

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Горшков Илья Валерьевич



ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ПЛОСКИХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ СЕЛЕКТИВНОГО КОМПЛЕКТОВАНИЯ
МНОГОЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКОЙ

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Максаров В.В.

Санкт-Петербург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ПЛОСКИХ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	11
1.1 Особенности изготовления направляющих станин металлорежущих станков	12
1.2 Материалы, применяемые для изготовления направляющих	24
1.3 Структурные особенности, механические и технологические свойства чугунов	36
1.4 Технологическое обеспечение шероховатости и точности изготовления направляющих станин металлорежущих станков	39
1.5 Выводы по первой главе.....	42
ГЛАВА 2 ЗАВИСИМОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРЕЗ, ОСНАЩЁННЫХ КЕРАМИЧЕСКИМИ РЕЖУЩИМИ ПЛАСТИНАМИ ОТ МИКРОСТРУКТУРЫ РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКИ	45
2.1 Виды режущей керамики и особенности её применения	45
2.2 Способы получения режущей керамики.....	52
2.3 Микроструктура режущей керамики	53
2.4 Способы определения удельного электрического сопротивления оксидно-карбидной режущей керамики.....	58
2.5 Выводы по второй главе.....	66
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ С УЧЁТОМ ОСНАЩЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА КЕРАМИЧЕСКИМИ ПЛАСТИНАМИ ПО СЕЛЕКТИВНОМУ МЕТОДУ	68
3.1 Оценка динамических параметров технологической системы фрезерной обработки плоских поверхностей с целью совершенствования работоспособности режущей керамики	70
3.2 Моделирование виброустойчивости технологической системы механической обработки при торцевой фрезерной обработке высокоточных плоских контактных поверхностей.....	80

3.3 Выводы по третьей главе.....	92
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СЕЛЕКТИВНОГО ОСНАЩЕНИЯ МНОГОЛЕЗВИЙНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ.....	94
4.1 Экспериментальные исследования влияния селективного метода оснащения многолезвийного режущего инструмента при фрезеровании на шероховатость обрабатываемой поверхности.....	94
4.2 Экспериментальные исследования влияния селективного метода оснащения многолезвийного режущего инструмента при фрезеровании на динамическую устойчивость процесса	99
4.3 Рекомендации по повышению качества изготовления высокоточных плоских поверхностей на основе селективного комплектования многолезвийного инструмента режущей керамикой	111
4.4 Выводы по четвёртой главе.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	118
ПРИЛОЖЕНИЕ А Технические характеристики приборов	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение	133
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о промышленном опробовании селективного метода комплектования многолезвийного инструмента	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт о промышленном опробовании селективного метода комплектования многолезвийного инструмента	136

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Плоские контактные поверхности, такие как направляющие технологического оборудования, широко распространены в различных агрегатах и узлах машин. К таким элементам конструкции предъявляются высокие требования по качеству обработки и геометрической точности. В настоящее время такие поверхности обрабатываются с помощью шлифования. Это трудоёмкий вид механической обработки, требующий особой подготовки помещения и оборудования. При этом может возникать коробление заготовки и такие дефекты, как прижоги и шаржирование. Решить данные проблемы позволяет переход к высокоскоростной фрезерной обработке с использованием многолезвийного инструмента, оснащённого керамическими режущими пластинами. Этот метод обеспечивает наилучшее качество и геометрическую точность обработки поверхности при максимально высокой производительности, однако, режущая керамика имеет такие недостатки, как низкая трещиностойкость и разнородность структурных параметров режущих пластин одной марки, из-за чего инструмент не обеспечивает стабильную работу при возникновении ударных нагрузок, что не позволяет широко использовать данный метод.

В связи с этим возникает необходимость изучения свойств керамического инструмента для создания эффективной технологии обеспечения качества обработки плоских контактных поверхностей с использованием керамических режущих пластин.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам торцевой обработки поверхностей многолезвийным инструментом были посвящены работы Андреева В.Н., Бурмистрова Е.В., Жаркова И.Г., Кудинова В.А., Маргулеса А.У., Сулова А.Г., Свирина В.М. и др.

Изучению методов и способов механической обработки плоских поверхностей деталей фрезерованием торцевой фрезой с использованием сменных многогранных пластин (СМП) из режущей керамики посвящен ряд фундаментальных исследований Болдырева А.И., Гудименко Н.Н., Дручилина

А.А., Жаркова И.Г., Журавлева М.П., Захаренко И.Л., Исаева А.В., Китайгородского И.И., Колермана Р., Мальцева О.С., Машкина Г.И., Поздняк Г.Г., Сулова А.Г. и др.

Применение режущей керамики для торцевого фрезерования изделий из чугуна рассматривается в трудах Андреева В.Н., Бакланова Е.И., Блюма Г., Деркачева Н.И., Журавлева М.П., Мамкина Г.И., Максимова А.В., Седова Е.В.

Так в работе Андреева В.Н. и Седова Е.В. «Обработка серого чугуна торцевыми фрезами с минералокерамическими пластинами» приведены результаты экспериментов по использованию режущей керамики при торцевом фрезеровании чугуна СЧ-20 (НВ197...207), которые показали, что применение режущей керамики сокращает машинное время обработки до двух раз в сравнении с часто используемым и более дорогим твердым сплавом ВК6.

В работе Касиловой А.Г. и Мещерякова Р.К. отмечается, что использование керамики ВОК 60 при торцевом фрезеровании чугуна (НВ до 260) взамен наиболее износостойких сплавов позволяет увеличить производительность в 2...2,5 раза.

Цель работы - технологическое обеспечение качества обработки высокоточных плоских контактных поверхностей при чистовом высокоскоростном фрезеровании с учетом параметров работоспособности режущей керамики.

Идея исследования. Создание метода, обеспечивающего заданную шероховатость и точность геометрических параметров поверхностей направляющих станин металлорежущих станков при чистовой фрезерной торцевой обработке на высокоскоростных станках с ЧПУ с учетом различных структурных параметров режущих керамических пластин в наборной фрезе.

Для достижения цели определены **задачи исследования:**

1. Провести анализ современной технологии чистовой обработки плоских контактных поверхностей корпусных деталей;

2. Оценить влияние параметров существующего технологического процесса обработки плоских контактных поверхностей, на производительность и качество обработки поверхности;

3. Оценить особенности эксплуатации керамического режущего инструмента при высокоскоростной фрезерной обработке;

4. Создать прикладной метод неразрушающего контроля свойств оксидно-карбидных керамических режущих пластин, позволяющий оценивать стойкость каждой отдельной пластины до начала технологической операции;

5. Разработать метод оснащения многолезвийного режущего инструмента, позволяющий оптимизировать работоспособность инструмента;

6. Создать математическую модель технологической системы, учитывающую селективное оснащение многолезвийного режущего инструмента, позволяющую прогнозировать динамическую устойчивость системы;

7. Провести теоретические и экспериментальные исследования технологического обеспечения качества обработки высокоточных плоских контактных поверхностей на основе высокоскоростного фрезерования с использованием селективного метода оснащения многолезвийного инструмента режущей керамикой;

8. Разработать практические рекомендации по настройке инструментального оснащения с использованием режущей керамики, применение которых позволит обеспечить заданную шероховатость плоских контактных поверхностей при высокоскоростном фрезеровании;

9. Произвести апробацию разработанной методики в производственных условиях.

Объект исследования - обеспечение качества обработки высокоточных плоских контактных поверхностей.

Предмет исследования - закономерности влияния параметров обработки на характеристики шероховатости в технологическом процессе изготовления высокоточных плоских контактных поверхностей.

Научная новизна работы заключается в решении актуальной задачи, направленной на выявление связи между структурными параметрами режущей керамики и показателями работоспособности режущего инструмента, позволяющей разработать метод обработки высокоточных плоских контактных поверхностей многолезвийным инструментом, обеспечивающий стабильность и качество чистовой обработки на высокоскоростных станках с ЧПУ.

Составляющими научной новизны являются:

- Выявлены закономерности, влияющие на качество обработки высокоточных плоских контактных поверхностей при высокоскоростной фрезерной обработке с использованием режущей керамики;

- Выявлены подсистемы, оказывающие доминирующее влияние на процесс возбуждения автоколебаний в технологической системе механической обработки высокоточных плоских контактных поверхностей;

- Разработана математическая модель технологической системы операции торцевого фрезерования с учётом использования селективного метода оснащения многолезвийного режущего инструмента, позволяющая исследовать динамические характеристики и определить динамическую устойчивость системы при различных технологических параметрах;

- Установлена зависимость влияния компоновок режущих пластин во фрезе на качество обработки поверхности.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Выполнены научно-обоснованные технические разработки на основе физико-механических свойств оксидно-карбидных режущих пластин и предложены рекомендации для изготовления высокоточных плоских контактных поверхностей фрезерованием с использованием метода селективного оснащения многолезвийного инструмента.

2. Разработан способ селективного оснащения многолезвийного режущего инструмента (SLM – Selective layout method), позволяющий комплектовать инструмент режущими пластинами максимально схожими по работоспособности,

в рамках которого были установлены три основополагающие схемы комплектования для реализации различных технологических задач.

3. Разработано устройство (патент на изобретение №2729169) для определения электрического сопротивления оксидно-карбидных керамических режущих пластин, позволяющий осуществлять оперативный неразрушающий контроль микроструктуры режущих пластин и комплектацию многолезвийного режущего инструмента под соответствующую технологическую задачу.

4. Разработана математическая модель, учитывающая режимы резания и компоновку оксидно-карбидных керамических режущих пластин в многолезвийном инструменте для реализации технологического процесса изготовления высокоточных плоских контактных поверхностей.

5. Результаты экспериментальных исследований на основе технологии селективного оснащения фрез оксидно-карбидными режущими пластинами, позволили установить взаимосвязь между различными компоновками и качеством обработанной поверхности.

6. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на промышленном предприятии ООО «ПО «Электромашина», а также отдельные научные положения работы приняты к внедрению в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 – Машиностроение, программе подготовки «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» Горного университета.

Методология и методы исследования базировались на современных положениях теории резания материалов, научных основах технологии машиностроения, статистических методах исследований и методиках математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод селективного оснащения многолезвийного инструмента на основе физико-механических свойств оксидно-карбидных режущих пластин для комплектования торцевой фрезы с различным удельным электрическим сопротивлением ($\cdot 10^{-4}$ Ом·м), с формированием смешанной (18...100), однородной

(SLM) низкоомной (18...60) и однородной (SLM) высокоомной (61...100) компоновки, что обеспечивает рациональное использование инструментальных комплекций многолезвийного инструмента для реализации различных технологических задач по повышению качества и эффективности обработки плоских контактных поверхностей;

2. Математическая модель технологической системы механической обработки, учитывающая применение селективного метода оснащения многолезвийного инструмента режущей керамикой, позволяющая оценивать динамическую устойчивость системы при различных технологических параметрах и прогнозировать динамическую стабильность при использовании однородных компоновок, и подтверждающая повышение динамической стабильности изготовления высокоточных поверхностей для многолезвийного инструмента с однородно-высокоомными пластинами в 2,6 раза, а с однородно-низкоомными пластинами в 2 раза по сравнению со смешанной схемой расположения режущих пластин в корпусе фрезы.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается необходимым объёмом использования методов математического моделирования; проведением лабораторных экспериментов на различных фрезерных станках, в том числе на станке с ЧПУ HAAS VF2; результатами промышленного опробования на производственном предприятии ООО «ПО «Электромашина», в также апробацией результатов исследований на всероссийских и международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

Апробация результатов. Материалы диссертационного исследования представлялись на следующих научно-практических конференциях: международный симпозиум «Нанозифика и Наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 2018 – 2021 гг.), международный семинар «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME» (г. Санкт-Петербург, апрель 2019 – 2020 гг.), IV всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса, 2021» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.).

Отдельные научные положения работы приняты к внедрению в учебный процесс подготовки магистров по направлению 15.04.01 – Машиностроение, программе подготовки «Технология автоматизированного машиностроения» Горного университета.

Технология селективного оснащения многолезвийного режущего инструмента оксидно карбидными режущими пластинами (SLM) апробирован в технологических процессах производственной компании ООО «ПО «Электромашина», где получила подтверждение эффективности и рассматривается к внедрению в стандартные технологические процессы предприятия.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 13 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура и содержание. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и библиографического списка. Содержит 136 страниц машинописного текста, 47 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 113 наименований литературы и 4 приложений на 7 страницах.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ПЛОСКИХ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Вопрос изготовления высокоточных плоских контактных поверхностей является одним из самых актуальных и сложных вопросов в механической обработке и построении технологических операций. Наиболее распространёнными из них являются строгание, шлифование и фрезерование. Стругание является высокоточным, но очень специализированным процессом из-за особенностей кинематики станка и конструкции режущего инструмента, что не позволяет повсеместно применять этот метод для обработки широких поверхностей.

Шлифование – это метод механической обработки, при котором удаётся добиваться хороших показателей качества обработанной поверхности и геометрической точности при высокой универсальности технологии. Однако процесс шлифования сопровождается распространением абразивной пыли от шлифовального инструмента вокруг станка, что требует изоляции шлифовального оборудования от других станков и применения мощных вентиляционных систем. Также во время обработки деталей по данной технологии часто возникают такие дефекты, как шаржирование, задиры и коробление деталей, что обусловлено особенностями процесса резания и высокой температуры в зоне обработки при некорректной работе системы подачи СОЖ [7, 21, 35].

Фрезерование же лишено описанных выше недостатков, но, несмотря на появление новых инструментов, которые позволяют добиваться параметров качества обработки поверхности и геометрической точности не хуже, чем при шлифовании, данная технология по-прежнему не обладает необходимой производительностью для нужд современного машиностроения, темпы которого ускоряются с каждым днём. В связи с этим возникает необходимость совершенствования технологии фрезерования и поиска наиболее эффективного инструмента для создания технологии обладающей высочайшей эффективностью и способной обеспечивать необходимые требования к качеству обработки поверхности и геометрической точности [9, 50, 93, 107].

Наиболее распространёнными и ответственными высокоточными плоскими поверхностями являются различные направляющие поверхности, отвечающие за плавное и точное перемещение узлов и агрегатов относительно друг друга в различных механизмах [48, 49].

Для проведения более детального исследования технологии изготовления и проблем, возникающих при обработке, выбраны направляющие станков, как наиболее ответственные детали, от качества поверхности, которых зависит точность и надёжность изготовления изделий [54]. Кроме этого, большая протяжённость таких поверхностей предъявляет требования к высокой стабильности и стойкости режущего инструмента для обеспечения заданной точности, и качества обработки при длительном периоде обработки.

1.1 Особенности изготовления направляющих станин металлорежущих станков

Главными параметрами технологического оборудования являются производительность и точность. Для разных технологических машин значимость этих параметров может меняться, в каких-то случаях больше важна производительность, а высокая точность не играет решающей роли, а каких-то случаях наоборот. В случае металлообрабатывающих станков, эти параметры имеют одинаковое значение, и они напрямую связаны с друг другом. Станки различной точности способны изготавливать детали высокой точности, но чем выше точность и жёсткость станков, тем выше производительность без потери качества обработки деталей [1, 10, 55].

Основой любого станка или другого технологического оборудования являются станины, которые обеспечивают точное базирование узлов оборудования относительно друг друга и обеспечивают жёсткость конструкции. Станины металлорежущих станков делятся на 2 основные группы – горизонтальные (рисунок 1.1, а) и вертикальные (рисунок 1.1, б) по положению основных рабочих узлов, таких как шпиндель, и направлению перемещения

элементов станка при обеспечении рабочих ходов. Таким образом, станина определяет жёсткость, долговечность и качество работы станка [97].

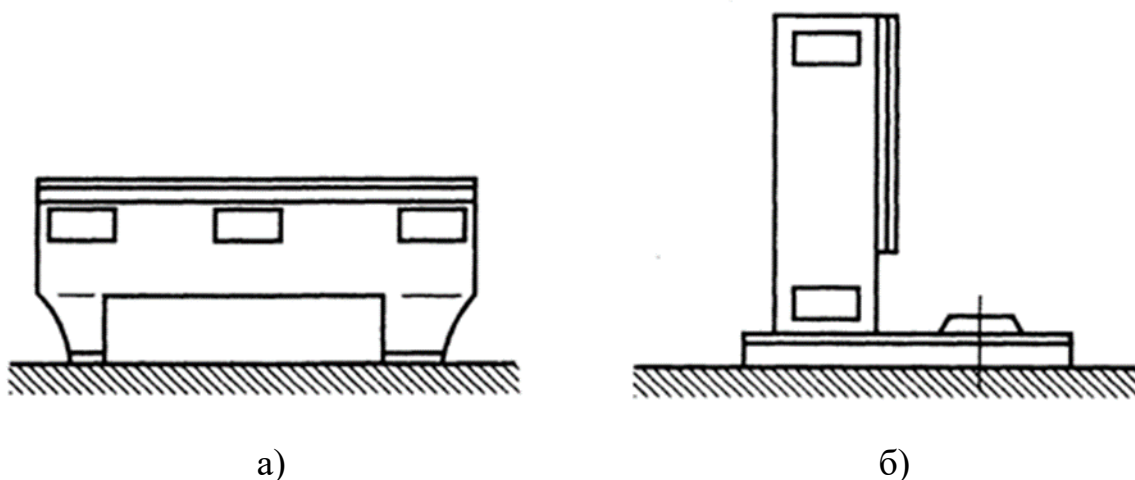


Рисунок 1.1 – Станины станков: а – горизонтальная, б – вертикальная

Геометрические параметры станин станков в первую очередь определяются назначением оборудования (размера, веса, особенностей технологического процесса) и особенностей компоновки рабочих элементов, механизмов и агрегатов.

В станках, требующих высокой жёсткости системы и точности перемещения рабочих элементов, станины изготавливаются с помощью литья в песчано-глинистые формы. Наиболее часто используемыми в таких целях марками чугуна являются серые чугуны, такие как СЧ 15, СЧ 20, СЧ 32, СЧ 40 и другие, а также в станинах, в которых требуются более высокие показатели износостойкости, применяются модифицированные чугуны марок МСЧ-28 и МСЧ-38. Применение модифицированных чугунов также актуально для изготовления станин сложной конфигурации [66, 82, 92, 110]. Также в последнее время все большую актуальность приобретают литые станины из композитных материалов, таких как «Синтегран». Такие материалы позволяют обеспечивать аналогичные механические свойства в сравнении с чугуном, при менее трудоёмком технологическом процессе изготовления деталей.

Для менее ответственных станков и прочего технологического оборудования в качестве станин часто применяют сварные конструкции из

металлического проката. Жёсткость таких станин при строгом соблюдении технологических требований к изготовлению сварных конструкций близка к чугунным, однако они имеют меньший вес вплоть до того, что разница в весе схожих по назначению конструкций может отличаться до 2 раз, при этом стоимость таких станин меньше. Для изготовления таких конструкций обычно используют марки стали хорошо поддающиеся свариванию такие, как 09Г2С, Ст 3 и другие [81, 83, 90, 91].

Все поверхности станин, отвечающие за сопряжение или передвижение элементов конструкции, являются ответственными и точными, однако наибольшее внимание к точности и качеству обработки поверхности требуют направляющие. Такие элементы конструкции станков обеспечивают точность и плавность перемещения движущихся элементов, что напрямую влияет на качество изготавливаемой продукции.

Направляющих в металлорежущем оборудовании разделяются на группы, как правило, по характеру движения рабочих элементов: прямолинейные и круговые; а также по конструкции – качения и скольжения. Также в сложных станках всё чаще встречаются различные комбинированные конструкции направляющих элементов [54, 81].

Направляющие должны обеспечивать плавность перемещений и заданную точность, иметь минимальный износ и допускать компенсацию износа. Для направляющих должна быть также обеспечена эффективность смазывания, простота сборки и регулирования, надёжная защита от загрязнения и попадания стружки на поверхность трения [54, 81, 83].

Конструкции станин с направляющими скольжения, как правило, являются монолитными, в которых направляющие поверхности являются частью станины, обработанной с обеспечением необходимой формы и качества обработки поверхности. Такие направляющие разделяются по профилю рабочих поверхностей на охватываемые и охватывающие. Охватываемые направляющие применяют в станках, не требующих высокой скорости перемещения элементов из-за того, что на деталях такой конструкции плохо удерживаются смазочные

материалы, но они просты в изготовлении, имеют относительно низкую стоимость и просты в обслуживании. Высокоскоростное оборудование более требовательно к качеству смазки элементов, поэтому применение вышеописанных направляющих в таких агрегатах не уместно. Поэтому при больших скоростях перемещения рабочих элементов станка используются охватывающие направляющие, благодаря тому, что обеспечивают стабильную плавность перемещений и высокую износостойкость [81, 82].

Также важным фактором, определяющим работоспособность направляющих элементов, является их профиль поперечного сечения. Существует множество различных профилей направляющих, определяемых характером движения и прикладываемой нагрузкой. Так прямоугольные направляющие способны обеспечивать высокую плавность прямолинейного движения, но плохо пригодны для восприятия пространственных нагрузок, в то время как треугольные направляющие имеют ровно противоположные характеристики, поэтому в конструкции металлорежущих станков эти виды профилей совмещают при обеспечении движения элементов станка (рисунок 1.2). В некоторых конструкциях подобный «тандем» заменяют трапециевидными направляющими, которые за счёт своей конструкции обладают преимуществами как прямоугольных, так и треугольных направляющих, однако такая конструкция также не лишена недостатков и применяется лишь при низких скоростях и средней точности перемещений. В высокоскоростном оборудовании большое внимание уделяется сокращению площади трения и снижению массы элементов конструкции, поэтому для таких случаев применяются сложнопрофильные направляющие [66, 69].

В направляющих элементах станков, между рабочими поверхностями имеется зазор, который является одной из главных проблем любого технологического оборудования в связи с тем, что значительно снижает жёсткость конструкций и способствует развитию колебательных процессов в рабочих элементах.

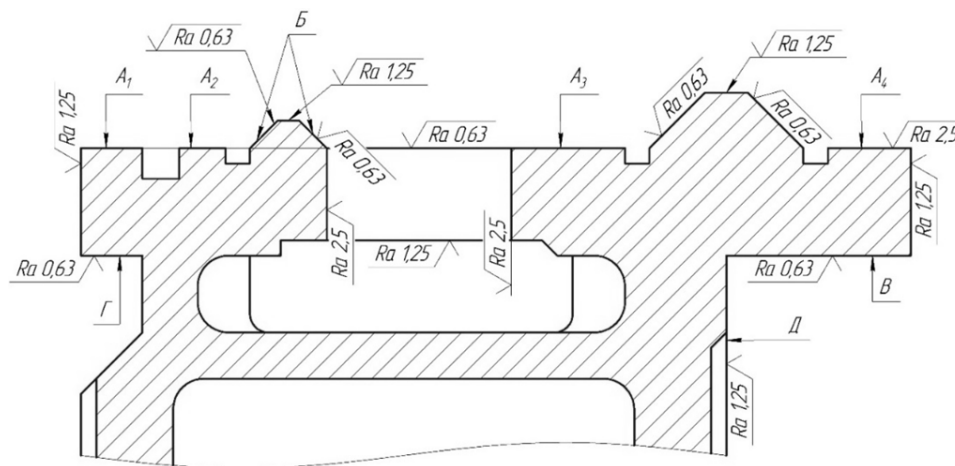


Рисунок 1.2 - Профиль монолитных направляющих скольжения станины прецизионного токарного станка

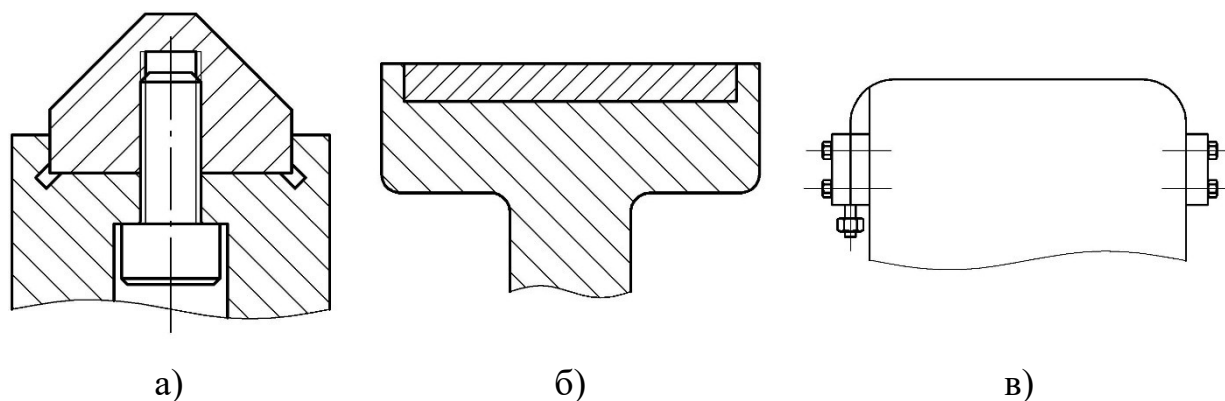
Поэтому для уменьшения негативного влияния этих элементов конструкции применяются различные технические решения, способствующие сокращению величины зазора. Наиболее распространёнными решениями являются клинья и планки, которые устанавливаются непосредственно в зазоре. Эти элементы могут быть как регулируемые, так и не регулируемые. Наибольшей эффективностью обладают регулируемые клинья и планки, так как способны обеспечивать наибольшую жёсткость конструкции во время всего жизненного цикла [81-83].

Монолитные направляющие станков обрабатывают фрезерованием, строганием, шлифованием или шабрением. Для компенсации погрешности, вызываемой термообработкой или изнашиванием направляющих в процессе эксплуатации, в ряде случаев после фрезерования преднамеренно создают выпуклость направляющих по программе ЧПУ или за счет упругого деформирования станины (вниз) в процессе обработки [16, 44].

В качестве типичного примера на рисунке 1.2 показан профиль направляющих прецизионного токарного станка с указанием основных требований к шероховатости поверхностей скольжения [66, 69]. При этом: допуск прямолинейности поверхности Б в вертикальной плоскости 0,012 мм на 1000 мм (допускается только выпуклость); изогнутость направляющих поверхностей не более 0,025 мм на всей длине направляющих; допуск параллельности поверхностей В и Г направляющим поверхностям Д и А 4 не более 0,015 мм на

длине 1000 мм; допуск перпендикулярности поверхности Д к общей прилегающей поверхности АЗ 0,03 мм на длине 250 мм [23, 24, 66, 69].

В случаях, когда применение монолитных направляющих невозможно в связи с особенностями изготовления или эксплуатации станка применяются накладные направляющие элементы (рисунок 1.3). Такие элементы представляют собой массивные планки или пластины (рисунок 1.4), изготовленные из высоколегированных износостойких сталей, которые закрепляются к станине или другим корпусным деталям технологического оборудования резьбовыми крепёжными элементами, клеевыми составами или в их комбинации. После установки таких элементов производится шлифование направляющих по всей длине для обеспечения точности взаимного расположения и геометрических параметров, всех направляющих станка. Типичные требования к обработке таких деталей представлены на рисунке 1.5.



а) Рисунок 1.3 – Накладные направляющие скольжения: а – накладные планки;
б – закалённые пластины; в – стальная лента

Дороговизна высоколегированных износостойких сталей заставляет конструкторов, проектирующих станки со станинами длиной более 10 м, вместо массивных планок использовать тонкие закалённые полосы (0,2-0,3 мм), которые клеиваются в станину эпоксидными составами. Такой способ фиксации предотвращает попадание стружки и СОЖ в зазор между лентой и станиной [81].

Конструкции направляющих суппортных групп металлорежущих станков существенно различаются в зависимости от их компоновки (рисунок 1.5). Основными группами таких компоновок являются горизонтальные и наклонные.

Горизонтальная компоновка зачастую выполняется в виде комбинированных направляющих, объединяющих прямоугольный и треугольный профиль (рисунок 1.5, а).

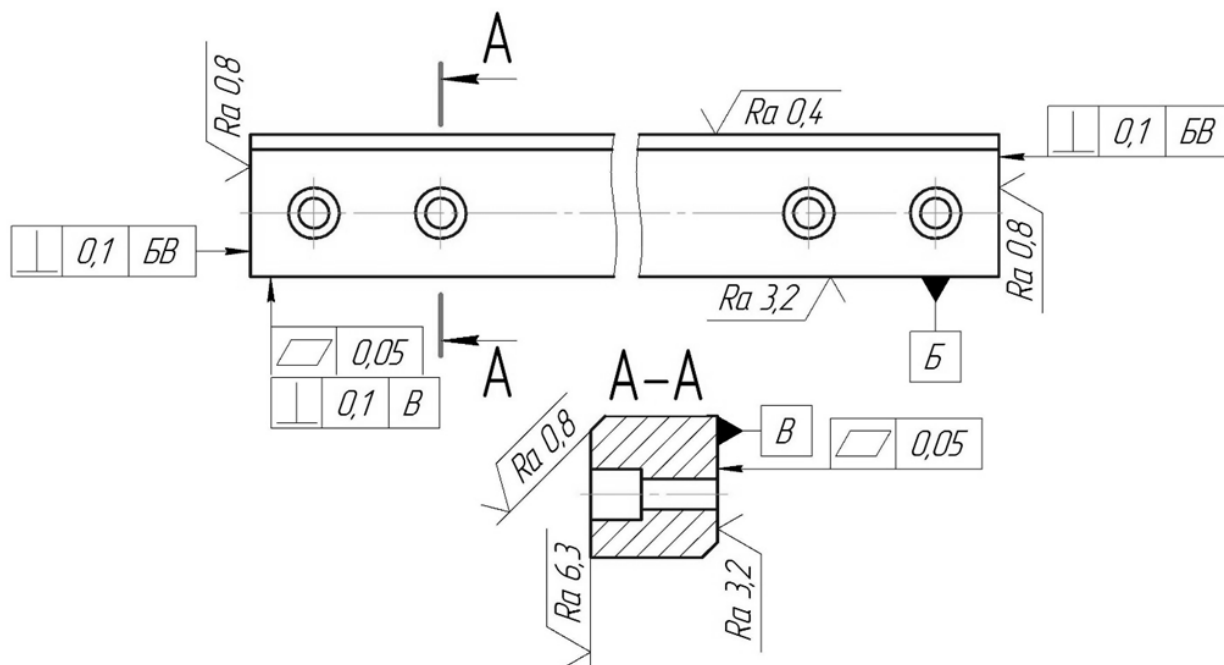


Рисунок 1.4 – Накладная планка токарного станка

При наклонной компоновке и наличии на станке только одного суппорта в основном применяют конструкции с одной (рисунок 1.5, б), двумя (рисунок 1.5, в-д) и четырьмя (рисунок 1.5, е) наклонными направляющими. При этом в зависимости от угла наклона суппортной группы существенно меняются условия работы различных направляющих. Так, при малых углах наклона суппорта, наиболее распространённым решением является максимально жёсткая фиксация подвижных элементов станка на нижней направляющей путём установки регулируемых планок с обратной стороны от плоскости приложения основной нагрузки (рисунок 1.5, г).

В случае, когда угол наклона превышает 60° , основная нагрузка может лечь на любую направляющую, на которую будет действовать вес всей суппортной группы, регулировочные планки в таких конструкциях также располагают на направляющих с обратной стороны от поверхности приложения

нагрузки. Применяют также наклонные конструкции суппортов с горизонтально расположенными направляющими (рисунок 1.5, ж).

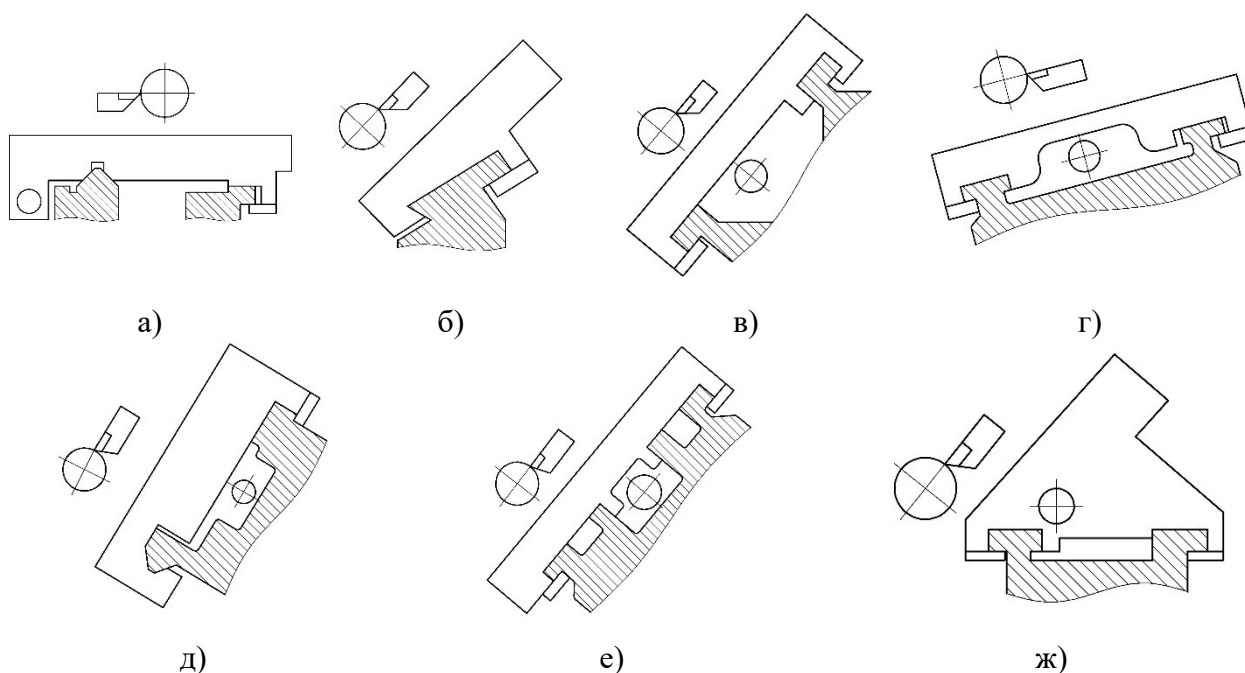


Рисунок 1.5 – Направляющие скольжения суппортов односуппортных токарных станков: а – 16К20Ф3, 16К20Т1; б – VDE 250 С (Германия); в – 1740 РФ3 и 1720 ПФ30; г – МК 85; д – DFS 400 NC (Германия); е – СТП 220 АН; ж – SD NG 610 Е (Венгрия)

Столы и подвижные бабки станков выполняют с различными комбинациями охватывающих и охватываемых направляющих (рисунок 1.6). При этом направляющие для вертикальных перемещений выполняют преимущественно по схеме, приведённой на рисунок 1.6, г [81].

В сфере легкого и среднего станкостроения, при создании оборудования широкое распространение получили направляющие качения, которые разделяются по конструкции и особенностям движения тел качения на следующие типы: направляющие, в которых тела качения фиксируются сепараторами, и направляющие, в которых выполнены кольцевые канавки для циркуляции тел качения при движении системы (катковые опоры), такие конструкции значительно увеличивают диапазон перемещений рабочих узлов станка.

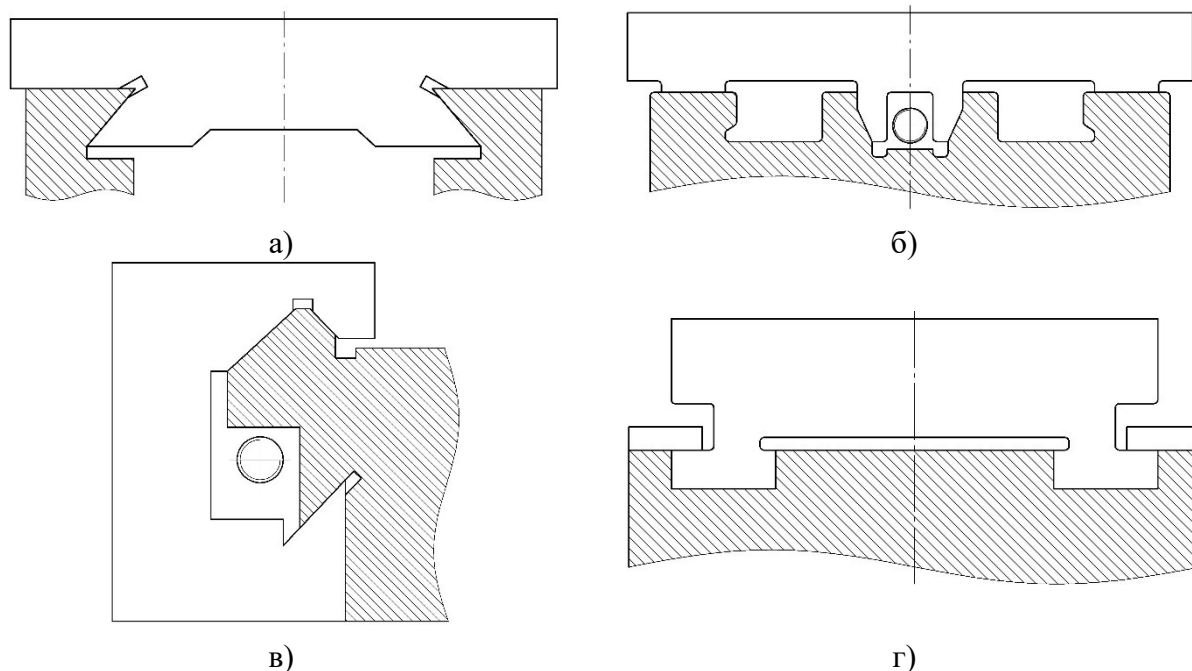


Рисунок 1.6 - Направляющие скольжения столов и бабок: а – KF-VBM AL (Тайвань); б - DIXI 400 (Швейцария); в – MC-12-250 (Россия); г – MA5HP (Япония)

Форма тел качения также определяет несколько разновидностей направляющих, а именно шариковые (рисунок 1.7, а) и роликовые (рисунок 1.7, б, в, д, е), которые обладают несущей способностью большей в 20...30 раз и жёсткостью, превышающей в 2,5...3 раза показатели аналогичных шариковых конструкций. Особенности сборки и количество степеней свободы движущихся элементов разделяет направляющие на замкнутые (рисунок 1.7, г, д, е) и незамкнутые (рисунок 1.7, а, б, в), разъединению которых препятствует исключительно сила тяжести [81-83].

Один ряд тел качения обычно достаточен и применим для лёгких и средних станков. При увеличении числа рядов и количества тел качения несущая способность конструкции увеличивается. Для направляющих качения элементов станка, движущихся с большой скоростью, используют V-образную компоновку рядов тел качения (рисунок 1.7 в, д, е).

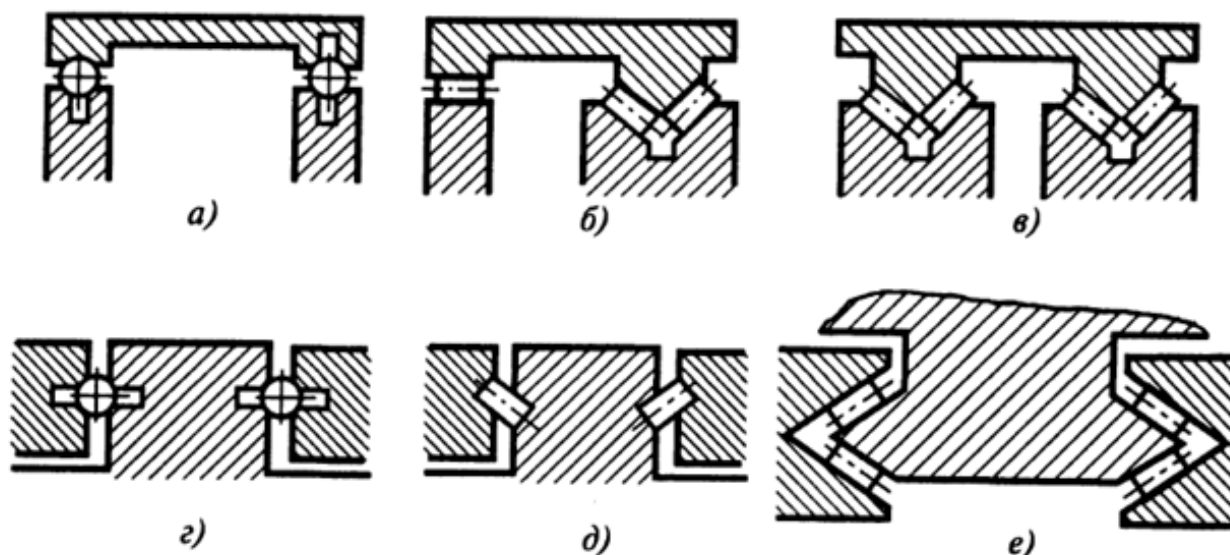


Рисунок 1.7 – Направляющие качения

Основными материалами для изготовления как самих направляющих элементов, так и тел качения являются хромистые шарикоподшипниковые стали (ШХ9, ШХ15) и цементируемые стали, такие как 20Х, с твердостью HRC 60...62. В некоторых случаях в качестве направляющих элементов для движения тел качения могут выступать планки из серого чугуна с твердостью 200...250 НВ [4, 10, 37, 81].

Для оборудования с повышенной нагрузочной способностью, жёсткостью, плавностью и точностью используют гидростатические и аэростатические направляющие. В таких направляющих в специальные полости между сопрягаемыми деталями подаётся под давлением масло или воздух, что создаёт так называемую подушку в соединении, что позволяет элементам станка не касаться друг друга при движении. Аэростатические направляющие (рисунок 1.8) применяются в основном в высокоточных лёгких станках, гидростатические же направляющие применяют в тяжёлых станках различной точности. Основным критерием точности перемещений элементов станка на таких направляющих является постоянство толщины масляного или воздушного слоя при изменении нагрузки. Точность изготовления таких направляющих должна быть очень

высокой в связи, с тем, что малейшие неровности поверхности могут нарушать равномерность масляного или воздушного слоя.

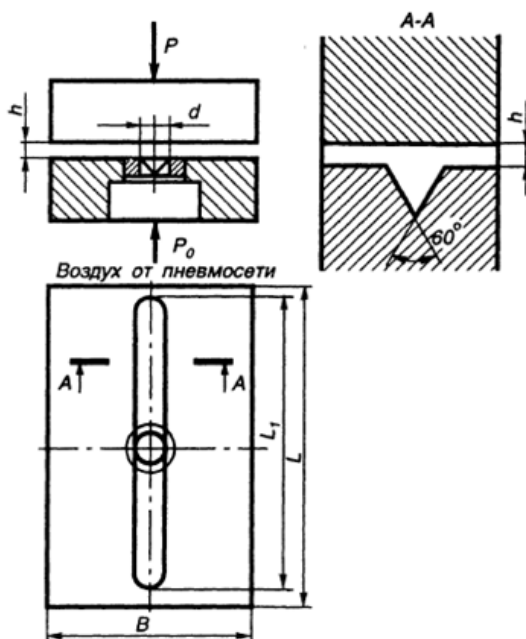


Рисунок 1.8 – Аэростатическая опора: P – нагрузка на направляющую;
 d – диаметр отверстия; h – зазор между направляющими;
 L , B – размеры направляющей, L_1 – длина кармана

Недостатками аэростатических опор в сравнении с гидростатическими являются: более низкие нагрузочная способность и динамические характеристики, невысокое демпфирование колебаний, так как вязкость воздуха в четыре раза меньше вязкости масла, а также склонность к отказам из-за засорения рабочего зазора и магистрали подачи воздуха [60, 81 - 83].

Преимущества аэростатических направляющих состоят в том, что они при движении обеспечивают низкий коэффициент трения, а при отключении подачи воздуха очень быстро создается контакт поверхностей с большим трением, обеспечивающий достаточную жесткость фиксации узла станка в заданной позиции [81, 89]. При такой конструкции отпадает необходимость в фиксирующих устройствах, которые необходимы для жесткой фиксации гидростатических направляющих. В аэростатических направляющих воздух подводят под избыточным давлением 0,2...0,4 МПа [81, 89].

При изучении динамики технологического оборудования, важно отметить, что демпфирование в направляющих скольжения значительно ниже чем в жёстких стыках, что снижает область динамической устойчивости системы в целом. Поэтому при оценке динамических параметров станков и моделировании виброустойчивости процессов механической обработки важно учитывать и демпфирование стыков, как и всех соединений рабочих элементов станка [22, 36, 45, 52].

Среди колебаний, возникающих в металлорежущих станках, значительное место занимают автоколебания, вызванные силами полужидкостного трения в направляющих скольжения. Фрикционные колебания, которые наблюдаются при движении столов фрезерных станков, шпиндельных бабок, суппортов, стоек и других узлов по направляющим скольжения, являются нежелательным нарушением заданного закона движения. Наибольшую значимость неравномерность движения набирает при точных перемещениях на малых скоростях [72, 87, 100].

Рассмотрим, что происходит при включении привода подач, когда скорость подачи достаточно мала (рисунок 1.9). Вначале передаточные элементы деформируются до тех пор, пока передаваемое ими усилие не преодолеет силу трения покоя. Далее рабочий элемент станка стремительно набирает скорость благодаря уменьшению сил трения. Во время остановки сила трения вновь увеличится и таким образом элемент станка совершает «прыжок» [67]. По окончании «прыжка» деформации звеньев механизма уменьшаются настолько, что необходимо некоторое время, пока упругая сила вновь не преодолеет силу трения покоя [22, 87]. Так возникают устойчивые автоколебания релаксационного характера, которые с ростом скорости либо пропадают совсем, либо превращаются в колебания, близкие по форме к гармоническим [22, 45, 87, 100].

Изменение скорости и ускорения в процессе колебаний вызывает появление дополнительных сил [22, 45, 87, 100]. При этом имеет место запаздывание формирования масляной пленки [22, 45, 81, 87].

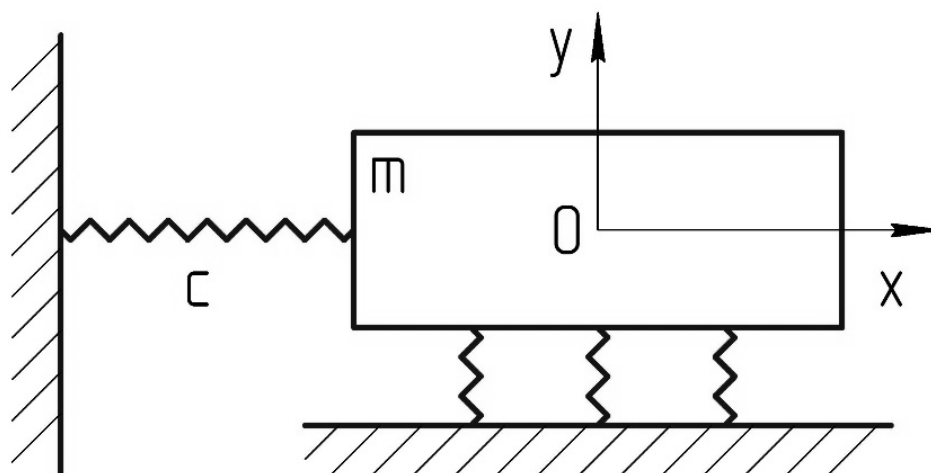


Рисунок 1.9 - Схема динамической модели суппорта на направляющих скольжения

Таким образом, изучив существующие разновидности направляющих станков и особенности их эксплуатации, можно сформулировать следующие технические требования к материалам для направляющих:

1. Износостойкость – данная характеристика направляющих, обуславливается необходимостью длительного сохранения работоспособного состояния пар трения для обеспечения изначальной точности рабочих перемещений подвижных элементов станка;
2. Низкие коэффициенты трения как в состоянии покоя, так и в движении, при этом они не должны значительным образом меняться при изменении скорости движения;
3. Низкая склонность материала к деформации при длительном воздействии нагрузки и при высвобождении остаточных напряжений материала после изготовления станины;
4. Стойкость к изменениям температуры и агрессивным средам;
5. Жесткость – параметр, определяющий точность и стабильность работы станка под нагрузкой, наиболее актуальной становится оценка жёсткости для накладных направляющих.

1.2 Материалы, применяемые для изготовления направляющих

Пару трения, как правило, следует комплектовать из разнородных материалов, имеющих неодинаковый состав или структуру и разную твердость,

так как в противном случае она, вследствие более интенсивного схватывания, будет иметь пониженную износостойкость. Назначение материалов, сопряженных направляющих прямолинейного движения производится в зависимости от соотношения их длин. Направляющие большей длины (более длинный элемент пары трения) следует изготавливать из более износостойкого и твердого материала [4, 10, 81]. Это объясняется следующим:

1. Направляющие большей длины изнашиваются неравномерно по длине, причем износ обычно невозможно компенсировать регулировкой даже частично; неравномерность износа оказывает наибольшее влияние на точность обработки. Направляющие меньшей длины обычно изнашиваются больше сопряженных с ними направляющих (при условии изготовления из материалов одинаковой износостойкости), однако их износ меньше сказывается на точности обработки и во многих случаях может быть частично компенсирован регулировкой;

2. Погрешности в контакте быстрее устраняются при приработке менее износостойких направляющих меньшей длины;

3. Трудоемкость изготовления и ремонта ниже, так как направляющие меньшей длины обычно пригоняются шабрением;

4. Открытые направляющие большей длины подвержены случайным повреждениям (забоинам, царапинам) и т.д.

В подавляющем большинстве случаев неподвижная деталь имеет направляющие большей длины, а перемещаемая — направляющие меньшей длины.

Для направляющих кругового движения возможны два решения — менее износостойкий материал пары может устанавливаться на перемещаемой (планшайбе, столе) либо на неподвижной (основании) деталях. Все же менее износостойкий материал рекомендуется устанавливать на перемещаемой детали [81]. Такая установка имеет следующие преимущества:

- уменьшается скорость изнашивания направляющих основания, к сохранению точности, которых должны предъявляться более высокие требования

(направляющие основания - база, относительно которой ориентированы другие узлы станка);

- уменьшается трудоемкость ремонта благодаря возможности обработки направляющих планшайбы на станке;

- обеспечивается лучшая сохранность клинообразующих скосов на направляющих основания.

В ряде случаев основным критерием долговечности направляющих является минимальный суммарный износ направляющих кинематической пары, например, в револьверных станках для направляющих пары продольные салазки суппорта - станина.

В этих случаях при технологически простой форме направляющих (прямоугольной), позволяющей получить точный контакт путем шлифования сопряженных направляющих, а также при наличии защиты направляющих, обеспечивающей предохранение их от случайных повреждений, направляющие меньшей длины (салазок) выгоднее изготавливать закаленными, а большей длины (станины) незакаленными. Это особенно целесообразно при длине хода существенно большей длины перемещаемой корпусной детали.

Резкое повышение долговечности достигается при сопряжении двух закаленных направляющих. Соответственно для тяжело нагруженных направляющих, работающих в условиях интенсивного загрязнения отходами обработки при технологически простой конструктивной форме направляющих, последние могут изготавливаться закаленными одновременно у обеих сопряженных деталей. При этом механическая обработка направляющих должна обеспечивать высокую точность их сопряжения.

В качестве материалов, применяемых для изготовления направляющих, наиболее широкое распространение получили чугуны легированные и нелегированные, закаленные и незакаленные.

Анализ работы чугуна в условиях преимущественно абразивного изнашивания направляющих показывает, что их износостойкость возрастает с повышением твердости при переходе от ферритной к перлитной и далее к

мартенситной структуре, а также с уменьшением размера графитовых включений [30, 53, 106].

Легирование чугуна никелем и хромом (например, 1,2-1,5 % Ni и 0,4-0,5 % Cr), присадка меди (порядка 0,5 %), легирование молибденом в комбинации с медью, хромом и никелем применяется в основном для станин и корпусных деталей прецизионных станков с закаленными направляющими. Установлено, что в пределах перлитной и ферритной структур нет существенного различия в износостойкости легированных и нелегированных чугунов [5, 19, 30]. Большой износостойкостью обладают высоколегированные чугуны [19, 30, 53]. Легирование чугуна, особенно для станков нормальной точности при выполнении направляющих (незакаленных) за одно целое со станиной (или столом), хотя и приводит к некоторому повышению их износостойкости, все же нецелесообразно, так как приходится легировать материал всей станины. Из легированного чугуна можно изготавливать накладные закаленные направляющие, особенно при сложной форме сечения.

Выбор марок чугуна для отливок, направляющих и требования к прочности, твердости и микроструктуре чугуна регламентируются ТУ 2-024-708-67. Твердость направляющих должна быть не менее 180 НВ, для тяжелых отливок массой более 7000 кг допускается снижение твердости до 170 кг/мм². Для столов, салазок, бабок с направляющими скольжения меньшей длины, чем у сопряженных деталей, твердость направляющих должна быть не менее 170 НВ [70].

Направляющие движения подачи с парой трения чугун-чугун токарных, револьверных, фрезерных, расточных и ряда других станков при несовершенных защитных устройствах и граничном трении имеют высокую скорость изнашивания; это не позволяет обеспечить длительную работу станка без ремонта. Направляющие главного движения, при невозможности исключить работу в режиме смешанного трения, недостаточно надежны - во многих случаях образуются задиры. Пара трения чугун-чугун остается еще наиболее

распространенной, однако при интенсивной работе направляющих она не отвечает современным требованиям.

Пару трения чугун - чугун целесообразно использовать: а) для направляющих станков, предназначенных для легких работ, и прецизионных станков, имеющих хорошую изоляцию направляющих от загрязнения, принудительную смазку и конструкцию, обеспечивающую малую скорость изнашивания направляющих; б) для редко работающих направляющих; в) для менее ответственных направляющих, износ которых не оказывает значительного влияния на точность обработки [70].

Во многих работах по изучению износостойкости материалов в условиях абразивного изнашивания и схватывания, характерных для направляющих станков, показано, что термическая обработка стальных и чугунных деталей до высокой твердости значительно повышает их износостойкость.

Износостойкость сталей при абразивном изнашивании возрастает при увеличении содержания углерода; с повышением твердости при переходе от перлитной к сорбитной, троститной и мартенситной структурам за счет термической обработки; с повышением содержания ряда легирующих элементов - хрома, никеля, вольфрама и др. [5, 66, 81]. При трении закаленной стали в паре с перлитным чугуном, шаржированным абразивом, ее износостойкость повышается при увеличении количества, степени дисперсности и твердости карбидов; карбиды вольфрама и хрома тверже карбидов железа [66, 69]. Износ пар трения в присутствии свободного абразива существенно зависит от способности элементов пары удерживать частицы абразива. Например, при трении образцов из шарикоподшипниковой стали, закаленных (65 HRC) и отпущенных (55-59 HRC) по той же стали без отпуска (65 HRC), абразив более прочно закрепляется в отпущенных более вязких образцах, что снижает их износ (износ уменьшается с понижением твердости); при трении тех же образцов по шаржированному абразивом чугуно, прочно удерживающему абразивные частицы, решающее значение имеет твердость образцов.

Высокой износостойкостью отличаются хромированные и азотированные стали. Интенсивность износа цементированного, цианированного и азотированного слоев металла увеличивается по мере изнашивания поверхностного слоя [65, 68, 80]. Повышение износостойкости чугуна, получаемое в результате закалки на мартенсит, имеет место в большей мере у легированных чугунов [69].

Указанные зависимости между износостойкостью и свойствами чугуна и стали при абразивном изнашивании во многом качественно совпадают с аналогичными зависимостями, установленными в работах, где основным видом изнашивания было схватывание [83].

В обоих случаях износостойкость доэвтектоидной стали и серого чугуна непосредственно связана с количеством углерода, находящимся в виде цементита, и твердостью, определяемой состоянием цементита в сплаве. Термическая обработка стали и чугуна с получением повышенной твердости увеличивает износостойкость в обоих случаях. К аналогичным результатам приводит легирование стали и чугуна хромом, никелем, вольфрамом и рядом других элементов с последующей термической обработкой и получением закалочных структур. Высокая износостойкость достигается при хромировании и азотировании. В парах сталь - сталь и чугун - чугун повышение износостойкости одного из элементов снижает износ каждого из них.

Закаленные направляющие могут выполняться как за одно целое со станиной (чугун), так и в виде накладных направляющих.

Для изготовления закаленных станин используют серый и модифицированный чугун, а также легированный чугун, содержащий никель, хром, молибден и другие легирующие элементы, а для изготовления накладных направляющих используют следующие материалы и термическую обработку: стали, подверженные цементации и закалке; высокоуглеродистые хромистые закаленные стали; конструкционные углеродистые закаленные стали; легированные стали, подверженные азотированию; графитизированные закаленные стали; стали, подверженные цианированию и закалке; легированные и

модифицированные чугуны и т. д. Ниже приведены примеры применения ряда указанных материалов, а также покрытий на-правляющих в зарубежных станках различных типов.

Фирма Экс-Целл-О (США) изготавливает накладные направляющие из стали 8620 (0,18-0,23 % С; 0,7-0,9 % Мn; 0,4-0,7 % Ni; 0,4-0,6 % Cr; 0,15-0,28 % Mo), близкой по составу к отечественной стали 20ХНМ, но с меньшим содержанием никеля; направляющие планки толщиной 40-50 мм цементируются и закаляются в вертикальном положении, 60-65 HRC.

Выпускаемые в США накладные стальные двухслойные направляющие различных профилей имеют толстый слой износостойкой стали высокой твердости (64-66 HRC) и мягкую сердцевину, облегчающую возможность их крепления. Рабочий слой из хромистой шарикоподшипниковой стали SAE 52100 (0,95-1,1 % С; 0,3-0,6 % Мn; 1,2-1,5 % Cr; 0,2-0,3 % Si; P < 0,025 %, S < 0,025 %) толщиной 4,8 мм приварен при температуре 1260 °С под давлением 2500 т к стальной сердцевине (Сталь 10), не воспринимающей закалки. Поставляются направляющие шлифованными с точностью ± 5 мк; применяются в револьверных станках Гишолт, Акмэ и др. Азотированные накладные направляющие (глубина азотирования 0,5 мм) применяют в тяжелых токарных станках фирмы Кревен (Англия) [81].

В токарных станках Ле Влонд (США) с наибольшим диаметром обработки направляющие станины под салазки и - нижних салазок под поперечные салазки выполнены в виде накладных, закаленных с нагревом газовым пламенем (61-63 HRC), направляющих из специальной инструментальной графитизированной стали, содержащей свободный углерод. Сопряженные с ними направляющие - из чугуна, а в станках больших размеров на направляющих продольных салазок накладки из слоистой пластмассы, обеспечивающей равномерность подачи. Фирма Америкен Тул Воркс, использующая направляющие из графитизированной стали в токарных и других станках, подвергает их после закалки обработке холодом (выдержка 8 ч при 100 °С) с целью исключить

коробление; эта обработка повышает также твердость направляющих примерно на две единицы HRC [81].

Накладные стальные цианированные закаленные направляющие применяют, например, на станине и стойках продольно-фрезерных станков швейцарской фирмы Старр с шириной стола 1000-1500 мм. Накладные закаленные направляющие изготавливают в ряде случаев из чугуна, особенно при сложной форме сечения. Например, из модифицированного чугуна, 450 НВ, изготавливают (при шлифовании в сборе со станиной) направляющие под салазки суппорта тяжелых токарных станков фирмы Морандо (Италия).

Из специального чугуна изготавливают накладные направляющие в тяжелых расточных станках разных типов фирмы Гиддингс и Льюис (США); планки сечением 203 x 70 мм, наибольшей длиной до 3 м закаливаются с трех сторон с нагревом газовым пламенем — на глубину 3,5 мм, HRC 53 - 56.

Хромирование направляющих станин (стоек) — мерное покрытие твердым хромом, толщиной 25 - 50 мк, HRC 68 - 72 — применяют в США и Германии для направляющих шлифовальных, расточных, поперечно-строгальных, токарных и других станков.

Хромированию подвергают чугунные незакаленные (иногда закаленные) направляющие, выполненные заодно со станинами, а также накладные стальные и чугунные закаленные направляющие [81 - 83]. Например, накладные направляющие из модифицированного чугуна, покрытые слоем хрома, применяют в протяжных станках фирмы Ляпойнт (на сопряженных направляющих салазок - текстолит). Хромируют направляющие и из алюминиевого сплава (узлы, имеющие возвратно-поступательное движение с высокой скоростью). Хромирование выполняется гальваническим методом и является окончательной операцией обработки направляющих; неравномерность слоя хрома 2 мк. После хромирования шабренной поверхности характерный для нее рельеф сохраняется.

Фирма Зокка (Италия) выпускает токарные, шлифовальные и расточные станки, на направляющих которых напыляют слой молибдена или метколая с

последующим шлифованием. Твердость молибденовой проволоки 370 НВ; твердость кристаллов молибдена после напыления 700 НВ. Проволока метколой содержит 13 % Сг и 0,3 % С, 285 НВ; твердость покрытия 610 НВ. Покрытие хорошо удерживает масло в порах и обеспечивает равномерности перемещений рабочих органов. Слой молибдена не более 0,5 мм во избежание отслаивания [81].

Фирма Черчилль - Редман (Англия) выпускает токарные и многорезцовые станки с напыленным на направляющие станин и салазок слоем сплава, содержащим 99 % молибдена или сплава с 18 % хрома [81]. Покрытие имеет толщину 0,25-0,30 мм; при шлифовании снимается 0,12 мм.

В патенте США (№ 3150940) описан способ металлизации шлифованных или шабрёных направляющих молибденом толщиной 25-50 мк, покрывающим не более 75 % площади направляющих. За счет нанесения слоев молибдена с перекрытием создаются хаотически расположенные пирамидальные возвышения. Напыленная поверхность притирается чугунным притиром. Площадки контакта (заштрихованы) занимают около 10% площади покрытия; на 1 см² площади покрытия 30-35 площадок.

Изучение опыта эксплуатации станков, а также результаты лабораторных и стендовых испытаний износа материалов показывают, что существенное повышение долговечности направляющих достигается термической обработкой с получением высокой твердости; при этом износостойкость закаленных направляющих подач, работающих с загрязненной смазкой (в условиях преимущественно абразивного изнашивания), может быть увеличена (по результатам эксплуатационных исследований) примерно до 2-2,5 раз, а сопротивляемость схватыванию (образованию задиров) - многократно [70, 82, 83].

Большим преимуществом пар трения чугун - закаленные чугун или сталь в сравнении с парами трения чугун - чугун и цветной сплав (пластмасса) - чугун является то, что они одно-временно имеют высокую износостойкость, как в условиях абразивного изнашивания, так и схватывания. Выше указывалось, что после одного-двух лет двухсменной работы около 50 % токарных и револьверных станков имели задиры на незакаленных чугунных направляющих. В то же время

из 260 станков тех же типов с закаленными направляющими станины, проработавших больше времени - не менее двух-трех лет (в переводе на двухсменную службу), - лишь около 8% станков имели небольшие задиры, многократно меньшей интенсивности, чем на незакаленных направляющих. При закалке направляющих увеличивается также их стойкость против случайных повреждений (от ударов).

Сравнительная износостойкость направляющих из ряда материалов по результатам длительных эксплуатационных испытаний около 250 станков дана в таблице 1.1. Износостойкость закаленных направляющих из модифицированного чугуна существенно выше, чем стальных закаленных направляющих из конструкционных углеродистых сталей (типа стали 45). Применением закаленных легированных (Cr, Ni, W, Mo и другими элементами) конструкционных сталей (ШХ15, 20Х и др.) можно обеспечить износостойкость не ниже, а в ряде случаев выше, чем у закаленного модифицированного чугуна. Применение стальных закаленных направляющих из конструкционных углеродистых сталей (например, стали 45) вследствие малого повышения износостойкости в сравнении с незакаленным чугуном не рекомендуется. Характеристики трения при работе со смазкой незакаленного чугуна в паре с закаленными чугуном и сталью близки.

Закаленные чугунные или стальные направляющие станины (стойки, поперечины) рекомендуются, когда чугунные незакаленные направляющие при недостаточной изоляции от загрязнения отходами обработки, интенсивном использовании (большой путь трения, повышенное давление) и невозможности обеспечить жидкостное трение во всем диапазоне скоростей подвергаются значительному износу, ограничивающему их работоспособность; применяются в большинстве случаев для направляющих подачи.

Закаленные направляющие рекомендуются в станках следующих типов:

а) универсальных станках легких и средних - токарных, револьверных, горизонтально-расточных, консольно-фрезерных, копировально-фрезерных, заточных, фрезерно-отрезных и др.;

б) станках, предназначенных для работы в условиях крупносерийного и массового производства, — многолезцовых одношпиндельных токарных, токарных полуавтоматах и автоматах, агрегатных сверлильно-расточных, протяжных и др.;

в) станках с программным управлением, в том числе обрабатывающих центрах. Закаленные направляющие целесообразны во многих случаях и в тяжелых станках - токарных, вальцетокарных, горизонтально расточных, продольно-фрезерных и др., к долговечности которых предъявляются повышенные требования. Конкретные рекомендации по узлам станков, где следует применять закаленные направляющие, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Сравнительная износостойкость в эксплуатации ряда материалов, применяемых для направляющих станины токарных и револьверных станков

Тип станка	Материал, термическая обработка и твёрдость направляющих станины ¹	Средняя относительная износостойкость ϵ_0
Токарный	Серый чугун СЧ 21-40, 182 НВ	1
	Сталь 45, поверхностная пламенная закалка светильным газом, 52 HRC	1,3
	Легированный никелем модифицированный чугун ² , поверхностная пламенная закалка кислородно-ацетиленовым пламенем, 50 HRC	1,9
Револьверный	Серый чугун СЧ 21-40, 182 НВ	1
	Конструкционная углеродистая сталь, закалка, отпуск, 47 HRC	1,35
	Конструкционная углеродистая цементируемая сталь, цементация, закалка, отпуск, 56 HRC	1,6
	Хромистая шарикоподшипниковая сталь типа ШХ15, SAE 52100 (двухслойные направляющие), закалка, отпуск 60 HRC	2,1

¹ Салазки из чугуна СЧ 15-32, СЧ 21-40 или чугуна аналогичных свойств. Твёрдость указана средняя по фактическим значениям.

² Выплавляется на шихте с большим процентом стали, твёрдость направляющих до закалки 225-240 НВ.

Материал и термическая обработка закаленных направляющих:

1) чугунные направляющие из чугуна СЧ 32-52 (предпочтительно), или СЧ 28-48, либо СЧ 21-40; твердость под закалку не менее 170 НВ; поверхностная закалка с нагревом т. в. ч. или газовым пламенем; структура - мартенсит, 48-53 HRC, глубина закаленного слоя не менее 2,5 мм;

2) накладные стальные направляющие: а) из цементируемых легированных сталей 20Х и 18ХГТ, подвергаемых цементации, закалке и отпуску, 56-62 HRC; глубина закаленного слоя после шлифования не менее 1,4 мм; б) из высокоуглеродистых легированных сталей ШХ15СГ (для меньших сечений ШХ15), ХВГ и 9ХС, подвергаемых объемной закалке и отпуску, 58-62 HRC [10, 70, 81].

Накладные направляющие из азотируемых сталей, например, 38ХМЮА, твердость HV 800-1050, глубина азотированного слоя 0,5 мм, при работе в паре с чугуном имеют более высокую износостойкость, чем пара чугун - закаленный чугун, малые деформации. Стоимость существенно выше, чем из стали 20Х. Недостаток - малая глубина упроченного слоя. Целесообразно применять для прецизионных станков.

Пара трения чугун - хромированный чугун (сталь) по износостойкости в условиях абразивного изнашивания в 3-4 раза выше, чем пара чугун-чугун; коэффициенты трения покоя и движения при малых скоростях скольжения у этой пары существенно ниже, чем у пары чугун-чугун [37, 81]. Минимальный коэффициент трения у пары хром по хрому, но она вследствие склонности к схватыванию используется редко. Хромирование уменьшает коррозию направляющих. Хромирование наиболее целесообразно для прецизионных станков, у которых допустимый износ направляющих меньше толщины хромового покрытия (25-50 мкм).

Хромированные направляющие вследствие незначительных деформаций могут быть использованы как сменные; возможно восстановление слоя хрома.

Металлизация направляющих молибденом и другими износостойкими сплавами представляет значительный интерес, так как не вызывает деформаций и

легко осуществима в условиях единичного производства, в том числе при изготовлении тяжелых станков.

1.3 Структурные особенности, механические и технологические свойства чугунов

Чугуны - железоуглеродистые сплавы (содержащие также то или иное количество примесей и легирующих элементов), затвердевающие с образованием эвтектики. Следовательно, чугун не может приобрести однофазное строение (аустенитное) при термической обработке, в отличие от стали. Присутствие эвтектики в структуре чугуна ограничивает его использование только в качестве литейного сплава (эксперименты по прокатке чугуна дали некоторые положительные результаты, но промышленного применения не получили) [5, 10, 69].

Главным преимуществом чугуна перед сталью являются хорошие литейные свойства и относительно низкая стоимость, но при этом данный материал более хрупок и менее прочен, чем сталь.

Углерод в чугуне может содержаться в виде графита или цементита (Fe_3C). Цементит имеет светлый цвет, обладает большой твердостью и трудно поддается механической обработке. Графит, наоборот, темного цвета и достаточно мягок [5, 30].

Исходя из того, какая форма углерода преобладает в структуре, различают два основных вида чугуна: серый и белый. Чугун также подразделяют по степени графитизации на белый (с малым содержанием графита), отбеленный или половинчатый (частично графитизированный) и серый (в значительной степени или полностью графитизированный). Ковким называют чугун, полученный из белого путем его графитизации в твердом состоянии при термической обработке [5, 19]. Белый чугун представляет собой сплав, в котором весь или практически весь избыточный углерод, не находящийся в твердом растворе в железе, присутствует в виде цементита Fe_3C (или специальных карбидов в легированном чугуне) [5, 53, 88].

Согласно общей классификации, принято следующее деление:

- по специальным свойствам чугуны подразделяют на: антифрикционный, износостойкий, жаростойкий, коррозионностойкий, немагнитный.

- по твердости чугуны подразделяют на: твердый - более 269 НВ, повышенной твердости - 197...269 НВ, средней твердости - 149...197 НВ и мягкий чугун – менее 149 НВ.

- по прочности чугуны подразделяют на: высокой прочности - более 38 кг/мм², повышенной прочности - 20...38 кг/мм² и обыкновенной прочности – менее 20 кг/мм² [5].

В белом чугуне почти весь углерод содержится в связанном состоянии в форме цементита [19]. Такой чугун на разломе имеет светло-серый цвет, очень тверд, почти не поддается механической обработке и поэтому не применяется для изготовления деталей, а используется для переделки в сталь и в ковкий чугун.

Серый чугун на разломе темно-серого цвета, мягок, хорошо обрабатывается инструментами и поэтому широко применяется в машиностроении. Основное количество углерода в сером чугуне содержится в виде графита, равномерно распределенного среди зерен основного сплава [5].

В сером чугуне, по сравнению с белым, содержится больше кремния и меньше марганца, так как кремний способствует графитизации углерода в чугуне, а марганец, наоборот, вызывает образование связанного углерода - цементита. Примерный состав серого чугуна: 3...3,6 % углерода; 1,6...2,5 % кремния; 0,5...1% марганца; 0,05...0,12 % серы; 0,1...0,8 % фосфора [5].

Чугун является своего рода композитным материалом, эксплуатационные и механические свойства которого зависят от характеристик металлической основы (твердость, прочность, пластичность и др.), а также размеров, формы, количества и распределения графитовых включений. При этом решающее значение в различных случаях может иметь как графит, так и металлическая основа [5, 6, 19, 30]. Например, твердость, как правило, определяется свойствами металлической основы, а модуль упругости чугуна, в свою очередь, в решающей степени зависит от величины и формы и графитовых включений. Но ударная вязкость, длительная

прочность, временное сопротивление разрыву зависят как от свойств металлической основы, так и от количества, формы и размеров графитовых включений [5, 6, 19, 28].

Получение той или иной структуры чугуна в отливках зависит от многих факторов:

- химического состава чугуна;
- технологии плавки;
- внепечной обработки металла;
- вида шихтовых материалов;
- скорости кристаллизации и охлаждения расплава в форме;
- толщины стенки отливки;
- теплофизических свойств материала формы [5, 6].

Структуру металлической основы чугуна можно изменять также термической обработкой отливок, общие закономерности, влияния которой аналогичны возникающим при термической обработке углеродистой стали, а особенности связаны с сопутствующими изменениями металлической основы процессами графитизации [5, 6].

Серый чугун - наиболее широко применяемый вид чугуна (строительные конструкции, машиностроение, сантехника и др.), он имеет включения графита пластинчатой формы. Для деталей из серого чугуна характерны более высокий коэффициент поглощения колебаний при вибрациях деталей (в 2...4 раза выше, чем у стали) и малая чувствительность к влиянию внешних концентраторов напряжений при циклических нагружениях [5, 43]. Наиболее значимая особенность серого чугуна в создании различных конструкций - более высокое, в сравнении со сталью, отношение предела прочности на растяжение к пределу текучести. Ещё одной важной особенностью графита является его высокие антифрикционные свойства, обусловленное наличием в структуре графита, который улучшает смазывание деталей при сухом трении.

Свойства серого чугуна зависят от структуры металлической основы, величины, формы, количества и характера распределения включений графита.

Перлитный серый чугун имеет высокие прочностные свойства и применяется для цилиндров, втулок и др. нагруженных деталей двигателей, станин и т.д. Для менее ответственных деталей используют серый чугун с ферритно-перлитной металлической основой [5].

1.4 Технологическое обеспечение шероховатости и точности изготовления направляющих станин металлорежущих станков

Большинство станин металлорежущих станков с монолитными направляющими изготавливаются из серого чугуна из его хороших литейных свойств, низкой стоимости и высокой стабильности. Перечисленные достоинства данного материала также нашли широкое применение в сфере автомобилестроения. Так из серого чугуна изготавливают тормозные диски и детали двигателей внутреннего сгорания.

Также для изготовления автомобильных комплектующих довольно часто применяется высокопрочный чугун. На его обработку, как правило, уходит в 3 раза больше инструмента, чем на обработку серого чугуна. Такой расход объясняется тем, что высокопрочный чугун содержит больше легирующих элементов и кремния, в виде труднообрабатываемых карбидов. Кроме того, графит в сером чугуне представлен в виде чешуек и достаточно легко обрабатывается резанием. В высокопрочном же чугуне графитовые включения имеют форму шара, окруженного оболочкой из карбида кремния [8, 15, 64].

Несмотря на то, что серый чугун легче обрабатывается резанием, всё же возникают некоторые трудности: при обработке выделяется большое количество теплоты. Именно поэтому твердосплавные пластины для обработки чугуна покрыты достаточно толстым многослойным покрытием (около 20 мкм), включающим в себя слой оксида алюминия (Al_2O_3). Такое покрытие защищает основу твердосплавной пластины от перегрева, кроме того, оксид алюминия химически стабилен: он не вступает в реакцию с чугуном, что позволяет избежать адгезионного износа пластины. Твердосплавные пластины с таким покрытием работают на скоростях резания 300...450 м/мин [42, 63, 102].

Обработка высокопрочного чугуна твердосплавными пластинами ведется на скоростях 150...250 м/мин, но для этого требуется покрытие более стойкое к абразивному изнашиванию. Применяются покрытия, в которых Al_2O_3 чередуется с толстыми слоями TiCN (карбонитрид титана) [45, 47].

Несмотря на высокую значимость износостойких покрытий на поверхности режущих пластин в работоспособности инструмента, нельзя недооценивать свойства основы твёрдосплавной пластины. При выборе инструмента для обработки чугунных деталей отдают предпочтение мелкозернистым сплавам с тонким кобальтовым покрытием, такая технология изготовления режущего инструмента позволяет исключить микро выкрашивание основы [86].

Для высокоскоростной обработки чугуна применяются пластины из режущей керамики. Этот инструментальный материал обладает высокой твёрдостью, высокой теплостойкостью и не обладает склонностью к адгезионному износу.

Одной из сложностей механической обработки чугуна является образование графитовой пыли, которая загрязняет всё пространство вокруг. Применение СОЖ позволяет обеспечить чистоту зоны обработки, но снижает производительность и стойкость инструмента [90, 92, 101].

При обработке чугуна образуется довольно много пыли, так как при этом разрушается и превращается в пыль свободный графит. Пыль оседает и загрязняет все пространство внутри и вокруг станка. Для борьбы с этим применяют СОЖ, но при обработке без СОЖ повышается производительность и стойкость инструмента [8, 31, 45].

При использовании СОЖ могут появиться термические трещины из-за разницы температур, так как труднее всего подать СОЖ туда, где она действительно нужна - на режущую кромку. В результате разница температур между зонами пластины, куда СОЖ попадает и куда не попадает, значительна [45].

При обработке без СОЖ основные проблемы - это выход размера за пределы поля допуска в результате нагрева заготовки в процессе обработки и

большое количество пыли. Необходимой точности можно добиться путем увеличения подачи – деталь просто не будет успевать нагреваться.

Основными видами износа при фрезеровании серого чугуна являются абразивный износ по задней поверхности и термические трещины. На деталях возможно выкрашивание в области выхода фрезы из резания и неудовлетворительное качество поверхности [78].

Основные сложности обработки чугуна:

- температура является одним из главных факторов износа инструментов, ввиду высокой твердости и прочности чугуна;
- наличие карбида кремния (SiC) в чугуне приводит к абразивному износу режущей кромки инструмента;
- высокая твердость и прочность влияют на износ, отпущенный ковкий чугун, чугун с вермикулярным графитом, чугун с шаровидным графитом имеют твердость 300...400 НВ. ковкий и серый чугуны – 200...250 НВ; белый чугун имеет твердость 500 НВ, однако он трудно поддается обработке;
- неоднородность структуры чугуна, неравномерность припуска чугунных отливок, высокие скорости обработки и остатки песка в корке отливок приводят к быстрому износу инструмента [4, 5, 10].

Общие рекомендации при обработке чугунов:

- чугуны преимущественно обрабатывают пластинами без задних углов, у них более прочные кромки, и они более надежны в использовании;
- пластины по чугуну должны иметь твёрдую основу и толстый слой покрытия оксида алюминия для обеспечения стойкости к абразивному износу;
- обычно чугун обрабатывают без СОЖ, но иногда для снижения углеродно-железной пыли допускается применение СОЖ;
- для снижения пыли при обработке без СОЖ и обеспечения высокой производительности необходимо обязательное применение вытяжной системы, а также применение ряда других мер, защищающих станок и самого рабочего от пыли [34, 51].

1.5 Выводы по первой главе

На основании проведённого анализа, были сделаны следующие выводы и поставлены цель и задачи исследования:

1. Направляющие металлорежущих станков и других технологических машин, являются важнейшими элементами конструкции, отвечающими за жёсткость технологической системы, точность обработки и производительность процесса.

2. Требования, предъявляемые к точности и качеству плоских контактных поверхностей направляющих станков должны соответствовать следующим требованиям:

- отклонения от плоскостности не более 30 мкм;
- отклонения от параллельности не более 60 мкм;
- шероховатость поверхности $Ra = 0,8 \dots 1,6$ мкм.

3. Основным материалом для изготовления станин станков является чугун. Данный материал лучше поддаётся обработке резанием в сравнении со сталью, но вносит ряд трудностей в процесс механической обработки, главными из которых являются высокая температура при резании и вкрапления твёрдых частиц, усиливающих абразивный износ.

4. В настоящее время самой распространённой технологией чистовой обработки плоских контактных поверхностей, направляющих является шлифование. Такой технологический процесс требует особой подготовки помещения и оборудования для защиты от абразивных частиц шлифовальных кругов. Также чистовое шлифование часто приводит к образованию таких дефектов обработки поверхности, как прижоги, шаржирование и коробление заготовки вследствие перегрева, что является неприемлемыми дефектами для исследуемых деталей.

5. Определена альтернативная технология чистовой механической обработки плоских контактных поверхностей направляющих станков. Высокоскоростное фрезерование обеспечивает необходимые параметры качества и точности направляющих элементов, при этом позволяет избежать типичных

дефектов обработки поверхности свойственных существующей технологии. Также данный технологический процесс является более производительным, но более требовательным к свойствам и качеству режущего инструмента.

6. Анализ современного режущего инструмента и материалов, использующихся для изготовления сменных режущих пластин позволил сделать вывод, что наилучшим решением для высокоскоростной чистовой обработки чугунных деталей является использование керамических режущих пластин, по причине отличной стойкости данного материала к воздействию высоких температур и абразивного изнашивания. Однако данный инструментальный материал отличается склонностью к хрупкому разрушению при ударной нагрузке, поэтому для расширения возможностей его использования для многолезвийного высокоскоростного фрезерования плоских контактных поверхностей чугунных изделий в работе необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ современной технологии чистовой обработки плоских контактных поверхностей корпусных деталей;

- оценить влияние параметров существующего технологического процесса обработки плоских контактных поверхностей, на производительность и качество обработки поверхности;

- оценить особенности эксплуатации керамического режущего инструмента при высокоскоростной фрезерной обработке;

- создать прикладной метод неразрушающего контроля свойств оксидно-карбидных керамических режущих пластин, позволяющий оценивать стойкость каждой отдельной пластины до начала технологической операции;

- разработать метод оснащения многолезвийного режущего инструмента, позволяющий оптимизировать работоспособность инструмента;

- создать математическую модель технологической системы, учитывающую селективное оснащение многолезвийного режущего инструмента, позволяющую прогнозировать динамическую устойчивость системы;

- провести теоретические и экспериментальные исследования технологического обеспечения качества обработки высокоточных плоских

контактных поверхностей на основе высокоскоростного фрезерования с использованием селективного метода оснащения многолезвийного инструмента режущей керамикой;

- разработать практические рекомендации по настройке инструментального оснащения с использованием режущей керамики, применение которых позволит обеспечить заданную шероховатость плоских контактных поверхностей при высокоскоростном фрезеровании;

- произвести апробацию разработанной методики в производственных условиях.

ГЛАВА 2 ЗАВИСИМОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРЕЗ, ОСНАЩЁННЫХ КЕРАМИЧЕСКИМИ РЕЖУЩИМИ ПЛАСТИНАМИ ОТ МИКРОСТРУКТУРЫ РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКИ

2.1 Виды режущей керамики и особенности её применения

Известно, что для осуществления процесса резания при размерном формообразовании режущая часть инструмента должна обладать рядом свойств, определяющих эффективность инструмента. Одним из таких свойств является твердость. Твердость инструмента должна быть значительно выше обрабатываемого материала, в том числе имеющего повышенные физико-механические свойства. Также режущий инструмент должен обладать высокой износостойкостью, теплостойкостью, теплопроводностью, и зачастую самым важным фактором – экономичностью. Экономичность инструмента обычно выражается стоимостью, формирующейся из затрат на его производство и материалы. Следовательно, стоимость напрямую зависит от использования дорогостоящих и дефицитных элементов, таких как тантал (Ta), вольфрам (W) и т.п [88].

Режущая керамика (РК) (рисунок 2.1) является одной из известных групп инструментальных материалов, в состав которой описанные выше элементы входят в относительно малых количествах [88].

Применение режущей керамики можно квалифицировать как перспективное направление в изучении обработки металлов резанием, так как РК является относительно новым инструментальным материалом [58, 79]. Режущая керамика отличается от прочих материалов более высокими режущими свойствами и способностью работать на высоких скоростях резания при высокой температуре, но в свою очередь, обладает повышенной хрупкостью и склонностью к возникновению трещин [58, 94].



Рисунок 2.1 – Сменные многогранные режущие пластины из режущей керамики

РК по своему составу нельзя отнести ни к одному из известных инструментальных материалов [58]. Поэтому создание этого материала открыло новую группу инструментальных материалов, а их исследование, обоснование научных положений и практики применения можно квалифицировать как новое перспективное направление в изучении обработки металлов резанием [29, 58].

Главными причинами применения РК являются высокая эффективность обработки, высокое качество обработки поверхности, сокращение времени обработки за счет значительного увеличения скорости резания и уменьшение затрат за счет замены шлифовальных операций обработкой резанием. Кроме этого с помощью режущего инструмента, оснащенного РК, можно обрабатывать закаленные стали и другие труднообрабатываемые материалы [98].

В промышленно-развитых странах доля режущей керамики в общей массе применяемых инструментальных материалов на данный момент не превышает 5...8 % [98]. Однако, следует отметить, что в ряде высокотехнологичных производств, таких как, например, аэрокосмическая отрасль, доля режущего инструмента, оснащенного РК, составляет около 60 % [13, 62, 63, 98].

По прогнозам доля использования РК в самое ближайшее время должна вырасти до 15 % [98]. Это переход может произойти в связи с тем, что

проверенные и технологичные твердые сплавы заменят на РК исходя из исключительно экономических соображений. Известно, что вне зависимости от стоимости инструмента и оснастки (с увеличением скорости обработки стоимость инструмента незначительно вырастает, а стоимость оснастки резко уменьшается) с интенсификацией процесса обработки, ее полная стоимость уменьшается [98]. Принимая во внимание то, что на обработку металлов тратится ежегодно не менее 100 миллиардов долларов только в США, становится ясным повсеместный интерес к РК – материалу, принципиально нацеленному на высокоскоростную обработку [98].

РК сочетает свойства как керамической, так и металлической составляющих [98]. Она отличается от прочих материалов более высокими прочностными характеристиками, повышенной теплостойкостью высокой твердостью, обладая высокими режущими свойствами [98]. На практике применение РК для резания металлов пока ограничено, так как их представляют хрупкими для широкого использования и слишком «скоростными» для нормальных условий [98].

Основной особенностью РК является отсутствие связки, что довольно сильно снижает ее разупрочнение при нагреве и предопределяет возможность применения скоростей резания, существенно превышающих скорости резания инструментом из твердого сплава (до 2,5 раз) [42]. Несмотря на это, отсутствие связующей фазы определяет низкую трещиностойкость, прочность и сопротивляемость циклическим тепловым нагрузкам, поэтому основная область использования РК - чистовая обработка в условиях жесткой технологической системы [42]. При обработке с повышенными значениями сечения среза, при прерывистом резании, и с применением СОЖ с использованием керамического инструмента существенно снижается эффективность его применения из-за высокой вероятности внезапного отказа вследствие хрупкого разрушения режущей части инструмента [42]. Причиной формирования фронта трещин является низкая трещиностойкость керамики. Трещины не встречают барьеров из-за отсутствия пластичной связующей фазы, способной затормозить или остановить их развитие. Выкрашивание режущих кромок керамического

инструмента является главным показателем износа, причём это не зависит от скорости резания, так как температурный фактор не оказывает заметного влияния на трансформацию механизма изнашивания [42, 62, 63, 85, 98].

Главной проблемой использования сменных многогранных пластин из РК при обработке резанием материалов повышенной твердости, заключается в наличии большого количества твердых включений в объеме обрабатываемого материала, вызванное неравномерностью распределения химических элементов, либо нарушение технологического процесса на заготовительных операциях [62, 88, 98].

Низкая обрабатываемость резанием материалов с повышенной твердостью частично объясняется возникающими чередующимися между собой растягивающими и сжимающими напряжениями на рабочих поверхностях инструмента, поэтому инструмент испытывает переменные нагрузки, особенно в условиях прерывистого резания, свойственного фрезерованию [62, 84, 88, 98].

Марки РК можно условно разделить на группы:

1. Керамика на основе оксида алюминия или циркония («белая») с добавками оксидов других металлов: Mg, Zn, Cr и других. Сюда же относится безоксидная керамика (основа - нитрид кремния);

2. Оксидно-карбидная («черная») керамика, промежуточная по составу между оксидной керамикой и твердыми сплавами. В качестве упрочняющей составляющей применяют карбиды титана, молибдена, вольфрама, нитриды титана и карбиды других тугоплавких металлов в количестве от 10 до 40 %;

3. Керметы — оксиды алюминия с добавкой металла (Mo, Cr, Ni и др.). Типичный представитель этого класса $Al_2O_3 + 10\% Mo$. Режущие свойства керметов существенно уступают оксидной и оксидно-карбидной керамике, но их прочность выше;

4. Керамика смешанного типа основана на оксиде алюминия и нитриде кремния (сиалон) [38, 98].

Керамические СМП для фрезерования выпускаются квадратной (рисунок 2.2) и круглой формой (рисунок 2.3) ГОСТ 19042-80 (Пластины сменные многогранные. Классификация. Система обозначений. Формы).

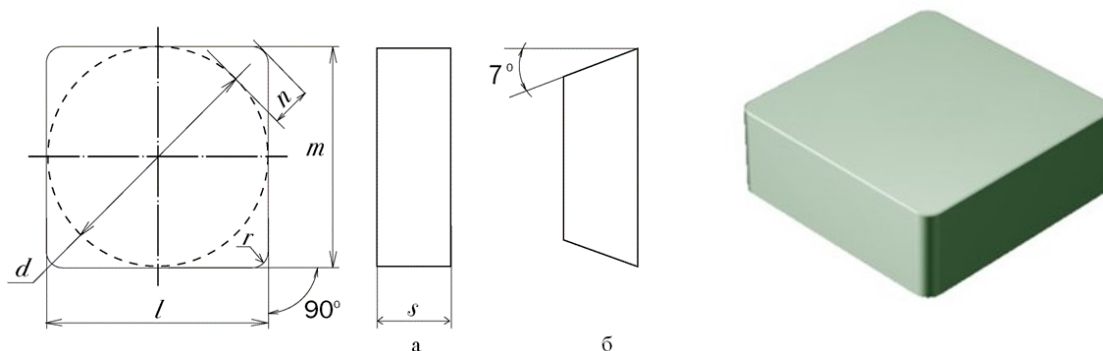


Рисунок 2.2 - Керамические СМП квадратной формы

Керамические СМП выпускаются двух классов: пластины класса U шлифуются по опорным и задним поверхностям до $Ra = 0,32$ мкм, а пластины класса G шлифуются по опорным и задним поверхностям с более жесткими допусками и оснащаются фасками с параметрами $f = 0,2$ мм и $\gamma = 20^\circ$ по периметру с обеих сторон [98].

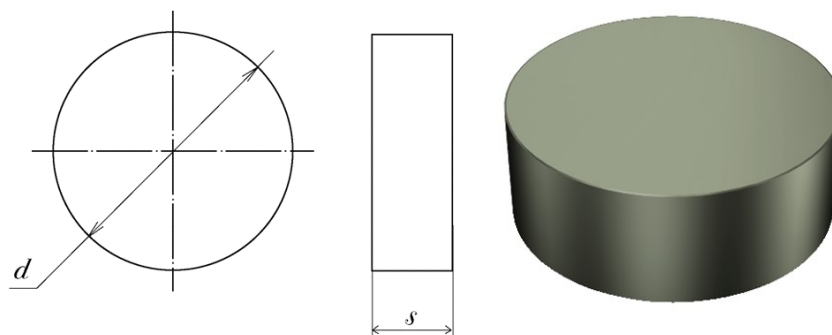


Рисунок 2.3 - Керамические СМП круглой формы

По ГОСТ 26630-85 определены пределы параметров зон выкрашивания керамических СМП, которые позволяют говорить о работоспособности каждой пластины при обработке резанием (рисунок 2.4). Такими зонами являются:

- зона А – на радиусе при вершине пластины;
- зона В – на рабочей части режущей кромки пластины длиной l ;

- зона С – на средней части режущей кромки пластины длиной l , где параметры выкраиваний, определяющие работоспособность каждой пластины из керамики [98] представлены в таблице 2.1.

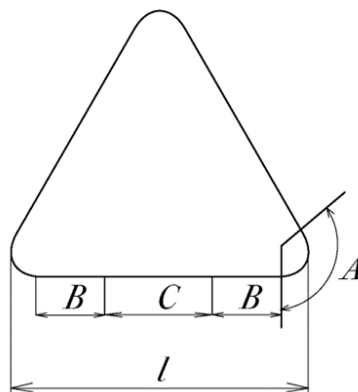


Рисунок 2.4 - Зоны выкраивания керамических СМП

В зонах А и В керамических СМП класса U допускается не более одного выкраивания с каждой стороны, а в зоне С для пластин всех классов допускается также не более одного выкраивания [98].

Таблица 2.1 - Параметры выкраиваний керамических СМП

Длина режущей кромки керамической СМП, мм	Зона	Величина выкраивания, мм	
		G	U
До 16	A	Не допускается	0,1...0,2
	B	Не допускается	0,15...0,3
	C	0,1...0,2	0,15...0,3
Свыше 16	A	Не допускается	Не допускается
	B	Не допускается	Не допускается
	C	0,1...0,2	0,2...0,4
Для круглых пластин класса G допуск по параметру B составляет 0,1...0,2			

Главными причинами, сдерживающими более широкое применение керамики в металлообработке, являются высокая хрупкость, низкая прочность материала (всего 500...700 МПа), значительная чувствительность к локальным

напряжениям и дефектам структуры [74, 95]. Устранение этих недостатков резко повысит использование керамического инструмента в металлообработке. Поэтому основная проблема при создании новых керамических материалов это повышение прочности и уровня трещиностойкости. Возможно, одними из путей решения этой проблемы станут армирование керамической матрицы дисперсными частицами и нитевидными кристаллами тугоплавких соединений, применения «улучшенного» горячего изостатического прессования при изготовлении СМП, получение слоистых композиций [3, 74, 98].

Благодаря высоким результатам, полученным при применении инструмента из сплавов ВЗ, ВОК60 и ВОК63, работы по исследованию оксидно-карбидных сплавов были продолжены [74]. Сравнительные характеристики свойств карбидов показали, что наиболее перспективным из них является карбид титана, который обладает высокой твердостью, износостойкостью, достаточной теплопроводностью и упругими свойствами. Таблица с описанием физико-механических свойств наиболее распространённых отечественных марок режущей керамики представлены в таблице 2.2. Карбид титана широко применяется как основа для твёрдосплавных инструментальных материалов [74]. Кроме того, он недефицитен и легко получается восстановлением оксида сажей [3, 62, 74, 98, 109].

Важно отметить, что надежность режущего инструмента, оснащенного керамическими режущими пластинами, возрастает при увеличении скорости резания в строго регламентируемом диапазоне при обработке каждого конкретного материала [74]. Это необходимо учитывать при проектировании технологических операций с использованием режущего инструмента со сменными керамическими пластинами для технологического оборудования, работающего в автоматическом или полуавтоматическом режимах [74, 98].

Таким образом, особенности микроструктурных параметров каждой режущей пластины определяются на стадии изготовления, поэтому возникает необходимость в детальном изучении технологического процесса изготовления

режущей керамики для оценки ключевых факторов, влияющих на дальнейшую работоспособность пластин.

Таблица 2.2 - Физико-механические свойства наиболее распространенных отечественных марок режущей керамики

Марки керамики	Плотность, г/см ³	Предел прочности при изгибе, МПа	Твердость, HRA
ЦМ332	3.85...3.90	300...350	91
ВЗ	4.50...4.70	650	93
ВОК60	4.20...4.30	650	94
ВОК63	4.20...4.30	650	94
ВОК200	4.20...4.30	650	94
ВОК71	4.22	650	94
ВО13	3.92...3.96	400...450	92
ВШ75	3.90	400...600	93
Силинит-Р	3.20...3.40	500...700	92...94
ОНТ-20	4.20	680	94

2.2 Способы получения режущей керамики

Технология получения оксидно-карбидных твердых сплавов ВЗ, ВОК60, ВОК63, ВОК 200 заключается в следующих операциях: приготовление керамической смеси ЦМ332, приготовление твердого раствора карбидов Mo_2C - TiC - WC при температуре 1900...2000 °С. Смесью материалов для металлургической обработки (шихтой) является следующий состав: $\text{TiO}_2 + \text{C} + \text{Mo} + \text{WC}$ [3, 62,74, 98].

Затем производится получение смесей в твердосплавной мельнице с твердосплавными шарами, размол за 120 ч ЦМ332 и 15 % карбидов Mo_2C - TiC - WC для марки ВЗ, а для ВОК60, ВОК63, ВОК 200 добавляется 25 % Mo_2C - TiC - WC [3, 62, 74, 98].

Далее следует приготовление изделий из сплавов ВЗ и ВОК60, ВОК63, ВОК-200. Спрессованные при давлении 750 МПа, замешанные на растворе каучука в бензине образцы ВЗ и ВОК60 спекаются в графитовой печи при 2300 °С. Сплав ВОК63 и ВОК 200 получается горячим прессованием при 1600...1700 °С с выдержкой 5 мин при давлении 20...30 МПа. Стойкость при резании чугуна у

этих материалов в 1,5 раза выше, чем у пластин из ЦМ332 (при скорости резания 300 м/мин) [62, 74].

Свойства и параметры структуры этих сплавов следующие:

- твердость HRA > 93;
- предел прочности $\sigma_{изг} = 550...650$ МПа;
- плотность 4,3...4,5 г/см³;
- пористость менее 1 %;
- размер зерен 0,5...1,5 мкм [74, 98].

Сплавы двухфазные: твердый раствор карбидов в фазе на основе оксида алюминия. При горячем прессовании получается более мелкозернистый сплав с более высокими режущими свойствами [3, 62, 74, 98].

После изготовления проходит операция контроля. Сменные многогранные пластины на контроль предъявляются партиями, состоящими из пластин одного типоразмера, одной марки, выполненных по одному технологическому процессу за определенный промежуток времени.

2.3 Микроструктура режущей керамики

Исходным сырьем для изготовления керамико-металлических материалов служит технический глинозем (Al_2O_3), его получают из боксита при производстве алюминия [98]. Технический глинозем, содержащий 98,5...99,5 % Al_2O_3 , сперва прокаливают при температуре 1400...1600 °С, после чего размалывают мокрым способом в шаровых мельницах или других размольных установках до требуемой зернистости порошка в пределах 1...2 мкм [13, 14, 17, 98].

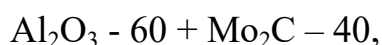
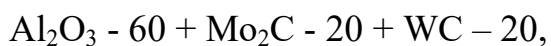
Вследствие истирания стенок барабана и размольных шаров при размоле глинозема происходит загрязнение размалываемого порошка железом. Эти примеси удаляются обработкой кислотами. После этого размельченный материал тщательно промывается и высушивается. К высушенному мелкозернистому глинозему примешивают требуемые добавки в зависимости от изготавливаемого режущего материала [98]. Металлы (к материалам типа кермет) и карбиды металлов (в оксидно-карбидную керамику) добавляются в глинозем в виде

тонкого чистого порошка (размеры зерен менее 2 мкм). Порошкообразные смеси тщательно перемешиваются в шаровых или вибрационных мельницах для обеспечения равномерного распределения отдельных компонентов материала [13, 98].

Режущие пластины формируются прессованием увлажненного порошка или литым пластифицированной массы под давлением [98]. Для облегчения процесса прессования и предотвращения возникновения пороков и дефектов в изделии при прессовании смеси порошков из металлов и их окислов в приготовленную массу добавляют целлюлозу, при изготовлении оксидно-карбидной керамики - несколько процентов гликоля (двухатомного спирта) [13, 14, 98].

Отпрессованные на гидравлических прессах давлением около 1000 кгс/см² или литые пластины сушат. Затем керамико-металлический материал спекается при температуре 1820...1880 °С ± 20 °С [58, 98]. Спекание оксидно-карбидной РК производится в печах с молибденовыми элементами и газовоздушных печах. Для спекания оксидно-карбидной керамики применяют трубчатые угольные печи [13, 14, 98].

Среди известных марок РК чаще всего встречаются композиции, содержащие (%) [98]:



Современные марки РК типа ВОК200 содержат $\text{Al}_2\text{O}_3 - 75\% + (\text{Ti}, \text{W}, \text{Mo}) \text{C} - 25\%$, эти данные подтверждаются при обработке полученного на металлографическом микроскопе изображения при помощи ЭВМ [98] (рисунок 2.5).

Составляющие оксидно-карбидной керамики, выделенные различными цветами на изображении, равномерно распределяются в поле зрения микроскопа [98].

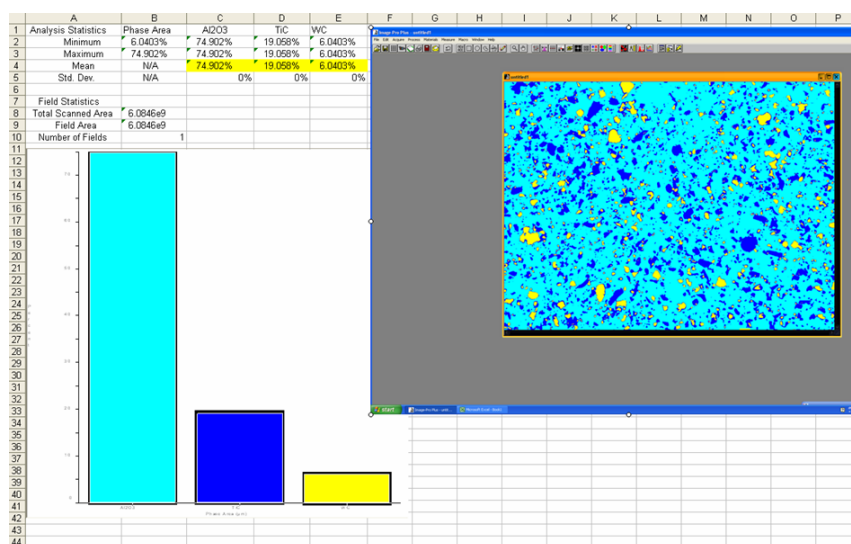


Рисунок 2.5 - Процентное распределение Al_2O_3 , TiC и WC в оксидно-карбидной керамике

Предел прочности на изгиб этих марок режущей керамики соответственно равен $\sigma = 31; 45; 70$ кгс/мм², предел прочности на сжатие $\sigma = 259,3 \pm 14,8$ и 300 кгс/мм² [98].

Плотность и твердость оксидно-карбидной керамики ВОК200 соответственно равны 4,46; 4,5; 4,6 г/см³ относительно параметров 91,8; 92; 94 (по HRA) [98].

Модуль упругости - 36054, 35114, 32994 кгс/мм², соответственно тех же вышеуказанных относительных параметров [58, 98].

Коэффициент теплового расширения РК находится в пределах значений $7,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ и $7,2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ в температурном интервале между 20 и 600 °C [58, 98].

Оксидно-карбидная керамика имеет низкую теплопроводность, снижающуюся в 1,1...1,25 раза по мере повышения температуры в диапазоне от 50 до 600 °C. В сравнении с оксидной керамикой оксидно-карбидная имеет более высокую теплопроводность, которая выше, чем у специальных твердых сплавов на основе карбида титана. Оксидно-карбидная РК лучше оксидной керамики сопротивляется резким и частым изменениям температуры [12, 98].

Важнейшей характеристикой керамического материала является его электропроводность - мера способности вещества проводить электрический ток [98].

Проведённые ранее исследования показали, что сменные многогранные пластины из РК обладают определенной величиной электропроводности. У РК, составными компонентами которых являются: оксид алюминия, металлы или карбиды металлов, электропроводность повышается с ростом металлических присадок [98].

Нижняя граница возникновения электрической проводимости системы $Al_2O_3 - Mo_2C$ лежит у состава с 40...50 % по массе карбида молибдена [98].

Как любой токопроводящий материал режущая керамика обладает определенной величиной электрического сопротивления - физическая величина, характеризующая свойства проводника препятствовать прохождению электрического тока и равная отношению напряжения на концах проводника к силе тока, протекающего по нему.

Также известно, что температурный коэффициент электрического сопротивления приобретает положительное значение по мере повышения процентного содержания карбида титана в РК. Альфа и гамма глиноземы являются диамагнитными материалами, поэтому и оксидно-карбидная керамика может быть отнесена к этой группе материалов. Вода или охлажденная жидкость не оказывают вредного влияния на РК. Карбиды тяжелых металлов, содержащиеся в оксидно-карбидной керамике, являются стойкими против большинства слабых кислот и щелочей.

Керамико-металлические режущие материалы более износостойки, чем твердые сплавы при трении, скольжении и истирании [17, 58, 88].

На рисунке 2.6 приведен фрагмент фотографии структуры специально подготовленной пластины оксидно-карбидной РК марки ВОК200 при увеличении в 9000, полученный при помощи металлографического микроскопа [62, 98].

При рассмотрении непротравленного шлифа оксидно-карбидной керамики отчетливо видны добавочные компоненты (металл или карбид) в виде светлой составной части в темной основной оксидной массе. Отсюда можно получить представление об объемном распределении добавочных компонентов, о равномерности распределения, о размерах и форме зерен [96, 98].

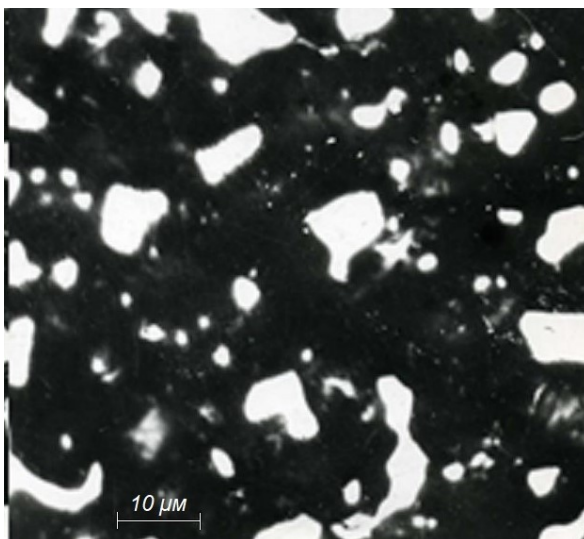


Рисунок 2.6 - Структура оксидно-карбидной керамики при увеличении в 9000 раз

Высокая мелкозернистость структуры керамико-металлического материала наблюдается как у материалов, содержащих большое количество карбидов, так и у материалов с малым количеством карбидов [98].

Вязкость РК оценивается по излому - если имеет несколько раковин, то это признак сравнительно хорошей вязкости; если же наоборот, поверхность излома совершенно гладкая, то это признак слишком высокой хрупкости [98].

Разница в значениях микротвердости основной оксидной составной части (Al_2O_3) и дополнительного компонента значительна там, где окись алюминия является наиболее твердой составной частью [98].

Микротвердость по Виккерсу основной части колеблется от 2350 до 2950, микротвердость дополнительного компонента - 1700...2080 кгс/мм² [98].

Изучение пластин ВОК200 при рентгеноструктурном анализе показало [98], что основной фазой в них является окись алюминия α - Al_2O_3 , а второй фазой - твердый раствор на основе карбида титана с периодом решетки, $a = 4,3066 \text{ \AA}$ и $a = 4,31 \text{ \AA}$, металлографическое исследование подтвердило наличие двухфазной структуры материала, состоящей из фазы α - Al_2O_3 (с основной массой зерен 5...10 мкм) и блестящих металлических прожилок другой фазы, не образующих сплошной сетки [17, 98].

В работах [58,98] на основании химического анализа произведен расчет количественного содержания карбидного компонента и необходимого содержания углерода. Установлено, что основная фаза α - Al_2O_3 составляет 75 % массы, вторая фаза - твердый раствор (Ti, W, Mo) C – 25 %. Твердый раствор получен при температуре 1700...1800 °С и имеет следующий состав (% мол) - TiC – 53, WC – 6, Mo₂C - 41. Исследование при помощи электронного микроскопа марки ЭМ-125 дало возможность более глубокого изучения структурных составляющих режущей керамики за счет увеличения 50000 раз. На рисунке 2.7 приведена фотография структуры РК марки ВОК63, на которой были обнаружены поры различной величины и зерна карбидов, имеющие сложную граничную конфигурацию [58, 98].



Рисунок 2.7 - Поры режущей керамики при увеличении в 50000 раз

2.4 Способы определения удельного электрического сопротивления оксидно-карбидной режущей керамики

Необходимость изучения методов определения удельного электрического сопротивления оксидно-карбидных режущих пластин обусловлена потребностью создания прикладного метода определения свойств режущих пластин непосредственно на металлообрабатывающих предприятиях.

Равномерное распределение карбидных зерен (Ti, W, Mo)С в оксиде алюминия позволяет говорить о наличии связующей конгломерации в объеме, которую можно предположить в следующем изображении [58, 98].

Используя метод, который позволяет осуществить измерение электрического сопротивления РК, было установлено, что электрическое сопротивление имеет прямую зависимость от структурных составляющих [58]. Непосредственный контакт по карбидным зернам с обеих сторон исследуемой керамической СМП (рисунок 2.8; А – В, А – С или В – С) позволяет получить определенную величину электрического сопротивления, а при попадании одного контакта на зерно, а другого - на связующую фазу Al_2O_3 (А – D, В – D или С – D) - отсутствие электрического сопротивления [58, 98].

Таким образом, для корректного определения электрического сопротивления, необходимо производить измерение с помощью объёмного контакта на поверхности измеряемого образца, что позволит выразить из полученного значения активного сопротивления объёмную интегральную величину электрического сопротивления РК.

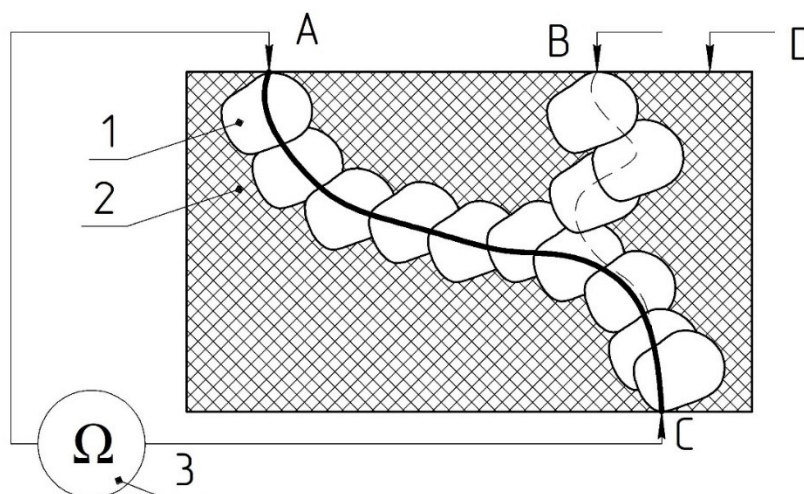


Рисунок 2.8 – Возникновение цепи протекания электрического тока через карбидные включения: 1 - карбидные зерна; 2 - связующая фаза, 3 – омметр; А, В, С и D – места контактов прибора с поверхностью керамической СМП

Результаты работы [88] показали наличие связи величины электрического сопротивления со структурными параметрами оксидно-карбидной РК. Была получена информация, что образцы, обладающие удельным электрическим

сопротивлением близким к $R = 100 \cdot 10^{-4}$ Ом·м, имеют более качественные структурные параметры по сравнению с прочими. У них меньший средний диаметр карбидных зёрен (D_{cp}), наибольшая длина граничной линии карбидных зёрен (C) и большее количество самих карбидных зёрен (N), и при этом малый процент пористости поверхности (Π).

Проведённые в работе [58, 98] исследования показали, что образцам пластин из РК, которые обладают относительно малым удельным электрическим сопротивлением ($R = 10 \cdot 10^{-4}$ Ом·м), присущи большой диаметр зерен карбидов металлов 2,2 мкм, большой процент пористости поверхности ($\Pi = 14$ %), малое значение суммарной линии протяженности границ зерен карбидов ($C = 2,76$ 1/мм² · 100), сравнительно небольшое количество зерен ($N = 21,5$) [58, 98].

Образцы пластин оксидно-карбидной РК с относительно большим электрическим сопротивлением ($R = 100 \cdot 10^{-4}$ Ом·м) обладают меньшим диаметром зерен карбидов 1,5 мкм, малым процентом пористости поверхности ($\Pi = 8$ %), большим количеством карбидных зерен ($N = 46,7$) и большим значением суммарной линии протяженности границ зерен карбидов ($C = 5,186$ 1/мм² · 100) [58, 98].

Количество зерен карбидов у отобранных пластин определяется по формуле (2.1) [98]:

$$N = \Pi + 0,5P - 1, \quad (2.1)$$

где Π - количество зерен, не пересекающихся с ограничивающим квадратом площадью

$$S = 625 \text{ мкм};$$

P - зерна, пересекающиеся с ограничивающим квадратом (рисунок 2.9).

Суммарная линия протяженности границ карбидных зерен определяется по формуле (2.2) [98]:

$$C = 0,35 \frac{M}{A}, \text{ 1/мм}^2, \quad (2.2)$$

где M - число пересечений границ зерен со стороной квадрата A .

Средний диаметр карбидных зерен определяется по формуле (2.3) [98]:

$$D_{CP} = \sum D_{X,Y}, \quad (2.3)$$

где D_{CP} - средний диаметр зерен по оси X и Y.

Измерения величин H, C и проводятся по всей площади передней поверхности образцов, в итоге выполняются по 200...400 замеров по каждой такой поверхности [98].

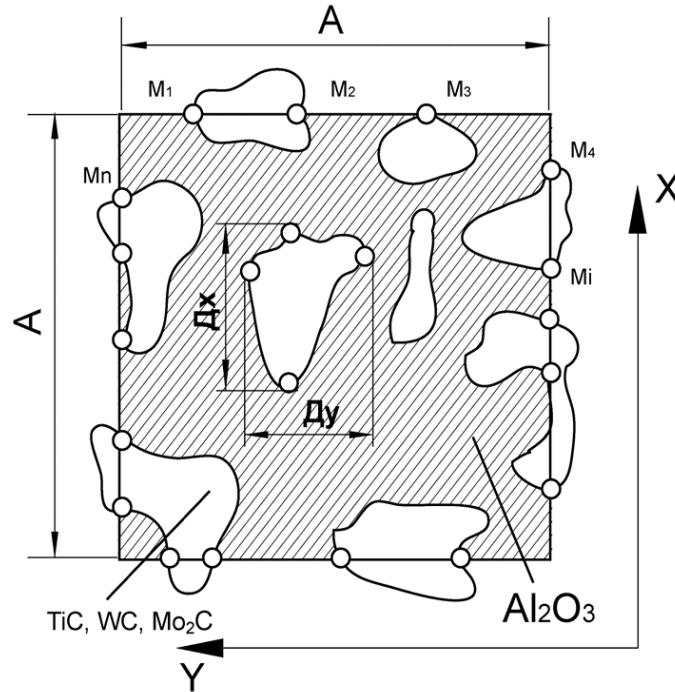


Рисунок 2.9 - Схема расчёта количества и размера карбидных включений в режущей керамике

По результатам измерений и вычислений удалось выразить функциональную зависимость $R = f(H, C, D_{CP})$ уравнением (2.4) [98]:

$$R = 542,9 \frac{H^{2,35}}{C^{1,14} \cdot D_{CP}^{3,029}}, \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (2.4)$$

Обобщенные результаты позволили получить также однофакторные графические зависимости:

- $R = f(H)$ при C и D_{CP} , равные постоянной величине;
- $R = f(C)$ при H и D_{CP} , равные постоянной величине;
- $R = f(D_{CP})$ при H и C, равные постоянной величине [98].

Графическая зависимость $R = f(H, C, D_{cp})$ представлена на рисунке 2.10 [98].

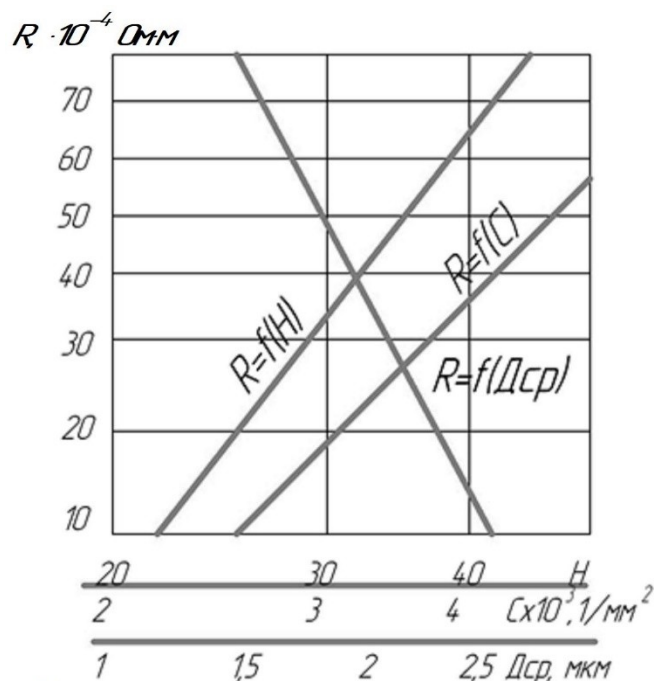


Рисунок 2.10 - Графическая зависимость удельного электрического сопротивления режущих пластин - R от количества карбидных зёрен – H , от суммарной линии протяженности границ карбидных зерен – C и от среднего диаметра карбидных зёрен - D_{cp}

При исследовании специально подготовленных образцов керамических СМП одной марки с различными величинами электрического сопротивления на современном металлографическом микроскопе, позволяющем автоматически определить параметры микроструктуры режущей керамики, результаты расчетов были подтверждены [98, 108].

На рисунке 2.11 показана фотография микроструктуры (увеличение в 500 раз) режущей керамики марки ВОК200 с электрическим сопротивлением $R = 12 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и фотография микроструктуры (увеличение в 500 раз) режущей керамики марки ВОК63 с электрическим сопротивлением $R = 98 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, полученные на микроскопе [98]. Результаты, полученные после компьютерной обработки представленных фотографий, показали, что значения средней величины размеров зерен карбидов и распределение их в основной фазе отличаются от расчетных значений не более чем на 5...7 % [98].

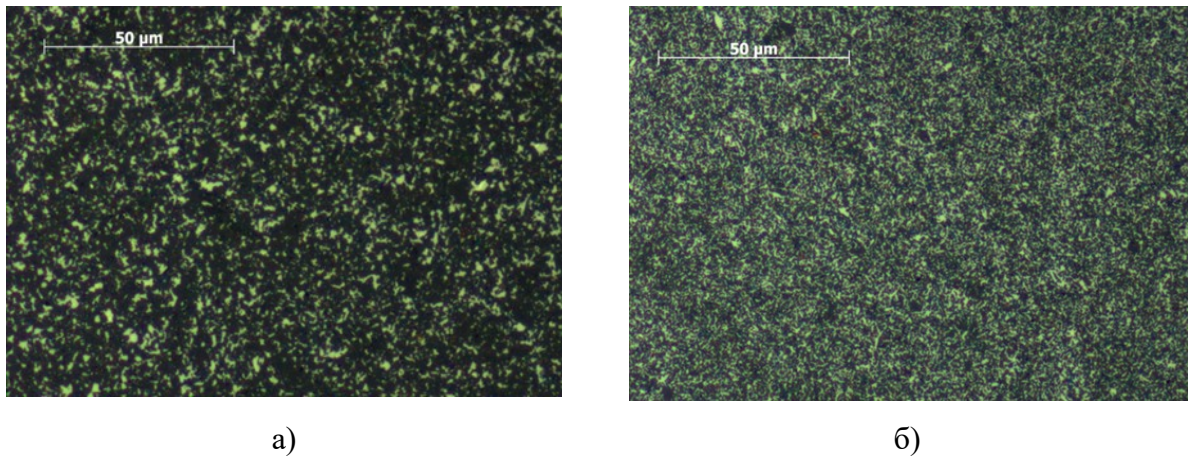


Рисунок 2.11 - Микроструктура оксидно-карбидной керамики марки ВOK200 с различным удельным электрическим сопротивлением ($\cdot 10^{-4}$ Ом·м): а – удельное электрическое сопротивление пластины $R = 12$; б – удельное электрическое сопротивление пластины $R = 98$

В процессе обработки металлов резанием одними из самых важных факторов являются прочностные свойства режущего материала инструмента, поэтому результаты данного исследования позволяют рекомендовать для более интенсивных режимов обработки пластины РК с величиной электрического сопротивления близкой к $100 \cdot 10^{-4}$ Ом·м [98, 105].

Несмотря на то, что зависимость микроструктуры от удельного электрического сопротивления была обнаружена ранее в исследовании [98], не существовало прикладного метода измерения сопротивления режущих пластин [113]. В ходе данного исследования были изучены и опробованы различные методы неразрушающего контроля микроструктуры и электрического сопротивления [46, 80, 99]. В результате поиска были отобраны 2 наиболее достоверных и удобных метода, а именно:

- Контактный метод (рисунок 2.12), при котором объёмный электрический контакт обеспечивается с помощью жидкотекучего токопроводящего материала. В ходе данного исследования было разработано и запатентовано (патент RU 2729169) устройство для проведения измерений [76];

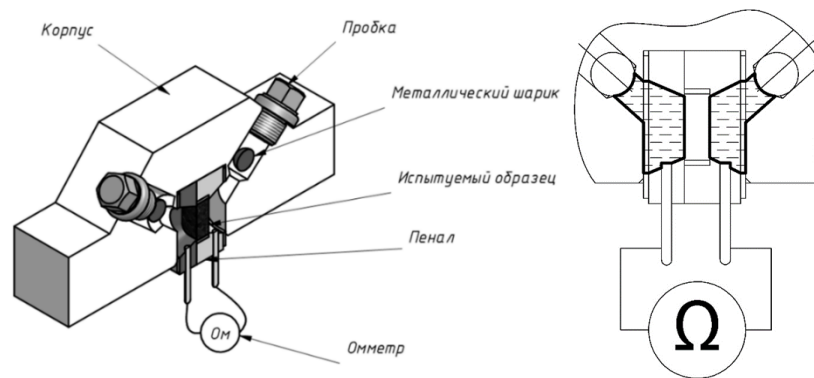


Рисунок 2.12 – Устройство для контактного метода измерения удельного электрического сопротивления режущих пластин

- Метод вихревых токов (рисунок 2.13). Для проведения измерений данным методом был использован стандартный вихретоковый измеритель электропроводности Константа К-6 и приспособление, необходимое для ориентирования режущей пластины на датчике прибора.

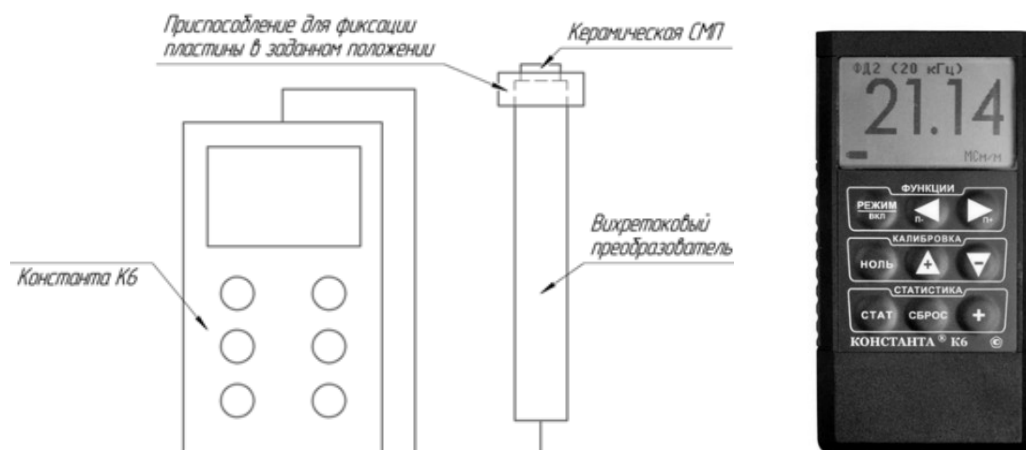


Рисунок 2.13 – Вихретоковый метод определения удельного электрического сопротивления на базе вихретокового измерителя электропроводности Константа К-6

В настоящее время в технологических процессах, в которых используются оксидно-карбидные режущие пластины для оснащения многолезвийного инструмента, не уделяют должного внимания различиям микроструктурных параметров, что приводит к преждевременному и неконтролируемому износу всех режущих пластин, установленных на инструмент, в независимости от индивидуальных свойств каждой пластины. Причиной этому является увеличение нагрузки на режущую кромку инструмента при износе стоящей перед ней менее

прочной пластины. Со временем выходят из строя и соседние режущие пластины. Это приводит к тому, что оставшиеся зубья фрезы вынуждены снимать припуск материала, рассчитанный на исходное количество зубьев инструмента [2, 11, 77, 104].

Данный процесс также сопровождается увеличением амплитуды автоколебательного процесса, что также негативно сказывается на ресурсе керамического инструмента. Качество обработки поверхности при выходе из строя даже одной режущей пластины резко ухудшается и продолжает стремительно ухудшаться до окончания операции [32, 33, 54, 56, 57].

Изображение описанной выше схемы компоновки (смешанная компоновка) торцевой фрезы оксидно-карбидными режущими пластинами представлена на рисунке 2.14, а, где R1...R6 – пластины с различными показателями удельного электрического сопротивления и, соответственно, различными механическими свойствами.

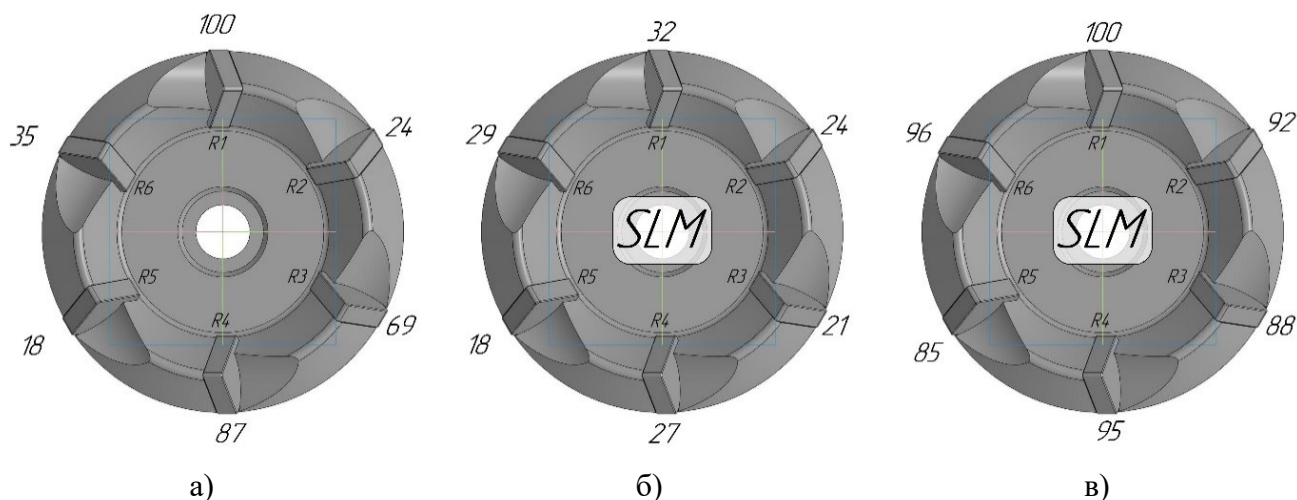


Рисунок 2.14 – Компоновки торцевых фрез оксидно-карбидными режущими пластинами с различным удельным электрическим сопротивлением ($\cdot 10^{-4}$ Ом·м):

а – смешанная компоновка, б – однородная (SLM) низкоомная компоновка,

в – однородная (SLM) высокоомная компоновка

Для осуществления возможности прогнозирования стойкости такого инструмента и эффективного использования его ресурса целесообразно оснащать фрезы режущими пластинами с максимально однородными свойствами (рисунок 2.14, б, в). Ресурс таких пластин будет примерно одинаков, что обеспечит

длительную стабильную и прогнозируемую работу инструмента [58, 61, 111].

Таким образом, в ходе данного исследования была предложена методика селективного оснащения (SLM – Selective Layout Method) многолезвийного инструмента, в которой фреза оснащается пластинами со сходными значениями удельного электрического сопротивления, что обеспечивает максимально однородные свойства режущих зубьев инструмента, и разработано устройство для прикладного определения степени однородности микроструктуры РК.

2.5 Выводы по второй главе

Проведённые исследования по изучению РК, особенностей её изготовления и эксплуатации определили следующие выводы и результаты:

- для технологических операций, в которых на инструмент действуют ударные нагрузки, в том числе для фрезерования, подходят композиции РК на основе оксида алюминия (Al_2O_3) и карбидов титана вольфрама и молибдена (TiC, WC, MoC);

- структурные параметры оксидно-карбидной керамики одной марки, определяемые количеством карбидных зерен, суммарной линией протяженности границ карбидных зерен и пористостью материала, могут различаться более чем в 2 раза, что обусловлено сложностью изготовления сверхтвёрдых спекаемых композиционных материалов;

- оксидно-карбидные режущие пластины, обладающие мелкозернистой структурой отличаются лучшей работоспособностью и стойкостью к изнашиванию (на 30-50 % в сравнении с крупнозернистыми образцами), что требует определения структурных параметров каждой отдельной режущей пластины для прогнозирования периода стойкости инструмента;

- на основе анализа существующих методов неразрушающего контроля микроструктурных параметров РК и других неметаллических токопроводящих материалов разработано устройство для прикладного определения микроструктуры керамических режущих пластин непосредственно перед началом технологической операции механической обработки (патент №2729169);

- учитывая существующий опыт разделения керамических режущих пластин на группы для прогнозирования стойкости при токарной обработке сталей, предложен метод селективного оснащения многолезвийного инструмента (SLM) оксидно-карбидными режущими пластинами для создания однородных компоновок по структурным параметрам, что позволит максимально эффективно использовать каждую отдельную режущую пластину;

Полученные результаты определяют следующие дальнейшие задачи:

- произвести математическое моделирование поведения технологической системы фрезерования с использованием селективного метода оснащения многолезвийного инструмента керамическими режущими пластинами;

- провести экспериментальным исследованием фрезерной обработки с использованием селективного метода оснащения многолезвийного инструмента керамическими режущими пластинами;

- разработать технологические рекомендации при обработке высокоточных плоских контактных поверхностей при чистовом высокоскоростном фрезеровании с учетом параметров работоспособности РК.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ С УЧЁТОМ ОСНАЩЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА КЕРАМИЧЕСКИМИ ПЛАСТИНАМИ ПО СЕЛЕКТИВНОМУ МЕТОДУ

В ходе проведенного анализа технической литературы установлено, что при фрезерной технологической операции колебания возбуждаются по причине цикличности врезания зубьев инструмента в заготовку, которые приводят к вынужденным (периодическим) колебаниям. Помимо этого, вынужденные колебания проявляются в случаях, когда совпадает зубцовая частота (кратная ей частота) с собственной частотой детали [20, 41, 45].

Теоретической основой для описания процесса возникновения автоколебаний является запаздывание силы резания по отношению к силе трения. В результате данный процесс приводит к повышению силового воздействия и износу режущей пластины по передней и задней поверхности, что приводит к повышению амплитуды вибраций [100, 103]. Следовательно, происходит ухудшение шероховатости поверхности и точности формы при фрезерной обработке.

В работе [98] автором установлено влияние удельного электрического сопротивления на стойкостные характеристики керамических режущих пластин. Как показали исследования, пластины из оксидно-карбидной керамики с высоким удельным электрическим сопротивлением обладают мелкодисперсной равномерной микроструктурой. Механическая обработка с использованием такого инструмента показала наиболее высокие значения по стойкости и шероховатости поверхности в сравнении с малым удельным электрическим сопротивлением.

Для механической обработки однолезвийным инструментом с керамической пластиной, обладающей определенным структурным составом, значительно проще оценить соответствующие стойкостные возможности, влияющие на качество обработанной поверхности изделия [98]. Однако при многолезвийной обработке стойкостной потенциал подсистемы «инструмент» оценить

значительно сложнее, поскольку каждая керамическая пластина обладает индивидуальной микроструктурой.

В настоящее время в технологических процессах механической обработки используются оксидно-карбидные режущие пластины для оснащения многолезвийного инструмента. Однако при их установке не учитываются различия микроструктурных параметров, что приводит к преждевременному и неконтролируемому износу всех режущих пластин, установленных на инструмент, в независимости от индивидуальных свойств каждой пластины [54].

Причиной этому является увеличение силовой нагрузки на режущую пластину при износе впереди стоящей пластины. Со временем выходят из строя и позади стоящие режущие пластины. В результате оставшиеся пластины вынуждены снимать припуск обрабатываемого материала, рассчитанный на исходное количество зубьев инструмента. Данный процесс также сопровождается увеличением амплитуды автоколебательного процесса. Качество обработки поверхности при выходе из строя даже одной режущей пластины резко ухудшается и продолжает стремительно снижаться. На основании этого установлены и предложены три наиболее рациональные компоновки селективного оснащения торцовых фрез оксидно-карбидными режущими пластинами:

- а) смешанная компоновка;
- б) однородная (SLM) высокоомная компоновка;
- в) однородная (SLM) низкоомная компоновка.

Изображение описанной выше схемы компоновки (смешанная компоновка) торцевой фрезы оксидно-карбидными режущими пластинами представлена на рисунке 2.14, где R1...R6 – пластины с различными показателями удельного электрического сопротивления и, соответственно, различными механическими свойствами.

3.1 Оценка динамических параметров технологической системы фрезерной обработки плоских поверхностей с целью совершенствования работоспособности режущей керамики

В процессе фрезерования плоских поверхностей торцевыми фрезами вероятность появления вибраций, снижающих производительность и качество обработки, выше, чем при других видах механической обработки, вследствие прерывистого контакта инструмента с заготовкой. Причиной возникновения вибраций могут быть: состояние станка; особенности крепления заготовки в зажимном приспособлении; жёсткость сборного инструмента. Однако наибольшее влияние на уровень вибраций оказывает состояние режущего инструмента, которое, главным образом, отражается на качестве обработанной поверхности и требует назначения рациональных режимов фрезерования.

Негативное воздействие вибраций проявляется в снижении производительности и точности обработки, сокращении периода стойкости инструмента, и качества обработанной поверхности, которое становится неудовлетворительным. Повышенный уровень вибраций приводит также к снижению ресурса металлообрабатывающего оборудования, поэтому контроль за динамическими явлениями, уровнем динамических колебаний в технологической системе и разработка способов повышения ее виброустойчивости является важной технической задачей для последующей оптимизации технологических процессов.

Возникновение вибраций при механической обработке обусловлено отсутствием динамической жёсткости входящих в обрабатывающую технологическую систему механической обработки элементов. Помимо общих закономерностей процесса резания при фрезеровании существуют специфические особенности, связанные с прерывистостью работы зубьев фрезы и переменной толщиной срезаемого слоя, что отражается на виброустойчивости системы.

В технологических системах принято различать следующие виды колебаний: собственные (свободные) колебания; вынужденные колебания; параметрические колебания; автоколебания.

В области обработки металлов многолезвийными инструментами, наиболее часто встречаются с возникновением автоколебаний и вынужденных колебаний. Вынужденные колебания вызваны периодическим внешним воздействием и происходят с воздействующей на них частотой. В случае фрезерования они возникают при периодическом процессе входе зуба фрезы в заготовку. Автоколебания - это незатухающие колебания, которые самовозбуждаются и самоподдерживаются в процессе стружкообразования под действием сил резания и трения.

Автоколебания возникают в широком диапазоне режимов резания, и их гораздо труднее устранить, чем другие типы колебаний. Все теории возникновения автоколебаний можно сгруппировать по следующим основным факторам, которые и являются основным источником возникновения автоколебаний при резании:

- упрочнение поверхностного слоя обрабатываемого материала при различии сил резания при врезании и отталкивании режущего инструмента;
- координатная связь в упругой системе, вследствие чего режущее лезвие инструмента при колебаниях описывает в общем случае замкнутую пространственную траекторию, до одного полного цикла, совершая положительную работу для поддержания колебательного процесса;
- запаздывание сил резания при деформации металлов в локальной зоне в процессе резания [59]. Процесс запаздывания сил резания основан на физическом допущении инерционности пластической деформации срезаемого слоя металла.

В целях определения оценки влияния режущих керамических пластин, установленных в многолезвийный фрезерный инструмент, на амплитуду автоколебательного процесса, необходимо составить модель технологической системы механической обработки [54]. Выбор модельной схемы связан с выделением подсистем и определением структуры связей между ними, определением количества степеней свободы и типа обобщенных координат, необходимых для полного описания процессов, происходящих в технологической системе [54].

Сходимость спектральных характеристик исходной и упрощенной моделей были близки, поэтому реализацию перехода осуществляли по методике профессора В.Л. Вейца [54]. В связи с этим, возможен переход к малоразмерной модели с учетом ограниченного частотного диапазона возмущений и слабо диссипативных свойств технологической системы [54].

В качестве объекта исследования выбран широкоуниверсальный фрезерный станок модели 67K25 (рисунок 3.1).

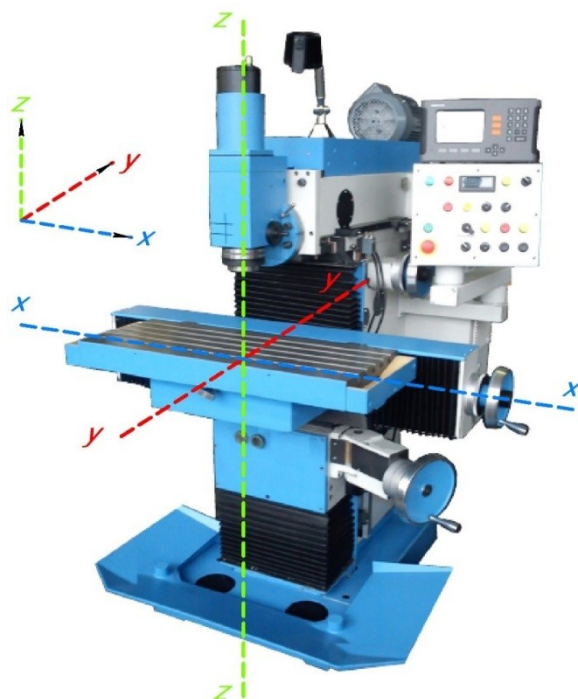


Рисунок 3.1 – Фрезерный станок модели 67K25 с распределенными осями пространственных координат

Оси пространственных координат для выбранного станка были ориентированы по следующим направлениям: ось $Z - Z$ совпадает с осью вращения шпинделя; ось $X - X$ совпадает с направлением продольной подачи; ось $Y - Y$ совпадает с направлением поперечной подачи. В каждом из направлений пространственных координат определялись динамические параметры шпиндельного узла с фрезой и стола с заготовкой. В качестве динамических параметров технологической системы механической обработки выбраны следующие показатели: жёсткость k_i , Н/м; диссипативные силы h_i , (Н·с/м = кг·м/с²·с/м = кг/с); приведённая масса m_i , кг.

Измерение жёсткости подсистемы «шпиндель-фреза» (стандартная торцевая фреза), «шпиндель-фреза с СМП» (фреза со сменными кармическими пластинами) и «стол-заготовка» осуществлялось с использованием динамометра модели ДОСМ-3-0,2 (максимальная допустимая нагрузка 2 кН) и индикатора часового типа. Посредством динамометра воспроизводилась нагрузка на каждую парциальную систему в отдельности в диапазоне усилий от 0 до 1200 Н, что позволяло эмитировать процесс фрезерования заготовки. Возникающие перемещения фиксировались индикатором часового типа. Полученные результаты по индикатору динамометра ДОСМ-3-0,2 сопоставлялись с тарифовочным графиком (рисунок 3.2)

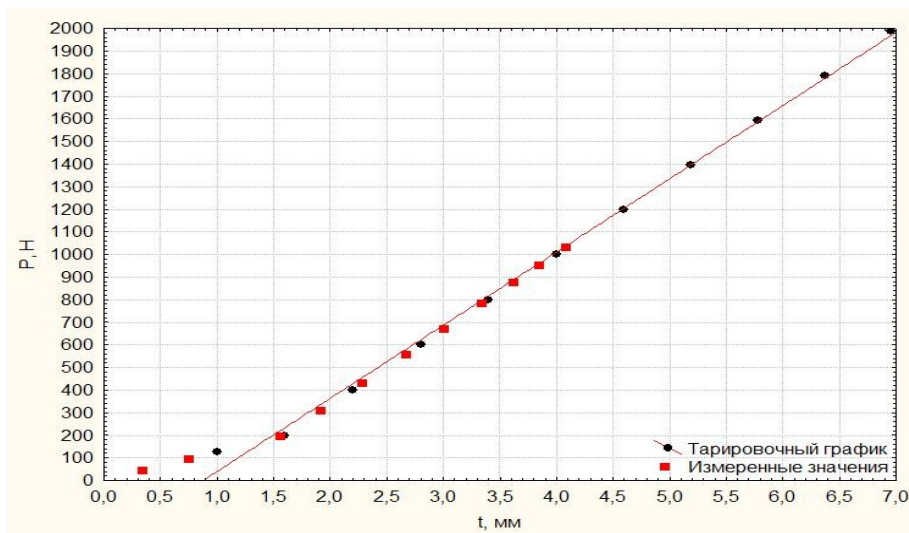


Рисунок 3.2 - Тарифовочный график для динамометра ДОСМ-3-0,2

В процессе экспериментальных исследований все измерения деформации каждого узла осуществляли по три раза, после предварительного трех кратного нагружения-разгружения системой сил, которая превышала номинальную на 25 %. Процесс измерения жёсткости подсистемы «шпиндель-фреза с СМП» представлен на (рисунок 3.3).

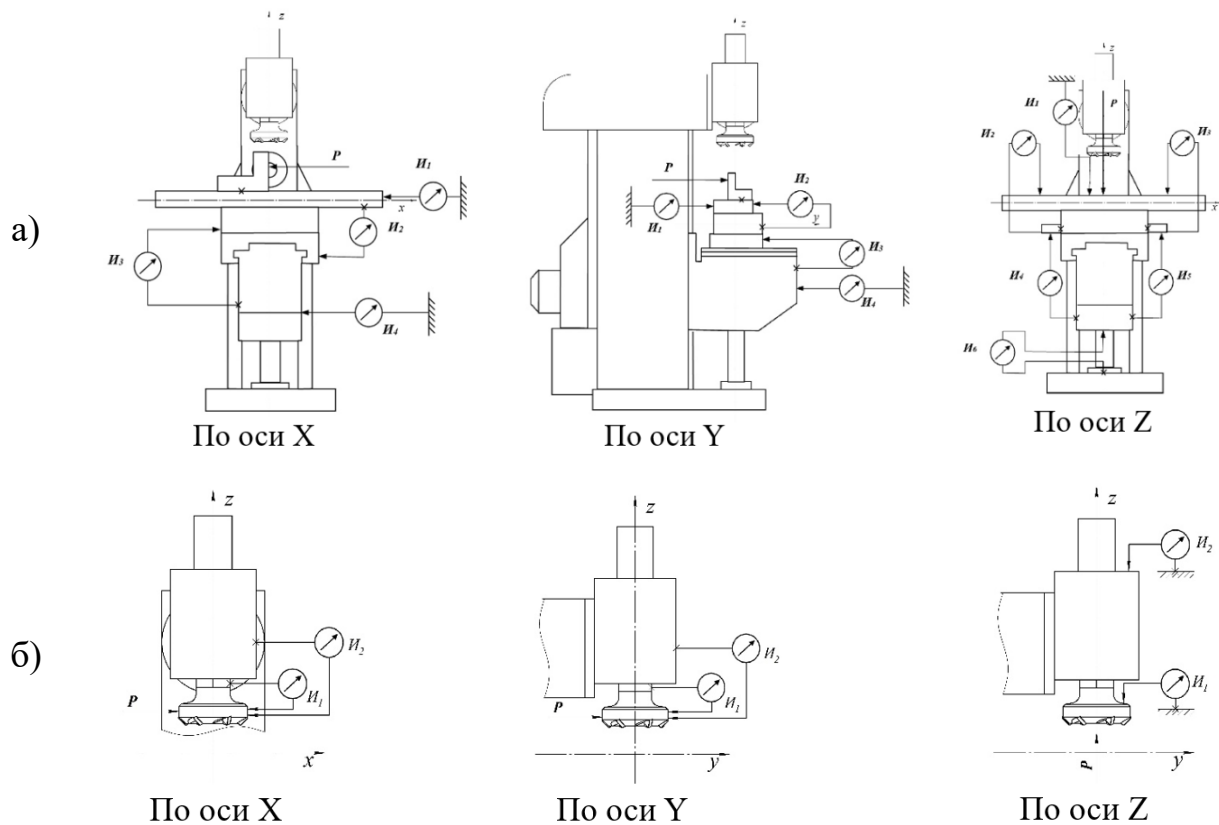
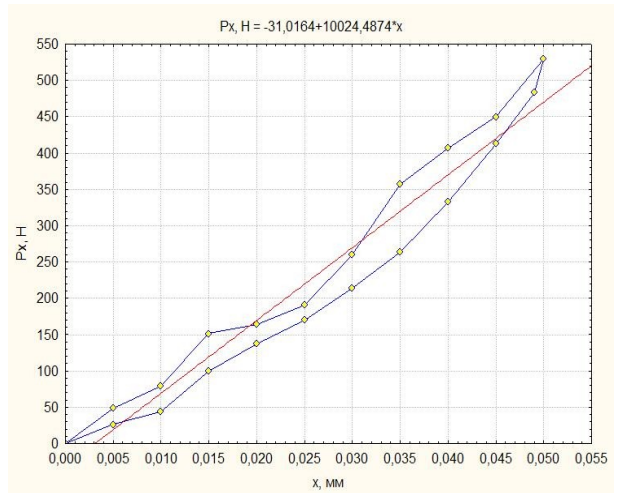
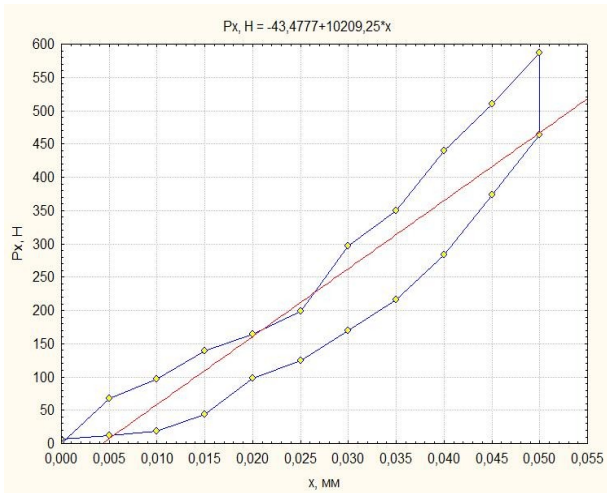


Рисунок 3.3 - Процесс измерения жёсткости подсистем станка:

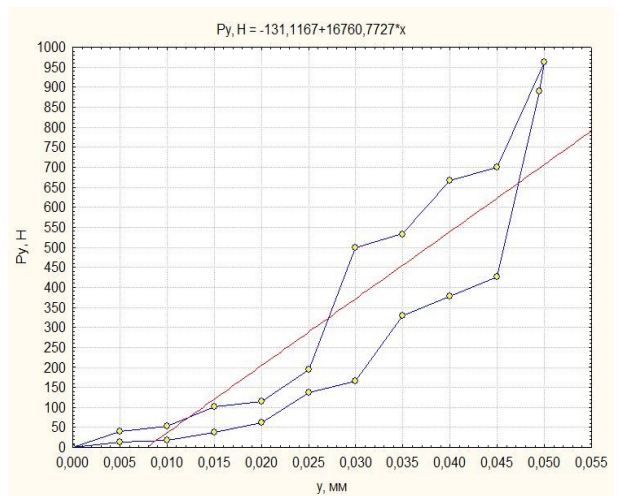
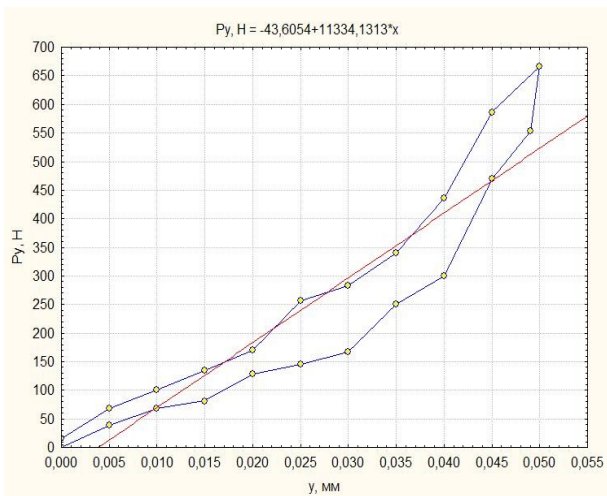
а - схема измерения деформации подсистемы «стол-салазки-консоль»;

б - схема измерения деформации подсистемы «шпиндель-фреза»

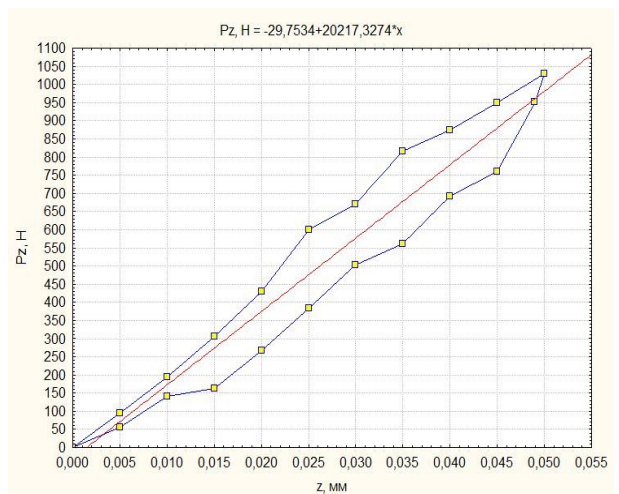
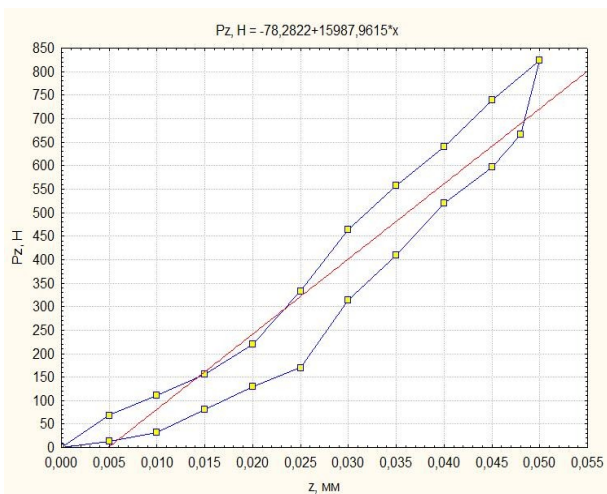
По результатам измерений были построены графики зависимости нагрузки от перемещения исследуемых элементов системы. Показатели жесткости подсистемы «шпиндель-фреза», «шпиндель-фреза с СМП» (рисунок 3.4) и «стол-заготовка» (рисунок 3.5) определялись по графикам путем аппроксимации ветви нагрузки уравнением. В качестве подсистемы «стол-заготовка» взяты чугунные направляющие станков с геометрическими размерами (ширина, высота, длина) 25x98x193 и (ширина, длина, высота) 98x193x25. Материал изделия серый чугун марки СЧ-20.



а) – по оси X



б) – по оси Y



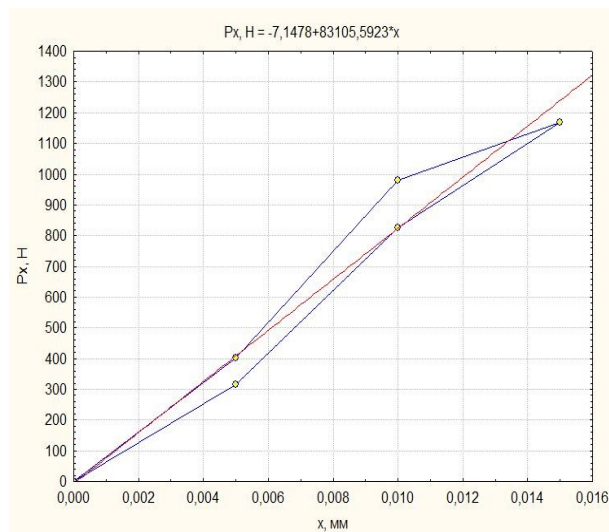
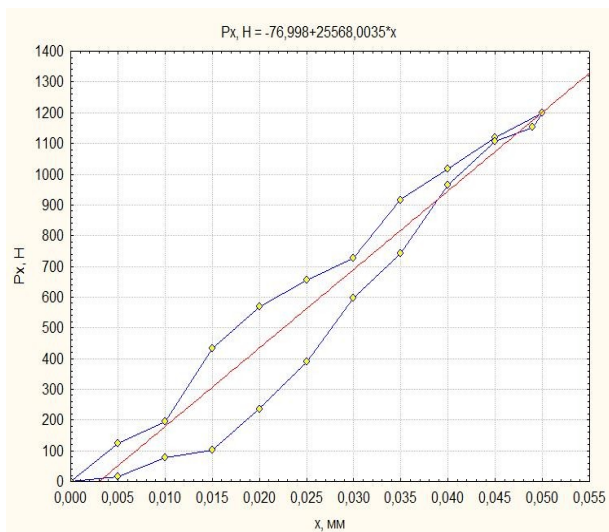
в) – по оси Z

«шпиндель-фреза»

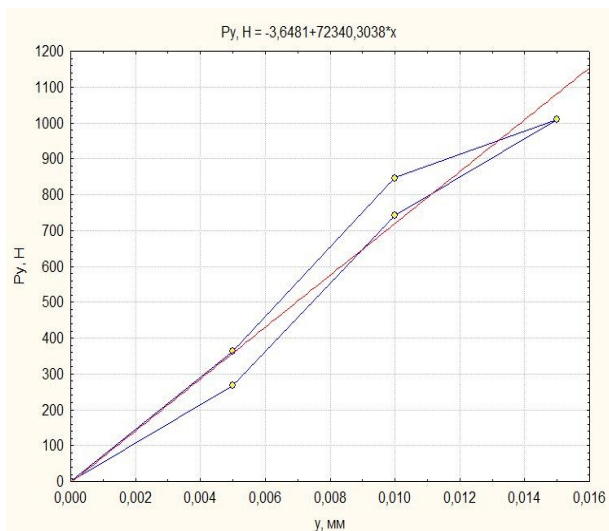
«шпиндель-фреза с СМП»

Рисунок 3.4 - Жёсткость подсистем «шпиндель-фреза»

В ходе экспериментальных исследований установлены следующие закономерности. Подсистема «шпиндель-фреза» обладает пониженной жёсткостью по отношению к подсистеме «шпиндель-фреза с СМП» в 1,3 раза. Подсистема «стол-заготовка» с различными геометрическими размерами не обладают значимыми отличиями по параметру жёсткости в трёх взаимно перпендикулярных направлениях.

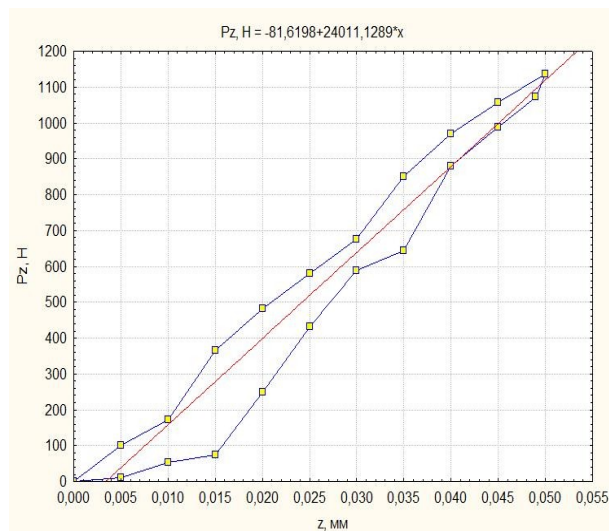


а) – по оси x



б) – по оси y

Геометрические размеры 25x98x193



в) – по оси z

Геометрические размеры 98x198x25

Рисунок 3.5 - Жёсткость подсистемы «стол-заготовка»

Несмотря на то, что динамическая система станка и является многомассовой, в отдельных случаях ее характеристики приближенно можно представить в виде группы одномассовых систем со своими динамическими параметрами. Приведенная масса колебательных подсистем рассчитывается по формуле (3.1):

$$m_i = k_i / \omega_c^2 = k_i / (2 \cdot \pi \cdot f_c)^2, \quad (3.1)$$

где ω_c – круговая частота собственных колебаний подсистем,

f_c – частота свободных затухающих колебаний подсистем.

Собственная частота затухающих колебаний f_c определялась по осциллограммам виброскорости из соотношения по формуле (3.2):

$$f_c = n / T_v, \quad (3.2)$$

где n – количество полных колебаний;

T_v – период колебаний.

Существенное влияние на развитие амплитуды вибраций в динамической системе оказывают демпфирующие силы, которые оцениваются через логарифмический декремент затухания колебаний.

В целях определения собственной частоты колебаний выбранных подсистем «шпиндель-фреза», «шпиндель-фреза с СМП» и «стол-заготовка», применялся вибродиагностический прибор модели «Prüftechnik MT GmbH VibXpert».

В комплект к данному прибору входят два высокочувствительных пьезоэлектрических акселерометра, считывающих информацию в частотном спектре от 1 Гц до 25 кГц.

Вибродатчики с пьезоэлектрическими акселерометрами устанавливались поочередно в трёх направлениях, соответствующих координатам x , y , z для подсистем: «шпиндель-фреза», «шпиндель-фреза с СМП» и стол-заготовка».

Импульсное возбуждение подсистем осуществлялось при помощи обрезиненного молотка. Результаты проведённых испытаний позволили определить собственные затухающие колебания по трём координатным осям x , y , z исследуемых подсистем (рисунок 3.6) [27, 45, 75].

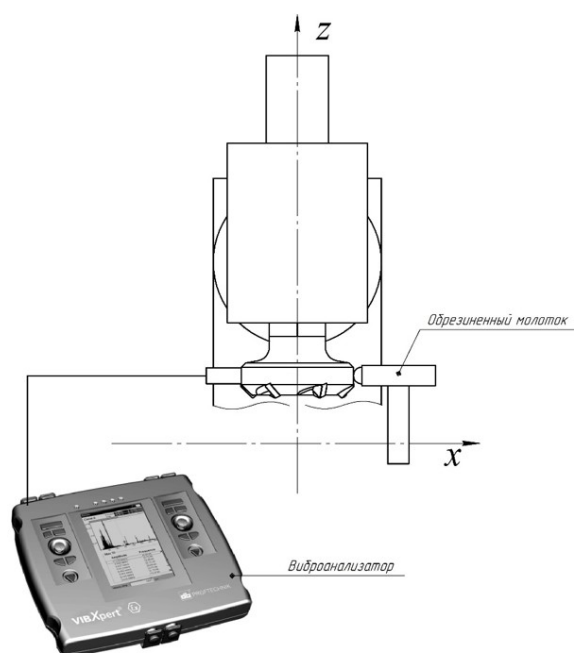
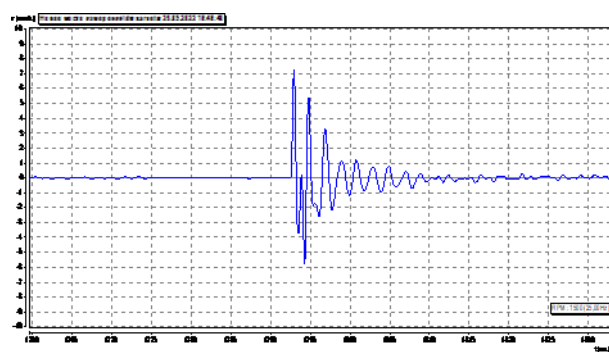
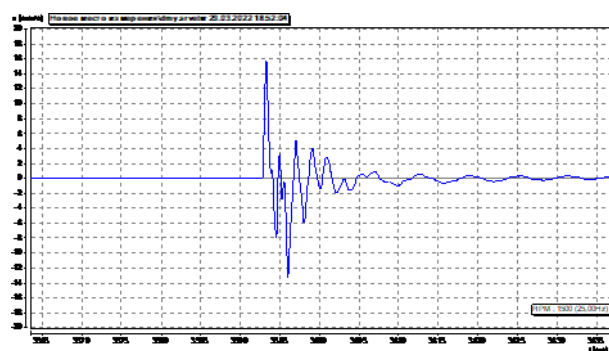


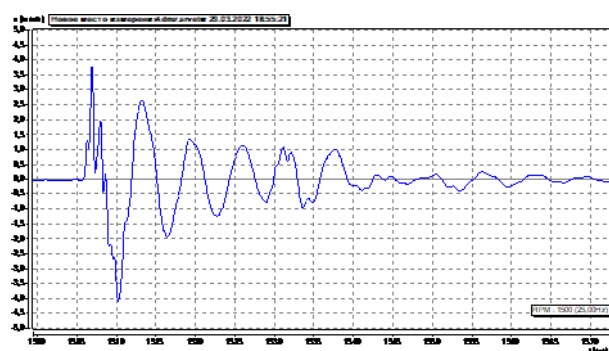
Схема измерения собственных колебаний подсистемы «шпиндель-фреза с СМП»



X-X



y-y



Z-Z

Рисунок 3.6 – Собственные затухающие колебания подсистемы «шпиндель-фреза с СМП»

Декремент колебаний является показателем относительного демпфирования, а относительное демпфирование служит показателем степени виброустойчивости технологической системы и определяется по формуле (3.3):

$$\lambda_i = (Ln \frac{A_i}{A_{i+n}}) / n, \quad (3.3)$$

где A_i и A_{i+n} – амплитуды колебаний, которые отстают друг от друга на количество периодов.

Форма затухающих колебаний подсистемы «шпиндель-фреза с СМП» и логарифмическое увеличение указывают на то, что данная система сохраняет

большую демпфирующую способность во всем рассматриваемом диапазоне по сравнению с подсистемой «шпиндель-фреза». С учётом полученных значений приведённой массы и логарифмического декремента колебаний получим формулу (3.4) для определения демпфирующих сил:

$$h_i = 2 \cdot \lambda_i \cdot f_c \cdot m_i. \quad (3.4)$$

Значения динамических параметров, которые были рассчитаны для априорной динамической модели технологической системы фрезерного станка, сведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Расчетные значения априорной динамической модели технологической системы фрезерного станка

Подсистемы	Коэффициент жесткости, $k_i \cdot 10^9$, Н/м			Приведённая масса m_i , кг			Диссипативные силы $h_i \cdot 10^3$, кг/с		
	х	у	z	х	у	z	х	у	z
Шпиндель-Фреза	8,26	15,5	50	26,3	28,9	181,1	7,7	9,08	26,78
Стол-Заготовка	6,17	9,22	18,2	94,7	205,7	361	9,3	18,08	82,1
Салазки	29,45	60,5	20,4	231,4	146,9	396	31,78	50,34	31,68
Консоль	10,6	118,3	15,7	1487	463	1086	15,45	54,45	63,23
Подсистемы	Частота вращения n , мин ⁻¹		Коэффициент крутильной жесткости c_φ , кН·м/рад	Приведенный момент инерции J , кг·м ²		Коэффициент момента сопротивления b_φ , Н·м·с			
Привод главного движения	160		70,23	0,075		8,56			
	200		52,10	0,056		6,24			
	250		21,52	0,051		4,98			
	315		10,25	0,045		4,56			
	400		9,03	0,039		4,41			
	500		6,23	0,025		3,89			
	630		4,03	0,023		3,43			

Для проведения теоретического анализа динамических процессов, которые происходят в технологической системе станка, необходимо обосновать выбор физической модели на основе полученных динамических параметров и конструктивных особенностей фрезерного станка.

Таким образом, можно сделать вывод, что, подсистема «стол-заготовка» обладает большей жёсткостью в сравнении с подсистемами «шпиндель-фреза» и «шпиндель-фреза с СМП». Однако высокая жёсткость и значительная приведённая масса, компенсируются наличием зазоров в направляющих стола, что приводит к интенсивному развитию колебательного процесса при фрезеровании.

3.2 Моделирование виброустойчивости технологической системы механической обработки при торцевой фрезерной обработке высокоточных плоских контактных поверхностей

Одним из важнейших параметров работоспособности станка является его виброустойчивость, которую можно понимать, как способность станка сопротивляться возникновению вибраций во время обработки. Стандартная программа испытаний станков предусматривает оценку границы зоны стабильности процесса механической обработки.

Одним из наиболее эффективных способов исследования технологических систем, который позволяет оценить влияние различных условий функционирования замкнутой технологической системы и определить оптимальные режимы обработки, является математическое моделирование виброустойчивости системы [40].

Для динамического анализа необходимо определить доминирующую колебательную систему. Анализ динамических значений и тех задач, которые поставлены в данной работе по повышению качества и точности обработки из чугуна высокоточных контактных плоских поверхностей, позволяет принять в качестве доминирующих подсистемы «инструмент» - «заготовка».

На основании приведённых исследований, базирующихся на анализе спектра виброускорений, в качестве доминирующей выбрана подсистема «заготовка» (рисунок 3.7).

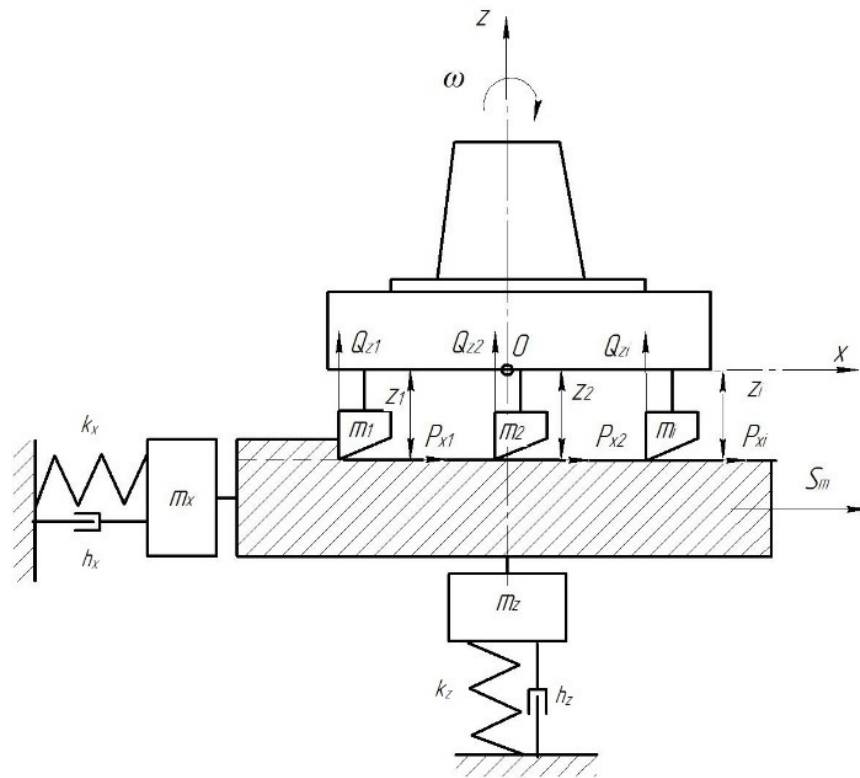


Рисунок 3.7 - Динамическая модель движения технологической системы торцевого фрезерования с учётом работоспособности РК, где: m_1, m_2, m_i – приведённая масса отдельных зубьев фрезы; m_x, m_y – приведённая масса заготовки; k_x, k_z – коэффициенты жесткости; h_x, h_z – коэффициенты диссипации энергии в контурах X и Z ; S_m – направление движения заготовки; ω – круговая частота вращения фрезы; P_{x1}, P_{x2}, P_{xi} – сила резания в направлении оси X ; Q_{z1}, Q_{z2}, Q_{zi} – сила трения в направлении оси Z ; t – глубина срезаемого слоя; Z_i – расстояние между периферией фрезы и плоскостью обработанной поверхности заготовки

В соответствии с принятой расчётной моделью технологической системы на операции фрезерования, движение по координатам x и z примет следующий вид (3.5 – 3.6):

$$\begin{cases} m_x \ddot{x} + h_x \dot{x} + k_x x = P & (3.5) \\ m_z \ddot{z} + h_z \dot{z} + k_z z = Q & (3.6) \end{cases}$$

где $m_z \ddot{z}, m_x \ddot{x}$ – инерционные силы;

$h_z \dot{z}, h_x \dot{x}$ – силы демпфирования;

$k_z z, k_x x$ – силы упругого взаимодействия;

Qz – сила трения;

P_x – сила резания.

При построении модели технологической системы механической обработки в процессе фрезерования, поведение такой системы рассматривалось исходя из феноменологического представления, как величина запаздывания силы резания по отношению к силе трения [100]. Расчёт длин запаздывания осуществляется по следующим формулам (3.7 - 3.8):

$$L_P = V_{\text{фр}} \cdot \tau_P + \int_{t=0}^{\tau_P} \Delta \frac{dx}{dt} dt, \quad (3.7)$$

$$L_Q = V_{\text{фр}} \cdot \tau_Q + \int_{t=0}^{\tau_Q} \left(\Delta \frac{dx}{dt} + \varepsilon \Delta \frac{dz}{dt} \right) dt, \quad (3.8)$$

где $V_{\text{фр}}$ – скорость фрезерования;

τ_P – время запаздывания по направлению действия силы P от z ;

τ_Q – время запаздывания по направлению действия силы Q от P ;

$\Delta \frac{dx}{dt}$ – приращение скорости по x ;

$\Delta \frac{dz}{dt}$ – приращение скорости по z ;

t – искомое время;

ε – коэффициент усадки стружки.

Осуществив математические преобразования с уравнением 3.5 и 3.6, получим уравнения (3.9 - 3.10) для расчёта времени запаздывания τ_P , силы резания P_Δ и τ_Q , силы трения Q_Δ [68, 75, 100]:

$$\tau_P = \frac{P_\Delta(t) - P(t)}{\dot{P}(t)}, \quad (3.9)$$

$$\tau_Q = \frac{Q_\Delta(t) - Q(t)}{\dot{Q}(t)}. \quad (3.10)$$

Учитывая формулы (3.7 - 3.10), получим уравнения (3.11 – 3.12):

$$T_P \dot{P} + \left(1 + \frac{dx}{dt} \cdot \frac{1}{V_{\text{фр}}} \right) P + \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned}
 & +Pz \left(1 + \frac{dx}{dt} \cdot \frac{1}{V_{\text{фп}}} \right) = 0, \\
 & T_Q \dot{Q} + \left(1 + \frac{dx}{dt} + \varepsilon \frac{dz}{dt} \cdot \frac{1}{V_{\text{фп}}} \right) Q - \\
 & - Pf \cdot \left(1 + \frac{dx}{dt} + \varepsilon \frac{dz}{dt} \cdot \frac{1}{V_{\text{фп}}} \right) = 0,
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

где T_P и T_Q – постоянные составляющие сил трения и силы резания.

Применив методику, связанную с аппроксимацией, получим следующую систему линейных дифференциальных уравнений (3.13 – 3.16), учитывающую процесс стружкообразования [73]:

$$\begin{cases}
 T_{z2}^2 \cdot \ddot{z} + T_{z1} \cdot \dot{z} + z = Q & (3.13) \\
 T_{x2}^2 \cdot \ddot{x} + T_{x1} \cdot \dot{x} + x = P & (3.14) \\
 T_P \dot{P}_x + P_x = -K_z \cdot z - T_{kx1} \cdot \dot{x} & (3.15) \\
 T_Q \dot{Q}_z + Q_z = P_x - T_{kz} \cdot z - T_{kx2} \cdot \dot{x} & (3.16)
 \end{cases}$$

где T_{z2} и T_{x2} – постоянные времени;

T_{z1} и T_{x1} – постоянные времени демпфирования;

K_z – коэффициент передачи;

T_{kz} , T_{kx1} и T_{kx2} – постоянные времени демпфирования от изменения скорости резания.

Составленная система уравнений позволяет отслеживать движение замкнутой технологической системы фрезерования чугунных изделий с плоской поверхностью. Изменение состояния замкнутой технологической системы осуществляется через процесс износа режущих керамических пластин по задней поверхности при обработке чугунных контактных поверхностей. Схема процесса фрезерования с изношенной пластиной представлена на рисунке 3.8.

На стадии процесса фрезерования плоской поверхности происходит врезание режущей керамической пластины с главным φ и вспомогательным

углом в плане φ' в изделие с подачей на зуб S_z . В результате снимается припуск толщиной t_z и шириной b_z на глубину H

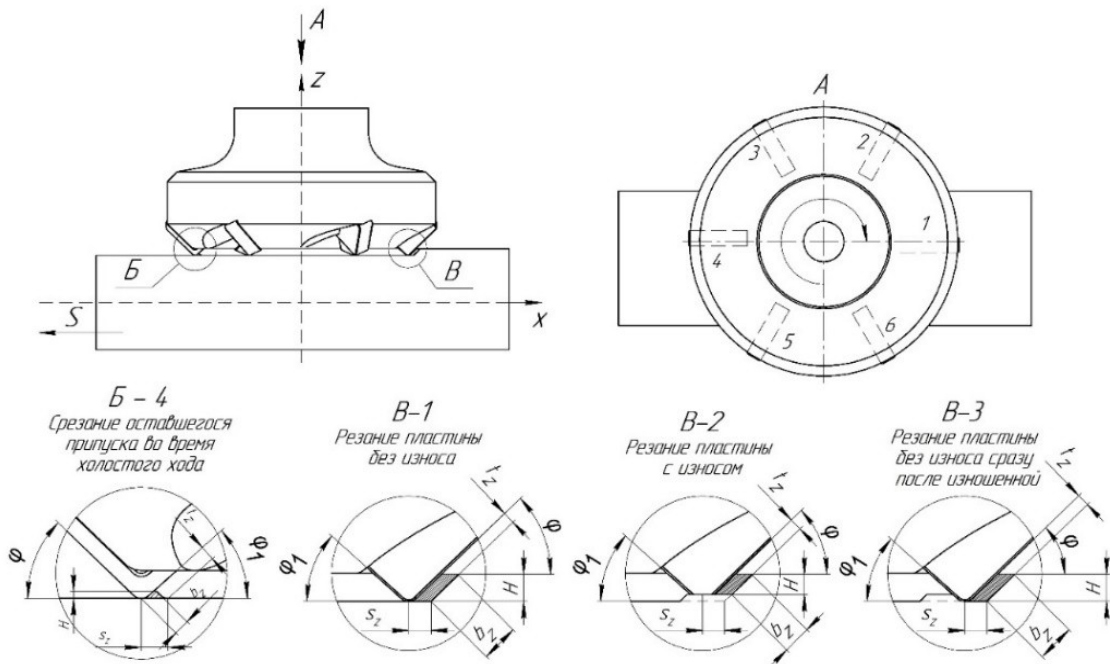


Рисунок 3.8 - Схема процесса фрезерования чугунной поверхности при неравномерном износе режущих керамических пластин

Мгновенные значения толщины t_z и ширины b_z среза для зуба фрезы определяются выражениями (3.17 – 3.18) [25, 26, 28]:

$$t_z = S_z \cdot \sin \xi \cdot \sin \varphi, \quad (3.17)$$

$$b_z = \frac{H}{\sin \varphi}, \quad (3.18)$$

где ξ – угол, определяющий положение зуба фрезы;

φ – главный угол в плане.

При этом возникающие силы резания и силы трения, при торцевом фрезеровании заготовки с неизношенной керамической пластиной будут иметь вид (3.19 – 3.20) [25, 26, 28]:

$$P_x = k_c \cdot t_z \cdot b_z, \quad (3.19)$$

$$Q_z = P_x \cdot f_{тр}, \quad (3.20)$$

где k_c – удельная сила резания.

Удельная сила резания при фрезеровании описывается как (3.21):

$$k_c = k_{c0} \cdot t_z^{-a} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right), \quad (3.21)$$

где k_{c0} – удельная сила резания при переднем угле $\gamma = 0$;

a – показатель степени.

Обработанная поверхность имеет хорошую шероховатость за счет плавной деформации снимаемого припуска металла. Через определённый промежуток времени фрезерования изделия, предшествующая керамическая пластина изнашивается по задней грани, что приводит к изменению глубины с H на ΔH , а следовательно и к приращению ширины Δb_z (3.22):

$$\Delta b_z = \frac{H - f(\Delta H)}{\sin\varphi}. \quad (3.22)$$

Тогда ΔH можно представить, как величину износа по задней грани пластины. С целью выявления основных закономерностей износа высокоомных и низкоомных режущих керамических пластин по задней поверхности проводились экспериментальные исследования. По окончании эксперимента установлены функциональные зависимости влияния износа по задней грани инструмента от режимов фрезерования для высокоомных и низкоомных сменных керамических пластин (3.24 – 3.25):

$$\begin{array}{l} \text{СМП} \sim \text{от } 50 \\ \text{до } 100 \text{ Ом}\cdot\text{м} \end{array} \quad \Delta H_{R>50} = 0,08 \cdot \frac{V_{\text{фр}}^{0.38} \cdot S_z^{0.17}}{t_z^{0.66}}, \quad (3.24)$$

$$\begin{array}{l} \text{СМП} \sim \text{от } 1 \\ \text{до } 50 \text{ Ом}\cdot\text{м} \end{array} \quad \Delta H_{R<50} = 0,04 \cdot \frac{V_{\text{фр}}^{0.22} \cdot S_z^{0.023}}{t_z^{0.11}}. \quad (3.25)$$

В результате последующая не изношенная керамическая пластина будет снимать изначально установленный припуск, что приведёт к образованию на обрабатываемой поверхности не снятого слоя металла. Через половину оборота фрезы происходит снятие остатка необработанной поверхности керамической пластиной. При этом снятие остаточного припуска осуществляется со стороны вспомогательного угла в плане φ' . Тогда в технологической системе возникнут силы резания и силы трения. Основное усилие со стороны силы резания P_x (3.19) и силы трения Q_z (3.20) отвечают за снятие равномерно припуска. В свою очередь

сила резания P'_x и сила трения Q'_z возникают при фрезеровании остаточного припуска (3.26 - 3.27):

$$P'_x = k_c \cdot t_z \cdot \Delta b_z, \quad (3.26)$$

$$Q'_z = P'_x \cdot f_{\text{тр}}. \quad (3.27)$$

Следовательно, обобщённую сумму сил резания и сил трения можно представить в следующем математическом виде (3.28 – 3.29):

$$P = P_x + P'_x, \quad (3.28)$$

$$Q = Q_z + Q'_z. \quad (3.29)$$

Таким образом, достигнутыми упрощениями удалось сформировать общую модель технологической системы механической обработки для исследования устойчивости и оценки предельных возможностей фрезерной операции. Устойчивость динамической системы определяется на основе алгебраического критерия Гурвица [25, 100, 112].

Характеристическое уравнение системы дифференциальных уравнений (3.13 - 3.16) имеет вид (3.30):

$$E_x E_z E_p E_Q + T_{kv1} p E_Q E_x + T_{kz} p (E_p E_Q + T_{kv1} p) + k_z (E_x - T_{kv2} p) = 0, \quad (3.30)$$

где $E_x = T_{x2}^2 p^2 + T_{x1} p + 1$; $E_z = T_{z2}^2 p^2 + T_{z1} p + 1$; $E_p = T_p p + 1$; $E_Q = T_Q p + 1$.

В результате подстановок и вычислений получаем характеристическое уравнение в форме полинома шестого порядка (3.31):

$$a_0 p^6 + a_1 p^5 + a_2 p^4 + a_3 p^3 + a_4 p^2 + a_5 p + a_6 = 0. \quad (3.31)$$

Для определения устойчивости по Гурвицу построим определитель (3.32):

$$\Delta_6 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ 0 & 0 & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 \end{vmatrix}. \quad (3.32)$$

Условие устойчивости Гурвица определяется выражениями:

1. Все коэффициенты полинома больше нуля: $a_i > 0$, $i = 1, \dots, 6$.
2. Все миноры определителя Гурвица больше нуля (3.33 – 3.38):

$$\Delta_1 = a_1 > 0; \quad (3.33)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0; \quad (3.34)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_3 \Delta_2 - a_1 (a_1 a_4 - a_0 a_5) > 0; \quad (3.35)$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = a_4 \Delta_3 - a_3 [a_2 \Delta_2 - a_0 (a_1 a_4 - a_3 a_5)] + a_4 (a_2 a_1^2 - a_0 a_3 a_5) > 0; \quad (3.36)$$

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & a_5 \end{vmatrix} = a_5 \Delta_4 - a_5 a_3 \Delta_3 - a_6 a_1 (a \Delta_3 - a_6 a_1^2) > 0; \quad (3.37)$$

$$\Delta_6 = a_1 \Delta_5 > 0 \quad (3.38)$$

Из анализа технологических условий применения фрез, укомплектованных пластинами режущей керамики в диапазоне от 50 до 100 Ом·м (высокоомных), от 18 до 50 Ом·м (низкоомных) и от 18 до 100 Ом·м (смешанных) комплектаций было установлено, что условием для рационального их использования при торцовом фрезеровании необходимо определить граничные условия отсутствия участков хрупкого разрушения на рабочих поверхностях режущей керамики. При проведении исследований исходили из необходимости ограничений работы инструмента по стойкости, равным $T = 240 \dots 300$ мин.

Для операций торцового фрезерования, удовлетворяющие этим условиям, в работе были установлены наиболее рациональные режимы резания: глубина резания $H = 0,1 \dots 0,7$ мм, подача на зуб $S_z = 0,01 \dots 0,02$ мм/зуб, скорость фрезерования $V_{фр} = 150 \dots 1000$ м/мин, при которых износ для торцового фрезерования по задней поверхности сменной керамической пластины равен $\Delta H = 0,4$ мм, который и был принят в качестве критерия отказа работы инструменты.

В дифференциальные уравнения, описывающие движение системы при фрезеровании с учётом применения селективного метода оснащения

многолезвийного режущего инструмента керамическими режущими пластинами, входит сила резания P_x , которая является функцией многих переменных.

Наиболее часто для аппроксимации сил резания используют эмпирические степенные зависимости от режимных параметров (3.39):

$$P_x = C \cdot H^y \cdot S_z^n \cdot V^m, \quad (3.39)$$

где P_x – осевая сила резания, Н;

H – глубина резания, мм;

S_z – подача, мм/зуб;

V – скорость резания, м/мин;

C – коэффициент, зависящий от условий обработки и вида обрабатываемого материала;

y, n, m – показатели степени, учитывающие влияние глубины подачи и скорости резания.

Экспериментальное определение коэффициентов для чугуна СЧ-20 осуществлялось на фрезерном обрабатывающем центре HAAS VF 2. В качестве режущего инструмента была выбрана сборная торцевая фреза, оснащённая керамическими режущими пластинами марки ВОК-200.

Прологарифмировав уравнение силы резания (3.39), получим уравнение следующего вида (3.40):

$$\ln P_x = \ln C + y \cdot \ln H + n \cdot \ln S + m \cdot \ln V. \quad (3.40)$$

Полученную линейную формулу представим в виде полинома первой степени (3.41) [39]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot y_1 + b_2 \cdot n_2 + b_3 \cdot m_3, \quad (3.41)$$

где $y = \ln P$ – логарифм силы резания;

$y_1 = \ln H, n_2 = \ln S, m_3 = \ln V$ – логарифмы глубины, подачи, скорости резания;

b_0, b_1, b_3 – коэффициенты регрессии.

В целях определения параметров модели применен план полного факторного эксперимента $N = 2^k$, где N – общее число различных точек в плане; 2 – число уровней изменения переменных; k – количество переменных, равное трем [39, 71]. Значения параметров сведены в таблицу 3.2. Значения,

представленные в таблице 3.4, получены посредством перевода действительных значений факторов в координированные по представленным ниже формулам (3.42 – 3.44) [39]:

$$x_1 = \frac{2 \cdot (\ln H - \ln H_{max})}{\ln t_{max} - \ln t_{min}} + 1; \quad (3.42)$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot (\ln S - \ln S_{max})}{\ln S_{max} - \ln S_{min}} + 1; \quad (3.43)$$

$$x_3 = \frac{2 \cdot (\ln V - \ln V_{max})}{\ln V_{max} - \ln V_{min}} + 1. \quad (3.44)$$

Матрица планирования 2^3 и результаты ее реализации для силы P_x при высокоомной компоновки представлены в таблице 3.3. Проверка показателей качества модели для силы резания P_s приведена в таблице 3.4.

Таблица 3.2 – Уровень факторов

Уровни факторов	Обозначение	H, мм		S, мм/зуб		V, м/мин	
		\tilde{x}_1	$\ln \tilde{x}_1$	\tilde{x}_2	$\ln \tilde{x}_2$	\tilde{x}_3	$\ln \tilde{x}_3$
Интервал изменения	$\Delta \tilde{x}_i$	1,7	-	0,18	-	0,76	-
Верхний уровень	+1	3	1,46	0,45	-0,87	2,88	1,12
Нижний уровень	-1	1	0	0,1	-2,15	1,43	0,37

Проведенные комплексные исследования по определению влияния режимов механической обработки на силу резания P_x позволили получить следующие зависимости для высокоомной компоновки (3.45), низкоомной компоновки (3.46) и смешанной компоновки (3.47):

$$P_{x_{выс.}} = 487 \cdot t^{0,97} \cdot S^{0,68} \cdot V^{-0,44}; \quad (3.45)$$

$$P_{x_{низ.}} = 523 \cdot t^{1,16} \cdot S^{0,76} \cdot V^{-0,32}; \quad (3.46)$$

$$P_{x_{см.}} = 560 \cdot t^{1,27} \cdot S^{0,85} \cdot V^{-0,23}. \quad (3.47)$$

Имитационное компьютерное моделирование эквивалентной замкнутой технологической систем, с использованием программной среды *NI LabVIEW 2013 SPI*, установило границу области устойчивости автоколебательного процесса по амплитудно-временной характеристике для высокоскоростной чистовой обработки плоских изделий торцовыми фрезами с оксидно-карбидными режущими пластинами укомплектованных по следующей схеме (рисунок 3.9):

а – смешанная компоновка (кривая 1); б – однородная (SLM) высокоомная компоновка (кривая 2); в – однородная (SLM) низкоомная компоновка (кривая 3).

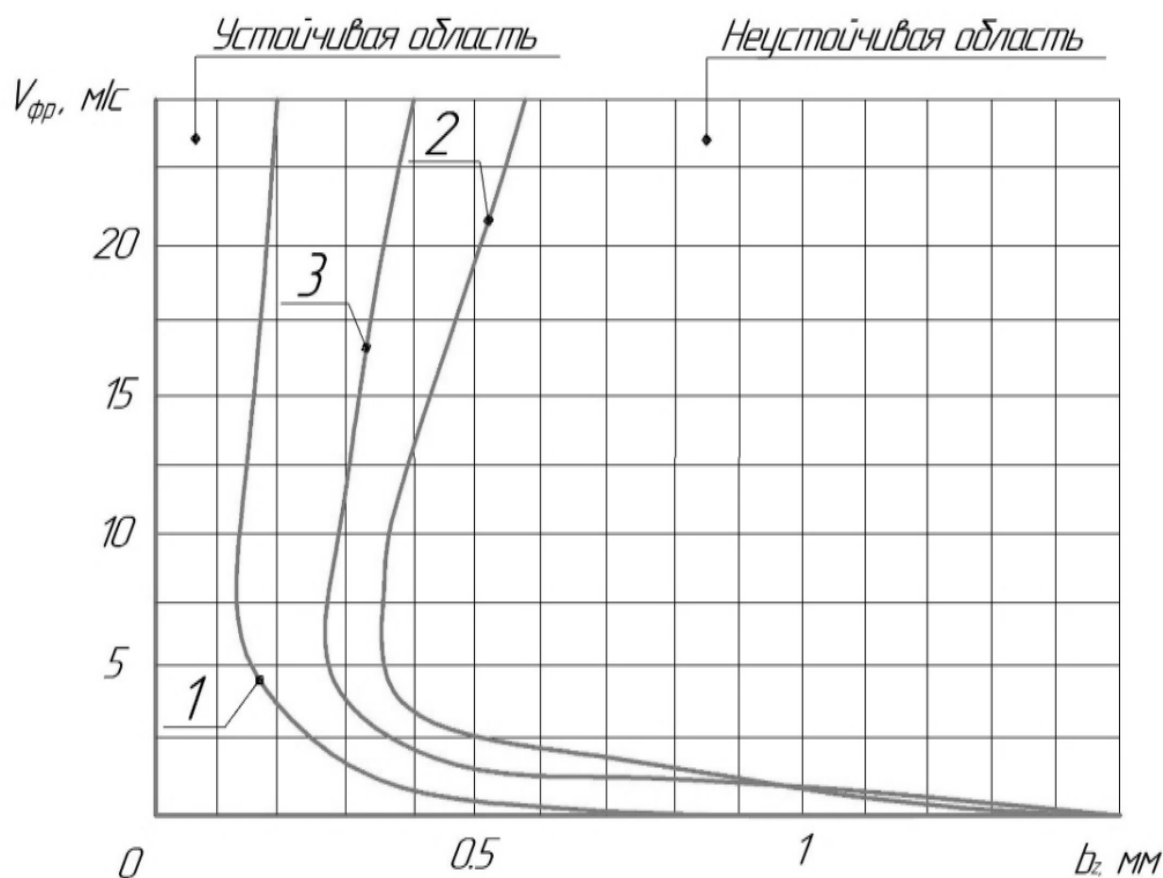


Рисунок 3.9 – Оценка границы области устойчивости для высокоскоростной чистовой обработки плоских изделий торцовыми фрезами с оксидно-карбидными режущими пластинами укомплектованных по следующей схеме: а – смешанная компоновка (кривая 1), б – однородная (SLM) высокоомная компоновка (кривая 2), в – однородная (SLM) низкоомная компоновка (кривая 3)

Оценка моделирования процессов на базе производственных ресурсов программы *NI LabVIEW 2013 SP1* по полученным расчетным осциллограммам позволила проанализировать влияние однородности структурных составляющих оксидно-карбидными режущими пластинами в смешанной компоновке, однородной (SLM) высокоомной компоновке и в однородной (SLM) низкоомной компоновке на устойчивость динамической составляющей технологической системы, используемой при производстве плоских изделий из чугуна.

Таблица 3.3 – Матрица планирования и результатов эксперимента по определению силы резания P_x при механической обработке чугуна марки СЧ-20 для высокоомной компоновки

Матрица планирования					Сила резания в Н, $P_x/\ln P_x$				S_g^2	$\frac{P_x}{\hat{y}_g}$	$(\bar{y}_g - \hat{y}_g)^2$	Доверительный интервал	
i/g	x_0	t	S	V	y_1	y_2	y_3	\bar{y}_g				$\hat{y}_g = \ln P_x$	P_x
		x_1	x_2	x_3									
	+1	-1	-1	+1	$\frac{108}{4,68}$	$\frac{114}{4,74}$	$\frac{108}{4,68}$	$\frac{110}{4,70}$	0,0014	$\frac{112}{4,61}$	0,002	4,54 ... 4,78	108 ... 112
	+1	+1	-1	-1	$\frac{596}{6,39}$	$\frac{578}{6,36}$	$\frac{652}{6,48}$	$\frac{610}{6,41}$	0,0042	$\frac{587}{6,47}$	0,007	6,39 ... 6,47	580 ... 604
	+1	-1	+1	-1	$\frac{446}{6,1}$	$\frac{446}{6,1}$	$\frac{488}{6,19}$	$\frac{460}{6,13}$	0,0025	$\frac{438}{6,18}$	0,0023	6,03 ... 6,12	430 ... 448
	+1	+1	+1	+1	$\frac{1352}{7,21}$	$\frac{1366}{7,22}$	$\frac{1466}{7,29}$	$\frac{1390}{7,24}$	0,0012	$\frac{1419}{7,15}$	0,003	7,27 ... 7,31	1390 ... 1446
	+1	-1	-1	-1	$\frac{138}{4,9}$	$\frac{139}{4,97}$	$\frac{141}{4,95}$	$\frac{140}{4,94}$	0,0014	$\frac{148}{5,02}$	0,008	4,97 ... 5,01	143 ... 149
	+1	+1	-1	+1	$\frac{503}{6,22}$	$\frac{513}{6,24}$	$\frac{473}{6,16}$	$\frac{500}{6,21}$	0,0012	$\frac{473}{6,29}$	0,0023	6,12 ... 6,16	457 ... 486
	+1	-1	+1	+1	$\frac{358}{5,85}$	$\frac{354}{5,9}$	$\frac{372}{5,92}$	$\frac{360}{5,89}$	0,0013	$\frac{346}{5,75}$	0,0008	5,86 ... 5,9	341 ... 354
	+1	+1	+1	-1	$\frac{1702}{7,45}$	$\frac{1652}{7,38}$	$\frac{1652}{7,41}$	$\frac{1680}{7,42}$	0,0014	$\frac{1746}{7,64}$	0,0034	7,43 ... 7,2	1741 ... 1812
b_i	6,218	0,674	0,613	-0,0987					0,0145		0,0121		

Таблица 3.4 – Проверка показателей качества модели для силы P_x

Проверка значимости коэффициентов регрессии								
$S^2\{Y\}$	$S\{b_i\}$	ν_{3H}	t_0	t_1	t_2	t_3	$t_{кр}$	
0,0121	0,0112	17	594,3	67,9	52,8	10,7	2,123	
Таким образом, если $t_i > t_{кр}$, то все коэффициенты b_i значимы								
Проверка однородности дисперсии				Проверка адекватности модели				
G_{max}	ν_{1b}	ν_{2b}	$G_{кр}$	$S_{a\partial}^2$	F	$\nu_{1a\partial}$	$\nu_{2a\partial}$	$F_{кр}$
0,247	3	7	0,523	0,0045	2,68	5	15	2,98
Т.к. $G_{max} < G_{кр}$, то дисперсии однородны				Т.к. $F < F_{кр}$, то модель адекватна				

Установлено, что наибольшей динамической стабильностью обладают компоновки, при которых фрезерный инструмент оснащается режущими пластинами по однородности (рисунок 3.9).

При этом фрезы с однородно-высокоомными пластинами повышают динамическую стабильность процесс резания в 2.6 раза и с однородно-низкоомными пластинами в 2 раза по сравнению со смешанной схемой расположения режущих пластин в корпусе фрезерного инструмента.

3.3 Выводы по третьей главе

В ходе создания математической модели технологического процесса фрезерования с использованием селективного метода оснащения многолезвийного инструмента керамическими режущими пластинами достигнуты следующие результаты:

1. Установлены и параметризованы динамические показатели подсистемы «стол-заготовка», «шпиндель-фреза», «шпиндель-фреза с СМП» по трём координатам фрезерного станка.

2. Выявлены доминирующие элементы глобальной технологической системы многолезвийной обработки путем уточненного рассмотрения отдельных подсистем с распределенными динамическими параметрами.

3. Разработана математическая модель технологической системы многолезвийной обработки изделий, позволяющая описывать динамические процессы при технологическом обеспечении параметров шероховатости плоских контактных поверхностей на основе оценки работоспособности режущей керамики.

4. Произведено имитационное моделирование динамической устойчивости технологической системы торцевого фрезерования в программной среде *LabVIEW* на основе созданной математической модели, что позволило определить области устойчивости системы при различных компоновках оксидно-карбидными режущих пластин во фрезерном инструменте.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СЕЛЕКТИВНОГО ОСНАЩЕНИЯ МНОГОЛЕЗВИЙНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

4.1 Экспериментальные исследования влияния селективного метода оснащения многолезвийного режущего инструмента при фрезеровании на шероховатость обрабатываемой поверхности

Целью представленных в работе экспериментальных исследований является анализ степени влияния микроструктурных различий отдельных оксидно-карбидных режущих пластин, устанавливаемых в многолезвийный режущий инструмент на операциях механической обработки высокоточных плоских поверхностей на качество получаемых поверхностей.

Для подтверждения целесообразности применения селективного метода комплектования фрез оксидно-карбидными режущими пластинами при обработке высокоточных плоских контактных поверхностей была проведена серия экспериментов по фрезерной обработке, в которой в качестве обрабатываемой детали использовалась заготовка из чугуна марки СЧ-20 размером 25x98x200мм, полученная из станины утилизированного токарного станка ДИП-600 (рисунок 4.1). Химический состав чугуна данной заготовки включал в себя 93,34 % железа (Fe), 3,46 % углерода (C), 1,97 % кремния (Si), 0,93 % марганца (Mn), 0,18 % фосфора (P), 0,12 % серы (S). Твёрдость заготовки в обрабатываемой зоне составила 220 НВ. Размер фрезеруемой плоскости заготовки составлял 25x200 мм. Обработка производилась фрезой диаметром 63 мм с 6 режущими зубьями, роль которых выполняли сменные многогранные режущие пластины марки ВОК-200 квадратной формы SNGN 120408. Каждый эксперимент производился по 3 раза с 3 различными компоновками (хаотичная, низкоомная и высокоомная). В качестве станка для проведения эксперимента был выбран обрабатывающий центр HAAS VF 2.



Рисунок 4.1 – Токарный станок ДИП-600 и заготовки, полученные при утилизации данного станка

Основываясь на рекомендациях производителя используемого режущего инструмента и эмпирических данных, оптимальными режимами резания для данных экспериментов были определены следующие значения: скорость резания $v = 990$ м/мин, подача $S = 0,09$ мин⁻¹, глубина резания $H = 0,1$ мм. Измерение шероховатости производилось после каждого 5-го прохода, т.е. через 1 метр рабочего пути фрезы, в пяти различных точках обработанной поверхности. Процесс обработки заготовки и проведение измерения шероховатости поверхности данной заготовки профилометром Mitutoyo SJ-210 представлены на рисунке 4.2.

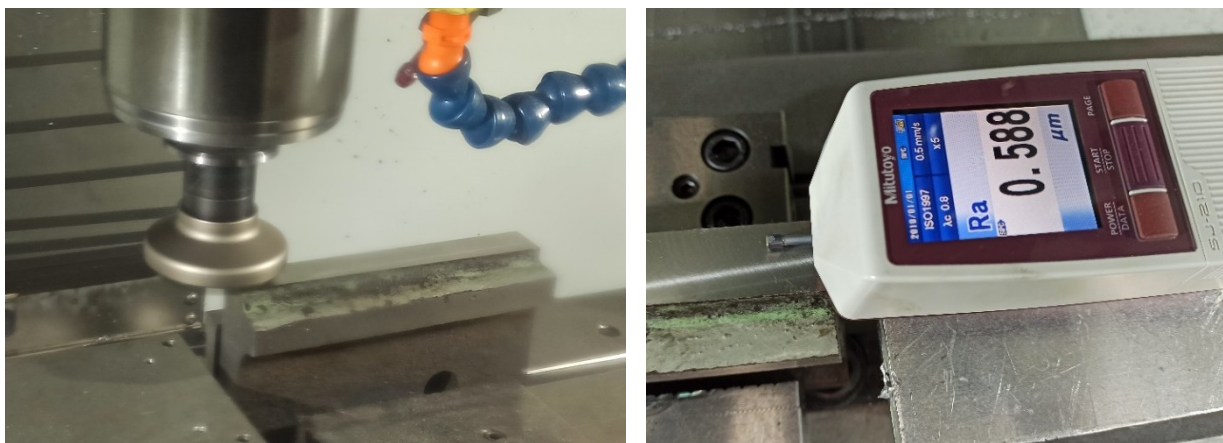


Рисунок 4.2 - Процесс обработки заготовки и проведение измерения шероховатости поверхности данной заготовки профилометром Mitutoyo SJ-210

Экспериментальные исследования подтвердили целесообразность применения метода SLM при оснащении фрез керамическими режущими

пластинами. Анализ результатов позволил построить графические зависимости изменения шероховатости поверхности, вследствие износа режущих кромок оксидно-карбидных пластин формы SNGN 120408 при фрезеровании чугунной заготовки при различных компоновках СМП. Эксперименты для каждой компоновки продолжались до выхода значений шероховатости за предельно допустимое значение $Ra=3$ мкм. Зависимость шероховатости поверхности от пройденного фрезой расстояния при фрезеровании режущей керамикой представлена на рисунке 4.3. Из графика видно, что лучшие показатели стойкости инструмента по качеству обрабатываемой поверхности показала компоновка высокоомными режущими пластинами. Низкоомные режущие пластины, скомпонованные во фрезе при проведении эксперимента, показали снижение стойкости на 6% относительно высокоомной компоновки, в то время как разница значений шероховатости поверхности Ra на некоторых этапах обработки при равном пройденном пути достигала 100 %.

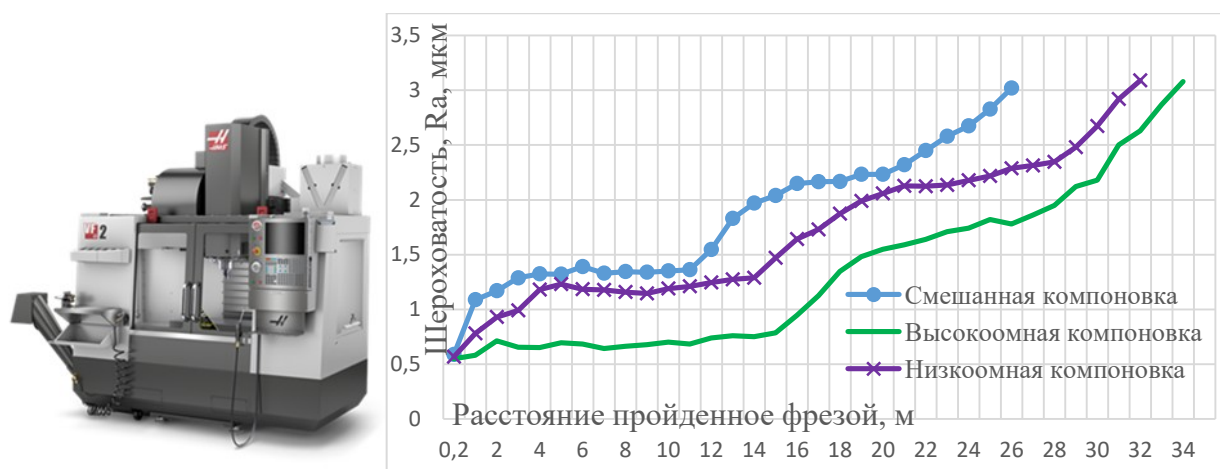


Рисунок 4.3 - Зависимость шероховатости поверхности от времени работы при фрезеровании режущей керамикой на высокоскоростном станке с ЧПУ HAAS VF 2

Смешанная компоновка во время эксперимента показала самые низкие стойкостные характеристики. Пройденный путь такой фрезой при обеспечении заданных параметров шероховатости поверхности меньше чем у однородной низкоомной компоновки на 24 %, и на 30 % меньше чем при однородной высокоомной компоновке.

Для подтверждения полученных результатов и проверки применимости метода SLM при оснащении многолезвийного инструмента для различных технологических условий, была проведена аналогичная серия экспериментов на широкоуниверсальном фрезерном станке 67K25 (рисунок 4.4). Обработка производилась при следующих режимах: $v = 190$ м/мин, подача $S = 0,09$ мм/об, глубина резания $H = 0,1$ мм. Проверка шероховатости также осуществлялась после каждого 5-го рабочего прохода инструмента, в 5-ти различных точках обработанной поверхности с помощью профилометра Mitutoyo SJ-210.

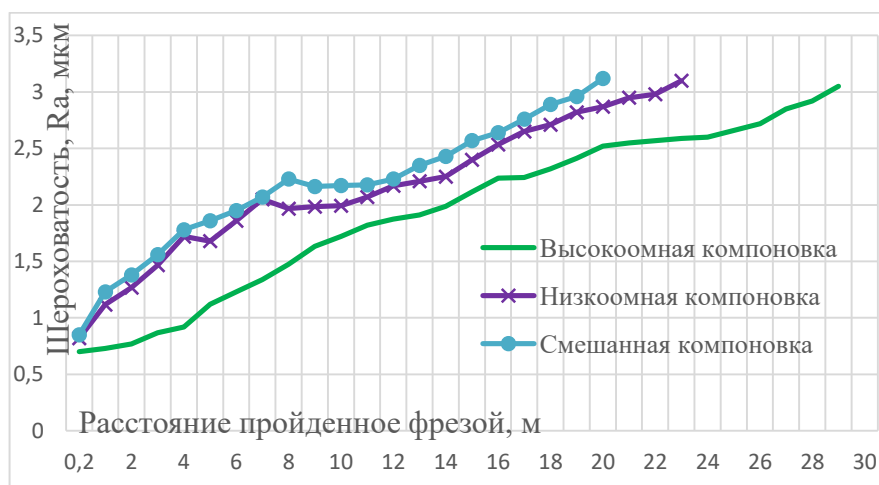


Рисунок 4.4 - Зависимость шероховатости поверхности от времени работы при фрезеровании режущей керамикой на широкоуниверсальном станке 67K25

Результаты эксперимента отражены графической зависимостью на рисунке 4.4. Высокоомная компоновка в данном эксперименте также показала лучшие показатели стойкости и качества обработанной поверхности. Разница в стойкости по качеству обработанной поверхности низкоомной компоновки относительно высокоомной составила 26 %. Различия параметров шероховатости находились в пределах от 15 % до 40 % в пользу высокоомной. Смешанная компоновка в данном эксперименте показала близкие показатели стойкости и шероховатости обработанной поверхности с низкоомной. Пройденный путь фрезы оснащённой такой компоновкой с обеспечением требуемых значений шероховатости снизился на 15 % относительно низкоомной компоновки и на 50 % относительно высокоомной компоновки. Различия значений шероховатости обработанной

поверхности Ra находились в пределах от 1 % до 15 % относительно значений, полученных при низкоомной компоновке и от 8 % до 80 % в сравнении с высокоомной.

Сравнение результатов экспериментов, проведённых на различных станках позволяет увидеть значительные отличия стойкости фрез и шероховатости обработанной поверхности при всех компоновках в пользу высокоскоростного станка с ЧПУ. Это можно объяснить тем, что режущая керамика в большей степени предназначена для высокоскоростной обработки в технологических системах обладающих высокой жёсткостью и точностью рабочих перемещений. Однако, можно отметить, что тенденция поведения многолезвийного режущего инструмента при различных компоновках чётко прослеживается в различных технологических условиях.

Обнаруженные отличия работоспособности описанных компоновок, в первую очередь, обусловлены различной стойкостью каждой отдельной режущей пластины. При изнашивании режущих кромок пластин, увеличивается площадь соприкосновения инструмента и заготовки, что ведёт к увеличению силы резания. Износ керамических режущих пластин имеет характер хрупкого разрушения, что во время работы инструмента меняет форму режущей кромки и ведёт к повторению профиля скалывающейся режущей кромки на обрабатываемой поверхности.

Также при неравномерном изнашивании режущих зубьев фрезы, изменяется припуск обработки (глубина резания), что совместно с изменением силы резания от увеличения площади контакта режущей кромки и поверхности заготовки, приводит к увеличению амплитуды вынужденных колебаний и автоколебаний. Увеличение амплитуды колебаний оставляет след на обрабатываемой поверхности, который впоследствии также становится причиной неравномерности припуска, что также ведёт к усилению автоколебательного процесса. Процесс обработки постепенно «коллапсирует» и приводит к катастрофическому ухудшению качества обработки поверхности.

Возникновение автоколебательного процесса неизбежно во время фрезерования, но в случае обеспечения однородности свойств режущих зубьев фрезы позволяет свести величину автоколебаний к минимуму на всём протяжении срока службы инструмента.

4.2 Экспериментальные исследования влияния селективного метода оснащения многолезвийного режущего инструмента при фрезеровании на динамическую устойчивость процесса

Для оценки динамической устойчивости процесса фрезерования с применением селективного метода оснащения многолезвийного режущего инструмента оксидно-карбидными режущими пластинами параллельно с экспериментом на широкоуниверсальном станке 67К25, описанным в разделе 4.1 данной главы производились измерения износа режущих кромок СМП по мере ухудшения шероховатости обработки поверхности с помощью мобильного микроскопа (рисунок 4.5, а). Также во время механической обработки по мере изнашивания инструмента снимались виброграммы с подсистемы «стол-заготовка» с помощью прибора модели «Prüftechnik MT GmbH VibXpert» (рисунок 4.5, б).

Данные исследования позволили на практике оценить динамическую устойчивость системы при различных компоновках режущих пластин во фрезе и на различных стадиях износа инструмента по задней поверхности ДН. Полученные данные позволили составить графические зависимости изнашивания оксидно-карбидных режущих пластин при различных компоновках (рисунки 4.6; 4.11; 4.14).

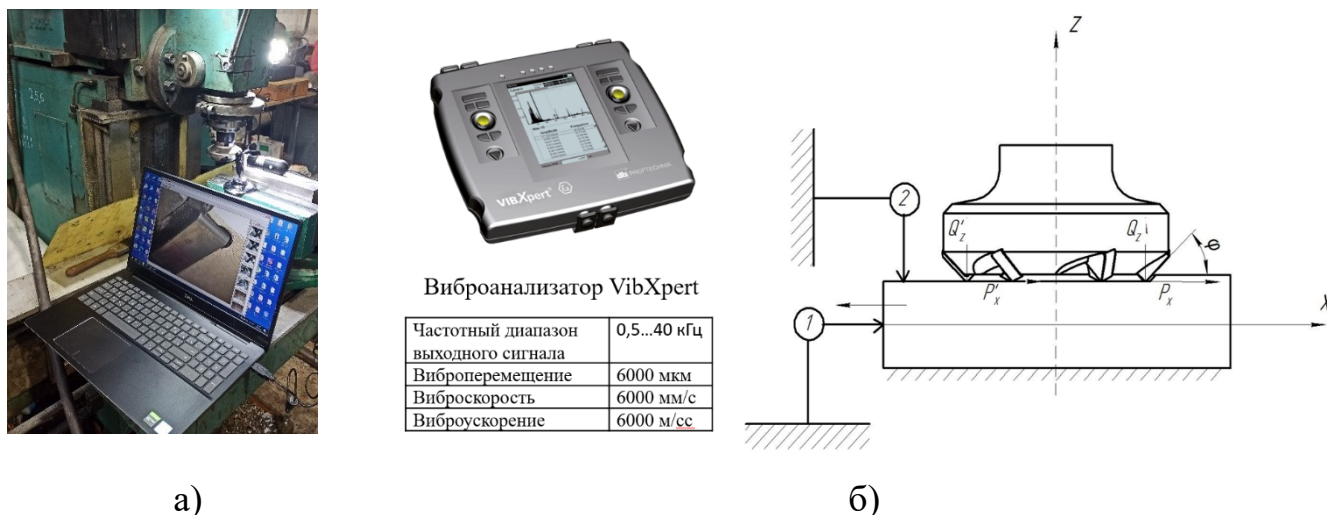


Рисунок 4.5 – Экспериментальная установка по проверке износа режущих пластин и оценке динамических параметров процесса:

- а – процесс микроскопической съёмки режущих кромок оксидно-карбидных пластин;
- б – экспериментальная установка снятия виброграмм во время механической обработки с помощью прибора модели «Prüftechnik MT GmbH VibXpert»

На данных графиках удалось выделить 3 стадии износа режущего инструмента: а – стадия приработки инструмента; б – стадия нормального износа инструмента; в – стадия катастрофического износа инструмента. Полученные виброграммы также были разделены согласно описанным стадиям износа.

На рисунке 4.6 представлен график износа оксидно-карбидных режущих пластин при фрезеровании с использованием инструмента со смешанной компоновкой. Период стойкости фрезы с данной компоновкой окидно-карбидными режущими пластинами показал наименьшую стойкость T , которая составила 200 минут до выхода значений шероховатости R_a обрабатываемой поверхности за пределы допуска определённого для данного эксперимента – R_a 3 мкм. Скорость изнашивания при данной компоновке отличалась более интенсивным характером, но классические стадии износа отчётливо прослеживались.

При внимательном рассмотрении виброграмм процесса фрезерования (рисунок 4.6) можно сделать вывод, что на стадии приработки (рисунок 4.6, а) такой инструмент имеет более однородный характер виброускорений и меньшую

амплитуду колебаний. Данные параметры обуславливаются практически отсутствующим износом режущих пластин, и максимальной для данной компоновки однородности режущих свойств.

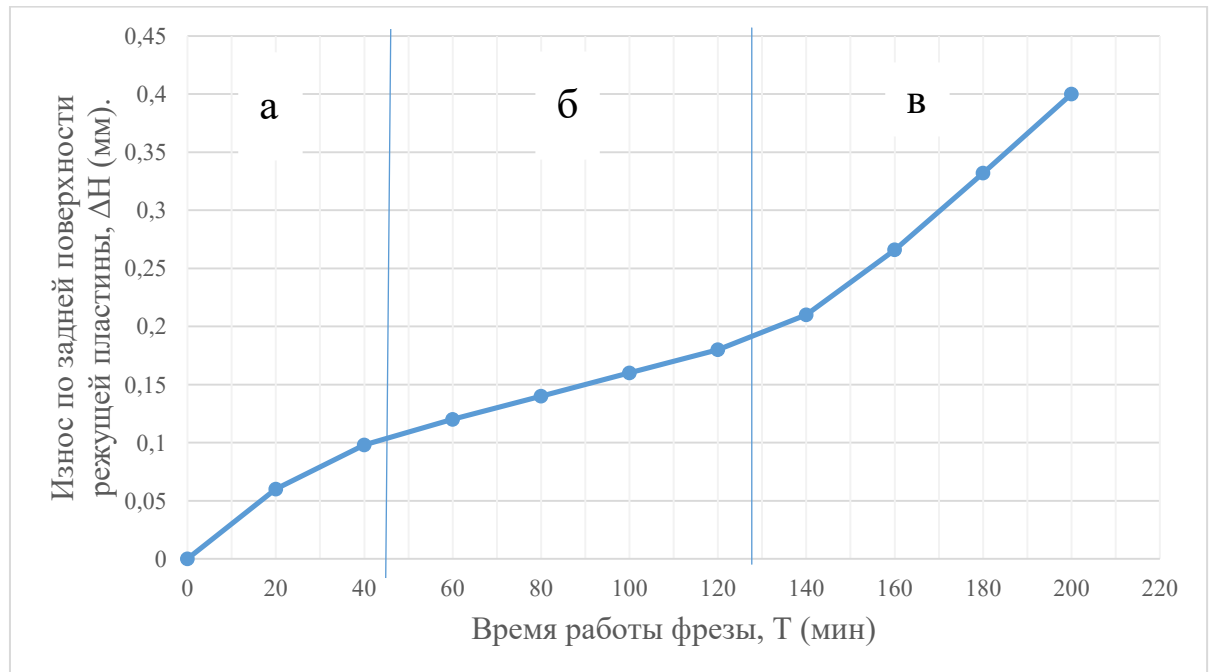


Рисунок 4.6 - График износа оксидно-карбидных режущих пластин ВСК-200 при торцевом фрезеровании с использованием инструмента со смешанной компоновкой (чугун СЧ20, обрабатываемая поверхность - 193x25 мм, попутное фрезерование, скорость резания $V_{фр} = 190$ м/мин, подача $S = 0,09$ мм/об, глубина резания $H = 0,1$ мм)

Однако изучение пиков виброграммы позволяет сделать вывод, что на данном этапе одна режущая пластина не участвует в процессе обработки (рисунок 4.6, а). Это может быть вызвано либо приработкой пластин, обладающих различиями геометрических параметров, либо износом данной пластины.

На стадии нормального износа (рисунок 4.6, б), при обработке фрезой со смешанной компоновкой оксидно-карбидных режущих пластин наблюдается увеличение амплитуды колебаний. Также отчётливо прослеживаются пропуски возбуждения колебаний от врезания зубьев инструмента, что говорит о том, что некоторые режущие кромки уже достигли катастрофического износа вследствие хрупкого разрушения и не участвуют в процессе обработки. Если оценить график

виброускорений (рисунок 4.7, б) можно сделать вывод, что в процессе резания участвуют только три из шести режущих пластины.

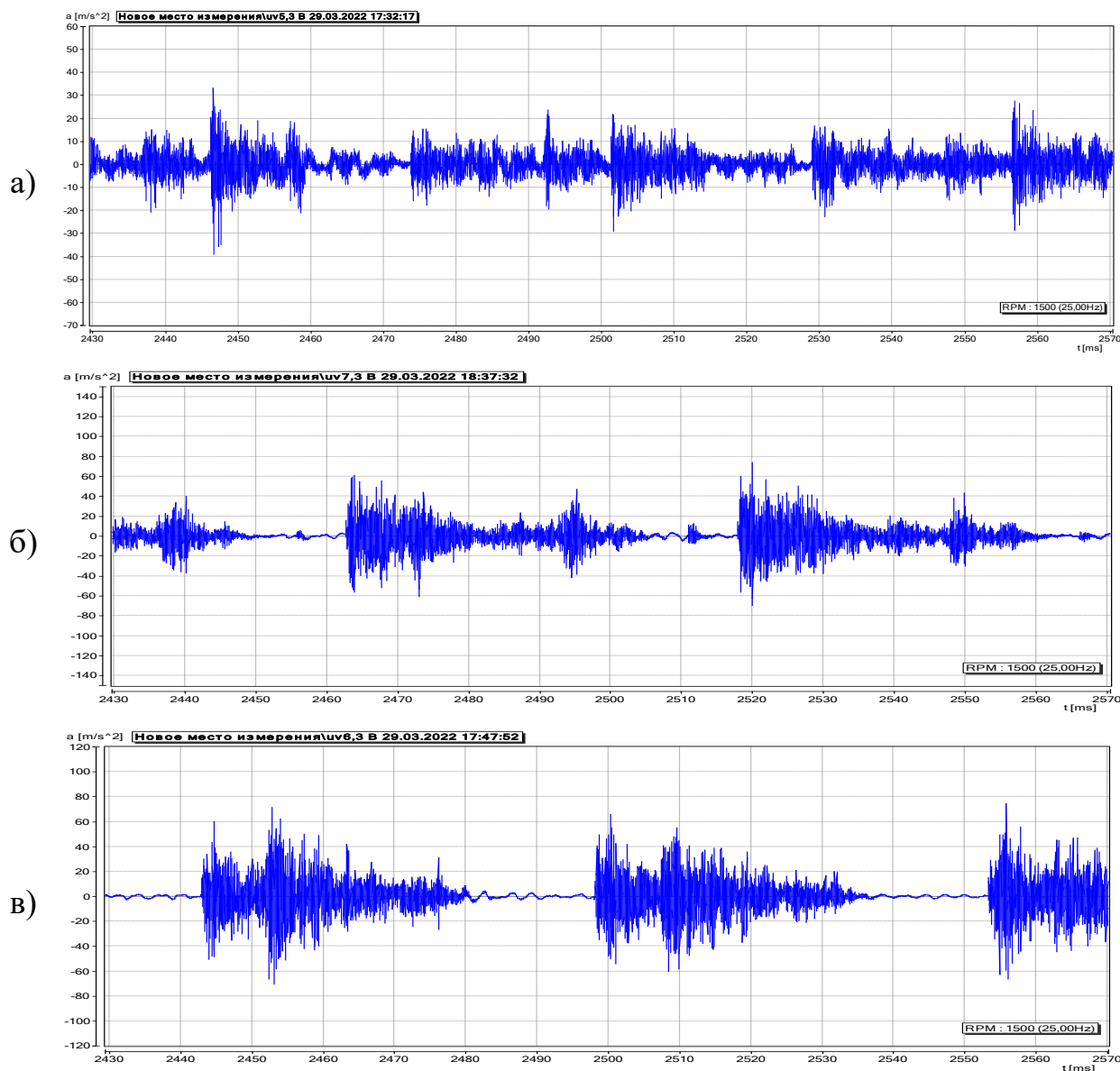


Рисунок 4.7 - График виброускорений подсистемы «стол-заготовка» при фрезеровании с использованием инструмента со смешанной компоновкой на различных стадиях износа (зона а – приработка, б – нормальный износ, в – катастрофический износ)

Отследить это можно по этапам резкого возрастания амплитуды, которые свидетельствуют о врезании зуба фрезы в заготовку. В исправном состоянии врезания новых зубьев фрезы в заготовку происходит каждые 10 миллисекунд при данных режимах обработки. На графике видно, что первые 2 пика виброускорений происходят на 2465мс и на 2475мс, а следующий происходит

только через 20мс на 2495 миллисекунде процесса обработки, что даже позволяет оценить расположение более изношенных режущих кромок (рисунок 4.8, а).

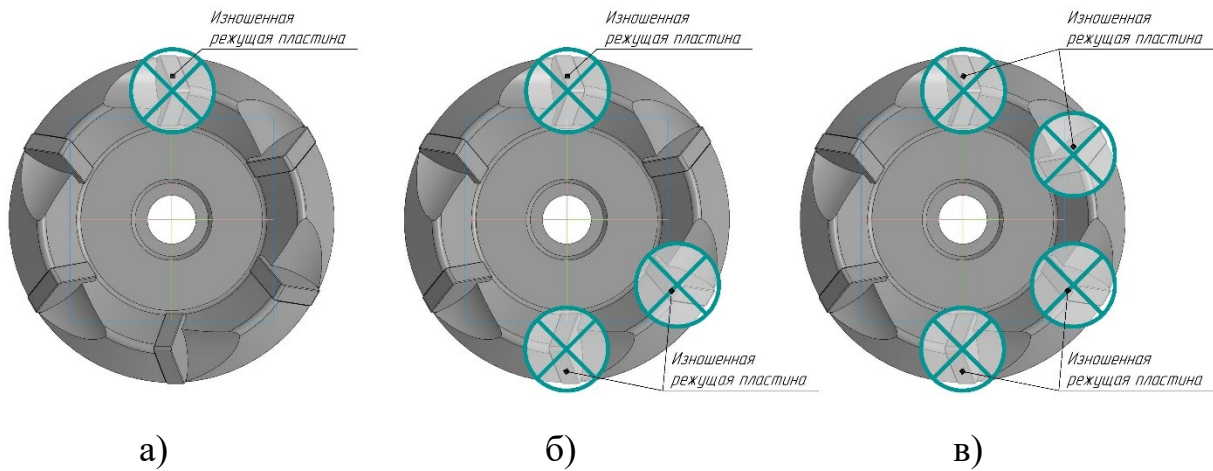


Рисунок 4.8 – Состояние режущих пластин при различных стадиях износа при смешанной компоновке фрезы оксидно-карбидными режущими пластинами:
а – приработка; б – нормальный износ; в – катастрофический износ

На стадии катастрофического износа (рисунок 4.7, в) наблюдается ещё большее увеличение амплитуды колебаний, обусловленное увеличением нагрузки на исправные режущие пластины. По пикам виброускорений можно проследить, что на данной стадии в резании участвуют только две режущие кромки (рисунок 4.8 в).

Анализ спектра виброускорений (рисунок 4.9) подсистемы «стол-заготовка» при фрезерной обработке на различных стадия износа говорит о том, что доминирующие частоты при обработке на всех стадиях износа остаются примерно одинаковыми и ощутимо изменяются только пиковые значения виброускорений.

Фазовый портрет колебаний подсистемы «стол-заготовка» (рисунок 4.10) также свидетельствует об увеличении величины отклонений системы от нулевой точки по мере изнашивания инструмента, но характер колебаний, который в первую очередь зависит от режимных параметров обработки и кинематики станка, остаётся неизменным.

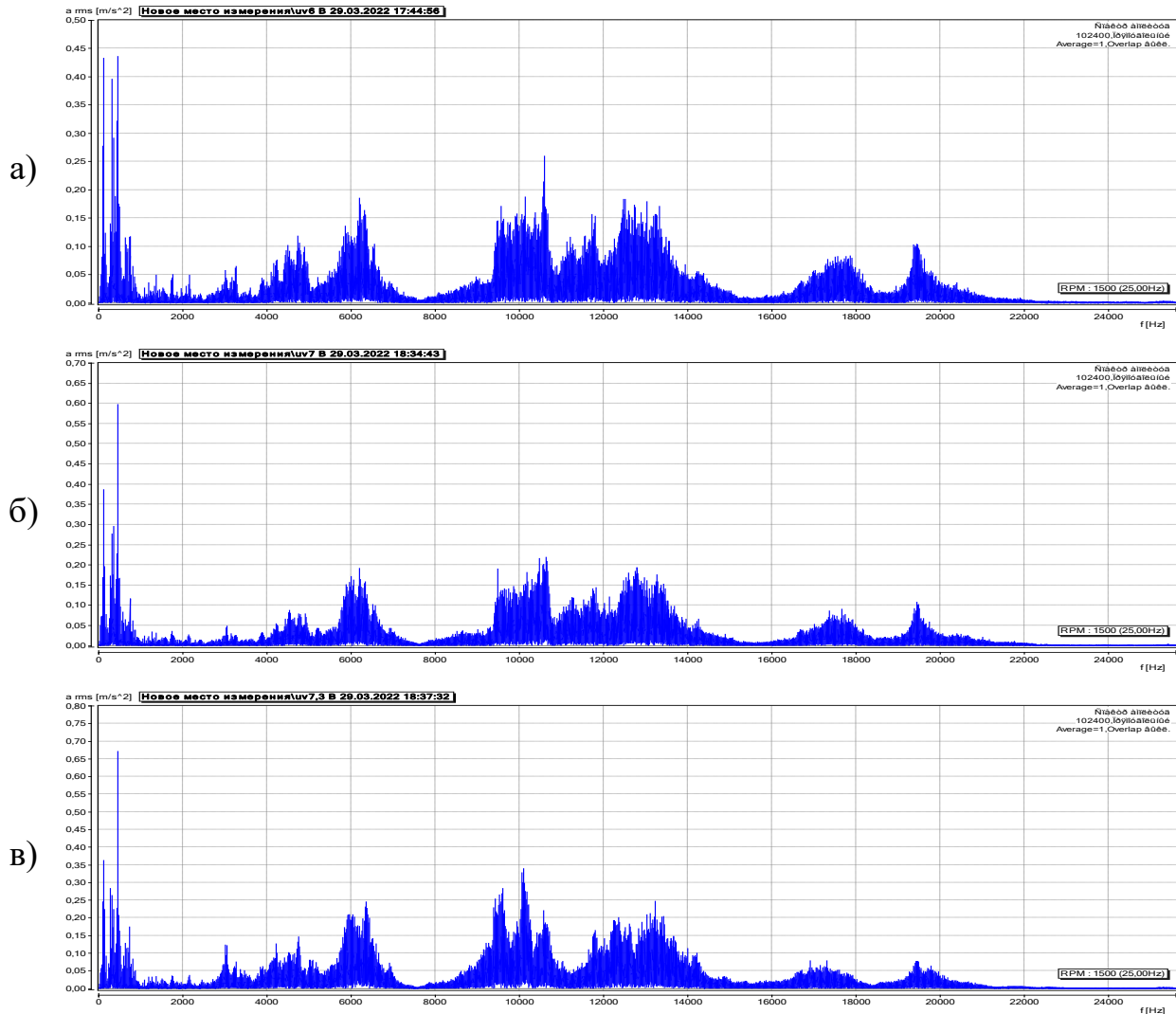


Рисунок 4.9 - График частотного спектра виброускорений подсистемы «стол-заготовка» при фрезеровании с использованием инструмента со смешанной компоновкой пластинами на различных стадиях износа (зона а – приработка, б – нормальный износ, в – катастрофический износ)

Анализ спектра виброускорений и фазовых портретов при фрезеровании с различными компоновками инструмента режущими пластинами показал, что во всех случаях характер этих параметров остаётся одинаковым и изменяются только пиковые значения.

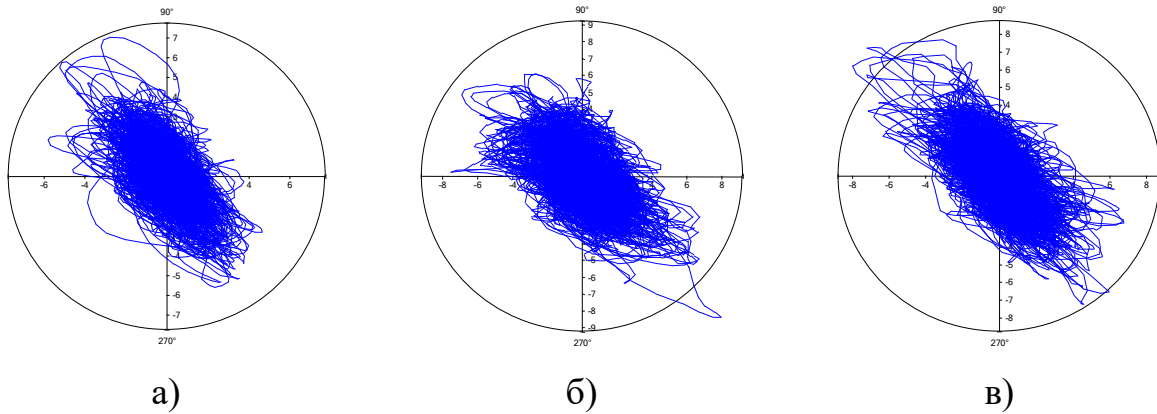


Рисунок 4.10 - Фазовый портрет виброускорений подсистемы «стол-заготовка» при фрезеровании с использованием инструмента с SLM компоновкой высокоомными пластинами на различных стадиях износа

На рисунке 4.11 представлен график износа оксидно-карбидных режущих пластин при фрезеровании с использованием инструмента с SLM компоновкой низкоомными пластинами. Данная компоновка показала большую стойкость до выхода шероховатости за пределы допуска по шероховатости, определённого для данного эксперимента – R_a 3 мкм.

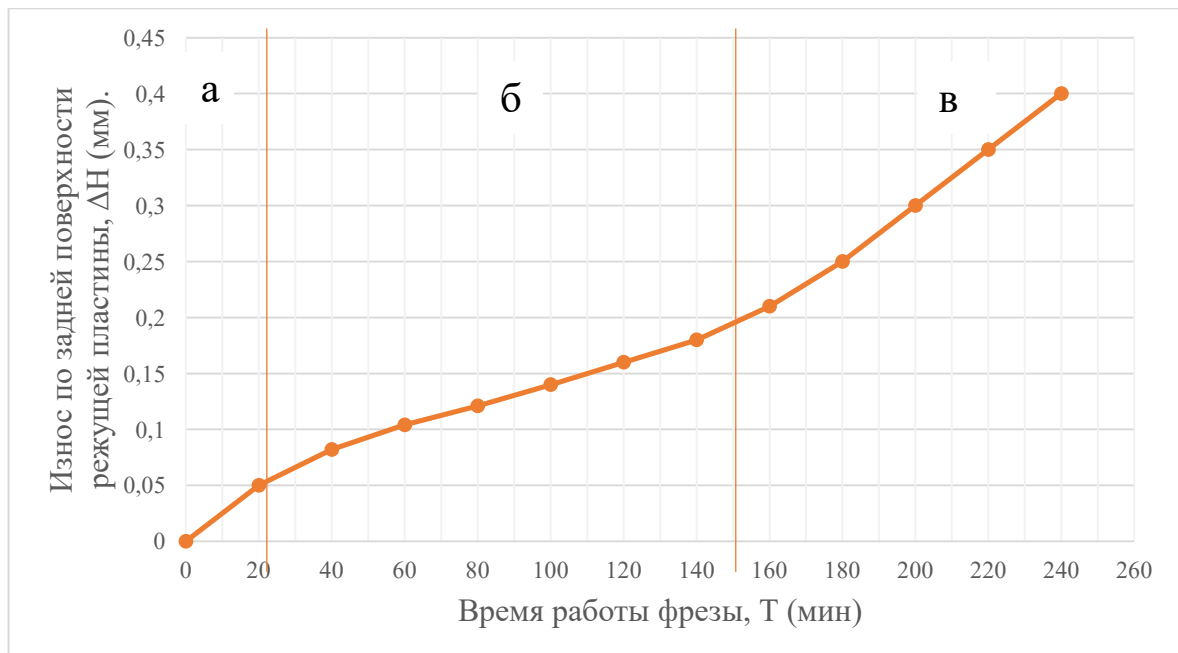


Рисунок 4.11 - График износа оксидно-карбидных режущих пластин ВОК-200 при торцевом фрезеровании с использованием инструмента с SLM компоновкой низкоомными пластинами (чугун СЧ20, обрабатываемая поверхность - 193x25 мм, попутное фрезерование, скорость резания $V_{фр} = 190$ м/мин, подача $S = 0,09$ мм/об, глубина резания $H = 0,1$ мм)

Период стойкости инструмента с данной компоновкой пластин составил 240 минут. Характер износа был менее интенсивным в сравнении со смешанной компоновкой, однако этап приработки не имеет значительных отличий, в то время как этапы нормального и катастрофического износа имеют более продолжительный период.

Анализ виброускорений, снятых в данном эксперименте свидетельствует о том, что во время стадии приработки процесс имеет наименьшую амплитуду виброускорений из измерений на различных стадиях износа, но процесс не является однородным, так как режущие пластины снимают различный припуск во время приработки. Из графика (рисунок 4.12, а) видно, что, несмотря на низкую амплитуду, в виброграмме присутствуют пропуски колебаний, свидетельствующие о том, что один зуб либо совсем не участвует в резании, либо снимает значительно меньший припуск.

На стадии нормального износа (рисунок 4.12, б) процесс фрезерования является однородным, в процессе резания участвуют все зубья фрезы, однако амплитуда колебаний выше, в связи с возрастанием силы резания за счёт увеличения площади контакта режущих кромок и поверхности заготовки вследствие их изнашивания.

Стадия катастрофического изнашивания инструмента для низкоомной компоновки (рисунок 4.12, в) наступает только спустя 150 минут с начала процесса обработки. При этом виброграмма, соответствующая данному этапу обработки говорит об увеличении амплитуды относительно предыдущего этапа и снижению однородности фрезерования, вследствие выхода из строя двух режущих кромок, о чём свидетельствуют характерные пропуски колебаний на виброграмме. Состояние оксидно-карбидных режущих пластин при низкоомной компоновке на различных стадиях изнашивания представлены на рисунке 4.13.

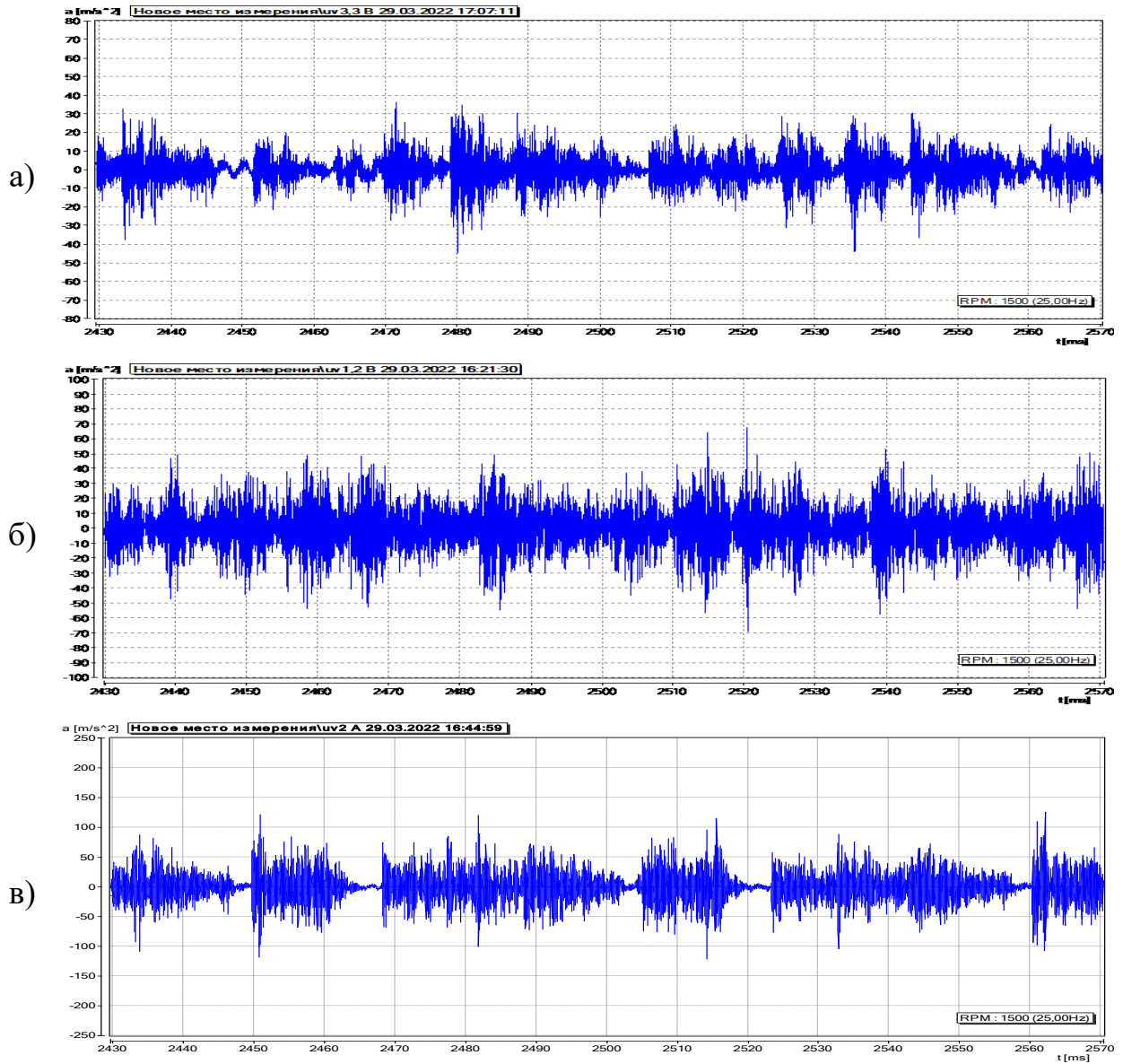


Рисунок 4.12 - График виброускорений подсистемы «стол-заготовка» при фрезеровании с использованием инструмента с SLM компоновкой низкоомными пластинами на различных стадиях износа

(зона а – приработка, б – нормальный износ, в – катастрофический износ)

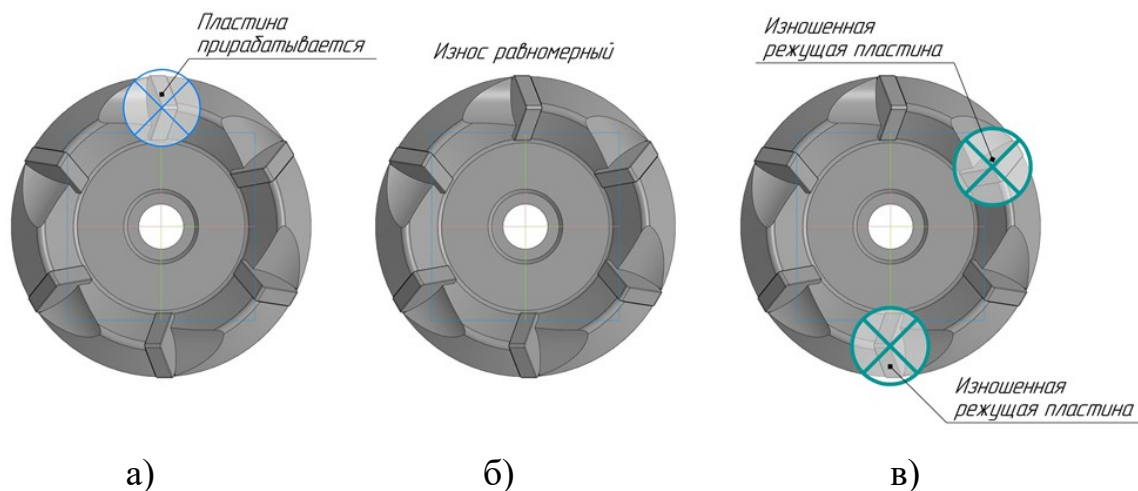


Рисунок 4.13 – Состояние режущих пластин при различных стадиях износа при низкоомной компоновке фрезы оксидно-карбидными режущими пластинами:
 а – приработка; б – нормальный износ; в – катастрофический износ

На рисунке 4.14 представлен график износа оксидно-карбидных режущих пластин при фрезеровании с использованием инструмента с SLM компоновкой высокоомными пластинами. Данная компоновка обеспечила более длительный период стойкости, а именно 340 минут, что на 29 % больше в сравнении с низкоомной компоновкой и на 41 % выше в сравнении с хаотичной, однако период приработки не претерпел значительных изменений.

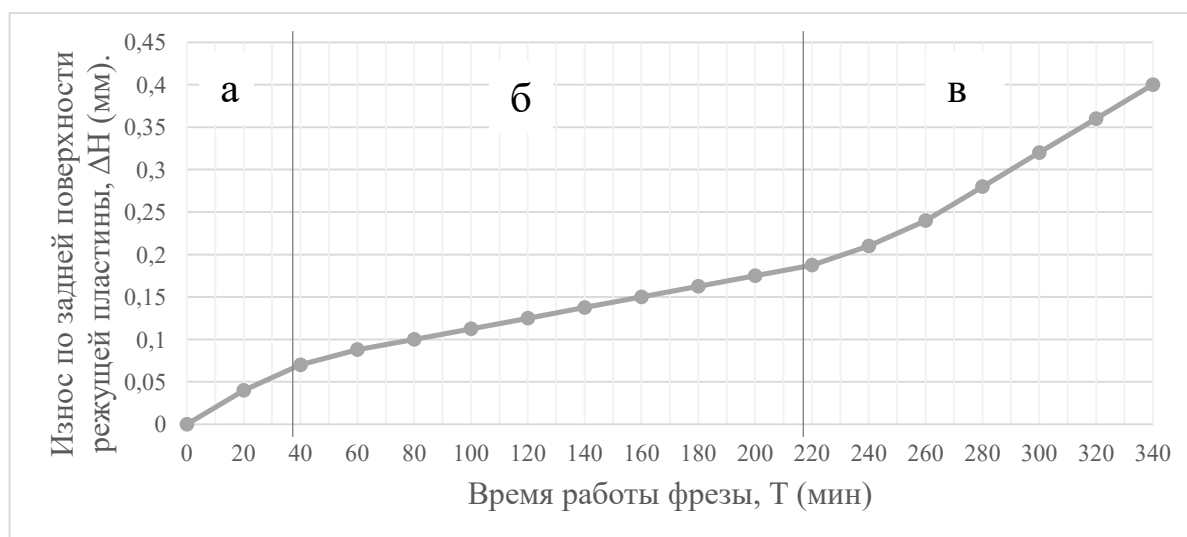


Рисунок 4.14 - График износа оксидно-карбидных режущих пластин ВОК-200 при торцевом фрезеровании с использованием инструмента с SLM компоновкой высокоомными пластинами (чугун СЧ20, обрабатываемая поверхность - 193x25 мм, попутное фрезерование, скорость резания $V_{фр} = 190$ м/мин, подача $S = 0,09$ мм/об, глубина резания $H = 0,1$ мм)

Виброграммы процесса фрезерования с использованием высокоомной компоновки многолезвийного режущего инструмента при фрезеровании на различных стадиях износа говорят об общем снижении амплитуды колебаний относительно низкоомной и смешанной компоновки (рисунок 4.15). При этом характер изменения виброускорений идентичен низкоомной компоновке.

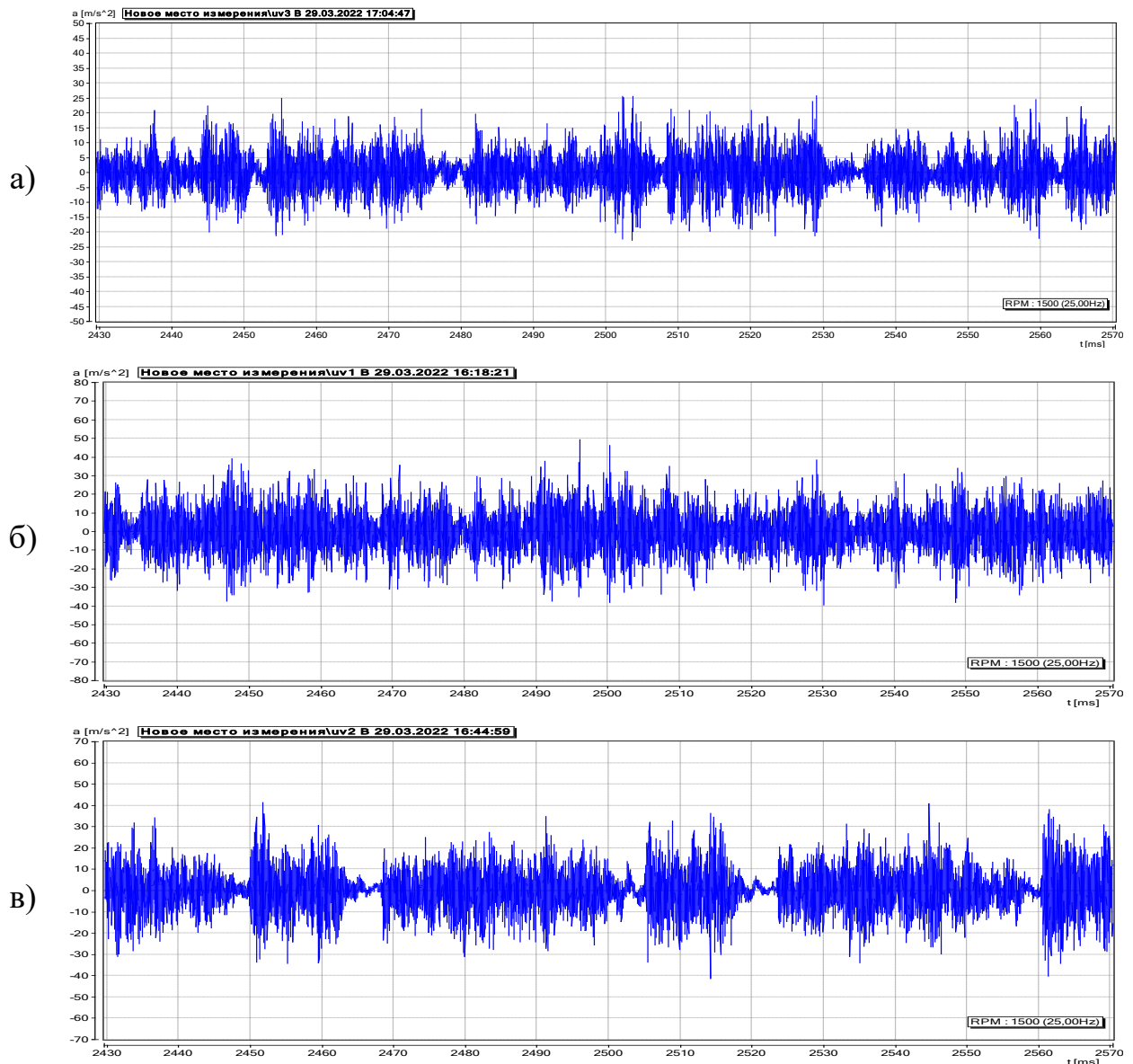


Рисунок 4.15 - График виброускорений подсистемы «стол-заготовка» при фрезеровании с использованием инструмента с SLM компоновкой высокоомными пластинами на различных стадиях износа

(зона а – приработка, б – нормальный износ, в – катастрофический износ)

На стадии приработки наблюдается наименьшая амплитуда колебаний во время всего процесса фрезерования с использованием высокоомной компоновки, но также наблюдается незначительная неоднородность процесса, вызванная приработкой режущих кромок.

Стадия нормального износа характеризуется высокой стабильностью процесса резания и незначительного повышения амплитуды колебаний, вследствие нормального и равномерного износа режущих кромок.

Стадия катастрофического изнашивания при высокоомной компоновке наступает спустя 220 минут работы инструмента. Резкое ухудшение качества обработки и увеличение интенсивности изнашивания режущих кромок является следствием выхода из строя двух режущих пластин, отсутствие которых увеличивает нагрузку на остальные пластины, тем самым увеличивая амплитуду колебаний и создавая риски на поверхности заготовки вследствие пропусков нормального срезания материала на установленную режимами обработки подачу на зуб фрезы. Схема изнашивания режущих пластин на различных стадиях износа режущих пластин представлена на рисунке 4.16.

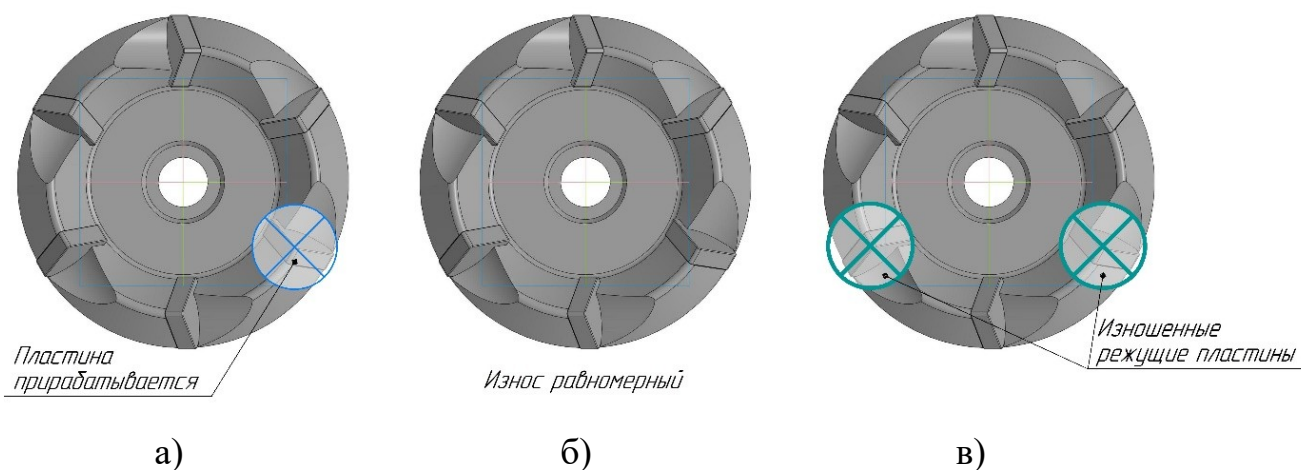


Рисунок 4.16 – Состояние режущих пластин при различных стадиях износа при высокоомной компоновке фрезы оксидно-карбидными режущими пластинами:
а – приработка; б – нормальный износ; в – катастрофический износ

Проведённые эксперименты подтверждают целесообразность и эффективность применения селективного метода оснащения многолезвийного

режущего инструмента при фрезеровании высокоточных плоских поверхностей. Таким образом, подбор максимально однородных режущих пластин, путём определения их микроструктурных параметров через удельное электрическое сопротивление каждой отдельной пластины позволяет ощутимо повысить качество обработки деталей с высокоточными плоскими поверхностями, повысить срок службы инструмента за счёт рационального использования каждой режущей пластины, обеспечить точное прогнозирование стойкости сборного многолезвийного режущего инструмента в зависимости от выбранной компоновки.

4.3 Рекомендации по повышению качества изготовления высокоточных плоских поверхностей на основе селективного комплектования многолезвийного инструмента режущей керамикой

Применение режущей керамики для обработки твёрдых сплавов и материалов обладает колоссальным экономическим потенциалом. Главной причиной этому служит возможность обработки на высоких скоростях резания до 1500 м/мин, что превышает показатели лучших твердосплавных пластин в 2,5 раза. При этом из-за высокой твёрдости РК и высокой скорости обработки удаётся добиваться высокого качества обработки, например, шероховатость поверхности можно довести до показателя $Ra = 0,4$ мкм. Это позволяет сократить количество технологических операций путём замены операции шлифования.

В настоящее время этот потенциал режущей керамики перевешивается невозможностью прогнозирования стойкость режущих пластин и фрезы в целом, что приводит к преждевременному износу инструмента и в связи с этим, получения бракованных деталей.

Селективный метод установки режущих пластин во фрезу (SLM) позволит оснащать многолезвийный инструмент пластинами с близкими показателями стойкости, что позволит максимально эффективно использовать ресурс СМП и

производить их замену до наступления критического разрушения, приводящего к браку.

Также нельзя не отметить, что оксидно-карбидная режущая керамика дешевле твёрдосплавных пластин с износостойкими покрытиями на 20 %, но и её стойкость ниже приблизительно на те же 20 %. Однако, благодаря высокой скорости обработки и сокращению технологических операций она позволяет значительно сократить расходы на обработку.

Таким образом, внедрение и соблюдение правил предлагаемых подходов позволит значительно повысить как эффективность технологического процесса, так и качество обрабатываемых поверхностей.

Для эффективного применения оксидно-карбидных режущих пластин в качестве лезвий многолезвийного режущего инструмента необходимо в обязательном порядке соблюдать следующие правила:

- при приёмке партии оксидно-карбидных режущих пластин на инструментальный склад, необходимо производить измерение удельного электрического сопротивления каждой режущей пластины и разделять пластины на две группы – высокоомные пластины (61-100 Ом·м) и низкоомные (18-60 Ом·м). После разделения на группы пластины различных категорий необходимо хранить в отдельных тарах с соответствующими подписями;

- для технологических операций по фрезерной обработке объёмных деталей, сопровождающихся длительной непрерывной работой инструмента и обеспечением высоких требований к качеству (например, направляющие станков); при обработке деталей с требованием к шероховатости обрабатываемых плоских поверхностей $Ra \leq 1$; при обработке плоских прерывистых поверхностей – в данных случаях допускается использование исключительно высокоомных режущих пластин, в остальных случаях использование низкоомных режущих пластин при однородной компоновке не повлечёт понижения эффективности процесса обработки; рекомендации по выбору режимных параметров для

различных компоновок режущих пластин и требований к шероховатости обрабатываемой поверхности представлены на рисунке 4.17;

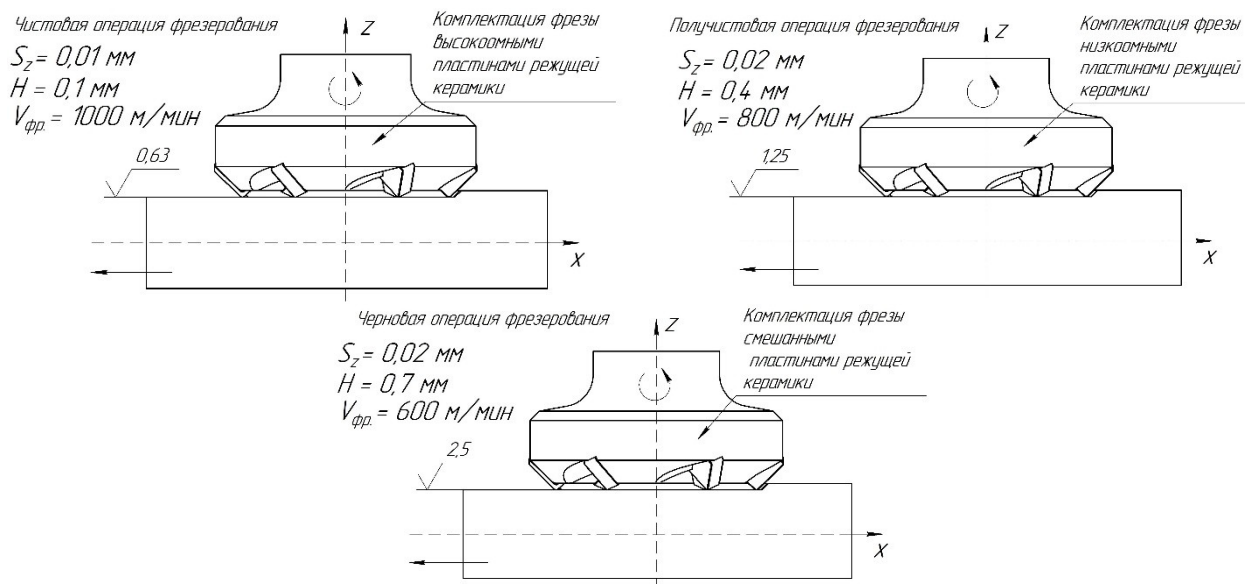


Рисунок 4.17 – Рекомендации по выбору режимных параметров при торцевом фрезеровании с различными компоновками оксидно-карбидных режущих пластин

- для определения стойкостных параметров каждой группы керамических пластин, исходя из технологических условий предприятия использующего оксидно-карбидную режущую керамику, необходимо эмпирическим путём определить стойкость инструмента, оснащённого такими режущими пластинами, для типовых технологических операций данного предприятия, и при проектировании технологических процессов выбирать инструмент исходя из требований к качеству обработки и длительности процесса обработки;

- по окончании ресурса режущих пластин для чистовой механической обработки, пластины также следует хранить группами для дальнейшего использования на получистовых и черновых операциях;

- режущие пластины, которые отработали время, равное своему периоду стойкости при чистовых операциях, могут быть использованы для получистовых и черновых операций, при этом при обработке деталей с прерывистой

поверхностью и деталей с длиной обрабатываемой поверхностью свыше 3 метров, необходимо также применять исключительно высокоомные режущие пластины.

4.4 Выводы по четвёртой главе

Экспериментальные исследования, проведённые с целью подтверждения целесообразности и эффективности применения селективного метода оснащения многолезвийного режущего инструмента (SLM) при фрезерной обработке высокоточных плоских поверхностей, показали следующие результаты:

1. Подтверждена гипотеза об интенсификации износа многолезвийного режущего инструмента при оснащении разнородными керамическими режущими пластинами, которая возникает по причине увеличения нагрузки на работоспособные пластины при преждевременном выходе из строя отдельных зубьев фрезы;

2. Установлено, что применение селективного метода оснащения многолезвийного инструмента оксидно-карбидными режущими пластинами при торцевом фрезеровании обеспечивает качество обработки сопоставимое с шлифованием и увеличивает стойкость инструмента в 1,2-1,5 раза;

3. Определена зависимость качества обработки поверхности от применяемых компоновок режущих пластин во фрезе, использование компоновок однородных пластин в многолезвийном инструменте показывает улучшение параметров шероховатости в 1,1 – 1,8 раз;

4. Разработаны практические рекомендации по применению оксидно-карбидных режущих пластин на операциях торцевого фрезерования высокоточных плоских поверхностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи технологического обеспечения качества обработки высокоточных плоских контактных поверхностей при чистовом высокоскоростном фрезеровании с учетом параметров работоспособности режущей керамики.

Проведённые исследования позволили добиться следующих результатов:

1. В соответствии с поставленной целью проведённый анализ современных технологий обработки высокоточных плоских поверхностей позволил выявить основополагающие факторы, влияющие на качество изготовления и дальнейшую эксплуатацию таких деталей, что позволило определить недостатки существующих технологии и определить пути повышения качества обработки и производительности процесса на основе использования режущей керамики в качестве инструментального материала при высокоскоростном торцевом фрезеровании.

2. Выявлены ключевые факторы, влияющие на работоспособность оксидно-карбидной режущей керамики, которые определяются различиями структурных параметров материала одной марки (количество карбидных зерен, суммарная линия протяженности границ карбидных зерен, пористость материала). Значения этих параметров могут различаться более чем в 2 раза, что приводит оксидно-карбидные режущие пластины, обладающие мелкозернистой структурой, к отличию по работоспособности и стойкости к изнашиванию на 30...50 % по сравнению с пластинами с крупнозернистой структурой.

3. Разработаны метод и устройство для неразрушающего контроля микроструктуры оксидно-карбидных керамических режущих пластин посредством определения их электрического сопротивления (Патент на изобретение №2729169), позволяющие прогнозировать стойкостные характеристики каждой пластины.

4. Создан способ селективного оснащения многолезвийного режущего инструмента (SLM – Selective layout method), позволяющий комплектовать

инструмент режущими пластинами максимально схожими по работоспособности. Применение данного метода позволяет увеличить стойкость многолезвийного инструмента на 20...50 % и повысить качество обработки поверхности на 10...80 % в зависимости от выбранной компоновки.

5. Разработана математическая модель, учитывающая режимы резания и компоновку оксидно-карбидных режущих пластин в многолезвийном инструменте при торцевом фрезеровании позволяет оценить влияние технологических факторов на динамическую устойчивость системы. Использование данной модели при проектировании технологических процессов позволяет выбирать оптимальные режимы обработки для различных компоновок режущих пластин с обеспечением максимального качества обработки, производительности процесса и стойкости инструмента.

6. Произведено имитационное моделирование процесса торцевого фрезерования с использованием селективного оснащения многолезвийного инструмента при торцевом фрезеровании на основе созданной математической модели при помощи программного обеспечения NI LabVIEW 2013 SP1. Результаты моделирования показывают, что применение однородных компоновок позволяет увеличить область устойчивости процесса в 2...2,6 раза в сравнении со смешанной компоновкой.

7. Произведены экспериментальные исследования фрезерования чугунных заготовок с использованием различных компоновок оснащения многолезвийного инструмента оксидно-карбидными режущими пластинами, которые позволили:

- оценить динамическую устойчивость системы при различных компоновках на различных стадиях износа, так при использовании однородных компоновок керамических режущих пластин амплитуда виброперемещений элементов системы на стадии нормального изнашивания снижается на 30 %;

- установить зависимость шероховатости и стойкости инструмента от используемой компоновки, так при использовании селективного метода шероховатость обработанной поверхности снижается в 1,1...1,8 раз, а

износостойкость увеличивается в 1,2...1,5 раза в сравнении с традиционной технологией;

8. Произведено апробирование разработанной методики селективного оснащения многолезвийного режущего инструмента в производственных условиях компании ООО «ПО «Электромашина» и внедрение разработанных технологических решений в учебный процесс кафедры Машиностроения Горного университета.

9. Перспективы дальнейшего развития диссертационного исследования заключаются в расширении области применения селективного метода оснащения многолезвийного металлорежущего инструмента керамическими пластинами для различных деталей, видов обработки и марок керамических режущих пластин, а также в создании программного обеспечения для инструментально-складского хозяйства и станков с ЧПУ для автоматизации хранения, выбора рациональной компоновки сменных режущих пластин и соответствующих режимов обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аврутин, С. В. Основы фрезерного дела / С.В. Аврутин. – М.: ПРОФТЕХИЗДАТ, 1962. – 316 с.
2. Андреев, В. Н. Обработка серого чугуна торцевыми фрезами с минералокерамическими пластинами / В. Н. Андреев, Е. В. Седов // Станки и инструмент. - 1981. - №5. С.33-38.
3. Антонюк, В. С. Сравнительные испытания режущих свойств нитридной керамики с многофункциональными покрытиями / В. С. Антонюк, А. В. Рутковский // Вестник СумДУ, 2003. – №3 (49). – С.162-167.
4. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т. 1 / В.И. Анурьев - М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.
5. Арзамасов, Б. Н. Материаловедение / Под ред. Б. Н. Арзамасова, - М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
6. Арзамасов, Б. Н. Справочник по конструкционным материалам / Б. Н. Арзамасов, Т. В. Соловьев. Под ред. Б. Н. Арзамасова, - М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 649 с.
7. Армарего, И. Обработка металлов резанием. Пер. с англ. / И. Дж. А. Армарего, Р. Х. Браун – М.: Машиностроение, 1977. - 325 с.
8. Артамонов, А. Я. Исследование обрабатываемости высокопрочного чугуна / А. Я. Артамонов. - М.: Машгиз, 1955. – 134 с.: ил.
9. Аршинов, В. А. Резание металлов и режущий инструмент. / В. А. Аршинов, Г. Л. Алексеев - М.: Машиностроение, 1976. - 440 с.
10. Ачеркан, Н. С. Детали машин. Расчёт и конструирование. Справочник. В 3-х т. Т. 1. / Под редакцией Н. С. Ачеракана. – М.: Москва, 1968. - 443 с.
11. Бакланов, Е. И. Исследование режущих свойств минералокерамики при торцевом фрезеровании серого чугуна / Е. И. Бакланов, А. И. Болдырев, Н. И. Деркачёв // Станки и инструмент. - 1980. - № 2. - С.61-73.

12. Балкевич, В. Л. Техническая керамика / В. Л. Балкевич. – М.: Издательство литературы по строительству, 1968. – 200 с.
13. Бальшин М.Ю., Основы порошковой металлургии / М. Ю. Бальшин, С. С. Кипакрисов - М.: Металлургия, 1978. - 184 с.
14. Бальшин, М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / М. Ю. Бальшин - М.: Металлургия, 1972. - 336 с.
15. Баранчиков, В. И. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Библиотека технолога. / В. И. Баранчиков, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
16. Барбашов, Ф. А. Фрезерное дело. Учебное пособие для учебных заведений профтехобразования / Ф. А. Барбашов. – М.: Высшая школа, 1973. – 280 с.
17. Баринов, С. М. Прочность технической керамики / С. М. Баринов, В. Я. Шевченко // РАН. Межотраслевой научный центр технич. керамики. – М.: Наука, 1996. - 159 с.
18. Бармин, Б. П. Вибрации и режимы резания / Б. П. Бармин – М.: Машиностроение, 1979. - 72 с.
19. Беляков, А. И. Применение чугуна с шаровидным графитом / А. И. Беляков, А. А. Беляков, А. А. Жуков // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. - №11. – С. 3 – 10.
20. Блек, У. Модель напряжения пластического течения при резании металла // Конструирование и технология машиностроения. – 1979. - №3. - С. 124-139.
21. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф.Бобров – М.: Машиностроение, - 1975. - 344 с.
22. Бржозовский, Б. М. Динамический мониторинг технологического оборудования / Б. М. Бржозовский, В. В. Мартынов, И. Н. Янкин, М. Б. Бровкова. – Саратов: Саратовский государственный технический университет, - 2008. – 310 с.

23. Бушуев, В. В. *Металлорежущие станки. Учебник в 2-х томах. Т. 1.* / В. В. Бушуев, Т. М. Авраамова, Л. Я. Гиловой и др. под ред. В. В. Бушуева. Т. 1. — М.: Машиностроение, 2011. — 608 с.
24. Бушуев, В. В. *Металлорежущие станки. Учебник в 2-х томах. Т. 2.* / В. В. Бушуев, А. В. Еремин, А. А. Какойло и др.; под ред. В. В. Бушуева. Т. 2. — М.: Машиностроение, 2011. — 586 с.
25. Васильков, Д. В. *Управление качеством финишных методов обработки: Сб. науч. тр. / Гл. ред. В. А. Иванов; Перм. гос. техн. ун-т и др. - Пермь, 1996, 327 с.*
26. Васильков, Д. В. *К вопросу упрощения динамической модели технологической системы механической обработки / Д. В. Васильков, В. Л. Вейц, П. А. Лопних // Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. Вып 14. – СПб.: СЗПИ, 1999. - С. 35-41.*
27. Васин, С. А. *Прогнозирование виброустойчивости при точении и фрезеровании. – М.: Машиностроение, 2006. - 383 с.*
28. Вейц, В. Л. *Резание материалов / В. Л. Вейц, В. В. Максаров, А. Г. Схиртладзе – СПб.: СЗТУ, 2002. - 232 с.*
29. Вязников, Н.Ф. *Металлокерамические материалы и изделия. 2 изд. / Н. Ф. Вязников, С. С. Ермаков - Л.: Машиностроение, 1967. - 224 с.*
30. Гарбер, М. Е. *Износостойкие белые чугуны / М. Е. Гарбер. – М.: Машиностроение, 2010. – 280 с.*
31. Гордеев, Ю. А. *Резание материалов / Ю. И. Гордеев, Е. Г. Зеленкова. – Красноярск: СФУ, 2012. – 256 с.*
32. **Горшков, И. В.** *Повышение эффективности металлообработки посредством применения селективного метода оснащения режущего инструмента керамическими режущими пластинами. / И.В. Горшков // Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021»: сборник тезисов. – Санкт-Петербургский горный университет, СПб.: 2021. – С. 38-39.*

33. **Горшков, И. В.** Структурные параметры режущей керамики как фактор, влияющий на качество механической обработки. / И.В. Горшков, М.А. Попов // Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020»: сборник тезисов. – Санкт-Петербургский горный университет, СПб.: 2020. – С. 29-33.

34. Грановский, Г. И. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.

35. Дальский, А. М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. / А. М. Дальский, Б. М. Базров. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364с.

36. Добрынин, С. А. Методы автоматизированного исследования вибрации машин. Справочник / С. А. Добрынин, М. С. Фельдман, Г. И. Фирсов. – М.: Машиностроение, 1987. – 223 с.

37. Дунаев, П. Ф. Конструирование узлов и деталей машин / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 496 с.

38. Ерохин, В. В. Изготовление режущих пластин из минералокерамики на основе нанодисперсных порошков / В. В. Дорохов / Научно технический вестник Брянского государственного университета – 2016. - № 4. – С. 27 – 33.

39. Ефимов, А. Е. Технологическое обеспечение качества поверхности гидроцилиндров горного оборудования на основе предварительного лазерного локального воздействия: дисс. канд. техн. наук: 05.02.08 / Александр Евгеньевич Ефимов. – Санкт-Петербург, 2017. – 166 с.

40. Жарков, И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И. Г. Жарков, В. Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1986. – 186 с.

41. Журавлёв, М. П. Исследование и испытание технологических систем / М. П. Журавлёв. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2017. – 88 с.

42. Зубков, Н. Н. Инструментальные материалы для изготовления многолезвийных инструментов/ Зубков Н. Н. / Электронный научно – технический журнал «Наука и Образование». – 2013. - №5. – С.75-100.
43. Иванов, В. А. Системы технологий отраслей экономики. Учебное пособие / В. А. Иванов. – Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2019. – 110 с.
44. Карагёзян, А.А. Высокоскоростное фрезерование плоских поверхностей точной геометрии у деталей / А. А. Карагёзян, Э. В. Широких // Научно-практический журнал Коломенского института (филиала) МГМУ (МАМИ). – 2014. – №2 (5). – С. 89-96.
45. Кедров, С. С. Колебания металлорежущих станков / С. С. Кедров. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.
46. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. Т. 2. В 2кн. / Под общ. ред. Ключева В.В. – М.: Машиностроение, 2003. - 688 с.
47. Кожевников, Д. В. Режущий инструмент / Д. В. Кожевников, В. А. Гречишников, С. А. Кирсанов, В. И. Кокарев, А. Г. Схиртладзе. – М.: Машиностроение, 2007. – 528 с.
48. Колев, Н. С. Металлорежущие станки: Учебное пособие для вузов. / Н. С. Колев, Л. В. Красниченко и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 500 с.
49. Колка, И. А. Многооперационные станки / И. А. Колка, В. В. Кувшинский – М.: Машиностроение, 1983. – 135 с.
50. Корсаков, В. С. Точность механической обработки / В. С. Корсаков, И. М. Колесов, В. И. Митин, В. В. Ржавинский. – М.: МашГиз, 1961. – 397 с.
51. Косилова, А. Г. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, - 1956. – 656 с.
52. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.

53. Лалазарова, Н. А. Влияние неоднородности высокопрочного чугуна на его обрабатываемость резанием / Н. А. Лалазарова // Вестник ХГАДТУ. – 2000. – №12-13. – С. 86-87.

54. Максаров, В. В. Автоматизация и управление процессом стружкодробления на основе метода локального пластического воздействия на обрабатываемый материал / В. В. Максаров, А. Н. Ванчурин // Металлообработка. – 2006. - №5-6 (35-36). – С. 12-17.

55. Максаров, В. В. Технологическое обеспечение качества направляющих металлорежущих станков. / В. В. Максаров, А. Д. Халимоненко, **И. В. Горшков**, И. А. Бригаднов // Металлообработка. – 2019. - №4 (112). – С. 59-67.

56. Максаров, В. В. Влияние структурных параметров режущей керамики на качество обработки при селективном формировании инструментального оснащения / В. В. Максаров, А. Д. Халимоненко, **И. В. Горшков** // Металлообработка. – 2020. - №1(115). – С. 54-62.

57. Максаров, В. В. Технология обеспечения качества геометрических параметров при обработке привалочной поверхности блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания / В. В. Максаров, Р. Р. Рахманкулов // Качество и жизнь – М.: МОО «Академия проблем качества», 2016. №3(11). С. 61-68.

58. Максаров, В. В. Управление работоспособностью режущего инструмента, оснащенного сменными пластинами из режущей керамики / А. Д. Халимоненко, Ю. Ольт, Т. Лаатсит // Металлообработка – СПб.: Издательство «Политехника», 2008, №6 (48), С. 50-59.

59. Максаров, В. В. Теория и методы моделирования и управления процессом стружкообразования при лезвийной механической обработке: дисс. докт. техн. наук: 05.03.01 / Вячеслав Викторович Максаров. – Санкт-Петербург, 1999. – 340 с.

60. Максимченко, Н. Н. Методы улучшения равномерности перемещения станочных узлов по направляющим скольжения / Н. Н. Максимченко //

Прогрессивные технологии и системы машиностроения – Донецк: Донецкий национальный технический университет. - 2016. - № 3(54). - С. 70-78.

61. Мальцев, О. С. Исследование режущих свойств керамики при фрезеровании чугуна / Мальцев О. С., Мамкин Г. И., Максимов А. В. – В сб.: Производство и применение сплавов. - М.: Машиностроение, 1982. – 230с.

62. Маргулес, А. У. Резание металлов керметами / А. У. Маргулес. – М.: Машиностроение, 1980. – 160с.

63. Маргулес А.У. Прочностные свойства керметов по структурным параметрам / Маргулес А.У., Максаров В.В. // Информационный листок №276-78. – Кемерово: ЦНТИ, 1978. – С. 74-86.

64. Маслов, А. Р. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента / А. Р. Маслов – М.: Издательство «ИТО», 2006. – 166 с.

65. Мельничук, П. П. Обработка плоских поверхностей чистовыми торцовыми фрезами / П. П. Мельничук, Г. Н. Выговский, А. А. Громовой // МЕТАЛЛООБРАБОТКА. – 2002. – №9. - С. 9-13.

66. Молодцов, В. В. Конструкция и расчёт направляющих скольжения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2006. - №4(109). – С. 18-23.

67. Мурашкин, Л. С. Прикладная нелинейная механика станков / Л. С. Мурашкин, С. Л. Мурашкин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 192 с.

68. Мурашкин, С. Л. Технология машиностроения: В 2 кн. Кн. 1 Основы технологии машиностроения: Учебное пособие для вузов. / С. Л. Мурашкин, Э. Л. Жуков и др. – М.: Высш. шк., 2003. – 278 с., ил.

69. Мусохранов, М. В., Калмыков В.В., Авраменко М.Ю. Технологические предпосылки повышения эксплуатационных характеристик направляющих элементов / М. В. Мусохранов, В. В. Калмыков, М. Ю. Авраменко // Фундаментальные исследования. – 2016. №8 (часть 1) – С. 55-58.

70. Мусохранов, М. В. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя направляющих элементов машиностроения: дисс. канд. техн. наук: 05.02.08 / Марсель Викторович Мусохранов. – Москва, 2006. – 138с.

71. Новик, Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М.: Машиностроение, - 1980. – 298 с.
72. Орликов, М. Л. Динамика станков / М. Л. Орликов – К.: Выща шк. Головное изд-во, - 1989. – 273 с.
73. Осминко, Д. А. Совершенствование технологии изготовления внутренних цилиндрических поверхностей сварных деталей из разнородных сталей: дисс. канд. техн. наук: 05.02.08 / Дмитрий Александрович Осминко. – Санкт –Петербург, 2020. – 182 с.
74. Панов, В. С. Технология и свойства спечённых сплавов и изделий из них. Учебное пособие для вузов / В. С. Панов, А. М. Чувиллин. - М.: «МИСИС», - 2001. – 428 с.
75. Пановко, Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я. Г. Пановко. – Л.: Машиностроение, - 1976. – 321 с.
76. Патент №2729169 «Российская Федерация». Устройство для измерения удельного сопротивления полупроводниковых режущих керамических пластин. - №2729169, заявл. 03.02.2020 г., опуб. 04.04.2020 г. / В.В. Максаров, А.Д. Халимоненко, **И.В. Горшков**,: заявитель СПГУ. – 9с.
77. Петрилин, А. Повышение производительности фрезерных операций / А. Петрилин / Металлообработка и станкостроение. – 2015. – №10. – С. 22-25.
78. Подураев, В. Н. Резания труднообрабатываемых материалов. Учебное пособие для вузов. / В. Н. Подураев - М.: Высш. шк., - 1974. – 587 с.
79. Попов, М. А. Формирование инновационной образовательной среды для подготовки молодых специалистов минерально-сырьевого комплекса. / М. А. Попов, И. В. Горшков // Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса, 2021», сборник трудов. – Санкт-Петербургский горный университет, СПб.: 2021. – С. 291-293.

80. Потапов, А. И. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий: Научное, методическое, справочное пособие. / А. И. Потапов, В. А. Сясько– СПб: Гуманистика, 2009. – 1100 с.
81. Проников, А. С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник в трёх томах. Том 1 / А. С. Проников – М.: Машиностроение, 1994. – 443 с.
82. Решетов, Д. Н. Детали и механизмы металлорежущих станков: Том 1 / Д. Н. Решетов – М.: Машиностроение, 1972. – 658 с.
83. Решетов, Д. Н. Точность металлорежущих станков. / Д. Н. Решетов, В. Н. Портман – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
84. Рубинштейн, С. А. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент. / С. А. Рубинштейн, Г. В. Левант, Н. М. Орнис, Ю. С. Тарасевич. – М.: Машиностроение, 1968. – 393 с.
85. Салахов, А. М. Современные керамические материалы. Учебное пособие / А. М. Салахов – Казань: КФУ, 2016. – 407 с.
86. Самойлов, В. С. Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент / В. С. Самойлов, Э. Ф. Эйхманс, В. А. Фальковский, А. Д. Локтев, Ю. П. Шкурин и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
87. Санкин, Ю. Н. Устойчивость токарных станков при нелинейной характеристике процесса резания / Ю. Н. Санкин, Н. Ю. Санкин; под общ. ред. Ю. Н. Санкина. - Ульяновск: УлГТУ, 2008. - 137 с.
88. Селезнёв, А. Е. Повышение эффективности работы торцовых фрез, оснащённых режущей керамикой, путём диагностирования состояния инструмента при изготовлении деталей из низколегированного чугуна: дисс. ... канд. техн. наук: 05.06.17 / Антон Евгеньевич Селезнёв. – Москва, 2017. – 140с.
89. Сибикин, М. Ю. Металлорежущее оборудование машиностроительных предприятий: учебное пособие / М. Ю. Сибикин. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, - 2015. – 564 с.

90. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение. – 2000. – 320 с.
91. Схиртладзе, А. Г. Технологическое оборудование машиностроительных производств: Учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов/А.Г. Схиртладзе, В. Ю. Новиков; Под ред. Ю.М. Соломенцева.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Высш. шк., 2001 — 407 с.
92. Трухин, В. В. Пути повышения эффективности обработки резанием износостойких чугунов / В.В. Трухин / Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2009. – №5. – С.55-57.
93. Филипенко, И. А. Современные технологии обеспечения качества в машиностроении / И. А. Филипенко, **И. В. Горшков** // Сборник научных статей по итогам работы международного научного форума «Наука и инновации – современные концепции», Москва. – 2019. – С. 121-125.
94. Халимоненко, А. Д. Исследование структуры режущей керамики как фактора влияния на качество обработки при торцовом фрезеровании. / А. Д. Халимоненко, **И. В. Горшков** // Международный семинар Нанозифика и Наноматериалы 2019. Сборник трудов международного семинара – Санкт-Петербургский горный университет, - СПб.: 2019.
95. Халимоненко, А. Д. Микроструктура режущей керамики, как фактор эффективности процесса механической обработки. / А. Д. Халимоненко, Е. Г. Злотников, **И. В. Горшков**, М. А. Попов // Международный семинар Нанозифика и Наноматериалы 2020. Сборник трудов международного семинара. – Санкт-Петербургский горный университет, СПб.: 2020. – С. 398-401.
96. Халимоненко, А. Д. Обработка изделий цилиндрической формы методом магнитно-абразивной обработки с предварительным травлением нанослоя поверхности заготовки. / А. Д. Халимоненко, М. А. Попов, **И. В. Горшков** // Международный симпозиум Нанозифика и Наноматериалы 2021. Сборник трудов международного семинара. – Санкт-Петербургский горный университет, СПб.: 2021. – С.318-326.

97. Халимоненко А.Д. Технологическое обеспечение точности и качества обработки поверхностного слоя направляющих металлорежущих станков / А. Д. Халимоненко, **И. В. Горшков** // Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019»: сборник тезисов. – Санкт-Петербургский горный университет, СПб.: 2019.

98. Халимоненко, А. Д. Управление качеством процесса точения инструментом из режущей керамики: дисс. канд. техн. наук: 03.11.09 / Алексей Дмитриевич Халимоненко. – Санкт-Петербург, 2009. – 140 с.

99. Халимоненко, А. Д. Влияние структуры материала инструмента на качество обработки при фрезеровании режущей керамикой. / А. Д. Халимоненко, **И. В. Горшков** // Международный семинар Нанопизика и Наноматериалы 2018. Сборник трудов международного семинара. – Санкт-Петербургский горный университет, СПб: 2018.

100. Эльясберг, М. Е. Автоколебания металлорежущих станков. Теория и практика / М. Е. Эльясберг – СПб: Особое конструкторское бюро станкостроения, 1993. – 92 с.

101. Denkena, B. Influence of the cutting tool compliance on the workpiece surface shape in face milling of workpiece compounds. / B. Denkena, E. Hasselberga - 15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, -2015 – P. 9-12.

102. Dias, L. Effect of the gray cast iron microstructure on milling tool life and cutting force. / L. R. M. Dias, A. E. Diniz // The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, - 2013. – P. 17-29.

103. Euan, I. G. Modeling Static and Dynamic Cutting Forces and Vibrations for Inserted Ceramic Milling Tools/ I. G. Euan, E. Ozturk, N. D. Sims // 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations, - 2013. – P. 564-569.

104. Ferreira, R. Surface Roughness Investigation in the Hard Turning of Steel Using Ceramic Tools / R. Ferreira, D. Carou, C. H. Lauro, J. P. Davim // Materials and Manufacturing Processes, 2014, № 31 – P. 648 – 652.

105. **Gorshkov, I. V.** Influence of structural parameters of cutting ceramics on quality of processing of machine slideways of metal-cutting equipment in selective formation of instrumentation. / I.V Gorshkov, M.A. Popov // *Key Engineering Materials*. – 2020. – T. 854 KEM. – P. 64-73.
106. Harrison, G. Developments in the production and use of martensitic alloy cast iron / G. Harrison, R. Dixon // *British Foundryman*. – 1962. – V. 55. – №5. – P. 40-46.
107. Kauppinen, V. High-speed milling – a new manufacturing technology / V. Kauppinen / 4th International Conference of DAAAM Estonia, Industrial engineering – innovation as competitive edge for SME. – 2004. – P. 131-134.
108. Khalimonenko, A. D. Influence of the microstructure of cutting ceramics on the efficiency of the machining process. / A. D. Khalimonenko, E. G. Zlotnikov, **I. V. Gorshkov**, M. A. Popov // *Materials Science Forum*. – 2021. – T. 1040 MSF. – P. 21-27.
109. Kuzin, V. V. Wear and failure of ceramic cutting plates / V. V. Kuzin, V. N. Anikin, S. Yu. Fedorov, M. Yu. Fedorov // *Russian Engineering Research*. – 2010. - № 1. – P. 1116 – 1123.
110. Stephenson, D. *Metal Cutting Theory and Practice*/ D.Stephenson, J. Agapiou - Boca Raton: CRC Press. – 2016. – 956 c.
111. Torrecillas, S. M. R. Specifics of Wear of Ceramic Cutting Tool Inserts Featuring Al₂O₃-TiC Dies when Face Milling Hardened Cast Iron. / S. M. R. Torrecillas, A.E. Seleznev, V.D. Gurin, P.Y. Peretyagin // *Materials Science Forum*, 2016 – 43-49 c.
112. Vasilkov, D. V. Dynamic System stability when machining with cutter / D. V. Vasilkov, A. V. Nikitina, V. S. Cherdakova // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. - № 194. – P. 1-7.
113. Yogesh, P. Use of electrical resistance as a non-destructive evaluation tool in health monitoring and damage of ceramic matrix composites / Yogesh P. Singh, Michael J. Presby, K. Manigandan, and Gregory N. Morscher - *Proceedings of the 41st International Conference on Advanced Ceramics and Composites*, - 2017 – 89-97 c.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Технические характеристики приборов

Таблица А.1 - Технические характеристики прибора «Surftest» (Япония).

Модель	<i>SJ- 210 P</i>
№	178-930 – 2 D
Назначение	Измерение шероховатости поверхностей
Диапазон измерений	
По оси Z	350 мкм
По оси X	12,5 мм
Блок привода	
Скорость измерения	0,25 мм/сек; 0,5 мм/сек
Скорость возврата	0,8 мм/сек
Длина кабеля	1 м
Масса	190 г
Датчик	
Тип	Стандартный (178 – 395)
Метод измерений	Индуктивный метод
Диапазон измерений	350 мкм
Щуп	Алмазный наконечник
Радиус	2 мкм
Радиус опоры	40 мм
Измерительное усилие	0,75 мН
Масса	18 г
Дисплейный блок	
Профили	Исходный профиль (<i>P</i>), Профиль шероховатости (<i>R</i>), <i>DIN 4776</i>
Параметры	<i>Ra, Ry, Rz, Rt, Rp, Sm, S, Pc, R3z, mr, A1, A2, Rq, Rk, Rpk, Rvk, Mr 1, Mr 2, Vo</i>
Стандарты шероховатости	<i>DIN, ISO, ANSI, JIS</i>
Длина оценки (<i>L</i>)	0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм
Отсечка шага	<i>lc</i> : 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 м <i>ls</i> : 2,5 мкм, 8 мкм
Число базовых длин	<i>x 1, x 3, x 5, x L</i>
Фильтр	<i>2CR – 75%, 2CR – 75%</i> (фазокорректированный фильтр), Гауссов фильтр
Вертикальное увеличение изображения на дисплее	-
Горизонтальное увеличение изображения на дисплее	-

Продолжение таблицы А.1

Диапазон отображаемых величин	Ra, Rq : 0,01 мкм – 100 мкм; $Ry, Rz, Rt, R3z, Rvk, Rpk, Rk, Rp$: 0,02 мкм – 350 мкм; Vo : 0,00 – 10,00 (мм ³ /см ²); S, Sm : 2 мк – 4000мкм; Pc : 2,5/см – 50/см; $Mr 1, Mr 2$: 0 – 100 %; mr : 1 – 100 %
Принтер	Дополнительное оборудование
Статистика	-
Оценка допусков	Значения верхнего / нижнего пределов
Сохранение настроек измерения	-
Спящий режим (выключение)	Автоматически после 30 секунд бездействия
Калибровка	Автоматическая калибровка Ввод значений и измерение эталона шероховатости
Источник питания	Сетевой адаптер АС (DC 7,5 В 1,5 Вт) или встроенный заряжаемый аккумулятор
Аккумулятор	Время зарядки: 12 часов (на 500 измерений)
Ввод / вывод данных	RS – 232 C интерфейс для ввода / вывода, DIGIMATIC выход
Масса	290 г.

Таблица А.2 - Технические характеристики прибора «VIBXpert EX» (Германия).

Входные каналы	2 аналоговых входа: напряжение (AC/DC, ± 30 В макс.); ток (AC/DC, ± 30 мА макс.); ICP сигнал (2 мА, 24 В макс.); LineDrive акселерометр (10 В, 10 мА макс.)
1 аналоговый вход для измерения температуры	Термопара (NiCrNi)
1 + 1 Импульс/Тахо (скорость вращ., триггер, фаза)	Импульс & AC сигнал: 0В ... +26В или -26В ... 0В
Аналоговые каналы	Диапазон частот: 0,5 Гц ... 40 кГц; Динам. диапазон: 96дБ / 136дБ(измер./общий); Дискретизация: до 131 кГц
Импульс/Тахометр каналы	Макс. напряжение: ± 26 В Порог переключения для 0В ... +26В сигн.: макс. 2,5В рост, мин. 0,6В падение -26В ... 0В сигн.: мин. -8В ростмакс. -10В падение Мин. длина импульса: 0,1 мс.
Контроль стробоскопа	Частотный диапазон: 0 – 500 Гц; Разрешение: 0,05 Гц
Выходной сигнал	Частотный диапазон: 0,5 Гц – 40 кГц; Выходное сопротивление: 100 Ом
Температура	NiCrNi: $-50 \dots +1000^{\circ}\text{C}$ / $\pm 1\%$ или $\pm 1^{\circ}\text{C}$
Виброперемещение	6000 мкм (П – П) ** / $\pm 1\%$ (± 5 ****) / 2 Гц и 10 Гц 1000 мкм (П – П) ** * / $\pm 5\%$ / 0,5 Гц и 1 Гц
Виброскорость	6000 мм/с (П – П) * * / $\pm 1\%$ / 2 Гц и 10 Гц 1000 мм/с (П – П) ** / $\pm 5\%$ / 0,5 Гц и 1 Гц
Виброускорение	6000 м/с ² (П – П) / $\pm 1\%$ / 2 Гц и 10 Гц 1000 м/с ² (П – П) / $\pm 1\%$ / 0,5 Гц и 1 Гц
Ударный импульс (состояние подшипника)	$-10 \dots 80 \text{ dBsv}$ / $\pm 3 \text{ dBsv}$
Стандарты фильтров	Частотная характеристика в соответствии ИСО 2954
Питание	Литий-ионный аккумулятор (7,2В / 4,8Ач). Время зарядки < 5 часов
Размеры	250 x 220 x 37 мм (ДxШxВ)
Вес	2,3 кг

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2729169

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
РЕЖУЩИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАСТИН**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Санкт-
Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Максаров Вячеслав Викторович (RU), Халимоненко
Алексей Дмитриевич (RU), Гориков Илья Валерьевич (RU)*

Заявка № 2020105016


Приоритет изобретения 03 февраля 2020 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 04 августа 2020 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 03 февраля 2040 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ильев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 729 169**⁽¹³⁾ **С1**

(51) МПК
G01N 27/02 (2006.01)
G01R 27/02 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01N 27/02 (2020.02); G01R 27/02 (2020.02)

(21)(22) Заявка: 2020105016, 03.02.2020
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
03.02.2020
Дата регистрации:
04.08.2020
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 03.02.2020
(45) Опубликовано: 04.08.2020 Бюл. № 22

Адрес для переписки:
199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет", Патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):
Максаров Вячеслав Викторович (RU),
Халимоненко Алексей Дмитриевич (RU),
Горшков Илья Валерьевич (RU)
(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет" (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: SU 1822972 A1, 23.06.1993. SU
1583814 A1, 07.08.1990. RU 2420749 C1,
10.06.2011. RU 2421742 C1, 20.06.2011. RU
2611980 C1, 01.03.2017. DE 2611316 A1,
22.09.1977. JP 1092666 A, 11.04.1989.

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РЕЖУЩИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

(57) Реферат:
Изобретение относится к области контрольно-измерительной техники для определения удельного электрического сопротивления полупроводниковых сменных многогранных режущих пластин из оксидно-карбидной керамики для неразрушающего определения и контроля микроструктурных параметров материала, которые непосредственно влияют на работоспособность режущей керамики. Устройство для измерения удельного сопротивления режущих керамических пластин, содержащее источник тока и средство регистрации Омметр, соединенный с зондирующими электродами. При этом согласно изобретению в корпусе устройства выполнены

два канала, сообщающиеся с камерами и заполненные токопроводящим жидким материалом, в которые с внешней стороны установлены резьбовые элементы, при этом металлические шарики находятся внутри каналов, в корпусе устройства выполнен паз, в который установлен разъемный пенал, выполненный в виде двух частей, корпуса и крышки, со сквозными квадратными отверстиями, к которым подведены электроды, при этом на внешних сторонах крышки и корпуса пенала установлены уплотнительные кольца, исследуемый образец керамической пластины установлен в пенале. 4 ил.

RU 2 729 169 С1

RU 2 729 169 С1

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт о промышленном опробовании селективного метода комплектования многолезвийного инструмента

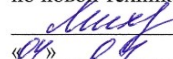


Производственное Объединение

ЭЛЕКТРОМАШИНА

Утверждаю:

Заместитель генерального директора
по новой технике и технологии

 Е.Г. Михайлова
«24» 04 2022 г.



АКТ
о промышленном опробовании
результатов кандидатской диссертационной работы
Горшкова Ильи Валерьевича

Комиссия в составе:

Председатель: главный инженер – Моиссенко Н.И.

Члены комиссии: ведущий инженер-технолог – Баширов М.Н.

мастер ремонтно-механического цеха – Крупкин Д.Д.

составили настоящий акт о том, что проведены в промышленных условиях производственные испытания метода селективного оснащения многолезвийного инструмента оксидно-карбидными керамическими режущими пластинами для осуществления операции торцевого фрезерования высокоточных плоских поверхностей на широкоуниверсальном фрезерном станке 67К25.

Сравнительные испытания традиционного (смешанного) и селективного метода оснащения многолезвийного режущего инструмента при фрезеровании заготовок из чугуна марки СЧ-20 показали:

- износостойкость торцевой фрезы, оснащённой оксидно-карбидными керамическими режущими пластинами марки ВОК-200 согласно селективному методу увеличивается в 1,2 – 1,5 раза в сравнении с традиционной технологией при смешанном оснащении;

- значения шероховатости обрабатываемой поверхности при обработке с использованием многолезвийного инструмента, оснащённого оксидно-карбидными режущими пластинами марки ВОК-200 с применением селективного метода, показывают улучшение параметров в 1,1 – 1,8 раза в сравнении с традиционной технологией при смешанном оснащении;

Полученные параметры свидетельствуют, что использование предложенного метода селективного оснащения многолезвийного режущего инструмента оксидно-карбидными режущими пластинами, позволяет обеспечить лучшие показатели шероховатости, чем при традиционной технологии, увеличивая также стойкость сборных торцевых фрез.

Результаты проведённой работы позволят улучшить качество обработки плоских высокоточных поверхностей чугунных деталей и повысить эффективность процесса торцевого фрезерования.

Председатель: главный инженер

 Моиссенко Н.И.

Члены комиссии: ведущий инженер-технолог

 Баширов М.Н.

мастер ремонтно-механического цеха

 Крупкин Д.Д.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт о внедрении результатов исследования в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет»

к.т.н., доц. Д.Г. Петраков

« 30 » 03 2022 г.



о внедрении результатов диссертационного исследования

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационного исследования Горшкова Ильи Валерьевича «Повышение качества изготовления высокоточных плоских поверхностей на основе селективного комплектования многолезвийного инструмента режущей керамикой», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.02.08 – Технология машиностроения в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Разработанный автором способ селективного комплектования многолезвийного инструмента оксидно-карбидными керамическими режущими пластинами, позволяющий повысить стойкость такого инструмента в 1,2 - 1,5 раза и улучшить шероховатость обработанной поверхности в 1,1 – 1,8 раза, предлагается для изучения на практических занятиях при обучении студентов направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение», направленности (профиля) «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств».

В ходе практических занятий студенты знакомятся с оборудованием и инструментами, используемыми при торцевом фрезеровании, в том числе с фрезами, комплектуемыми керамическими режущими пластинами, производят разделение режущих пластин на группы, исходя из значений удельного электрического сопротивления, определённого с помощью специального устройства, комплектуют инструмент керамическими режущими пластинами, обучаются работе на станке Emco Concept Mill 250 при операции торцевого фрезерования с использованием подготовленного инструмента.

Декан
механико-машиностроительного
факультета, д.т.н., проф.

V.V. Максаров

Заведующий кафедрой
машиностроения, д.т.н., проф.

V.V. Максаров