обработки при увеличении концентрации СОЖ, что ухудшает санитарно-гигиенические условия труда рабочих-шлифовщиков.

Новые составы СОЖ были испытаны при тех же технологических условиях, что и составы №6...№13. Установлено (таблица 4.7), что наибольший период стойкости круга при шлифовании покрытия обеспечивается при использовании СОЖ 3 % - й концентрации (состав №12) – 38,4 мин.

Таблица 4.7 – Усредненные показатели продольного шлифования плазменно-напылённых валов с использованием СОЖ различной концентрации

Составы СОЖ	Показатели шлифования		
	Стойкость круга Т, мин	Объем снятого материала за период стойкости Q_m , мм ³	Шероховатость Ra , мкм
№12 (3 %)	38,4	18271	0,41
№14 (1,5 %)	16,9	8492	0,46
№15 (5 %)	23,7	12062	0,46

Объем снятого материала Q_m за период стойкости круга при шлифовании покрытия с применением СОЖ №12 оказался в 1,5...2,2 раза больше, чем в случаях применения составов №14 и №15 при достаточно низком значении шероховатости поверхности. Можно ожидать, что достигаемая низкая высота микронеровностей при шлифовании покрытия с использованием СОЖ №12 обеспечит повышение эксплуатационных показателей восстановленных валов.

Таким образом, анализ режущей способности кругов из электрокорунда белого и карбида кремния зеленого при круглом наружном шлифовании микропористого покрытия с использованием различных СОЖ, проведенный по всему комплексу выбранных показателей, позволяет вывести заключение о том, что наиболее эффективным составом СОЖ по совокупности принятых показателей является состав №12 – 3 % - й водный раствор эмульсола ЭПМ-1ш с присадками на основе хлора и серы [150].

4.7 Выводы по главе

Проведенные эксперименты по резанию-царапанию и шлифованию покрытия дают основание сделать следующие выводы:

1. Выполненные электронно-микроскопические исследования и МРСА позволили установить, что при резании-царапании покрытия на железной основе абразивными остриями из электрокорунда белого 24А и карбида кремния

зелёного 64С преобладает адгезионно-усталостный износ, способствующий комбинированному режиму (частичному самозатачиванию) работы кругов: у первого в виде объёмного микроразрушения с адгезионными налипками, а у второго в виде поверхностного микроскалывания с незначительной адгезией.

2. Экспериментальные исследования показали, что при микрорезании покрытия на установленных диапазонах скоростей и глубин износ корунда значительно выше карбида; при этом с ростом скорости и глубины резания износ корунда значительно возрастает, а износ карбида остается практически постоянным.

3. В результате экспериментальных исследований по резанию-царапанию покрытия на железной основе установлено, что к группе наиболее износостойких абразивов относятся сверхтвердые материалы – алмаз синтетический и эльбор поликристаллический, ко второй группе относятся карбиды, и наименьшей износостойкостью обладают корундовые материалы.

4. Экспериментальные исследования подтвердили теоретические предпосылки о падении режущей способности кругов из 24А и 64С и, в частности, стойкости и удельной производительности, с увеличением скорости резания. Можно ожидать, что величиной скорости, близкой к оптимальной, будут ее значения лежащие в середине исследованного диапазона скоростей – 25...35 м/с.

5. Экспериментально подтверждено предположение о снижении работоспособности кругов из 24А и 64С и, в частности, стойкости, с увеличением глубины резания. Можно ожидать, что величиной глубины, близкой к оптимальной, будут её значения лежащие в середине исследованного диапазона глубин – 10...15 мм/дв. ход.

6. Шлифование покрытий на разных скоростях и глубинах резания кругом из 64С сопровождалось комбинированным режимом его работы с микроскалыванием зёрен и с меньшими значениями составляющих P_y и P_z силы резания по сравнению с кругом из 24А. Следовательно, можно ожидать понижения степени уплотнения поверхностного слоя и заволакивания пор, а

значит улучшения условий смазки в сопряжении «шейка вала - подшипник скольжения» и повышения эксплуатационных возможностей восстановленных валов.

7. Экспериментально подтвердилась выдвинутая гипотеза о повышении эксплуатационных показателей шлифовальных кругов при обеспечении комбинированного режима работы абразивного инструмента с микроскалыванием режущих зёрен (частичное самозатачивание) и удалением с их поверхности налипших частиц покрытия.

8. Достигнутые высокие показатели по шероховатости и точности геометрической формы обработанных образцов при шлифовании кругом из карбида кремния зелёного 64А на разных скоростях и глубинах резания будут способствовать снижению износа сопрягаемых поверхностей и повышению эксплуатационных показателей восстановленных валов.

9. Экспериментально установлено, что наибольшей режущей способностью и наименьшей адгезионной активностью по отношению к покрытиям на железной основе обладают алмазные круги, затем идут круги из эльбора, далее следует инструмент из карбидов и, наконец, электрокорундовые инструменты. Шлифовальные круги из карбида кремния зелёного с характеристикой 64CF46N6V обеспечивали более высокие показатели по шероховатости и точности геометрической формы поверхностей по сравнению с другими опытными кругами, что позволит исключить операцию чистового шлифования и обеспечит повышение эксплуатационных возможностей восстановленных валов.

10. Экспериментально подтвердились теоретические предпосылки о повышении смазочного, смачивающего и диспергирующего действия эмульсионных СОЖ, а вместе с тем и эксплуатационных показателей кругов, при введении в их состав присадок на основе серы и хлора и поверхностно-активных веществ. Достижимые при этом низкие значения шероховатости обработанных поверхностей могут обеспечить повышение послевосстановительного ресурса плазменно-напылённых валов.

Глава 5. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ НАРАЩИВАНИЕМ МИКРОПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ

5.1 Экономическая оценка кругов и определение рациональных режимов абразивной обработки микропористых покрытий

При шлифовании покрытий восстановленных деталей сельскохозяйственной техники обычно используют круги из электрокорунда. В то же время лабораторные испытания кругов из СТМ и карбида кремния показали (см. п. 4.5), что эти инструменты обладают более высокими эксплуатационными возможностями по сравнению с электрокорундовыми кругами. Однако широкое использование кругов из СТМ в ремонтном производстве сдерживается их высокой стоимостью.

В связи с этим целесообразно провести расчеты себестоимости съема единицы объема материала при использовании кругов из СТМ и карбида кремния зеленого 64С в сравнении с кругом из электрокорунда белого 24А на операциях шлифования покрытий.

Затраты на шлифовальный инструмент, приведенные к единице снятого металла определим по формуле

$$C_m = C_{инс} / Q_{общ} , \quad (5.1)$$

где $C_{инс}$ – цена шлифовального круга;

$Q_{общ}$ – объем снятого материала за весь срок службы кругов.

Цены рассматриваемых кругов приняты по прейскурантам заводоизготовителей – для кругов из 24А и 64С это ООО «Косулинский абразивный завод», а для кругов из СТМ - ООО «Петербургский абразивный завод «Ильич».

$$Q_{общ} = \sum_{i=1}^n Q_i , \quad (5.2)$$

где Q_i – объем снятого материала за i -й период стойкости ШК;

n – количество периодов стойкости ШК за весь срок его службы.

При уменьшении диаметра ШК по мере его износа и производимых правок объем снятого металла Q_i за период стойкости инструмента снижается. Поэтому величина Q_i будет определяться диаметром круга и функциональными зависимостями его радиального износа U и удельной производительности q от скорости и глубины резания и может быть рассчитана по формуле

$$Q_i = \left(\frac{D_{kp_i}^2 - (D_{kp_i} - \Delta R(V_k, t) \cdot 2)^2}{4} \cdot 3,14 \cdot B \right) \cdot q(V_k, t), \quad (5.3)$$

где D_{kp_i} – диаметр ШК на i -ом периоде его стойкости;

B – высота круга;

$\Delta R(V_k, t)$ – радиальный износ кругов из 24А и 64С в зависимости от скорости и глубины резания, определяемый по формулам (4.6) и (4.7);

$q(V_k, t)$ – удельная производительность для кругов из 24А и 64С в зависимости от скорости и глубины резания, рассчитанная по формулам (4.8) и (4.9).

У кругов из СТМ толщина абразивного слоя на их периферии составляет 5 мм (регламентируется заводом-изготовителем), а значит, даже при полном износе этого инструмента его диаметр изменится незначительно. В таких условиях проследить влияние скорости на износ инструмента и удельную производительность не имеет смысла.

Для расчетов затрат на абразивный инструмент использовали приложение «Excel» офисного пакета «MS Office». В этих расчетах допустимый наименьший диаметр кругов из 24А и 64С был принят равным 450 мм, а для кругов из ЛКВ40 и АС4 при толщине абразивного слоя 5 мм - 590 мм. Скорость резания V_k рассчитывалась на каждом периоде стойкости круга в связи с уменьшением диаметра инструмента вследствие его износа. Глубина резания в данных расчетах принималась постоянной $t = 10$ мкм/дв.ход. Результаты расчетов представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Результаты расчетов затрат на АИ при продольном шлифовании

Шлифовальные круги	Кол-во периодов стойкости кругов	Цена абразивного круга $C_{инс}$, руб	Объём снятого металла за срок службы кругов $Q_{общ}$, мм ³	Затраты на абразивный инструмент при съеме 1 см ³ металла C_m , руб
25A F46N6V	751	1640	4328	0,38
64C F46N6V	775	2320	18528	0,13
ЛКВ40 250/200КСТ2	71	36675	50706	0,72
АС4 250/200КСТ2	67	38570	118640	0,33

Полученные данные показывают, что при шлифовании покрытия на железной основе экономически более эффективным оказался круг из карбида кремния зеленого 64С. Использование этого круга снижает затраты на АИ по сравнению с электрокорундовым кругом и кругом из синтетического алмаза в 2,9 и 2,5 раза соответственно.

Экономичность операции шлифования достаточно полно характеризуется комплексом из трех показателей: T , Q_m и Q_a . Для экономической оценки процесса шлифования кругом из карбида кремния зеленого 64CF46NV по сравнению с кругом из электрокорунда белого 25AF46NV определяли эмпирические зависимости, выражающие связь стойкости и износа кругов со скоростью съема металла по формулам (1.1) и (1.2).

Зависимости (1.1) и (1.2), построенные по результатам испытаний, изображены на рисунке 5.1 и 5.2, а C_T и n , C_q и t показаны в таблице 5.2.

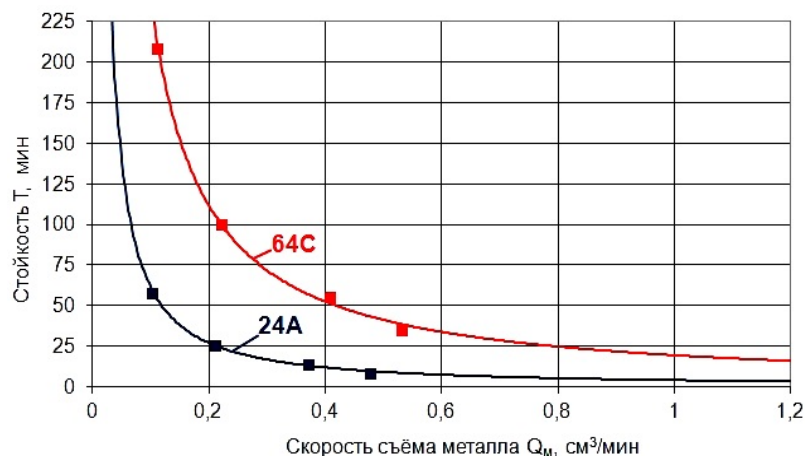


Рисунок 5.1 - Зависимости стойкости кругов из 64С и 24А от скорости съема металла

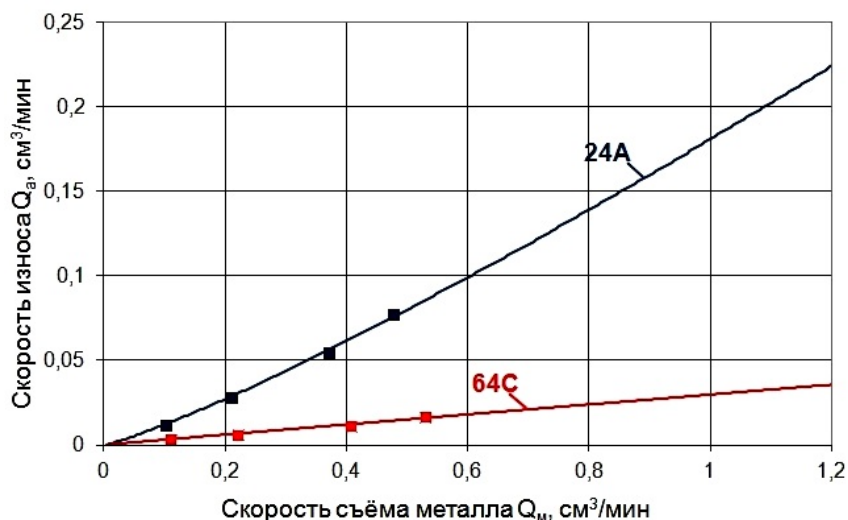


Рисунок 5.2 - Зависимости износа кругов из 64С и 24А от скорости съема металла.

Таблица 5.2 - Результаты шлифования покрытия кругами из электрокорунда и карбида кремния

Характеристики кругов	Постоянные зависимости (1.1)		Постоянные зависимости (1.2)	
	C_T	n	C_q	m
24AF46N6V	4,0	1,19	0,18	1,18
64CF46N6V	19,4	1,09	0,03	0,99

На основании полученных эмпирических зависимостей, а также используя данные таблицы 5.2, можно сказать, что в рассматриваемом диапазоне режимов резания круг из 64С показал значительно более высокую стойкость и меньший износ, по сравнению с кругом из 24А.

Таким образом, можно считать окончательно установленным, что наиболее эффективным абразивным инструментом при круглом наружном продольном и врезном шлифовании покрытий является круг из карбида кремния зеленого.

Для определения рационального режима шлифования покрытия кругом из 64С необходимо найти значение оптимальной скорости съема металла, соответствующей минимуму себестоимости обработки [70]. Себестоимость операции чернового продольного шлифования плазменно-напыленных шатунных шеек коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53 кругом из 64С в сравнении с кругом из 24А оценим по уравнению (3.20) для случаев, приведенных на рисунке 5.1 и 5.2 и в таблице 5.2.

Исходные данные для расчёта: $M = 6,9 \text{ см}^3$; $C_3 = 1,56 \text{ руб/мин}$ (по данным ООО «Плазматех»); $t_{np} = 3,0 \text{ мин}$; $D_{cp} = 525 \text{ мм}$; $B = 25 \text{ мм}$; $h_{np} = 0,16 \text{ мм}$; $k_{24A} = 0,53 \text{ руб/см}^3$; $k_{64C} = 0,75 \text{ руб/см}^3$.

Подставляя исходные данные в уравнение себестоимости (3.20), получаем:

$$\text{для круга из 64С: } C_{64C} = 10,76Q_M^{-1} + 1,66Q_M^{0,09} + 0,16Q_M^{-0,01} + 1,76Q_M^{0,09};$$

$$\text{для круга из 24А: } C_{24A} = 10,76Q_M^{-1} + 8,07Q_M^{0,19} + 0,66Q_M^{0,18} + 6,02Q_M^{0,19}.$$

Кривые себестоимости данной операции, построенные по уравнению 3.20 для кругов из 64С и 24А, показаны на рисунке 5.3, из которого следует, что значение оптимальной скорости съема металла $Q_{M_{opt}}$ для круга из 64С лежит в пределах $0,9 \dots 1,1 \text{ см}^3/\text{мин}$ (заштрихованная зона). Тогда стойкость T_{opt} круга из 64С при работе со скоростью съема металла $Q_{M_{opt}} = 0,9 \dots 1,1 \text{ см}^3/\text{мин}$ можно определить по формуле (1.1)

$$T_{opt} = C_T / Q_{M_{opt}}^n = 19,4 / (0,9 \dots 1,1)^{1,09} = 18 \dots 22 \text{ мин},$$

где C_T, n – коэффициенты, берем из таблицы 5.3.

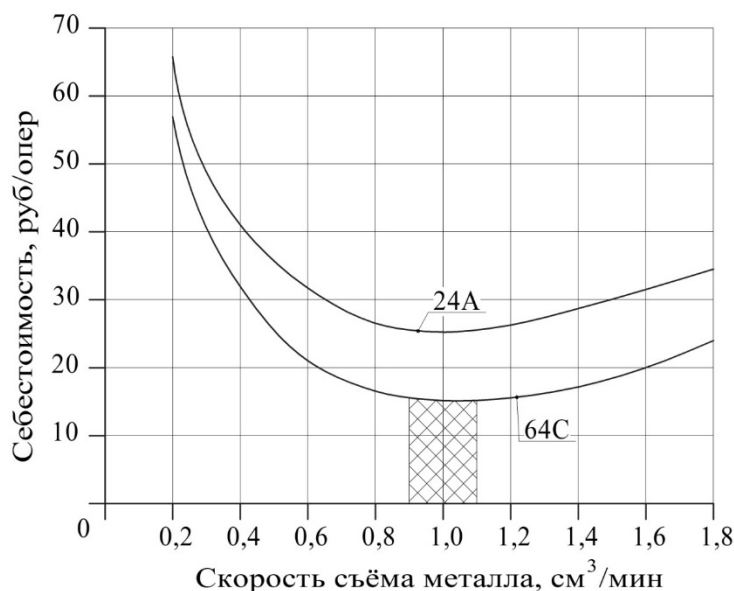


Рисунок 5.3 - Кривые себестоимости шлифования кругами из 64С и 24А

Сочетание режимных факторов, обеспечивающих стойкость круга из 64С равную $T_{opt} = 18 \dots 22 \text{ мин}$, определим из графика зависимости стойкости кругов T от скорости V_k и глубины резания t (рисунок 4.14,б). Откуда следует, что указанная стойкость достигается при скоростях $V_k = 40 \dots 45 \text{ м/с}$ и глубинах резания $t = 0,015 \dots 0,017 \text{ мм/дв. ход}$. Кроме того, для достижения обозначенной

стойкости кругов T_{onm} необходимо поддерживать скорость продольной подачи в пределах $S_{prod} = 425...605$ мм/мин и скорость вращения детали в пределах $V_d = 19...27$ м/мин (таблица 3.3).

Вышеприведенные режимы резания следует считать рациональными при черновом шлифовании покрытий.

Всё сказанное свидетельствует о том, что ШК из карбида кремния зелёного перспективны для обработки распространенных в практике ремонта машин покрытий на железной основе (напыленных, напеченных и т.д.).

5.2 Результаты сравнительных лабораторных испытаний на износ

После обработки результаты исследований представлены в таблице П14 и на рисунке 5.4. Анализ полученных данных показывает, что износостойкость плазменно-напыленных образцов, обработанных кругом из карбида кремния зеленого с характеристикой 64CF46N6V соответственно в 1,46 и 1,31 раза выше эталонных образцов и образцов, обработанных по обычной технологии.

Износ контртел, работающих в паре с плазменно-напыленными образцами, обработанными кругом 64CF46N6V, оказался соответственно в 1,40 и 1,25 раза меньше по сравнению с износом контртел, работающих в паре с эталонными образцами и с плазменно-напыленными образцами после обработки с применением обычной технологии. Это позволяет отвергнуть предположение о том, что круг 64CF46N6V оказывает шаржирующее действие на микропористый слой, своим более хрупким абразивом. Причем рабочая поверхность контртела, работающего в паре с плазменно-напыленным образцом, обработанным кругом 64CF46N6V была гладкой и блестящей, а поверхности контртел, работающих в паре с эталонами и с плазменно-напыленными, обработанными по обычной технологии, образцами можно охарактеризовать неоднородностью и повышенной шероховатостью.

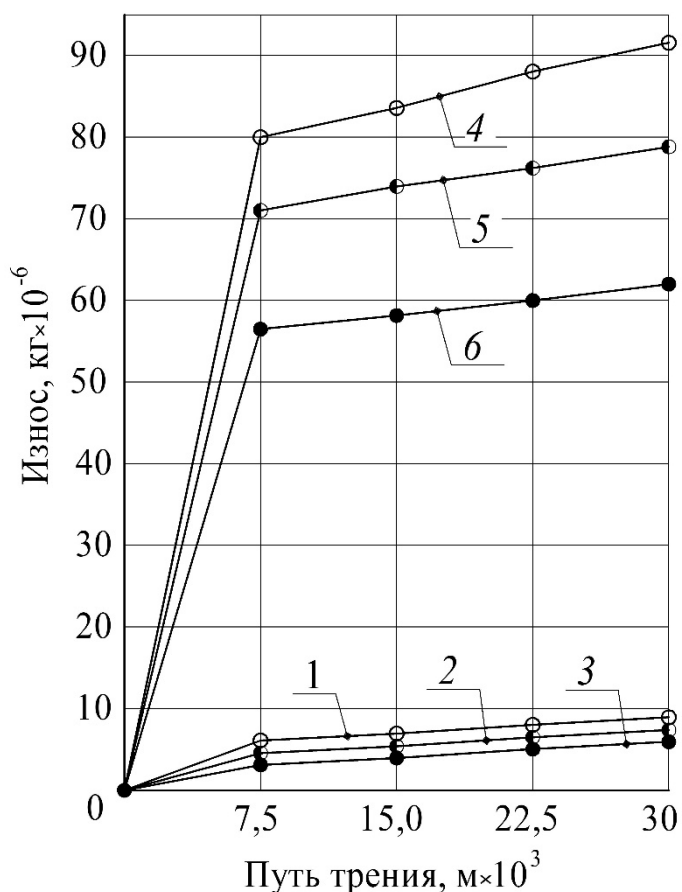


Рисунок 5.4 - Интенсивность изнашивания образца из чугуна (1), плазменно-напыленного образца, обработанного по обычной технологии (2), плазменно-напыленного образца, обработанного кругом 64CF46N6V (3) и контробразцов, работающих в паре с чугунными образцами (4), с образцом после обычной обработки (5), с образцом после обработки кругом 64CF46N6V (6).

При изнашивании как шлифованных образцов, так и контробразцов работающих в паре с ними, наблюдается интенсивный износ в начальный период, когда происходит приработка трущихся поверхностей. При изнашивании образцов, обработанных кругом 64CF46N6V, и контробразцов, составляющих пару трения с ними, интенсивность изнашивания в начальном цикле в 1,3...1,5 раза ниже, наблюдается равномерное изнашивание на протяжении всех периодов.

Анализ записей температуры пар трения показывает, что средняя величина температуры для испытуемых образцов и эталона примерно одинакова и составляла 30...35 °С. Величина момента трения для всех образцов на установившемся режиме износа была равна 0.

Таким образом, пара трения с плазменно-напыленным образцом, обработанным кругом 64CF46N6V, обладает повышенной износостойкостью по сравнению с парой трения чугунного образца и образца плазменно-напыленного, после обработки с применением обычной технологии.

5.3 Результаты производственных испытаний экспериментальных шлифовальных кругов и СОЖ

На ремонтном предприятии ООО «ПлазмаТех» (г. Барнаул) испытан шлифовальный круг формы 1 900x25x305 ГОСТ Р52781-2007 производства ООО «Косулинский абразивный завод» с характеристикой 64CF46N6V (круг №1). Этот инструмент испытывался на круглошлифовальном станке 3А423 на операции чернового шлифования плазменно-напыленных шеек коленчатых валов двигателя ЯМЗ-240 совместно с экспериментальным составом СОЖ №12 – 3% - ый водный раствор эмульсола «ЭПМ-1шп» ТУ 0258-004-11850138-01 ООО «Научные исследования и химические продукты» (г. Новосибирск). Упомянутые круг и СОЖ показали наилучшие результаты при лабораторных исследованиях обрабатываемости плазменных покрытий на железной основе.

Для сравнения был испытан круг 24AF46N6V (круг №2) совместно с серийной СОЖ – 5% - й водный раствор концентрата «Экол-3» ТУ 2422-001-23750583-93 ООО НПО «Сибирская лаборатория качества» (г. Мыски, Кемеровская обл.). Этот состав СОЖ и круг №2 применяются в настоящее время в ООО «ПлазмаТех» для перешлифовки шеек коленчатых и распределительных валов на ремонтные размеры и для обработки плазменно-напыленных покрытий на железной основе.

Результаты испытаний показали (таблица 5.3 и таблица П15), что при совместном применении круга №1 и СОЖ №12 период стойкости АИ оказался в четыре раза выше по сравнению с периодом стойкости достигаемом при использовании круга №2 и СОЖ «Экол-3». Так, при совместном использовании круга №2 и СОЖ «Экол-3» за время обработки одной шейки коленчатого вала абразивный инструмент приходилось править дважды (появлялась огранка и возникали вибрации), в то время как использование круга №1 и СОЖ №12 позволяло обработать без правки две шейки.

Объём снятого металла Q_m за период стойкости при использовании круга №1 с подачей в зону шлифования СОЖ №12 оказался в 4,4 раза выше по сравнению с величиной Q_m , достигаемой с применением круга №2 совместно с

жидкостью на основе концентрата «Экол-3». Меньший износ инструмента и соответственно большая удельная производительность были зафиксированы при использовании круга 64CF46N6V с подачей в зону шлифования экспериментальной СОЖ.

Таблица 5.3 - Результаты производственных испытаний шлифовальных кругов и СОЖ

Наименование опытов	Период стойкост и кругов Т, мин	Объёмный съём металла Q_m , мм ³	Объёмный износ круга Q_a , мм ³	Удельная производительность q , мм ³ / мм ³	Шероховатость обработанных шеек Ra, мкм
Круг 24AF46N6V совместно с серийной СОЖ «Экол-3»	8,56	5052	488	10,9	0,36
Круг 64CF46N6V совместно с экспериментальной СОЖ №12	32,33	22026	424	52,5	0,47

Применение кругов 24AF46N6V и 64CF46N6V с подачей соответственно серийной и экспериментальной СОЖ позволяет получить шлифованные поверхности с низкими параметрами шероховатости $R_a = 0,36$ и $0,47$ мкм. Точность геометрической формы (овальность) обработанных шеек не превышала 0,01 мм как при шлифовании кругом №1 совместно с СОЖ №12, так и при обработке кругом №2 совместно с «Экол-3».

Таким образом, результаты производственных испытаний подтверждают данные лабораторных исследований в том, что наибольшей технологической эффективностью при шлифовании плазменно-напыленных покрытий на железной основе являются круги из карбида кремния с подачей в зону резания экспериментального состава СОЖ №12. Акт внедрения прилагается (Приложение П16).

5.4 Результаты испытаний восстановленных валов в условиях рядовой эксплуатации

Эксплуатационные испытания восстановленных коленчатых валов в условиях рядовой эксплуатации показали хорошую работоспособность микропористых покрытий на железной основе. В результате обработки данных

микрометрирования установлено (таблица 5.4), что значения величин износов шеек испытуемых коленчатых валов находились в пределах допустимых для дальнейшей эксплуатации. Средний пробег автомобилей с этими валами на момент замера величин износов составил около 40 тыс. км. Минимальный пробег автомобилей при этом составил 35 тыс. км, а максимальный – 46 тыс. км.

Таблица 5.4 - Величина износов шеек испытуемых коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53А

Номер двигателя	Пробег тыс. км	Износ коренных шеек, мкм				
		1-я шейка	2-я шейка	3-я шейка	4-я шейка	5-я шейка
Коленчатые валы с плазменно-напылёнными коренными шейками						
179935	37	75	60	75	65	60
163820	46	120	100	125	120	100
Коленчатые валы с коренными шейками, перешлифованными под ремонтный размер						
182324	35	85	70	85	75	65
174254	41	130	110	140	135	110

Плазменно-напылённые коренные шейки валов имеют среднюю скорость изнашивания на 15...25 % меньшую по сравнению с коренными шейками перешлифованными до второго ремонтного размера (таблица 5.5). При этом твёрдость микропористого покрытия составляла 40...42 HRC, а твёрдость шлифованной шейки 58...60 HRC.

Проведённые испытания показали хорошую ходимость плазменно-напылённых коленчатых валов в эксплуатации. Случаев поломок испытуемых валов за время испытаний, а также аварийного выхода из строя коленчатых валов (задиры, схватывание сопряжений) не зафиксировано.

Таблица 5.5 - Скорость изнашивания шеек испытуемых коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53А

Номер двигателя	Пробег тыс. км	Скорость изнашивания коренных шеек, мкм на 1000 км пробега				
		1-я шейка	2-я шейка	3-я шейка	4-я шейка	5-я шейка
Коленчатые валы с плазменно-напылёнными коренными шейками						
179935	37	2,03	1,62	2,03	1,76	1,62
163820	46	2,61	2,17	2,72	2,61	2,17
Коленчатые валы с коренными шейками, перешлифованными под ремонтный размер						
182324	35	2,43	2,00	2,43	2,14	1,86
174254	41	3,17	2,68	3,41	3,29	2,68

Эти результаты подтверждают достоверность выводов, сделанных по результатам лабораторных испытаний на износостойкость и свидетельствуют об увеличении долговечности валов, восстановленных плазменным напылением металлических порошков на железной основе и обработанных шлифовальным кругом с характеристикой 64CF46N6V.

Автомобили с плазменно-напылёнными коленчатыми валами продолжают успешно работать в КФХ «Егорова» Алтайского края. Акт испытаний прилагается (Приложение П17).

5.5 Расчет экономической эффективности внедрения кругов и смазочно-охлаждающей жидкости для шлифования микропористых покрытий восстановленных деталей

По результатам внедрения на ремонтном предприятии ООО «ПлазмаТех» шлифовального круга и экспериментального состава СОЖ (см. п. 5.2) требуется определить их экономическую эффективность. Тип производства серийный. Режим работы односменный. Исходные данные приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 - Исходные данные

Наименование показателя	Обозначение	Значение показателей	
		1-й вариант (базовый)	2-й вариант (новый)
Годовая программа восстановления коленвалов, шт	$N_{год}$	1000	1000
Норма штучного времени операции чернового шлифования шеек коленвала, мин	$T_{шт}$	159	118,2
Норма основного времени, мин	T_o	144,6	107,4
Часовая тарифная ставка оператора, руб	$C_{мс}$	83	83
Цена нового абразивного круга, руб	C_u	4104	8086
Цена изношенного круга (отходов), руб	$C_{от}$	1231	2350
Цена одного литра эмульсола, руб	$C_{эм}$	47	198
Количество шеек, обрабатываемых за период стойкости круга, шт	$N_{кд}$	0,5	2

Расчет экономической эффективности осуществляют по следующим статьям калькуляции [152]: сырье и материалы за вычетом возвратных отходов, покупные

изделия, полуфабрикаты и услуги производственного характера сторонних организаций, топливо и энергия на технологические цели, заработная плата производственных рабочих, отчисления на социальные нужды, расходы на подготовку и освоение производства, расходы на содержание и эксплуатацию оборудования. В данном случае при определении технологической себестоимости по вариантам ограничимся расчетом только тех статей, по которым предполагаются изменения. Рассматриваемые варианты операции чернового шлифования различаются только применяемым режущим инструментом и СОЖ. Кроме того, внедрение нового абразивного инструмента позволит интенсифицировать режимы обработки, а значит, и снизить штучное время технологической операции. Следовательно, годовой экономический эффект можно определить по формуле

$$\mathcal{E}_{год} = \mathcal{E}_{зн} + \mathcal{E}_{соц} + \mathcal{E}_{эл} + \mathcal{E}_{ин} + \mathcal{E}_{СОЖ}, \quad (5.4)$$

где $\mathcal{E}_{зн}$ – годовой экономический эффект от снижения расходов на заработную плату шлифовщика, руб;

$\mathcal{E}_{соц}$ – годовой экономический эффект от снижения расходов на отчисление на социальные нужды, руб;

$\mathcal{E}_{эл}$ – годовой экономический эффект от снижения затрат на электроэнергию, руб;

$\mathcal{E}_{ин}$ – годовой экономический эффект от замены абразивного инструмента, руб;

$\mathcal{E}_{СОЖ}$ – годовой экономический эффект от замены СОЖ, руб.

Экономия от снижения расходов на заработную плату определим по формуле

$$\mathcal{E}_{зн} = C_{мс} \cdot (T_{ум1} - T_{ум2}) \cdot k_p \cdot k_{дон} \cdot N_{год}, \quad (5.5)$$

где $C_{мс}$ – часовая тарифная ставка оператора соответствующего разряда, руб/час; принята по данным предприятия (таблица 5.6);

T_{um1} – штучное время операции чернового шлифования коленчатого вала по первому варианту (таблица 5.6), час;

T_{um2} – штучное время операции чернового шлифования коленчатого вала по второму варианту (таблица 5.6), час;

k_p – районный коэффициент; $k_p = 1,15$ (для Алтайского края);

$k_{дон}$ – коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату;
 $k_{дон} = 1,1$ (по данным предприятия);

$N_{год}$ – годовая программа выпуска коленчатых валов, шт; (таблица 5.6);

Годовой экономический эффект от снижения расходов на отчисления на социальные нужды рассчитаем по формуле

$$\mathcal{E}_{соц} = 0,3 \cdot \mathcal{E}_{зн}, \quad (5.6)$$

где 0,3 – доля отчисления на социальные нужды во внебюджетные фонды (30% от фонда заработной платы).

Экономию затрат на электроэнергию определим по формуле

$$\mathcal{E}_{эл} = \Delta G \cdot Ц_{эл}, \quad (5.7)$$

где ΔG – разница годовой потребности в силовой электроэнергии между двумя вариантами чернового шлифования коленчатого вала, кВт;

$Ц_{эл}$ – цена 1 кВт/час электроэнергии, руб; $Ц_{эл} = 3,95$ руб (по данным предприятия).

$$\Delta G = \frac{N_{\partial} \cdot k_{ep} \cdot k_m \cdot k_{одн}}{\eta_{дв}} \cdot (T_{o1} - T_{o2}) \cdot N_{год}, \quad (5.8)$$

где N_{∂} – суммарная мощность двигателей станка, кВт; $N_{\partial} = 10,23$ (по паспорту станка 3А423);

k_{ep} – коэффициент загрузки электродвигателей по времени работы оборудования; $k_{ep} = 0,8$;

k_m – коэффициент загрузки электродвигателей по мощности; $k_m = 0,3$;

$k_{одн}$ – коэффициент одновременной работы электродвигателей; $k_{одн} = 1$;

$\eta_{\text{дв}}$ – средний КПД двигателей; $\eta_{\text{дв}} = 0,8$ (по паспорту станка 3А423);

T_{o1} – основное время операции чернового шлифования шеек коленчатого вала по первому варианту, час; (таблица 5.6);

T_{o2} – основное время операции чернового шлифования шеек коленчатого вала по второму варианту, час; (таблица 5.6).

Годовой экономический эффект от замены абразивного инструмента определим как разницу затрат на ШК по двум вариантам по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{ин}} = \mathcal{Z}_{\text{ин1}} - \mathcal{Z}_{\text{ин2}}, \quad (5.9)$$

где $\mathcal{Z}_{\text{ин1}}$ – затраты на инструмент по первому варианту, руб;

$\mathcal{Z}_{\text{ин2}}$ – затраты на инструмент по второму варианту, руб.

$$\mathcal{Z}_{\text{ин}} = (C_u - C_{\text{от}}) \cdot N_{\text{кр}}, \quad (5.10)$$

где C_u – стоимость круга данного типоразмера, руб; по прейскуранту ООО «Косулинский абразивный завод» (таблица 5.6);

$C_{\text{от}}$ – выручка от реализации изношенного круга, руб; принята по данным предприятия (таблица 5.6);

$N_{\text{кр}}$ – количество кругов необходимое для восстановления годовой программы коленчатых валов, шт.

$$N_{\text{кр}} = \frac{6N_{\text{зод}}}{n_{\text{ув}}} \cdot K_{\text{уб}}, \quad (5.11)$$

где $n_{\text{ув}}$ – количество напыленных шеек коленчатого вала, которое может обработать один круг за весь срок его службы, шт;

6 – количество шеек на одном коленчатом валу;

$K_{\text{уб}}$ – коэффициент, учитывающий случайную убыль кругов; определяется по нормативам в зависимости от размера и вида круга; рекомендуется $K_{\text{уб}} = 1,0 - 1,5$ [96], принимаем $K_{\text{уб}} = 1,25$.

$$n_{\text{ув}} = T_{\text{кд}} \cdot n_{\text{пр}}, \quad (5.12)$$

где n_{np} – общее количество правок, выдерживаемых кругом за весь срок его службы;

$T_{кр}$ – количество шеек, обрабатываемых за период стойкости круга; по результатам производственных испытаний (таблица 5.6).

$$n_{np} = \frac{R}{H}, \quad (5.13)$$

где R – допустимая величина износа круга, мм;

H – суммарный износ круга за цикл «шлифование-правка», мм.

$$R = \frac{D - D_n}{2}, \quad (5.14)$$

где D – наружный диаметр нового круга до работы, мм; $D = 900$ мм;

D_n – наименьший допустимый наружный диаметр круга, мм; $D_n = 750$ мм.

$$H = r + h_{np}, \quad (5.15)$$

где h_{np} – величина снимаемого слоя абразива за одну правку круга, мм; по результатам производственных испытаний $h_{np} = 0,16$ мм;

r – средний радиальный износ круга за период стойкости, мм; по результатам производственных испытаний (таблица П14).

Годовой экономический эффект от замены СОЖ определим как разницу затрат по двум вариантам по формуле

$$\mathcal{E}_{СОЖ} = \mathcal{Z}_{СОЖ1} - \mathcal{Z}_{СОЖ2}, \quad (5.16)$$

где $\mathcal{Z}_{СОЖ1}$ – затраты на СОЖ в первом варианте, руб;

$\mathcal{Z}_{СОЖ2}$ – затраты на СОЖ во втором варианте, руб.

$$\mathcal{Z}_{СОЖ} = k \cdot \mathcal{C}_{ЭМ}, \quad (5.17)$$

где $\mathcal{C}_{ЭМ}$ – цена одного литра эмульсола, руб; принята по прейскуранту производителя – ООО «Научные исследования и химические продукты» (таблица 5.6);

k – количество эмульсола необходимого для восстановления годовой программы коленчатых валов, л.

$$k = \frac{m \cdot \eta}{100}, \quad (5.18)$$

где η – процентное содержание эмульсола или концентрата в СОЖ; для «Экол-3» по рекомендации завода-изготовителя принято 5%, для СОЖ №12 по данным лабораторных (см. п. 5.4) и производственных испытаний (см. п. 5.5) – 3%;

m – общее количество СОЖ необходимое для восстановления годовой программы выпуска деталей, л.

$$m = m_{\text{час}} \cdot T_{\text{шт}} \cdot N_{\text{год}}, \quad (5.19)$$

где $m_{\text{час}}$ – расход СОЖ за один час работы; л.

Согласно среднестатистическим данным суточный расход СОЖ на один станок в среднем можно принять равным 20% полезной емкости резервуара [103]. Следовательно, расход СОЖ за один час работы можно определить по формуле

$$m_{\text{час}} = \frac{q_{\text{бак}} \cdot 0,2}{8}, \quad (5.20)$$

где $q_{\text{бак}}$ – полезный объём резервуара станка под СОЖ, л; $q_{\text{бак}} = 60$ л (по паспорту станка 3А423).

Результаты расчетов изменившихся статей по технологической себестоимости представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 - Результаты расчетов

Наименование статьи	Обозначение	Экономия/перерасход
Экономический эффект от снижения расходов на заработную плату	$\mathcal{E}_{\text{зн}}$	71683
Экономический эффект от снижения расходов на отчисление на социальные нужды	$\mathcal{E}_{\text{соц}}$	21505
Экономический эффект от снижения затрат на электроэнергию	$\mathcal{E}_{\text{эл}}$	7524
Экономический эффект от замены режущего инструмента	$\mathcal{E}_{\text{ин}}$	50219
Экономический эффект от замены СОЖ	$\mathcal{E}_{\text{СОЖ}}$	-8204
ИТОГО		142728

Таким образом, внедрение результатов научно-исследовательских работ в ООО «ПлазмаТех» позволит получить экономию в размере 142728 рублей при программе восстановления коленчатых валов двигателя ЯМЗ-240 1000 штук в год.

ВЫВОДЫ

В соответствии с поставленными задачами и результатами проведенного исследования можно сделать следующие общие выводы и рекомендации:

1. В результате анализа литературных источников и статистических данных установлено, что из известных прогрессивных способов технологии размерной обработки микропористых покрытий восстановленных валов абразивная обработка является наиболее эффективной и способна оказывать положительное влияние на эксплуатационные свойства обработанных поверхностей и отличается высокой точностью размеров, геометрической формы и низкой шероховатостью.

2. Теоретические предпосылки, в основу которых положен анализ видов износа абразивных зёрен и ШК, позволили установить возможность повышения износостойкости восстановленных валов и работоспособности АИ при обработке микропористых покрытий на железной основе за счёт комбинированного режима работы кругов с микроскалыванием режущих зёрен и удаления адгезионных налипков. Установлено, что в указанном режиме способен работать инструмент из карбида кремния зелёного с характеристикой 64CF46N6V, обеспечивающий при этом снижение сил резания на 10...15 % и интенсивности засаливания в 7...12 раз по сравнению с кругами из электрокорунда.

3. Обоснованы рациональные режимы технологии шлифования покрытий на железной основе: скорость резания $V_p = 40...45$ м/с, глубина резания $t=0,015...0,017$ мм/дв. ход, скорость продольной подачи $S_{prod} = 425...605$ мм/мин и скорость вращения детали $V_d = 19...27$ м/мин, обеспечивающий работу круга 64CF46N6V с наибольшей эффективностью.

4. Выявлен наиболее эффективный состав СОЖ для технологического процесса абразивной обработки покрытий - 3% - й водный раствор эмульсола «ЭПМ-1шп» (патент РФ № 2501847). Установлено, что период стойкости рекомендуемого круга 64CF46N6V совместно с запатентованной СОЖ значительно превышает (в 4 раза) период стойкости серийного круга при использовании серийной СОЖ.

5. Установлено, что при шлифовании покрытий кругом 64CF46N6V достигается шероховатость поверхностей в пределах $Ra = 0,12...0,31$ мкм, а точность геометрической формы опорных шеек восстановленных валов (овальность и конусность) не превышала 0,01 мм, что соответствует техническим требованиям. Столь низкие значения высоты микронеровностей и высокая точность геометрической формы обработанных поверхностей обеспечат снижение износа восстановленных валов, особенно в период приработки. При этом исключается операция чистового шлифования, что позволит упростить технологию обработки валов и сократить парк круглошлифовальных станков.

6. Лабораторными испытаниями установлено, что износостойкость плазменно-напылённых образцов, обработанных по предложенной технологии повысилась в 1,46 раза по сравнению с эталонным чугунным образцом, обработанным по обычной технологии. Испытания коленчатых валов ЗМЗ-53А в условиях рядовой эксплуатации в ООО КФХ «Егорова» Егорьевского района Алтайского края показали, что плазменно-напылённые шейки валов имеют среднюю скорость изнашивания на 15...25 % меньшую, по сравнению с чугунными коленчатыми валами перешлифованными по старой технологии при пробеге 40 тыс. км.

7. Рекомендуемый круг 64CF46N6V совместно с экспериментальным составом СОЖ был внедрен в ООО «Плазматех» (г. Барнаул) на операции чернового шлифования плазменно-напыленных шеек коленчатых валов двигателя ЯМЗ-240. Расчетный экономический эффект от внедрения новой технологии составляет 140 тыс. рублей в год при годовой программе восстановления 1000 валов.

Рекомендации предприятиям. Для повышения качества восстанавливаемых валов и снижения себестоимости их обработки рекомендуется шлифовать шейки с микропористыми покрытиями на железной основе кругом с характеристикой 64CF46N6V с использованием 3%-го водного раствора эмульсола «ЭПМ-1шп» на рекомендуемых режимах резания.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Дальнейшие научные исследования должны быть направлены на повышение эффективности технологии восстановления валов и их эксплуатационных показателей на основе разработки оптимизационной математической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черноиванов В.И. Организация и технология восстановления деталей машин. 2-е изд., доп. и перераб. / В.И. Черноиванов, В.П.Лялякин – М.: ГОСНИТИ, 2003. – 488 с.
2. Надежность и ремонт машин: Учебник / Под ред. В. В. Курчаткина. – М.: Колос, 2000. – 776 с.
3. Черноиванов В.И. Восстановление техники – приоритетная задача сельхозмашиностроения и ремонтной базы АПК / В.И. Черноиванов // Техника в с/х. – 2000. – №6. – с. 9-11.
4. Лялякин В.П. Концепция развития ремонта техники на базе восстановления и упрочнения деталей / В.П. Лялякин // Механиз. и электриф. с/х. – 2001. – №6. – с. 2-7.
5. Иванов, В.П. Технология и оборудование восстановления деталей машин: Учебник/ В.П. Иванов. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 458 с.
6. Алексеев Н.С. Абразивная черновая обработка микропористых покрытий восстановленных деталей: автореферат...дисс. к.т.н.: 05.20.03 / Алексеев Николай Сергеевич. – Челябинск: 1987. – 20 с.
7. Гаврилов К.Л. Тракторы и сельскохозяйственные машины иностранного и отечественного производства: устройство, диагностика и ремонт / К.Л. Гаврилов - Пермь: Звезда, 2017. - 544 с.
8. Карагодин В.И. Ремонт автомобилей и двигателей / В.И. Карагодин, Н.Н. Митрохин - М.: Академия, 2017. - 496 с.
9. Лялякин В.П. Восстановление деталей – важное направление импортозамещения при эксплуатации сельскохозяйственной техники / В.П. Лялякин // Труды ГОСНИТИ, 2015 - №119. - с. 183-192.
10. Лялякин В.П. Вторая жизнь изношенных деталей / В.П. Лялякин // Механиз. и электриф. с/х. – 1992. – №7-8. – с. 36-37.

11. Фархшатов М.Н. Повышение ресурса автотракторных деталей при их восстановлении / М.Н. Фархшатов // Механиз. и электриф. с/х. – 2006. – №7. – с. 31-33.

12. Косимов К. Композиционные материалы для восстановления деталей машин / К. Косимов, Х. Юсупов, М. К. Косимова // Техника в с/х. – 2006. – №6. – с. 36–37.

13. Сайфуллин Р.Н. Восстановление деталей машин электроконтактной приваркой металлопорошковых композиций / Р.Н. Сайфуллин // Техника в с/х. – 2008. – №2. – с. 26-28.

14. Сайфуллин Р.Н. Электроконтактная приварка металлических порошков / Р.Н. Сайфуллин // Механиз. и электриф. с/х. – 2008. – №5. – с. 38.

15. Сайфуллин Р.Н. Восстановление изношенных деталей электроконтактной приваркой / Р.Н. Сайфуллин // Механиз. и электриф. с/х. – 2008. – №7. – с. 37.

16. Сабеев К.Г. Восстановление подшипника ротора турбокомпрессора / К.Г. Сабеев, Ю.И. Попович, В.Е. Семиченко, В.В. Ерасов // Механиз. и электриф. с/х. – 1989. – №11. – с. 32-33.

17. Полупанов Ф.П. Восстановление молочных кранов газопламенным напылением порошков / Ф.П. Полупанов // Механиз. и электриф. с/х. – 1990. – №1. – с. 52.

18. Плотников С.М. Эффективная технология восстановления коленчатых валов / С.М. Плотников, В.А. Иванов, А.И. Чечин // Механиз. и электриф. с/х. – 2003. – №9. – с. 24-25.

19. Соловьев Б.М. Детонационно – газовое напыление покрытий / Соловьев Б. М. // Механиз. и электриф. с/х. – 1989. – №6. – с. 53-55.

20. Соловьев Б.М. Детонационно-газовое напыление изношенных деталей / Б.М. Соловьев // Механиз. и электриф. с/х. – 1991. – №12. – с. 34-37.

21. Савчук В.П. Установка плазменного напыления / В.П. Савчук, Б.М. Соловьев // Механиз. и электриф. с/х. – 1989. – №6. – с. 51-52.

22. Тюгашкина О.Ю. Плазменное напыление юбок алюминиевых поршней / О.Ю. Тюгашкина, Б.М. Соловьев // Механиз. и электриф. с/х. – 1989. – №6. – с. 52-53.

23. Шмаков Л.М. Технология восстановления нажимного диска коробки передач / Л.М. Шмаков, А.А. Басистый, В.С. Чепкасов // Механиз. и электриф. с/х. – 1990. – №6. – с. 50.

24. Терехов Д.Ю. Оптимизация технологии восстановления чугуновых коленчатых валов плазменным напылением с одновременным электроискровым легированием: автореф. дисс. к.т.н.: 05.20.03 / Терехов Дмитрий Юрьевич – Ульяновск.: 1990. – 20 с.

25. Соловьев Б.М. Использование потока ламинарной плазмы для нанесения порошковых покрытий / Б.М. Соловьев // Механиз. и электриф. с/х. – 1991. – №11. – с. 52-53.

26. Тер-Даниэльян Б.И. Электродуговая металлизация коленчатых валов / Б.И. Тер-Даниэльян, Л.В. Красниченко // Техника в с/х. – 1983. – №4. – с. 58-59.

27. Тер-Даниэльян Б.И. Восстановление распределительных валов двигателей / Б.И. Тер-Даниэльян, Л.В. Красниченко, Ю.Н. Пономарев // Техника в с/х. – 1986. – №7. – с. 54.

28. Литовченко Н.Н. Восстановление шеек коленчатых валов электродуговой металлизацией / Н.Н. Литовченко, С.Б. Климов, В.Г. Михайлов, В.П. Холопов // Техника в с/х. – 1986. – №10. – с. 46-47.

29. Шмаков Л.М. Восстановление коленчатых валов компрессоров / Л.М. Шмаков, А.Б. Черепанов, М.В. Иванова // Механиз. и электриф. с/х. – 1992. – №3-4 – с. 48.

30. Литовченко Н.Н. Восстановление изношенных деталей электродуговой металлизацией / Н.Н. Литовченко, Г.Г. Раджабов, В.В. Денисов // Техника в с/х. – 2001. – №2. – с. 32-33.

31. Литовченко Н.Н. Восстановление деталей машин электродуговой металлизацией / Н.Н. Литовченко, В.И. Денисов, П.А. Воробьев, М.Ю. Юсим // Техника в с/х. – 2008. – №2. – с. 28-32.

32. Батищев А.Н. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники / А.Н. Батищев, И.Г. Голубев, В.П. Лялякин. – М.: Информагротех, 1995. – 296 с.
33. Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А.И. Сидоров. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
34. Суденков Е.Г. Восстановление деталей плазменной металлизацией / Е.Г. Суденков, С.И. Румянцев. – М.: Высшая школа, 1980. – 38 с.
35. Пиманов Г.П. Прогрессивная технология газотермического нанесения порошковых покрытий при ремонте машин агропромышленного комплекса / Г.П. Пиманов, В.А. Ульянов. – М.: Машиностроение, 1987. – 42 с.
36. Сабеев К.Г. Металлизация тормозных барабанов тракторов / К.Г. Сабеев // Техника в с/х. – 1986. – №7. – с. 56-57.
37. Чёсов Ю.С. Влияние режимов плазменного напыления на структуру износостойких покрытий / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, П.В. Трегубчак // Матер. 1-й междунар. науч.-техн. конф. «Инновации в машиностроении» – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2010. – №2(47). – с. 144-147.
38. Бирюков В.Н. Электрохимические и электрофизические методы размерной обработки / В.Н. Бирюков – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
39. Золотых Б.Н. Физические основы электроэрозионной обработки / Б.Н. Золотых, Р.Р. Мельдер – М.: Машиностроение, 1977. – 42 с.
40. Бевз И.И. Разработка технологии электроконтактной обработки наплавленных деталей сельскохозяйственной техники: автореф. дисс. к.т.н.: 05.20.03 / Бевз Иван Иванович. – Челябинск.: 1984. – 20 с.
41. Бевз И.И. Влияние режимов электроконтактной обработки на шероховатость обработанной поверхности / И.И. Бевз, Б.М. Дудин // Сб. науч. тр. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1981 – с. 56-59.
42. Ермаков С.С. Металлокерамические детали в машиностроении / С.С. Ермаков, Н.Ф. Вязников – Л.: Машиностроение, 1975. – 232 с.
43. Артамонов А.Я. Износ резцов при обработке пористых материалов / А.Я. Артамонов, В.И. Кононенко // Порошковая металлургия, 1967. – №4. – с. 78-86.

44. Николаев В.А. Тонкое точение спечённых материалов / В.А. Николаев – М.: Машиностроение, 1979. – 64 с.

45. Артамонов А.Я. Влияние окисления пористых металлокерамических материалов на стойкость режущих инструментов / А.Я. Артамонов, В.И. Кононенко, А.И. Чирков // Физико-химическая механика материалов, 1968. – №11. – с. 66-68.

46. Артамонов А.Я. Влияние условий шлифования на чистоту поверхности и уплотнение металлокерамического материала / А.Я. Артамонов, Л.С. Рабинович // Порошковая металлургия, 1967. – №11. – с. 97-104.

47. Артамонов А.Я. Влияние условий шлифования на изменение твёрдости и износостойкости закалённого металлокерамического материала / А.Я. Артамонов, Л.С. Шишкин // Порошковая металлургия, 1968. – №2. – с. 89-93.

48. Шишкин Л.С. Влияние пористости спечённых материалов на температурный режим шлифования / Л.С. Шишкин, А.И. Безыкорнов, Б.И. Бекерман // Порошковая металлургия, 1977. – №5. – с. 44-49.

49. Ящерицын П.И. Совершенствование процесса шлифования износостойких покрытий / П.И. Ящерицын, С.Н. Казаков, С.И. Миткевич, А.И. Белицкая // Межвуз. сб. науч. тр. «Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента»: Выпуск 14. – Пенза: ПензПИ, 1986. – с. 3-8.

50. Сире Ю.С. Определение областей эффективного использования алмазных кругов при шлифовании наплавов и покрытий / Ю.С. Сире, В.М. Горбатовский // Труды ВНИИалмаза «Повышение технического уровня алмазных инструментов». – М.: 1987. – с. 26-32.

51. Рыбицкий В.А. Алмазно-абразивная обработка напыленных материалов / В.А. Рыбицкий, О.Г. Гуцаленко, Л.Е. Пекарев, И.А. Фомичев, М.А. Лумельский // Респуб. межвед. науч.-техн. сб. «Резание и инструмент». – Харьков: «Вища школа», 1987. – №38. – с. 29-31.

52. Алексеев Н.С. Износостойкость абразивных материалов при микрорезании плазменного покрытия / Н.С. Алексеев, С.В. Иванов, В.А. Капорин // Тр. V Междунар. науч.-техн. конф. «Современные проблемы машиностроения» /

Томский политехн. ун-т. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2010. – с. 152-154.

53. Ульянов В.А. Рекомендации по восстановлению деталей газопламенным напылением / В.А. Ульянов, Г.П. Пиманов. – М.: ГОСНИТИ, 1988. – 47 с.

54. Изгагин В.Н. Восстановление коленчатых валов напеканием металлических порошков / В.Н. Изгагин, В.С. Дорофеев, Ю.С. Тарасов, В.Н. Чижов // Техника в с/х. – 1982. – №10. – с. 47-49.

55. Потапов Г.К. Электроконтактное напекание порошковых сплавов / Г.К. Потапов, Ч.М. Мамлеев, А.Ф. Меркулов // Механиз. и электриф. с/х. – 1986. – №12. – с. 54-55.

56. Лурье Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 174 с.

57. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.

58. Лоладзе Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М: Машиностроение, 1967. – 112 с.

59. Бокучава Г.В. Трибология процесса шлифования / Бокучава Г.В. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1984. – 238 с.

60. Носенко В.А. Шлифование адгезионно-активных металлов / В.А. Носенко. – М.: Машиностроение, 2000. – 262 с.

61. Саютин Г.И. Шлифование деталей из сплавов на основе титана / Г.И. Саютин, В.А. Носенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 80 с.

62. Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов / Л.Л. Мишнаевский. – Киев: Наукова думка, 1982. – 192 с.

63. Ящерицын П.И. Химические явления в процессе шлифования / П.И. Ящерицын, А.К. Цокур, А.М. Драевский // Вестник АН БССР, серия физико-технических наук, 1986. – №2. – с. 43-48.

64. Носенко В.А. Определение износа шлифовальных зерен скалыванием и закона его распределения / В.А. Носенко, Е.В. Федотов, М.В. Даниленко // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – №8. – с. 43-48.

65. Харченко И.В. Исследование износа абразивов при шлифовании авиационных титановых сплавов: автореферат диссертации к.т.н.: 05.07.04. – Киев: 1974. – 32 с.

66. Зубарев Ю.М. Исследование процесса микрорезания единичными абразивными зёрнами при шлифовании сталей и сплавов / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев // Сб. науч. тр. «Физические процессы при резании металлов». – Волгоград: ВолгПИ, 1984. – с. 151-156.

67. Худобин Л.В. Исследование процесса микрорезания заготовок из пластичных материалов единичным абразивным зёрном / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин // Сб. статей междунар. науч.-техн. конф. «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы»: Шлифабразив – 2002; Волжский, 2002. – Волгоград, Волжский: Изд-во Волжск. инж.- строит. ин-та фил-ла ВолгГАСА, 2002. – с. 108-111.

68. Кошин А.А. Исследование режущих свойств абразивных зёрен методом микрорезания / А.А. Кошин, А.А. Дьяконов, В.Н. Кондаков // Тематич. сб. науч. тр. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – с. 13-17.

69. Юсупов Г.Х. Влияние физико-химических явлений на взаимосвязь абразивных зёрен с обрабатываемым материалом в процессе резания / Г.Х. Юсупов, С.А. Колегов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – №1(15). – с. 206-209.

70. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов / Л.Н. Филимонов. – М.-Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1973. – 136 с.

71. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

72. Худобин Л.В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин: Под ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.

73. Казаков С.Н. Выбор СОЖ и метода правки абразивного круга для врезного предварительного шлифования валов с плазменными покрытиями / С.Н. Казаков // Машиностроение (Минск), 1980. – №14. – с. 58-62

74. Худобин Л.В. Шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов с применением СОЖ / Л.В. Худобин, М.А. Белов // Вестник машиностроения. – 1986. – №3. – с. 48-52.

75. Киселев Е.С. Современные смазочно-охлаждающие жидкости для шлифования / Е.С. Киселев, А.Н. Унянин, С.З. Курзанова, М.А. Кузнецова // Вестник машиностроения. – 1996. – №7. – с. 30-34.

76. Трофимов А.С. Применение СОЖ на водной основе на операциях шлифования и хонингования / А.С. Трофимов, О.Л. Крамер, В.Ю. Шолом // Сб. науч. трудов УралНИИ абразивов и шлифования «Абразивное производство». – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – с. 69-71.

77. Трофимов А.С. Применение водорастворимых СОЖ при операциях абразивной обработки взамен масляных и керосиномасляных смесей / А.С. Трофимов, О.Л. Крамер, В.Ю. Шолом, Д.Г. Тюленев, С.Ф. Беляев, С.А. Данилов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – №12. – с. 18-21.

78. Резников А.Н. Интенсификация процесса шлифования путем введения ультразвуковых колебаний в СОЖ / А.Н. Резников, Б.М. Левин // Сб. науч. трудов «Современные методы повышения эффективности и качества механической обработки». – Куйбышев: КПИ, 1989. – с. 5-8.

79. Гурьянихин В.Ф. Эффективность шлифования титановых сплавов с применением СОЖ / В.Ф. Гурьянихин, Ю.М. Правиков, Н.М. Мужиков // Сб. науч. трудов «Смазочно-охлаждающие технологические средства в процессах обработки резанием». – Ульяновск: УлПИ, 1990. – с. 41-46.

80. Латышев В.Н. Повышение эффективности СОЖ: 2-е издание, переработанное и дополненное / В.Н. Латышев. – М.: Машиностроение, 1985. – 65 с.

81. Белоус В.И. Модифицирование смазочно-охлаждающих жидкостей при шлифовании труднообрабатываемых материалов / В.И. Белоус // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – №7(84). – с. 66-70.

82. Богомолов Н.И. Механизм действия поверхностно-активных веществ при тонкой абразивной обработке металлов / Н.И. Богомолов // Физико-химическая механика материалов. – Киев: Наукова думка, 1971. – №1. – Том 7. – с. 29-32.

83. Худобин Л.В. Выбор смазочно-охлаждающей жидкости при шлифовании заготовок из труднообрабатываемых материалов / Л.В. Худобин, Е.С. Киселев // Оптимшлифабразив-88: Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении: 3 Всесоюз. семинар, (7-11 сент. 1988 г.). Тезисы докладов. – Л.: 1988. – с.18-19.

84. Мустафаев Р.Ф. Выбор смазочно-охлаждающей жидкости для шлифования плазменных покрытий на железной основе / Р.Ф. Мустафаев, Н.С. Алексеев, С.В. Иванов, В.А. Капорин, А.В. Рязанов // Обработка металлов. – 2012. – №4(57). – с. 28-31.

85. Худобин Л.В. О механизме формирования и разрушения узлов схватывания металла с абразивными зёрнами / Л.В. Худобин, Ю.В. Полянсков // Физико-химическая механика материалов, 1973. – №3. – том 9. – с. 70-75.

86. Худобин Л.В. О сущности процесса засаливания и смазочном действии СОЖ при шлифовании / Л.В. Худобин // Вестник машиностроения, 1970. – №6. – с. 52-55.

87. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазного шлифования деталей с высокопрочными покрытиями / Г.В. Новиков, В.А. Андилахай, А.А. Машко, И.Н. Снисаренко // Вестник НТУ «ХПИ», 2009. – №2. – с. 53-60.

88. Муцянюк В.И. Коэффициент шлифования как критерий оценки процесса / В.И. Муцянюк, В.И. Островский // Труды ВНИИАШ, 1965. – №1. – с. 64-67.

89. Руднев А.В. Новые инструментальные наноматериалы и некоторые особенности их обрабатываемости / А.В. Руднев, Р.М. Стрельчук, М.Д. Узунян //

Тр. IV Всеросс. конф.-семинара «Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы», Сызрань, 22 мая 2009 г. – Самара: Изд-во СамГТУ, 2009.

90. Гасанов М.И. Определение условий повышения эффективности процесса шлифования / М.И. Гасанов, В.В. Нежебовский, А.В. Черненко // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: 2008. – №22. – с. 8-12.

91. Пилинский В.И. Расчёт усилий резания при скоростном шлифовании закалённых сталей / В.И. Пилинский // Станки и инструмент. – 1977. – №3. – с. 30-31.

92. Пилинский В.И. Расчёт сил резания, действующих на абразивное зерно при шлифовании / В.И. Пилинский // Сверхтвердые материалы. – 1980. – №5. – с. 64-68.

93. Артамонов А.Я. Влияние условий обработки на физико-механическое состояние металлокерамических материалов / А.Я. Артамонов. – Киев: Наукова думка, 1965. – 264 с.

94. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учеб. пособие. 11-е изд., перераб. – М.: Высшее образование, 2009. – 404 с.

95. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 392 с.

96. Ваксер Д.Б. Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании / Ваксер Д. Б. – М-Л.: Машиностроение, 1964. – 122 с.

97. Соловьев Б.М. Контроль качества восстановленных шеек чугуновых коленчатых валов / Б.М. Соловьев, И.П. Петрова // Механиз. и электриф. с/х. – 1990. – №9. – с. 45-47.

98. Корчак С.Н. Виды разрушения абразивных зерен при шлифовании и методы их определения / С.Н. Корчак, А.А. Кошин, В.И. Клочко, П.П. Переверзев // Абразивные инструменты с полимерными и керамическими связующими: процессы получения и применение. – Свердловск: Академия наук СССР, Уральский научный центр, 1982. – с. 34-44.

99. Розин С.К. Ударная вязкость как фактор, определяющий работоспособность абразивного материала в инструменте / С.К. Розин, Г.Б. Лурье // Науч.-техн. реферат. сборник «Абразивы». – М.: НИИМАШ, 1972. – №11. – с. 15-17.

100. Саютин Г.И. Выбор шлифовальных кругов / Г.И. Саютин. – М.: Машиностроение, 1976. – 64 с.

101. Барановский В.А. Методика определения хрупкости абразивных материалов / В.А. Барановский, В.Т. Ивашинников, Л.Г. Пицына // Науч.-техн. реферат. сб. «Абразивы». – М.: НИИМАШ, 1972. – №7. – с. 4-5.

102. Ивашинников В.Т. Выбор характеристики шлифовальных кругов для различных операций шлифования / В.Т. Ивашинников. – Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 1966. – 124 с.

103. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / Под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

104. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник. 2-е изд. перераб. и доп. / Под общ. ред. С.Г. Энтелеса и Э.М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.

105. Латышев В.Н. Трибология и проблемы СОТС / В.Н. Латышев, А.Г. Наумов // Инструмент и технологии, 2004. – №17-18. – с. 117-128.

106. Смагин Г.И. Эффективность новой смазывающе-охлаждающей жидкости на основе водорастворимого полимера / Г.И. Смагин, Н.Д. Яковлев, Р.Ф. Мустафаев // Межвуз. сб. науч. тр. «Оборудование и технология машиностроительного производства». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. – Выпуск 2. – с. 55-60.

107. Душко О.В. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на коэффициент трения абразива по металлу / О.В. Душко, В.М. Шумячер, И.В. Башкирцева // Технология машиностроения. – 2005. – №12. – с. 39-41.

108. Скрябин В.А. Воздействие смазочных сред при микрорезании поверхности металла выступами микрорельефа абразивных зерен / В.А. Скрябин,

О.Ф. Пшеничный // Межвуз. сб. науч. тр. «Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента». – Пенза: ПензПИ, 1986. – выпуск 14. – с. 91-95.

109. Ефимов В.В. О влиянии технологической среды на условия перехода от внешнего трения к микрорезанию / В.В. Ефимов // Трение и износ. – 1988. – том 9. – №1. – С.150-154.

110. Глаговский Б.А. Измерение составляющих силы резания при помощи динамометрических центров / Б.А. Глаговский, Л.Н. Филимонов // Абразивы и алмазы. – 1966. – №3(52). – с. 34-36.

111. Справочник технолога - машиностроителя / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – Том 2. – 496 с.

112. Алексеев Н.С. Исследование работы кругов при шлифовании микропористых покрытий / Н.С. Алексеев // Техника в с/х. – 2004. – №2. – С.27-29.

113. Алексеев Н.С. Влияние структуры кругов на некоторые показатели шлифования / Н.С. Алексеев // Автомобильная промышленность. – 2003. – №1. – с. 25-27.

114. Сире Ю.С. Обрабатываемость наплавов и покрытий алмазными кругами при торцовом и круглом шлифовании / Ю.С. Сире // Тезисы докл. всеросс. науч.-техн. конф. «Прогрессивные процессы шлифования, инструменты и его рациональная эксплуатация». – М.: 1986. – с. 124-127.

115. Кошин А.А. Исследование режущих свойств абразивных зёрен методом микрорезания / А.А. Кошин, А.А. Дьяконов, В.Н. Кондаков // Тематич. сб. науч. тр. Южно-Уральского государственного университета «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Челябинск: Юж.-Урал. гос. ун-т, 2006. – с. 13-17.

116. Алексеев Н.С. К вопросу определения износостойкости абразивных зёрен при микрорезании / Н.С. Алексеев, С.В. Иванов, В.А. Капорин // Матер. III всеросс. науч.-техн. конф. «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы». – Рубцовск: РИИ, 2013. – с. 64-67.

117. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2014661186, Российская Федерация. Анализ и обработка профилограмм и осциллограмм / М.Е. Торопов, В.А. Капорин, Н.С. Алексеев, С.В. Иванов, Е.А. Дудник; заявитель и правообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №2014618920; заявл. 4.09.14; зарегистр. 24.10.14 г.

118. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2014614259, Российская Федерация. Анализ и обработка профилограмм профилографа-профилометра АБРИС ПМ7 / М.Е. Торопов, В.А. Капорин, Н.С. Алексеев, С.В. Иванов, Е.А. Дудник; заявитель и правообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №2014612026; заявл. 12.03.14; зарегистр. 21.04.14 г.

119. Кашук В.А. Справочник шлифовщика / В.А. Кашук, А.Б. Верещагин – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.

120. Худобин Л.В. Анализ методов измерения размерного износа шлифовальных кругов / Л.В. Худобин // Ученые записки / Ульяновский педагогический институт. – Ульяновск: 1963. – том 18. – выпуск 1. – С.57-76.

121. Редозубов Ю.Б. Приспособление для измерения износа шлифовального круга / Ю.Б. Редозубов // Тр. Горьковского политехнического института «Вопросы технологии машиностроения». – Горький: 1973. – том 29. – выпуск 11. – с. 54-56.

122. Дубровский Ю.В. К вопросу об измерении износа шлифовальных кругов / Ю.В. Дубровский, И.В. Швецов, Е.Н. Гулецкий // Науч. тр. междунар. конф. «Сварка, электротермия и родственные технологии-2000». – Великий Новгород: Изд-во Новгород. гос. ун-та, 2000. – с. 50.

123. Воронцова А.Н. Исследование влияния величины действующей силы на износ шлифовального круга при шлифовании с постоянной силой / А.Н. Воронцова, В.В. Воронцов // Известия Волгоградского государственного технического университета «Прогрессивные технологии в машиностроении». – 2004. – №9. – выпуск 1. – с. 12-15.

124. Батаев В.А. Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей: Учеб. пособие / В.А. Батаев, А.А. Батаев, А.П. Алхимов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 220 с.

125. Металловедение и термическая обработка стали. В 3 томах / Под редакцией М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. Том 1. // Методы испытаний и исследования. В 2 кн. Кн. 2. – М.: Металлургия, 1991. – 304 с.

126. Корчак С.Н. Применение радиоактивных изотопов для выбора смазывающе-охлаждающей жидкости при шлифовании / С.Н. Корчак // Станки и инструмент. – 1960. – №10.

127. Худобин Л.В. Влияние смазочно-охлаждающей жидкости на засаливание шлифовальных кругов / Л.В. Худобин // Станки и инструмент. – 1969. – №9. – с. 37-40.

128. Подгорков В.В. Прибор для измерения засаливания абразивных инструментов / В.В. Подгорков, В.Н. Латышев, Н.М. Оношин, В.В. Семенов, Б.А. Хлуднев // Ученые записки «Вопросы техники и технологии». – Иваново: Ивановский педагогический институт. – 1973. – том 103. – выпуск 4. – с. 41-46.

129. Носенко В.А. Роль охлаждающих свойств среды в изнашивании абразива / В.А. Носенко, Г.А. Саютин // Науч.-техн. реферат. сб. «Абразивы». – 1979. – №3. – с. 6-7.

130. Башков В.М. Испытания режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1985. – 131 с.

131. Грановский Г.И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания материалов / Г.И. Грановский. – М.: Машиностроение, 1982. – 112 с.

132. Определение износа деталей машин за короткие периоды работы / Под ред. М.М. Хрущова. – М.: 1965. – 76 с.

133. Григорьев М.А. Износ и долговечность автомобильных двигателей / М.А. Григорьев, Н.Н. Пономарев. – М.: Машиностроение, 1976. – 248 с.

134. Исаев А.Э. Расчет толщины масляного слоя в подшипнике коленчатого вала / А.Э. Исаев, В.И. Чумак // Автомобильная промышленность. – 1972. – №5. – с. 4-5.

135. Сазонов А.А. Исследование и разработка технологии восстановления шеек чугунных коленчатых валов автотракторных двигателей: автореферат дисс. к.т.н. 05.20.03 / Сазонов Александр Алексеевич. - Челябинск: 1982. - 20 с.

136. Алексеев Н.С. Выбор абразивных материалов для шлифования плазменных покрытий на железной основе / Н.С. Алексеев, С.В. Иванов, Е.А. Бойко, В.А. Капорин // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – №5. – С.51-55.

137. Алексеев Н.С. Износ абразивных материалов при микрорезании плазменного покрытия на железной основе / Н.С. Алексеев, С.В. Иванов, Е.А. Бойко, В.А. Капорин, Н.В. Горлаченко // СТИН. – №11. – 2012. – с. 29-32.

138. Богомолов Н.И. Влияние адгезионных свойств абразива на силы шлифования / Н.И. Богомолов, Ю.А. Казимирчик, Г.И. Саютин, И.В. Харченко, Б.К. Кулик // Труды ВНИИАШ, 1973. – №14. – с. 53-60.

139. Алексеев Н.С. Влияние скорости микрорезания на износ абразивных материалов при обработке плазменных покрытий на железной основе / Н.С. Алексеев, С.В. Иванов, В.А. Капорин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2015. – №1. – с. 26-30.

140. Алексеев Н.С. Исследование влияния глубины резания на износ абразивных материалов при обработке плазменных покрытий / Н.С. Алексеев, В.А. Капорин, А.В. Рязанов, Ю.Н. Ромашова // Обработка металлов. – 2013. – №1(58). – с. 90-94.

141. Богомолов Н.И. О роли адгезии при взаимодействии абразива и металла / Н.И. Богомолов, Ю.А. Казимирчик, Г.И. Саютин, И.В. Харченко, Б.К. Кулик // Физико-химическая механика материалов. – 1971. – №3. – с. 42-45.

142. Алексеев Н.С. Шлифовальные материалы для абразивной обработки плазменных покрытий / Н.С. Алексеев, С.В. Иванов, Е.А. Бойко, В.А. Капорин // Справочник. Инженерный журнал. – 2012. – №4. – с. 3-7.

143. Алексеев Н.С. Влияние скорости шлифования плазменных покрытий на режущую способность кругов / Н.С. Алексеев, С.В. Иванов, В.А. Капорин // Техника в с/х. – 2014. – №5. – с. 26-30.

144. Алексеев Н.С. Влияние глубины резания на показатели шлифования плазменных покрытий / Н.С. Алексеев, В.А. Капорин, С.В. Иванов // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – том 116. – с.161-168.

145. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. – М.-Л.: Машиностроение. Ленинград. отд., 1979. – 248 с.

146. Алексеев Н.С. Выбор материала круга при шлифовании плазменных покрытий / Н.С. Алексеев, В.А. Капорин, С.В. Иванов // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – том 117. – С.211-219.

147. Алексеев Н.С. Динамика процесса шлифования плазменных покрытий в связи с «затуплением» шлифовальных кругов / Н.С. Алексеев, В.А. Капорин, С.В. Иванов // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – том 119. – с. 206-213.

148. Алексеев Н.С. Влияние СОЖ при шлифовании микропористых покрытий / Н.С. Алексеев, В.А. Капорин, С.В. Иванов // Матер. IV Всеросс. науч.-техн. конф. «Инженерные исследования и достижения – основа инновационного развития». – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2014. – с. 117-123.

149. Алексеев Н.С. Эффективность шлифования микропористых покрытий с применением СОЖ / Н.С. Алексеев, В.А. Капорин, С.В. Иванов // Обработка металлов. – 2015. – №2(67). – с. 6-16.

150. Пат. 2501847 Российская Федерация, МПК С 10 М 173/00 Смазочно-охлаждающая жидкость для шлифования плазменных покрытий на никелевой основе / Р.Ф. Мустафаев, Н.П. Саявина, Н.С. Алексеев, С.В. Иванов, В.А. Капорин; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - №2012115175/04; заявл. 16.04.2012, опубл. 20.12.2013, Бюл. №35.

151. Alekseev N.S. Wear of abrasives in the microcutting of an iron-based plasma coating / N.S. Alekseev, S.V. Ivanov, E.A. Boiko, V.A. Kaporin, N.V. Gorlachenko // Russian Engineering Research. – 2013. – Issue 6. – pp. 375-378.

152. Расчёты экономической эффективности новой техники: Справочник / Под общ. ред. К.М. Великанова. 2-е издание – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд., 1990. – 448 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П1

Результаты опытов по исследованию износостойкости корунда и карбида кремния при резании-царапании единичным абразивным зерном на скорости 35 м/с

Абразивный материал	Обрабатываемый материал	Номер опыта	1-я повторность		2-я повторность	
			Количество нанесенных рисок, шт	Длина пути резания, м	Количество нанесенных рисок, шт	Длина пути резания, м
Электрокорунд белый (24А)	Покрытие	1	2100	1,28	3178	1,45
		2	1400	0,74	2389	1,79
		3	984	0,28	2800	1,69
		4	2100	1,01	6300	2,16
		5	1874	0,89	735	0,40
		6	2100	0,98	2590	1,19
		7	1540	0,68	1300	0,99
		8	2100	0,99	1925	1,36
		9	2156	1,64	2974	1,75
		10	2660	2,00	2483	1,47
		11	2458	1,87	1987	1,50
		12	1730	0,98	2145	1,55
		13	2145	1,50	2412	1,32
Среднее значение для 24А по покрытию					2253	1,29
Электрокорунд белый (24А)	Сталь 45, закаленная	1	6528	3,87	7600	4,83
		2	2485	1,49	2380	1,39
		3	4725	3,31	5109	2,88
		4	5480	4,12	7805	5,90
		5	9250	6,42	8300	5,89
		6	12954	9,61	2100	1,05
		7	5200	3,32	9400	6,78
		8	4200	3,15	5250	3,50
		9	8943	6,46	6300	3,36
		10	5150	2,53	5150	2,66
		11	10500	6,50	3987	2,35
		12	13390	9,58	14600	10,44
		13	12780	8,36	14650	10,64
Среднее значение для 24А по стали 45, закаленной					7469,8	5,01
Карбид кремния зеленый (64С)	Покрытие	1	15750	11,68	16800	11,21
		2	14700	9,99	12587	8,33
		3	9650	6,79	10269	7,25
		4	17325	11,76	17536	12,93
		5	9297	6,81	21312	13,89
		6	7004	4,79	9600	7,33
		7	8028	5,69	19164	14,34
		8	6850	4,90	7540	5,13
		9	7890	5,37	15191	11,09
		10	8540	5,69	9587	7,17
		11	9456	6,23	7500	5,28
		12	10269	7,99	11360	8,67
		13	7450	4,95	9369	6,44

Продолжение таблицы П1

Среднее значение для 64С по покрытию					11539	8,14
Карбид кремния зеленый (64С)	Сталь 45, закаленная	1	2590	1,29	2660	1,90
		2	4200	2,33	2800	1,55
		3	1354	0,75	3850	1,94
		4	3553	2,27	2644	1,35
		5	1925	1,04	2100	1,56
		6	2800	1,59	4725	2,81
		7	2100	1,16	2188	1,07
		8	2100	0,93	1540	0,88
		9	1435	0,82	1383	0,82
		10	2608	1,19	2870	1,32
		11	4463	2,44	5528	2,81
		12	3654	1,92	2964	1,99
		13	3360	1,83	4515	2,54
Среднее значение для 64С по стали 45, закаленной					2920	1,62

Таблица П2

Статистические характеристики результатов опытов по исследованию износостойкости единичных зерен из корунда и карбида при резании-царапании на скорости 35 м/с

Абразивный материал	Обрабатываемый материал	Количество опытов n , шт	Среднеарифметическое значение \bar{x}	Среднеквадратическое отклонение S	Принятый критерий Стьюдента $t_{кр}$	Относительная ошибка Δx	Относительная ошибка, %	Критическое значение отсева грубых погрешностей $\tau_{кр}$	Расчетное значение крайнего элемента выборки отсева грубых погрешностей τ
Электрокорунд белый (24А)	Покрытие	26	1,29	0,48	2,06	0,19	14,94	2,105	2,122
	Сталь 45, закаленная	26	5,01	2,87	2,06	1,16	23,13	2,105	1,957
Карбид кремния зеленый (64С)	Покрытие	26	8,14	2,99	2,06	1,21	14,83	2,105	2,074
	Сталь 45, закаленная	26	1,62	0,64	2,06	0,26	15,85	2,105	1,874

Таблица ПЗ

Результаты исследования износостойкости единичных зерен из корунда и карбида в зависимости от скорости микрорезания покрытия

Абразивный материал	Скорость микрорезания, м/с	Номер опыта	1-я повторность		2-я повторность	
			Количество нанесенных рисок, шт	Длина пути резания, м	Количество нанесенных рисок, шт	Длина пути резания, м
Электрокорунд белый (24А)	10	1	1225	0,65	2100	1,01
		2	1890	1,13	2485	1,50
		3	595	0,43	2100	1,20
		4	2800	1,89	4380	2,56
		5	3150	1,94	4255	2,92
		6	1180	0,83	945	0,69
		7	1265	0,83	4356	2,46
		8	956	0,54	3560	1,86
		9	2450	1,41	3655	2,15
		10	1950	1,33	4150	2,35
		11	1050	0,54	4560	2,87
		12	1587	1,00	3048	1,86
		13	3606	2,23	3120	1,91
Среднее значение для 24А по покрытию					2555	1,54
Карбид кремния зеленый (64С)	10	1	8300	6,17	9550	7,33
		2	6300	4,75	7800	5,99
		3	12625	9,27	12800	9,82
		4	16800	11,87	18940	14,33
		5	12600	8,75	19985	13,51
		6	8750	6,00	17850	12,35
		7	10325	7,28	14689	10,06
		8	8430	6,05	16740	11,03
		9	6560	4,64	12300	8,71
		10	8400	6,11	15600	10,29
		11	9820	7,05	17510	13,33
		12	8635	6,04	12300	8,49
Среднее значение для 64С по покрытию					12234	8,72
Электрокорунд белый (24А)	20	1	3900	2,13	4300	2,51
		2	2450	1,31	2690	1,56
		3	1575	0,87	4200	2,33
		4	1260	0,70	4100	2,56
		5	3150	1,77	1400	0,87
		6	1715	1,01	2275	1,47
		7	1435	0,82	3640	2,24
		8	2013	1,10	2938	2,07
		9	788	0,52	1656	1,13
		10	1505	0,86	1418	0,79
		11	2910	1,74	3820	2,37
		12	1698	0,98	2048	1,17
		13	1838	1,24	2330	1,35
Среднее значение для 24А по покрытию					2425	1,44

Продолжение таблицы ПЗ

Карбид кремния зеленый (64С)	20	1	10500	7,59	15750	10,37
		2	19400	14,49	18350	13,91
		3	14477	9,86	12514	8,16
		4	5972	3,98	6300	4,26
		5	8156	5,94	13650	10,20
		6	6475	4,19	8420	5,87
		7	14700	10,65	13200	9,86
		8	6020	4,08	16740	12,76
		9	8750	6,51	9850	7,54
		10	5725	4,06	16300	10,85
		11	11271	7,80	15690	11,55
		12	10395	7,13	18430	13,48
Среднее значение для 64С по покрытию					11960	8,54
Электрокорунд 24А	35	-	См. приложение П1			
Среднее значение для 24А по покрытию					2253	1,29
Карбид кремния 64С	35	-	См. приложение П1			
Среднее значение для 64С по покрытию					11539	8,14
Электрокорунд белый (24А)	50	1	2030	1,02	1850	0,93
		2	1680	0,95	1450	0,78
		3	2180	1,32	2945	1,63
		4	1120	0,60	1750	0,86
		5	2484	1,20	2560	1,42
		6	928	0,54	1488	0,84
		7	2560	1,46	1925	1,26
		8	1435	0,82	2630	1,49
		9	2100	1,38	2100	1,16
		10	1985	1,30	1628	0,97
		11	2100	1,14	1830	1,01
		12	1715	1,07	1120	0,64
		13	2140	0,91	2645	1,56
Среднее значение для 24А по покрытию					1938	1,09
Карбид кремния зеленый (64С)	50	1	3750	2,52	2555	1,56
		2	6860	4,83	9830	6,33
		3	6300	4,73	10500	7,49
		4	8944	6,16	12650	9,52
		5	8925	6,35	17325	11,66
		6	11288	7,42	14300	9,36
		7	5250	3,59	12075	8,29
		8	4590	3,12	11480	7,63
		9	19950	12,86	21600	14,66
		10	11025	7,87	18300	13,62
		11	4500	3,03	7600	5,87
		12	8925	5,82	18710	12,33
		13	10990	7,06	6300	4,037
Среднее значение для 64С по покрытию					10559	7,22

Таблица П4

Статистические характеристики результатов опытов по исследованию износостойкости единичных зерен из корунда и карбида при резании-царапании в зависимости от скорости микрорезания

Абразивный материал	Скорость микрорезания, м/с	Количество опытов n , шт	Среднесрифметическое значение \bar{x}	Среднеквадратическое отклонение S	Принятый критерий Стьюдента $t_{кр}$	Относительная ошибка Δx	Относительная ошибка, %	Критическое значение отсева грубых погрешностей $\tau_{кр}$	Расчетное значение крайнего элемента выборки отсева грубых погрешностей τ
24А	10	26	1,54	0,76	2,06	0,31	10,75	2,105	1,823
64С	10	26	8,72	2,89	2,06	1,21	13,91	2,105	1,944
24А	20	26	1,44	0,62	2,06	0,25	17,46	2,105	1,794
64С	20	24	8,54	3,33	2,06	1,40	16,40	2,105	1,783
24А	35	См. приложение П2							
64С	35	См. приложение П2							
24А	50	26	1,09	0,30	2,06	0,12	11,26	2,105	1,819
64С	50	26	7,22	3,55	2,06	1,44	19,88	2,105	2,093

Таблица П5

Результаты исследования износостойкости единичных зерен из корунда и карбида в зависимости от глубины микрорезания

Абразивный материал	Глубина микрорезания, мкм	Номер опыта	1-я повторность		2-я повторность	
			Количество нанесенных рисок, шт	Длина пути резания, м	Количество нанесенных рисок, шт	Длина пути резания, м
Электрокорунд белый (24А)	5	1	1051	0,57	2360	1,28
		2	2998	1,62	1981	1,01
		3	1131	0,62	3432	1,64
		4	3624	1,93	3120	1,69
		5	1054	0,54	1003	0,56
		6	933	0,51	1706	0,88
		7	1846	0,96	3082	1,71
		8	1702	0,90	2487	1,30
		9	1134	0,61	2365	1,27
		10	2558	1,42	3754	1,94
		11	2897	1,50	1458	0,75
		12	2756	1,47	2194	1,21
		13	3875	2,17	2256	1,20
Среднее значение для 24А по покрытию					2260	1,20
Карбид кремния зеленый (64С)	5	1	4698	2,47	3698	1,85
		2	3833	2,02	5987	2,93
		3	7720	3,99	4087	2,16
		4	11500	6,20	10258	5,32
		5	4598	2,56	7265	3,81
		6	7554	3,92	11698	6,36
		7	10100	5,37	11850	6,27
		8	9450	4,98	5875	3,05
		9	8256	4,37	12569	6,82
		10	4697	2,62	6620	3,63
		11	4256	2,19	5210	2,85
		12	6987	3,29	7269	3,95
		13	6140	3,32	8500	4,53
Среднее значение для 64С по покрытию					7334	3,88
Электрокорунд белый (24А)	10	-	См. приложение П1			
Среднее значение для 24А по покрытию					2253	1,29
Карбид кремния зеленый (64С)	10	-	См. приложение П1			
Среднее значение для 64С по покрытию					11539	8,14

Продолжение таблицы П5

Электроко- рунд белый (24А)	15	1	2100	1,05	2423	1,75
		2	2123	1,63	1796	0,87
		3	1820	0,81	1715	0,92
		4	2450	1,61	4655	1,89
		5	1405	0,99	2980	1,65
		6	1890	0,84	2458	1,61
		7	2458	1,48	3475	1,96
		8	1980	1,27	3215	1,83
		9	2698	1,13	2450	1,23
		10	2985	1,26	1905	1,58
		11	2200	1,07	3001	1,99
		12	3256	1,71	2568	1,18
		13	1458	0,62	2480	1,16
Среднее значение для 24А по покрытию					2459	1,35
Карбид кремния зеленый (64С)	15	1	21950	20,50	24900	22,02
		2	15750	14,22	27587	20,75
		3	9905	8,78	16987	12,58
		4	11700	9,09	21325	16,35
		5	26050	23,54	29400	24,12
		6	11520	9,21	16980	12,84
		7	21320	19,43	24800	21,35
		8	10987	8,95	19640	14,47
		9	24520	21,48	29541	25,48
		10	16408	14,99	22698	18,78
		11	13870	12,96	8874	7,305
		12	10752	8,27	13505	11,43
		13	9875	7,40	12325	8,33
Среднее значение для 64С по покрытию					18199	15,18
Электроко- рунд белый (24А)	20	1	3058	1,38	2400	1,13
		2	1587	1,60	1923	1,86
		3	1987	1,41	1698	0,78
		4	1798	0,84	3340	1,65
		5	771	0,71	3080	1,27
		6	1541	0,88	1890	1,93
		7	3655	1,92	2689	1,41
		8	2206	1,23	3469	1,43
		9	2458	1,13	2798	1,96
		10	2204	0,99	3687	1,60
		11	2960	1,22	1834	1,73
		12	3852	1,68	3987	1,87
		13	2800	1,36	3698	1,58
Среднее значение для 24А по покрытию					2591	1,41
Карбид кремния зеленый (64С)	20	1	18462	16,76	38850	36,59
		2	26587	26,27	39758	35,85
		3	15690	15,75	31256	27,84
		4	19700	18,65	36900	35,85
		5	18300	15,34	37854	36,87
		6	25402	20,66	36984	31,74

Продолжение таблицы П5

		7	33114	31,86	39874	38,73
		8	24587	22,86	42156	39,73
		9	22015	20,87	23945	20,73
		10	22369	20,87	36874	36,87
		11	25426	20,54	39851	35,89
		12	30269	27,85	36987	34,90
		13	19364	15,86	33800	30,84
Среднее значение для 64С по покрытию					29861	27,56

Таблица П6

Статистические характеристики результатов опытов по исследованию износостойкости единичных зерен из корунда и карбида при резании-царапании в зависимости от глубины микрорезания

Абразивный материал	Глубина микрорезания, мкм	Количество опытов n , шт	Среднеарифметическое значение \bar{x}	Среднеквадратическое отклонение S	Принятый критерий Стьюдента $t_{кр}$	Относительная ошибка Δx	Относительная ошибка, %	Критическое значение отсева грубых погрешностей $\tau_{кр}$	Расчетное значение крайнего элемента выборки отсева грубых погрешностей τ
24А	5	26	1,20	0,49	2,06	0,198	16,47	2,105	1,962
64С	5	26	3,87	1,47	2,06	0,59	15,34	2,105	2,001
24А	10	См. приложение П2							
64С	10	См. приложение П2							
24А	15	26	1,35	0,39	2,06	0,159	11,81	2,105	1,859
64С	15	26	15,18	5,91	2,06	2,389	15,74	2,105	1,742
24А	20	26	1,41	0,25	2,06	0,151	10,75	2,105	1,847
64С	20	26	27,56	8,28	2,06	3,345	12,13	2,105	1,476

Таблица П7

Результаты исследования износостойкости единичных зерен из электрокорундов и карбидов кремния разных модификаций при микрорезании покрытия со скоростью 35 м/с

Абразивный материал	Номер опыта	1-я повторность		2-я повторность	
		Количество нанесенных рисок, шт	Длина пути резания, м	Количество нанесенных рисок, шт	Длина пути резания, м
Электрокорунд нормальный (14А)	1	1314	0,75	1401	0,77
	2	1505	0,86	2756	1,75
	3	1715	0,98	2450	1,33
	4	1855	1,11	3315	2,16
	5	2380	1,43	3569	1,91
	6	1458	0,91	987	0,49
	7	2145	1,58	2100	0,99
	8	2005	1,05	2369	1,32
	9	1500	0,88	2360	1,17
	10	1987	1,35	2547	1,88
	11	3580	1,95	2205	0,87
	12	2547	1,49	2900	1,12
	13	2360	1,31	2150	1,20
Среднее значение для 14А по покрытию				2210	1,25
Электрокорунд хромотитанистый (95А)	1	4550	2,37	8925	3,43
	2	3955	2,21	4200	2,69
	3	4200	2,05	3150	1,66
	4	2625	1,31	3678	2,57
	5	2520	1,31	3275	2,24
	6	4225	3,07	2278	1,53
	7	4100	3,19	6650	2,74
	8	5430	2,90	5540	2,36
	9	3825	1,70	4200	2,36
	10	3956	2,94	3550	2,37
	11	2460	1,39	2238	1,63
	12	3680	2,48	4338	2,36
	13	2525	1,67	4250	2,23
Среднее значение для 95А по покрытию				4012	2,26
Электрокорунд белый (24А)	-	См. приложение П1			
Среднее значение для 24А по покрытию				2253	1,29
Карбид кремния зеленый (64С)	-	См. приложение П1			
Среднее значение для 64С по покрытию				11539	8,14

Продолжение таблицы П7

Карбид кремния черный (54С)	1	4400	3,07	6370	4,30
	2	10698	7,85	13412	9,85
	3	3550	2,39	12800	8,86
	4	17525	11,40	16804	11,48
	5	19050	12,47	17517	11,85
	6	5140	3,18	9450	7,10
	7	3150	2,17	11200	7,42
	8	6987	4,20	10987	8,55
	9	5410	3,86	8730	6,58
	10	5500	3,29	12984	9,00
	11	9548	5,69	14297	9,85
	12	7900	5,58	13690	10,38
	13	8245	5,38	9540	6,97
Среднее значение для 54С по покрытию				10188	7,03

Таблица П8

Результаты исследования износостойкости единичных зерен из алмаза и эльбора при микрорезании покрытия со скоростью 35 м/с

Абразивный материал	Обрабатываемый материал	Номер опыта	Количество нанесенных рисков, шт	Износ абразивного зерна, мкм	Длина последней риски	Длина пути резания по формуле (3.1), м	Теоретическая длина пути резания по формуле (3.3), м
Алмаз синтетический (АС4)	Покрытие	1	94500	3,27	1,31	137,25	420,4
		2	94500	2,70	1,36	139,80	518,1
		3	94500	2,55	1,38	140,45	551,2
Среднее значение для АС4							496,6
Эльбор поликристаллический (ЛКВ40)	Покрытие ПЖ	1	94500	5,70	1,05	124,82	219,07
		2	94500	6,78	0,90	118,13	174,13
		3	94500	6,33	0,97	121,08	191,43
Среднее значение для ЛКВ40							194,8

Таблица П9

Статистические характеристики результатов опытов по исследованию износостойкости единичных зерен из электрокорундов и карбидов кремния

Абразивный материал	Количество опытов n , шт	Среднеарифметическое значение \bar{x}	Среднеквадратическое отклонение S	Принятый критерий Стьюдента $t_{кр}$	Относительная ошибка Δx	Относительная ошибка, %	Критическое значение отсева грубых погрешностей $t_{кр}$	Расчетное значение крайнего элемента выборки отсева грубых погрешностей τ
14А	26	1,25	0,42	2,06	0,17	13,59	2,105	2,141
95А	26	2,26	0,60	2,06	0,24	10,68	2,105	1,958
24А	См. приложение П2							
64С	См. приложение П2							
54С	26	7,03	3,17	2,06	1,28	18,22	2,105	1,716

Таблица П10

Усредненные результаты круглого продольного шлифования плазменного покрытия кругами из электрокорунда и карбида кремния на разных скоростях

Шлифовальный круг	Стойкость T , мин	Объемный съём металла Q_m , мм ³	Объемный износ круга Q_a , мм ³	Удельная производительность q , мм ³ /мм ³	Тангенциальная сила резания P_z , Н	Радиальная сила резания P_y , Н
<i>Скорость резания 10 м/с</i>						
24AF46N6V	58,2	5932,74	722,5	8,26	46,44	98,57
64CF46N6V	209	23060,1	730,7	31,6	39,66	99,28
<i>Скорость резания 20 м/с</i>						
24AF46N6V	26,3	5524,49	749,1	7,42	50,38	105,6
64CF46N6V	101	22250,4	654,6	34	39,83	101,1
<i>Скорость резания 35 м/с</i>						
24AF46N6V	13,90	5156,07	761,9	6,83	49,05	110,7
64CF46N6V	56,10	22875,6	646,4	35,6	39,79	102,8
<i>Скорость резания 50 м/с</i>						
24AF46N6V	8,95	4262,87	695,1	6,14	51,4	111,6
64CF46N6V	35,8	18965,1	612	31	44,78	113,5

Продолжение таблицы П10

Шлифовальный круг	Коэффициент режущей способности K_p , мм ³ /мин Н	Удельная мощность шлифования $N_{уд}$, Вт мин/мм ³	Шероховатость образца R_a , мкм	Овальность образца, мм	Конусность образца, мм	Интенсивность засаливания кругов S_z , мг/см ² ·мин
<i>Скорость резания 10 м/с</i>						
24AF46N6V	1,0	45	0,386	0,007	0,008	$14 \cdot 10^{-4}$
64CF46N6V	1,1	35	0,447	0,007	0,007	$3 \cdot 10^{-4}$
<i>Скорость резания 20 м/с</i>						
24AF46N6V	2,0	47	0,282	0,007	0,008	$28 \cdot 10^{-4}$
64CF46N6V	2,2	35	0,372	0,007	0,008	$3,5 \cdot 10^{-4}$
<i>Скорость резания 35 м/с</i>						
24AF46N6V	3,4	45	0,213	0,006	0,008	$49 \cdot 10^{-4}$
64CF46N6V	4,0	33	0,312	0,007	0,005	$4,6 \cdot 10^{-4}$
<i>Скорость резания 50 м/с</i>						
24AF46N6V	4,3	47	0,151	0,007	0,008	$69 \cdot 10^{-4}$
64CF46N6V	4,7	37	0,215	0,006	0,006	$6,1 \cdot 10^{-4}$

Таблица П11

Усредненные результаты круглого продольного шлифования плазменного покрытия кругами из электрокорунда и карбида кремния на разных глубинах

Шлифовальный круг	Стойкость T , мин	Объемный съём металла Q_m , мм ³	Объемный износ круга Q_a , мм ³	Удельная производительность q , мм ³ /мм ³	Тангенциальная сила резания P_z , Н	Радиальная сила резания P_y , Н
<i>Глубина резания 5 мкм</i>						
24AF46N6V	28,8	5472,78	727,6	7,57	28,68	59,8
64CF46N6V	114	23260,8	756,6	31,1	31,03	74,84
<i>Глубина резания 10 мкм</i>						
24AF46N6V	13,90	5156,07	761,9	6,83	49,05	110,7
64CF46N6V	56,10	22875,6	646,4	35,6	39,79	102,8
<i>Глубина резания 15 мкм</i>						
24AF46N6V	9,11	4978,26	816,3	6,21	60,14	133,1
64CF46N6V	33,3	20493,1	502	41,1	73,09	156,8
<i>Глубина резания 20 мкм</i>						
24AF46N6V	5,82	4186,4	843,6	5,01	79,88	171,1
64CF46N6V	17,7	14935,1	321,9	46,3	125,8	221,5

Продолжение таблицы П11

Шлифовальный круг	Коэффициент режущей способности K_p , мм ³ /мин Н	Удельная мощность шлифования $N_{уд}$, Вт мин/мм ³	Шероховатость образца R_a , мкм	Овальность образца, мм	Конусность образца, мм	Интенсивность засаливания кругов C_z , мг/см ² ·мин
<i>Глубина резания 5 мкм</i>						
24AF46N6V	3,2	52	0,127	0,005	0,065	$31 \cdot 10^{-4}$
64CF46N6V	3,4	51	0,220	0,007	0,070	$1,8 \cdot 10^{-4}$
<i>Глубина резания 10 мкм</i>						
24AF46N6V	3,4	45	0,213	0,006	0,008	$49 \cdot 10^{-4}$
64CF46N6V	4,0	41	0,312	0,007	0,005	$4,6 \cdot 10^{-4}$
<i>Глубина резания 15 мкм</i>						
24AF46N6V	4,1	38	0,205	0,007	0,008	$61 \cdot 10^{-4}$
64CF46N6V	5,1	36	0,261	0,007	0,006	$11 \cdot 10^{-4}$
<i>Глубина резания 20 мкм</i>						
24AF46N6V	4,2	35	0,192	0,008	0,009	$52 \cdot 10^{-4}$
64CF46N6V	5,8	30	0,246	0,008	0,008	$23 \cdot 10^{-4}$

Таблица П12

Усредненные результаты круглого продольного шлифования покрытия кругами из разных абразивных материалов на скорости 35 м/с

Шлифовальный круг	Обрабатываемый материал	Стойкость T , мин	Объемный съём металла Q_m , мм ³	Объемный износ круга Q_a , мм ³	Удельная производительность q , мм ³ / мм ³	Тангенциальная сила резания P_z , Н	Радиальная сила резания P_y , Н
24AF46N6V	Покрытие	13,9	5156,07	761,9	6,83	49,05	110,7
	Сталь 45	44,4	17668,1	423,9	43,8	56,42	90,54
14AF46N6V	Покрытие	13,1	4459,74	860,8	5,21	57,04	116,6
95AF46N6V	Покрытие	25,5	9752,92	935,9	10,5	58,55	117,1
64CF46N6V	Покрытие	56,1	22875,6	646,4	35,6	39,79	102,8
	Сталь 45	10,9	4451,73	347,3	12,8	58,98	90,15
54CF46N6V	Покрытие	50	20270,3	722,7	28,3	40,21	104,2
ЛКВ40 250/200КСТ2	Покрытие	1507	576190	770	748	19,49	34,38
АС4 250/200КСТ2	Покрытие	3824	1422997	941,7	1517	6,717	11,34

Продолжение таблицы П12

Шлифовальный круг	Обрабатываемый материал	Коэффициент режущей способности K_r , мм ³ /мин Н	Удельная мощность шлифования $N_{уд}$, Вт мин/мм ³	Шероховатость образца R_a , мкм	Овальность образца, мм	Конусность образца, мм	Степень засаливания шлифовальных кругов C_3 , мг/см ²
24AF46N6V	Покрытие	3,4	45	0,213	0,006	0,008	0,068
	Сталь 45	4,4	49	0,355	0,006	0,007	0,251
14AF46N6V	Покрытие	2,9	58	0,215	0,008	0,009	0,075
95AF46N6V	Покрытие	3,3	53	0,197	0,009	0,010	0,08
64CF46N6V	Покрытие	4,0	33	0,312	0,007	0,005	0,026
	Сталь 45	4,5	50	0,168	0,008	0,007	0,139
54CF46N6V	Покрытие	3,9	34	0,231	0,009	0,010	0,033
ЛКВ40 250/200КСТ2	Покрытие	11,1	18	0,456	0,008	0,008	0,327
АС4 250/200КСТ2	Покрытие	33,0	6	0,982	0,009	0,008	0,251

Таблица П13

Усредненные результаты круглого врезного шлифования покрытия кругами из разных абразивных материалов на скорости 35 м/с

Шлифовальный круг	Обрабатываемый материал	Стойкость T , мин	Объемный съём металла Q_m , мм ³	Объемный износ круга Q_a , мм ³	Удельная производительность q , мм ³ /мм ³	Тангенциальная сила резания P_z , Н	Радиальная сила резания P_y , Н
24AF46N6V	Покрытие	2	821,9	168,3	4,96	63,37	96,6
	Сталь 45	52	23973,7	278,1	86	55,22	69,51
14AF46N6V	Покрытие	2	925,8	193,9	4,92	71,18	106
95AF46N6V	Покрытие	3	1386,8	219,5	6,47	70,71	109,2
64CF46N6V	Покрытие	14	6644,6	141,6	50,2	87,91	150,4
	Сталь 45	14	6431,6	232,9	27,7	113,8	148,5
54CF46N6V	Покрытие	12	5505,4	184,5	31,2	90,88	151,8
ЛКВ40 250/200КСТ2	Покрытие	246	111558	252,2	443	31,65	47,73
АС4 250/200КСТ2	Покрытие	568	262899	425,3	617	9,709	19,86

Продолжение таблицы П13

Шлифовальный круг	Обрабатываемый материал	Коэффициент режущей способности K_r , мм ³ /мин Н	Удельная мощность шлифования $N_{уд}$, Вт мин/мм ³	Шероховатость образца R_a , мкм	Овальность образца, мм	Конусность образца, мм	Степень засаливания шлифовальных кругов C_3 , мг/см ²
24AF46N6V	Покрытие	4,3	63	0,128	0,006	0,007	0,032
	Сталь 45	6,8	41	0,286	0,004	0,008	1,284
14AF46N6V	Покрытие	4,4	68	0,148	0,005	0,009	0,036
95AF46N6V	Покрытие	4,2	60	0,169	0,005	0,009	0,021
64CF46N6V	Покрытие	3,2	53	0,119	0,005	0,006	0,086
	Сталь 45	3,0	85	0,115	0,006	0,008	0,687
54CF46N6V	Покрытие	3,0	53	0,136	0,006	0,010	0,11
ЛКВ40 250/200КСТ2	Покрытие	9,5	24	0,314	0,003	0,010	0,472
АС4 250/200КСТ2	Покрытие	23,2	7	0,767	0,004	0,009	0,317

Таблица П14

Результаты износных испытаний эталонного образца из чугунного коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53А и плазменно-напыленных образцов (изнашивание в чистом масле)

Показатели	Путь трения, м			
	7500	15000	22500	30000
Эталонный образец из чугуна				
1. Масса образца до испытания, г	165,1965	165,1930	165,1910	165,1900
2. Масса образца после испытания, г	165,1930	165,1930	165,1910	165,1900
3. Износ образца, г	0,0055	0,0020	0,0010	0,0010
4. Масса контрообразца до испытания, г	2,8335	2,7397	2,7360	2,7310
5. Масса контрообразца после испытания, г	2,7537	2,7360	2,7310	2,7280
6. Износ контрообразца, г	0,0798	0,0037	0,0050	0,0030
7. Момент трения, кгс·см	0	0	0	0
8. Температура, °С	31	32	32	34
9. Скорость изнашивания образца, мг/км	0,73	0,26	0,13	0,13
10. Скорость изнашивания контрообразца, мг/км	10,65	0,49	0,67	0,4
Плазменно-напыленный образец, обработанный по обычной технологии				
1. Масса образца до испытания, г	190,3823	190,3797	190,3772	190,3747
2. Масса образца после испытания, г	190,3797	190,3772	190,3747	190,3722
3. Износ образца, г	0,0040	0,0015	0,0015	0,0015
4. Масса контрообразца до испытания, г	2,0975	2,0225	2,0200	2,0170
5. Масса контрообразца после испытания, г	2,0225	2,0200	2,0170	2,0140
6. Износ контрообразца, г	0,0710	0,0025	0,0030	0,0030
7. Момент трения, кгс·см	0	0	0	0
8. Температура, °С	35	35	35	35
9. Скорость изнашивания образца, мг/км	0,53	0,2	0,2	0,2
10. Скорость изнашивания контрообразца, мг/км	9,47	0,33	0,4	0,4
Плазменно-напыленный образец, обработанный кругом 64CF46N6V				
1. Масса образца до испытания, г	183,8727	183,8712	183,8697	183,8682
2. Масса образца после испытания, г	183,8712	183,8697	183,8682	183,8672
3. Износ образца, г	0,0030	0,0015	0,0010	0,0010
4. Масса контрообразца до испытания, г	2,3517	2,2967	2,2942	2,2927
5. Масса контрообразца после испытания, г	2,2967	2,2942	2,2927	2,2512
6. Износ контрообразца, г	0,0570	0,0025	0,0015	0,0015
7. Момент трения, кгс·см	0	0	0	0
8. Температура, °С	30	30	30	30
9. Скорость изнашивания образца, мг/км	0,4	0,2	0,13	0,13
10. Скорость изнашивания контрообразца, мг/км	7,6	0,33	0,2	0,2

Таблица П15

Результаты производственных испытаний шлифовальных кругов и смазочно-охлаждающих жидкостей на ремонтном предприятии ООО «ПлазмаТех» (г. Барнаул) при обработке плазменных покрытий на железной основе

№ опыта	Стойкость кругов T , мин	Объёмный съём металла Q_m , мм ³	Радиальный износ кругов ΔR , мкм	Объёмный износ круга Q_a , мм ³	Удельная производительность q , мм ³ / мм ³	Шероховатость обработанных шеек R_a , мкм	Овальность обработанных шеек, мм
<i>Испытание круга 24AF46N6V совместно с серийной СОЖ «Экол-3»</i>							
1	9,12	5370	12,5	441	12,2	0,32	0,005
2	7,90	4960	13,5	476	10,4	0,32	0,0075
3	9,10	5150	15,5	547	9,4	0,40	0,01
4	8,12	4730	11,5	406	11,6	0,40	0,005
<i>Испытание круга 64CF46N6V совместно с экспериментальной СОЖ №12</i>							
1	32,30	21350	10,5	371	57,6	0,40	0,005
2	31,52	21430	11,5	406	52,7	0,63	0,0075
3	33,16	23300	14,0	494	47,1	0,40	0,01

Приложение П16

Акт внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ на предприятии ООО «ПлазмаТех» г. Барнаул

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. заместителя директора по научной работе «Рубцовского индустриального института»


 Севастьянова С.К.
 « 07 » марта 2018 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «ПлазмаТех»


 Сигарёва М.В.
 « 07 » марта 2018 г.



А К Т

внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ

Мы, ниже подписавшиеся, представители «Рубцовского индустриального института» доцент Алексеев Н.С., инженер Иванов С.В., инженер Капорин В.А. с одной стороны и представитель ООО «ПлазмаТех» (г. Барнаул) мастер Сафронов Н.П. с другой стороны составили настоящий акт в том, что в марте 2018 г. года в результате научно-исследовательских работ внедрен в производство абразивный круг формы 1 900x25x305 ГОСТ P52781-2007 с характеристикой 64CF46N6V на операциях черного и чистового шлифования плазменно-напыленных шеек коленчатых валов автотракторных двигателей на станке 3А423. Произведено так же внедрение экспериментального состава смазочно-охлаждающей жидкости марки «ЭПМ-1шт».

Технико-экономические показатели внедрения

1. Увеличена производительность обработки на 25%;
2. Снижено штучное время операции шлифования шеек коленчатых валов на 35%;
3. Снижены затраты на режущий инструмент в 2 раза;
4. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения указанных шлифовального круга и СОЖ для обработки плазменно-напыленных шеек коленчатого вала двигателя ЯМЗ-240 при программе 1000 валов в год составил 142728 (сто сорок две тысячи семь сот двадцать восемь) рублей.

Представители «Рубцовского индустриального института»

 Н.С. Алексеев

 В.А. Капорин

 С.В. Иванов

**Представитель
ООО «ПлазмаТех»**

 Н.П. Сафронов

Приложение П17

Акт о результатах испытаний восстановленных коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53А в условиях рядовой эксплуатации в КФХ «Егорова» Егорьевского района Алтайского края

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор КФХ «Егорова»


Егорова Г.Г.
« 05 » апреля 2019 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «ПлазмаТех»


Сигарёва М.В.
« 05 » апреля 2019 г.



А К Т

о результатах испытаний восстановленных коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53А в условиях рядовой эксплуатации

Мы, нижеподписавшиеся, инженер КФХ «Егорова» Егоров А.В. и представитель «Рубцовского индустриального института» инженер Капорин В.А. составили настоящий акт о нижеследующем:

В целях проверки и сравнения качества и долговечности восстановленных плазменным напылением по технологии ООО «ПлазмаТех» и обработанных по технологии «Рубцовского индустриального института» коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53А были установлены в ремонтируемые двигатели два вала с плазменно-напыленными коренными и шатунными шейками и два вала с коренными и шатунными шейками перешлифованными на ремонтные размеры.

Двигатели с установленными коленчатыми валами отправлены на испытания в КФХ «Егорова» Егорьевского района Алтайского края.

В результате совместных наблюдений за испытываемыми двигателями установлены величины износов шеек валов и пробег автомобилей на которых испытывались коленчатые валы.

За весь период эксплуатации пробег автомобилей с испытываемыми валами составил в среднем 40 тыс. км. Величина среднего износа шеек испытываемых валов, отнесённая к 1000 км пробега автомобиля составила:


а) коренные плазменно-напылённые шейки - 2,13 мкм;

б) коренные шейки, перешлифованные на второй ремонтный размер – 2,61 мкм.

Коленчатые валы продолжают успешно эксплуатироваться в КФХ «Егорова» Егорьевского района Алтайского края. Наблюдения за валами продолжаются.

Представитель КФХ «Егорова»

Представитель «Рубцовского
индустриального института»


А.В. Егоров


В.А. Капорин

Коллектив авторов
Алексеев Николай Сергеевич
Капорин Владимир Анатольевич

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАЛОВ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ
ПРИ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МИКРОПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ
НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ**

Монография

Дизайн обложки В.А. Капорин

Режим доступа:

<https://www.rubinst.ru/sites/default/files/files/science/alekseev-n-s-kaporin-v-a-sovershenstvovanie-tekhnologii-vosstanovleniya-valov-selskohozyajstvennoj-tekhniki.pdf>

