

На правах рукописи

Горшков Илья Валерьевич



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

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2022

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Максаров Вячеслав Викторович

Официальные оппоненты:

Свинин Валерий Михайлович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра «Технологии и оборудования машиностроительных производств», профессор;

Журавлев Михаил Петрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», кафедра «Технология машиностроения, станки и инструменты», доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 15 сентября 2022 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 15 июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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., Поздняка Г.Г., Сулова А.Г. и др.

Применение режущей керамики для торцевого фрезерования изделий для получистой и чистовой обработки закаленных сталей и чугунов 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 окисдно-карбидных керамических режущих пластин, позво-

ляющий 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. Проведение исследований базировалось на современных положениях теории резания материалов, научных основах технологии машиностроения, статистических методах исследований и методиках математического моделирования.

На защиту выносятся следующие положения:

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 комплектований 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 обеспечена необходимым объемом 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» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

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.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, идея работы, научная ценность и задачи исследования.

В первой главе представлен анализ современного состояния вопроса технологического обеспечения качества поверхностного слоя и точности плоских контактных поверхностей на примере направляющих металлорежущих станков.

Во второй главе описаны особенности изготовления и эксплуатации керамических режущих пластин, определены существующие недостатки данного инструментального материала, и предложен селективный метод оснащения многолезвийного инструмента, позволяющий повысить эффективность использования оксидно-карбидных режущих пластин.

В третьей главе приведена, разработанная в ходе исследования, математическая модель технологической системы механической обработки, учитывающая различия свойств отдельных режущих пластин при многолезвийной обработке, которая позволяет прогнозировать динамическую устойчивость системы при различных технологических параметрах.

В четвёртой главе описаны экспериментальные исследования по апробации селективного метода оснащения многолезвийного режущего инструмента керамическими режущими пластинами.

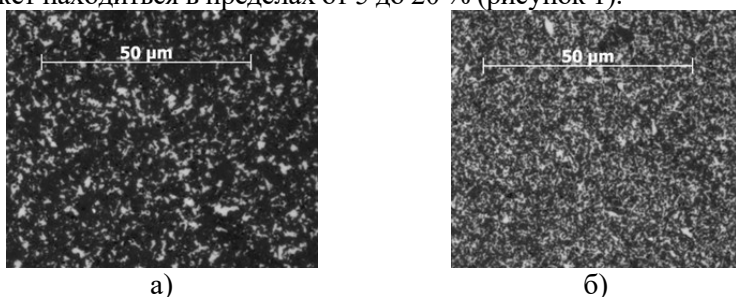
В заключение отражены выводы и рекомендации по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

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 комплектов многолезвийного инструмента для реализации различных технологических задач по повышению качества и эффективности обработки плоских контактных поверхностей.

В ходе исследования был изучен весь жизненный цикл керамических режущих пластин, описана технология изготовления режущей керамики, разновидности марок и форм пластин, определены границы применения в механической обработке, выявлены недостатки данного инструментального материала, главным из которых является различная стойкость отдельных пластин одной марки, что обусловлено микроструктурными параметрами, различия которых являются результатом технологической наследственности.

Обнаруженные различия микроструктуры возникают в связи с недостаточным качеством помола и перемешивания компонентов композиции режущей керамики. Таким образом, размер зёрен карбидов пластин одной марки может отличаться от 1 до 3 мкм, а пористость может находиться в пределах от 5 до 20 % (рисунок 1).



а)

б)

Рисунок 1 – Микроструктура режущих пластин одной марки:

a – пластина с удельным электрическим сопротивлением $R=12 \cdot 10^4$ Ом·м;

б - пластина с удельным электрическим сопротивлением $R=98 \cdot 10^4$ Ом·м

Точно прогнозировать работу такого инструмента невозможно, что приводит к отказу многих предприятий от режущей керамики, как от ненадёжного инструментального материала, несмотря на высокие показатели производительности и низкую стоимость. В ранее проведённых исследованиях была выявлена зависимость микроструктурных параметров от электрического сопротивления оксидно-карбидных режущих пластин. Данная зависимость (рисунок 2) позволяет неразрушающим способом определять микроструктуру оксидно-карбидной режущей пластины и таким образом прогнозировать её работоспособность. В ходе исследования были определены два наиболее достоверных и удобных способа определения удельного электрического сопро-

тивления. Первым и основным способом является контактный метод, для которого было разработано устройство (Патент №2729169), и метод на основе вихретокового неразрушающего контроля на основе прибора Константа К6.

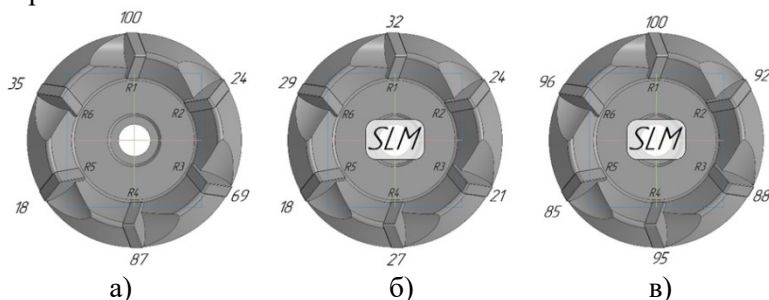


Рисунок 2 – Компоновки торцовых фрез оксидно-карбидными режущими пластинами с различным удельным электрическим сопротивлением ($\cdot 10^{-4}$ Ом·м): а – смешанная, б – однородная (SLM) низкоомная, в – однородная (SLM) высокоомная компоновки

В работе предложен метод селективного оснащения фрез оксидно-карбидными режущими пластинами (SLM – selective layout method) (рисунок 2), включающий в себя выбор расположения режущих пластин в торцевой фрезе на основе физико-механических свойств режущей керамики с различным удельным электрическим сопротивлением, что позволило установить три основополагающие схемы комплектования для реализации различных технологических задач: смешанная ($18 \dots 100 \cdot 10^{-4}$ Ом·м), однородная (SLM) низкоомная ($18 \dots 60 \cdot 10^{-4}$ Ом·м) и однородная (SLM) высокоомная ($61 \dots 100 \cdot 10^{-4}$ Ом·м).

Данный метод позволяет продлить срок службы фрезы в сборе до двух раз за счёт равномерного распределения нагрузки на зубья фрезы, и прогнозировать период стойкости многолезвийного инструмента, вследствие ликвидации главной проблемы режущей керамики – нестабильности стойкости пластин.

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 прогноиро-

вать 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.

При помощи динамометра ДОСМ-3 и виброанализатора модели Prüftechnik MT GmbH VibXpert были определены динамические параметры технологической систем станка для торцевого фрезерования, что позволило при анализе данных априорной модели свести к упрощенной двухконтурной динамической модели малой размерности (рисунок 3) с диссипативными характеристиками, учитывающими конструктивное демпфирование и реологические процессы рассматриваемой глобальной модели, которой соответствует подсистема «стол-заготовка» с координатами x и z .

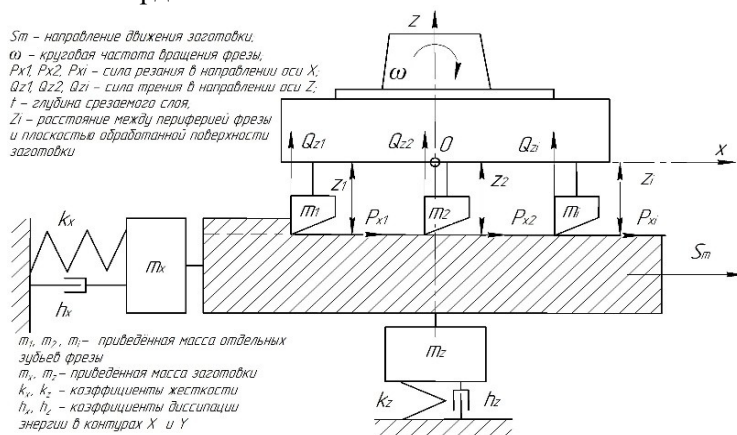


Рисунок 3 – Динамическая модель движения технологической системы торцевого фрезерования с учётом работоспособности режущей керамики

В соответствии с принятой динамической моделью технологической системы на операции фрезерования, движение по координатам x и z примет следующий вид (1):

$$\begin{cases} m_x \ddot{x} + h_x \dot{x} + k_x = P \\ m_z \ddot{z} + h_z \dot{z} + k_z = Q \end{cases}, \quad (1)$$

где m_x, m_z - приведенные инерционные параметры; k_x, k_z - коэффициенты, учитывающие рассеяние энергии и h_x, h_z - коэффициенты жесткости в контурах X и Z системы.

Составленная система уравнений позволяет отслеживать движение замкнутой технологической системы торцевого фрезерования чугунных изделий. Изменение состояния замкнутой технологической системы осуществляется через процесс износа режущих керамических пластин по задней поверхности. Схема процесса фрезерования с изношенными пластинами представлена на рисунке 4.

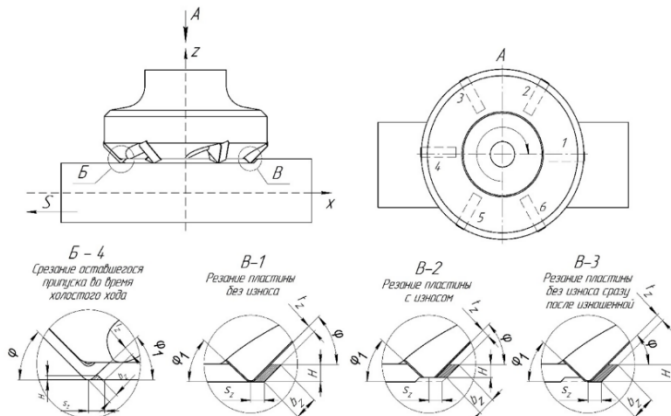


Рисунок 4 – Схема процесса фрезерования чугунной поверхности при неравномерно износе режущих керамических пластин

При этом возникающие силы резания и силы трения, при торцевом фрезеровании заготовки с неизношенной керамической пластиной будут иметь вид (2 – 3):

$$P_x = k_c \cdot t_z \cdot b_z, \quad (2)$$

$$Q_z = P_x \cdot f_{тр}, \quad (3)$$

где k_c – удельная сила резания, Н/мм²; t_z – толщина срезаемого слоя, мм, b_z – ширина срезаемого слоя, мм.

Удельная сила резания при фрезеровании описывается как (4):

$$k_c = k_{c0} \cdot t_z^{-a} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right), \quad (4)$$

где k_{c0} – удельная сила резания при переднем угле $\gamma = 0$, Н/мм²; a – показатель степени.

Через определённый промежуток времени фрезерования изделия, режущие пластины изнашиваются по задней поверхности, что приводит к изменению глубины с H на ΔH , а, следовательно, и к приращению ширины Δb_z (5):

$$\Delta b_z = \frac{H - f(\Delta H)}{\sin\varphi}. \quad (5)$$

В свою очередь сила резания P'_x и сила трения Q'_z возникают при фрезеровании остаточного припуска, образованного в результате обработки предшествующей изношенной керамической пластиной (6 - 7):

$$P'_x = k_c \cdot t_z \cdot \Delta b_z, \quad (6)$$

$$Q'_z = P'_x \cdot f_{\text{тр}}. \quad (7)$$

Следовательно, обобщённую сумму сил резания и сил трения можно представить в следующем математическом виде (8 – 9):

$$P = P_x + P'_x, \quad (8)$$

$$Q = Q_z + Q'_z. \quad (9)$$

Имитационное компьютерное моделирование эквивалентной замкнутой технологической систем на основе разработанной динамической модели, с использованием программной среды *NI LabVIEW 2013 SPI*, установило границу области устойчивости (рисунок 5).

Данный график показывает область режимных параметров, при которых система находится в устойчивом состоянии. Область устойчивости на графике для каждой кривой находится слева. Разработанная математическая модель технологической системы механической обработки, учитывающая применение селективного метода оснащения многолезвийного инструмента режущей керамикой, позволяет исследовать динамическую устойчивость системы при различных технологических параметрах и прогнозировать динамическую стабильность при использовании однородных компоновок.

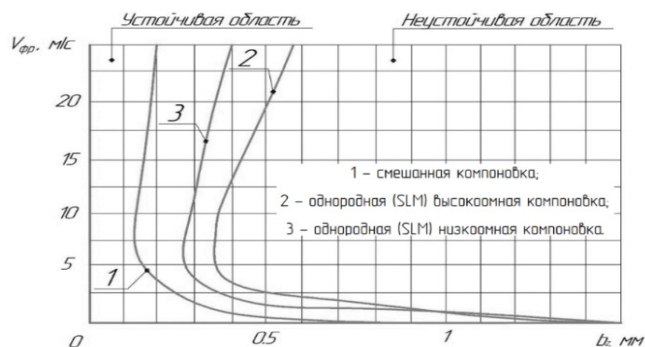


Рисунок 5 – Оценка границы области устойчивости для высокоскоростной чистовой обработки плоских изделий торцевыми фрезами при различных компоновках оксидно-карбидными режущими пластинами

Многолезвийный инструмент с однородно-высокоомными пластинами позволяет повысить динамическую стабильность изготовления высокоточных поверхностей в 2,6 раза, а с однородно-низкоомными пластинами в 2 раза по сравнению со смешанной схемой расположения режущих пластин в корпусе фрезы.

Достоверность защищаемых положений подтверждена экспериментальными исследованиями. Эксперимент по оценке изменения шероховатости при различных компоновках осуществлялся на высокоскоростном фрезерном станке *HAAS VF 2*. Режимы резания для данных экспериментов были определены следующие параметры: скорость резания ($V_{фр} = 990$ м/мин), подача ($S_{об.} = 0,09$ мм/об.), 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 профилометром *Mitutoyo SJ-210*.

Также производилась оценка влияния износа режущих керамических пластин от времени фрезерования при различных компоновках режущих пластин во фрезе. На характерных этапах изнашивания режущих кромок: приработка, нормальный износ, катастрофический износ; измерялась амплитуда вибраций с помощью прибора модели «*Prüftechnik MT GmbH VibXpert*».

Полученные данные показывают, что при различных компоновках скорость изнашивания на этапе приработки примерно равна, однако период нормального изнашивания при однородных компоновках больше в 1,2...1,8 раз в сравнении с хаотичной. Виброграммы процесса фрезерования с использованием однородных компоновок многолезвийного режущего инструмента при фрезеровании на различных стадиях износа говорят об общем снижении амплитуды виброускорений (40 м/сек^2 при высокоомной компоновке, 50 м/сек^2 при низкоомной компоновке) относительно смешанной компоновки (60 м/сек^2). Результаты экспериментальных исследований технологии селективного оснащения фрез оксидно-карбидными режущими пластинами подтверждают, что комплектование многолезвийного инструмента максимально однородными режущими пластинами по микроструктурным параметрам позволяет повысить качество обработки деталей с высокоточными плоскими поверхностями в 1,1...1,8 раз, повысить срок службы инструмента в 1,2...1,5 раза за счёт рационального использования каждой режущей пластины и обеспечить точное прогнозирование стойкости сборного многолезвийного режущего инструмента в зависимости от выбранной компоновки, а также выбирать оптимальные режимы обработки.

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 каче-

стве 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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.

2. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. **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. – Т. 854 KEM. – pp. 64-73.

4. 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. – Т. 1040 MSF. – pp. 21-27.

Публикации в прочих изданиях:

5. 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. - С. 323-328

6. **Горшков, И.В.** Современные технологии обеспечения качества в машиностроении / И.В. Горшков, А.И. Филипенко // *Наука и инновации - современные концепции. Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума*. - Санкт-Петербургский горный университет, СПб.: 2019. - С.121-125.

7. 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. - С. 150-154.

8. Халимоненко, А.Д. Исследование структуры режущей керамики как фактора влияния на качество обработки при торцовом фрезерова-

нии / А.Д. Халимоненко, **И.В. Горшков** // Международный семинар Нанofизика и Наноматериалы 2019. Сборник трудов международного семинара – Санкт-Петербургский горный университет, СПб.: 2019. – С. 303-310.

9. **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.

10. 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 Нанofизика и Наноматериалы 2020. Сборник трудов международного семинара. – Санкт-Петербургский горный университет, СПб.: 2020. – С. 398-401.

11. **Горшков, И.В.** 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.

12. **Горшков, И.В.** Повышение эффективности металлообработки посредством применения селективного метода оснащения режущего инструмента керамическими режущими пластинами // 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.

13. **Горшков, И.В.** 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 Нанofизика и Наноматериалы 2021. Сборник трудов международного семинара. – Санкт-Петербургский горный университет, СПб.: 2021. – С.318-326.

Патент:

14. Патент №2729169 С1 Российская Федерация. МПК G01N 27/02 (2006.01). Устройство для измерения удельного сопротивления полупроводниковых режущих керамических пластин: №2729169, заявл. 03.02.2020 г., опублик. 04.04.2020 г./ Максаров В.В., Халимоненко А.Д., **Горшков И.В.**; заявитель СПбГУ. – 12 с. : ил.