

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

На правах рукописи

Волосова Марина Александровна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ И
ПОВЫШЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность
2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор С.Н. Григорьев

Москва – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ	20
1.1. Современные керамические инструментальные материалы, изготавливаемые из них лезвийные режущие инструменты и области их возможного применения в машиностроении и ОПК	20
1.2. Изучение характера разрушения поверхностного слоя керамического инструмента при воздействии теплосиловых нагрузок в процессе резания	30
1.3. Оценка надежности керамического инструмента при воздействии теплосиловых нагрузок в процессе резания	42
1.4. Анализ состояния поверхностного слоя керамического инструмента, формируемого в процессе алмазного шлифования, и особенности контроля качества инструмента в производственных условиях	50
1.5. Целенаправленное воздействие на состояние поверхностного слоя (модификация) керамического инструмента как направление для повышения его эффективности при эксплуатации	66
1.6. Выводы	83
1.7. Конкретизация объектов исследований работы	87
Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ДЕФЕКТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИСТИРАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ	90
2.1. Изучение состояния поверхностного слоя шлифованного керамического инструмента и разработка обобщенного критерия для количественной оценки степени его дефектности	90

2.2. Подготовка образцов режущих пластин из керамик $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON с различным индексом дефектности поверхностного слоя для экспериментальных исследований	96
2.3. Исследование влияния индекса дефектности режущих пластин из керамик на основе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON на физико-механические и трибологические характеристики	101
2.4. Исследование влияния состояния поверхностного слоя режущих пластин и режимов резания на интенсивность истирания керамики $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ при фрезеровании закаленной стали и керамики SiAlON при точении жаропрочного никелевого сплава	110
2.5. Разработка математических моделей зависимости интенсивности истирания режущих пластин из керамик $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON от состояния их поверхностного слоя и элементов режима резания при фрезеровании закаленной стали и точении жаропрочного никелевого сплава	119
2.6. Исследование влияния индекса дефектности режущих пластин из керамик $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON на надежность при фрезеровании закаленной стали и точении жаропрочного никелевого сплава	130
2.7. Выводы	134
Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ И ПОВЫШЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ	137
3.1. Выявление взаимосвязи микроструктуры и морфологии формируемых покрытий с индексом дефектности керамических инструментов и задачи, решаемые модификацией их поверхностного слоя	137
3.2. Разработка метода и технологического оборудования для комплексной модификации поверхностного слоя керамических инструментов посредством воздействия пучками ускоренных частиц для	143

удаления дефектного слоя и последующего нанесения функциональных покрытий

3.3. Комплексные трибологические исследования различных функциональных покрытий и выбор перспективных составов для нанесения на керамические инструменты 156

3.4. Лабораторные стойкостные испытания режущих пластин из керамик $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON после комплексной модификации поверхностного слоя при фрезеровании закаленной стали и точении жаропрочного никелевого сплава 166

3.5. Выводы 170

Глава 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕЛЬНЫХ КОНЦЕВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ФРЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ 173

4.1. Потребность в разработке опытно-промышленной технологии изготовления цельных концевых керамических фрез и последовательность операций для ее реализации 173

4.2. Выбор состава и подготовка порошковой композиции, искровое плазменное спекание керамических заготовок для цельных концевых фрез 179

4.3. Выбор рациональных конструкторско-геометрических параметров цельных концевых фрез и формообразование спеченных керамических заготовок алмазной многокоординатной заточкой 195

4.4. Выбор износостойких покрытий для цельных концевых керамических фрез и комплексная модификация их поверхностного слоя 206

4.5. Проведение лабораторных эксплуатационных испытаний цельных концевых керамических фрез, прошедших комплексную модификацию поверхностного слоя 220

4.6. Выводы 231

Глава 5. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ОПК КЕРАМИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ С КОМПЛЕКСНОЙ МОДИФИКАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ	234
5.1. Предприятия машиностроения и ОПК, где выполнялась промышленная апробация, и алгоритм проведения производственных испытаний керамических инструментов с комплексной модификацией поверхностного слоя	234
5.2. Производственные испытания цельных концевых керамических фрез из SiAlON+TiN с комплексной модификацией поверхностного слоя при обработке жаропрочного никелевого сплава	238
5.3. Производственные испытания сборных торцевых насадных фрез, оснащенных СМКП из Al_2O_3+TiC с комплексной модификацией поверхностного слоя, при обработке закаленной инструментальной стали	241
5.4. Производственные испытания сборных токарных резцов, оснащенных СМКП из SiAlON и Al_2O_3+TiC с комплексной модификацией поверхностного слоя, при обработке жаропрочного никелевого сплава и закаленной подшипниковой стали	245
5.5. Выводы	251
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	253
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	257
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Охранные документы, полученные на базовые технические решения, созданные в рамках работы	283
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты производственных испытаний и промышленной апробации керамического инструмента широкой номенклатуры	300

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Достигнутый на сегодняшний день высокий уровень развития инструментальных керамик (ИК) явился результатом многолетних и разноплановых исследований, выполняемых научными коллективами и производственными компаниями в России и за рубежом. Передовые разработки в области получения высококачественных исходных порошков, возможности выбора порошковых композиций наилучших составов, появление новых технологий спекания и оптимизация их ключевых параметров, обеспечивают получение высокоплотных керамических заготовок с улучшенным комплексом свойств и позволяют их использовать для изготовления инструмента широкой номенклатуры, например, появившихся сравнительно недавно на рынке металлообрабатывающего инструмента цельных концевых керамических фрез. Благоприятная совокупность важнейших свойств ИК позволяет эксплуатировать режущий инструмент на экстремально высоких скоростях резания, недостижимых для инструментов из твердого сплава, при обработке закаленных сталей и жаропрочных сплавов, используемых при изготовлении наиболее ответственных машиностроительных изделий – деталей подшипников и автомобильных компонентов, элементов авиационных двигателей и др. За счет этого применение керамического инструмента (КИ) имеет потенциал для многократного увеличения производительности механической обработки и повышения качества изготовленных деталей. Отмеченные базовые преимущества КИ дополняются возможностью обеспечения высоких экологических требований к технологиям механообработки.

Однако при всех перечисленных преимуществах ИК и изготовленных из них режущих инструментов, даже в условиях непрерывно увеличивающегося с каждым годом в промышленно развитых странах количества исследований и разработок в области создания и совершенствования КИ, доля его промышленного применения

в общем мировом объеме рынка лезвийного инструмента находится на низком уровне и не демонстрирует значительного роста.

Если по состоянию на 1991 г. доля КИ на мировом рынке сменных многогранных пластин составляла около 4%, то по прошествии нескольких десятилетий этот показатель увеличился немногим более чем в 2 раза – в 2018 г. на долю ИК, используемых в технологиях лезвийной обработки резанием, приходилось около 9% общего объема мирового рынка. Статистика по Российской Федерации до недавнего времени не вызывала оптимизма – доля сегмента ИК в общем объеме рынка металлообрабатывающего инструмента по состоянию на 2010 г. не превышала 1%. По экспертным оценкам на сегодняшний день доля использования КИ на мировом рынке лезвийного инструмента составляет порядка 10-12%, а в Российской Федерации – не более 2-3%.

Нереализованный технологический потенциал КИ и его более широкое распространение в промышленности ограничивается недостаточной эффективностью эксплуатации такого инструмента, характеризующейся пониженной надежностью (большим рассеиванием наработки до отказа). Особенно ярко указанный недостаток выражен, когда КИ эксплуатируется при сочетании повышенных термических и механических нагрузок. При работе на повышенных скоростях резания и относительно больших сечениях срезаемого слоя нередко наблюдается ускоренное (в ряде случаев – внезапное) разрушение контактных поверхностей КИ. Отмеченные проблемы еще сильнее проявляются при воздействии на контактные площадки КИ циклических нагрузок. Потеря работоспособного состояния инструмента (превышение очага износа предельно допустимого значения) может произойти на различных стадиях его эксплуатации – как в период приработки, так и на стадии установившегося изнашивания. Отмеченное обусловлено целым рядом причин – структурной неоднородностью керамических материалов, заложенной в их природе, присутствующими в объемной структуре и поверхностном слое (ПС) инструмента дефектами технологической природы, которые могут формироваться как в процессе спекания, так и на этапе алмазной заточки. Указанные дефекты являются концентраторами

напряжений, которые при воздействии термических и механических нагрузок в процессе резания приводят к ускоренному микроразрушению рабочих поверхностей КИ, что снижает эффективность его эксплуатации. Поэтому основной областью промышленного использования КИ сегодня являются чистовые операции непрерывной высокоскоростной механической обработки с относительно малыми сечениями срезаемого слоя.

Отмеченное выше демонстрирует, что повышение надежности эксплуатации КИ широкой номенклатуры при воздействии повышенных термомеханических нагрузок, в том числе циклического характера, в настоящее время является актуальной проблемой, требующей разработки новых научно обоснованных технических и технологических решений, внедрение которых позволит внести значительный вклад в развитие отечественного машиностроения. Решение указанной проблемы приобретает чрезвычайную важность в сложившихся беспрецедентных экономических и политических условиях, когда отечественные предприятия машиностроения и ОПК как никогда нуждаются в конкурентоспособном инструментальном обеспечении для решения широкого спектра технологических задач.

Степень разработанности темы. Сдерживающие промышленное распространение КИ проблемы его недостаточной надежности, проявляющейся в виде внезапного (труднопредсказуемого) разрушения режущей части, а также механизмы трещинообразования и хрупкого разрушения различных керамических материалов всесторонне изучены в работах российских и зарубежных исследователей, среди которых – Аникин В.Н., Андриевский Р.А., Боровский Г.В., Верещака А.С., Волков Д.И., Верхотуров А.Д, Вельдхейс С., Видерхорн Ш., Викулин В.В. Гречишников В.А., Григорьев С.Н., Гнесин Г.Г., Гогоци Г.А., Горячева И.Г., Гурин В.Д., Джавахир И., Каныгина О.Н., Кульков С.Н., Метселаар Р., Орданьян С.С., Синопальников В.А., Табаков В.П., Торресильяс Р., Чен М., Эшби М. и ряд других.

Вопросам изучения сложного многофакторного процесса алмазного шлифования керамических материалов, причин возникновения в ПС дефектов

технологической природы, а также выявления роли дефектного слоя в снижении физико-механических характеристик шлифованных изделий из различных керамик посвящены многочисленные работы авторитетных специалистов в России и за рубежом – Бахарева В.П., Валандро Л., Горелова В.А., Гусева В.В., Гусевой Л.Ю., Душко О.В., Кузина В.В., Муна Р., Никиткова Н.В., Рогова В.А., Старкова В.К., Сытника А.А., Ульмана Э., Хуанга Ч. и ряда других. Для решения проблемы минимизации дефектности ПС керамических изделий, сформировалось отдельное научное направление, связанное с совершенствованием стратегий абразивной обработки, характеристик алмазного инструмента и оптимизацией режимов алмазного шлифования для улучшения состояния поверхностного слоя – шероховатости, волнистости, трещиностойкости и др. К сожалению, большинство предлагаемых учеными новых подходов и технических решений в данной области, имеют крайне ограниченное применение в инструментальном производстве. При массовом изготовлении сменных многогранных керамических пластин (СМКП), являющихся изделиями с коротким сроком эксплуатации, в целях обеспечения высокой рентабельности производства их алмазная заточка осуществляется на многокоординатных станках с ЧПУ на режимах повышенной производительности. Поэтому поверхностный слой промышленно выпускаемых СМКП из различных инструментальных керамик всегда изобилует разнообразными дефектами.

Для улучшения характеристик ПС керамических изделий получило развитие направление «инженерия поверхности керамики», в рамках которого используются различные технологии ионно-плазменного, лучевого, механического, комбинированного и других видов воздействия для модификации характеристик ПС, в том числе «залечивания» поверхностных дефектов и повышения износостойкости. Среди них наиболее распространённым и экономически целесообразным подходом является нанесение функциональных покрытий, прекрасно зарекомендовавших себя для повышения работоспособности твердосплавного инструмента. Вопросы применения данного технологического подхода для СМКП отражены в работах Верещаки А.А., Ву Ш., Гангопадхья С., Григорьева С.Н., Добржанского Л., Крапостина А.А., Мабруки Т., Пакулы Д.,

Пателя С., Сотовой Е.С., Фукса-Рабиновича Г.С. и некоторых других российских и зарубежных исследователей. Однако применение покрытий, обеспечивающих определенное повышение износостойкости контактных поверхностей КИ, не способно решить проблему его пониженной надежности при работе с увеличенными сечениями срезаемого слоя, а также при воздействии нагрузок циклического характера. В данной области необходимо изменение фокуса исследований и всесторонняя оценка роли исходного состояния ПС керамики как основы для функционирования покрытий.

На сегодняшний день практически неисследованными остаются вопросы влияния степени дефектности ПС промышленно выпускаемых СМКП на изнашивание их контактных поверхностей при воздействии широкого спектра теплосиловых нагрузок в процессе резания и показатели надежности, а также отсутствуют информативные критерии, характеризующие степень дефектности и методики для их количественной оценки. Отсутствуют эффективные и широкодоступные потребителям режущего инструмента технологические решения для модификации (целенаправленного внесения прогрессивных изменений) ПС промышленно выпускаемых СМКП и минимизации степени их дефектности, которые могли бы обеспечить увеличение надежности инструмента в широком диапазоне режимов резания. Кроме того, вне области исследований российских специалистов остаются вопросы изготовления и улучшения состояния ПС появившихся сравнительно недавно цельных концевых керамических фрез, в промышленных масштабах выпускаемых рядом ведущих зарубежных инструментальных компаний, которые являются возможной альтернативой концевым твердосплавным фрезам, широко использующимся при механической обработке жаропрочных авиационных сплавов.

Объектом исследований работы являются различные виды керамического инструмента – сборные торцевые фрезы и токарные резцы, оснащаемые керамическими пластинами из материалов Al_2O_3+TiC и $SiAlON$, и цельные концевые керамические фрезы из $SiAlON$, предназначенные для обработки высокотвердых сталей и жаропрочных никелевых сплавов, распространенных в

машиностроении в качестве конструкционных материалов для изготовления ответственных изделий.

Предметом исследований работы является состояние поверхностного слоя промышленно выпускаемых керамических инструментов, взаимосвязи его характеристик с интенсивностью истирания и показателями надежности (наработкой на отказ и коэффициентом ее вариации) при воздействии широкого спектра эксплуатационных нагрузок, а также процессы энергетического воздействия направленными потоками частиц для модификации керамического инструмента и создания нового функционального поверхностного слоя с улучшенным комплексом свойств.

Целью настоящей работы является повышение надежности различных видов сборного и цельного режущего инструмента, изготавливаемого из наиболее востребованных инструментальных керамик на базе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON , при фрезеровании и точении изделий из закаленных сталей и жаропрочных никелевых сплавов в широком диапазоне режимов резания на основе комплексных исследований степени дефектности поверхностного слоя инструмента и разработки новых научно обоснованных технических и технологических решений для его модификации.

Для достижения указанной цели в работе необходимо решить **следующие задачи**, перечисленные ниже.

1. Классифицировать дефекты поверхностного слоя, формируемые в процессе алмазного шлифования инструментальных керамик на базе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON , предложить и обосновать информативный критерий, характеризующий степень дефектности поверхностного слоя промышленно выпускаемого керамического инструмента, и исследовать его влияние на комплекс физико-механических характеристик, изнашивание и надежность инструмента в широком диапазоне условий резания при фрезеровании закаленных сталей и точении жаропрочных никелевых сплавов.

2. Разработать математические модели зависимости изнашивания керамического инструмента из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON при фрезеровании закаленной

стали и точении никелевого сплава от факторов, связанных с состоянием поверхностного слоя инструмента и элементами режима механической обработки, обеспечивающие возможность прогнозирования изнашивания контактных поверхностей керамического инструмента при эксплуатации.

3. Разработать и реализовать принципы создания на поверхности керамических инструментов «бездефектного» слоя посредством целенаправленного энергетического воздействия, обеспечивающего удаление дефектного слоя, сформированного при алмазном шлифовании, установить закономерности влияния условий воздействия на характеристики поверхностного слоя распространенных инструментальных керамик на базе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON .

4. Разработать инновационную технологию комплексной модификации керамического инструмента широкой номенклатуры, включающей удаление дефектного поверхностного слоя и последующее осаждение функциональных покрытий перспективных составов; для возможности выполнения комплексной модификации керамического инструмента широкой номенклатуры в едином технологическом цикле создать опытную многофункциональную технологическую установку.

5. Исследовать взаимосвязи микроструктуры и характеристик функциональных покрытий, осаждаемых на керамические инструменты, со степенью дефектностью поверхностного слоя, и на основе комплексных экспериментальных исследований предложить рациональные составы функциональных покрытий для нанесения на керамический инструмент.

6. Выполнить комплекс лабораторных стойкостных испытаний сборных торцевых фрез и токарных резцов, оснащенных керамическими пластинами из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON , прошедшими комплексную модификацию поверхностного слоя в соответствии с разработанными технологическими принципами, при фрезеровании закаленной стали и точении жаропрочного никелевого сплава, и установить влияние предложенного подхода на надежность инструментов.

7. Разработать и практически реализовать опытно-промышленную технологию изготовления цельных концевых керамических фрез из материала

SiAlON, предусматривающую полный цикл производства инструмента – спекание, алмазную заточку и модификацию поверхностного слоя, выявить рациональные состав инструментальной керамической композиции и основные геометрические параметры инструмента, а также провести комплекс лабораторных стойкостных испытаний для сопоставления характеристик новых керамических фрез с зарубежными аналогами.

8. На базе ведущих отечественных предприятий машиностроения и ОПК провести комплекс производственных испытаний и промышленную апробацию керамического инструмента широкой номенклатуры (сборных торцевых фрез и токарных резцов, оснащенных керамическими пластинами, и цельных концевых керамических фрез) для оценки вклада разработанных технических и технологических решений в решение проблемы повышения надежности инструмента при высокопроизводительной механообработке деталей из высокотвердых сталей и жаропрочных труднообрабатываемых сплавов.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем.

1. Классифицированы дефекты поверхностного слоя керамических инструментов из Al_2O_3+TiC и SiAlON, формируемые в процессе алмазного шлифования, и предложен обобщенный информативный критерий «индекс дефектности», количественно характеризующий степень дефектности поверхностного слоя и определяемый как произведение плотности дефектов и максимальной глубины дефектного слоя.

2. Разработаны математические модели зависимости интенсивности истирания керамических инструментов из Al_2O_3+TiC и SiAlON при фрезеровании закаленной стали и точении никелевого сплава от факторов, связанных с состоянием поверхностного слоя инструмента (индексом дефектности и трещиностойкостью) и элементами режима механической обработки (скоростью резания и подачей).

3. Предложен новый метод и технологические решения для комплексной модификации поверхностного слоя керамических пластин и цельных концевых керамических фрез, включающей воздействие пучками ускоренных частиц для

удаления дефектного слоя и последующее осаждение на «бездефектный» слой функциональных покрытий типа (TiZr)N, (TiAl)N/TiB₂ и (CrAlSi)N/DLC, обеспечивающей повышение надежности керамических инструментов при эксплуатации.

Теоретическая значимость работы заключается: в раскрытии взаимосвязей между степенью дефектности поверхностного слоя керамического инструмента, формируемого при алмазном шлифовании, комплексом физико-механических характеристик, интенсивностью истирания и надежностью инструмента в широком диапазоне эксплуатационных нагрузок; в установленном влиянии степени дефектности поверхностного слоя керамических подложек на характеристики осаждаемых на них покрытий; в создании метода для обеспечения высокой надежности керамического инструмента широкой номенклатуры при эксплуатации в условиях повышенных термических и механических нагрузок, в том числе циклического характера, на основе комплексной модификации поверхностного слоя инструмента.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Предложена универсальная методика для количественной оценки степени дефектности поверхностного слоя металлообрабатывающих инструментов и других изделий, изготавливаемых из различных керамик, включающая определение плотности дефектов контрастированием поверхности наклонным освещением и глубины дефектного слоя по параметру Rt посредством профилометрии.

2. Разработана программа для выполнения численных расчетов в среде MATLAB, позволяющая прогнозировать интенсивность истирания керамических пластин из Al₂O₃+TiC и SiAlON при фрезеровании закаленной стали и точении никелевого сплава при различном состоянии поверхностного слоя инструмента и элементах режима резания, изменяющихся в широком диапазоне.

3. Разработаны и созданы на базе комплекса запатентованных технических решений (патенты РФ на изобретения № 2712154, 2020132869, 2726187, 2752877, 2778246 и др.) инновационная технология комплексной модификации и опытная

многофункциональная установка для ее реализации, которая в едином цикле позволяет выполнять предварительное удаление дефектного слоя с керамических пластин и концевых фрез направленным воздействием пучками ускоренных атомов аргона с энергией ~ 5 кэВ и последующее осаждение гаммы покрытий перспективных составов на базе нитридов, диборидов и алмазоподобных пленок – типа (TiZr)N, (TiAl)N/TiB₂ и (CrAlSi)N/DLC. Новая технология является универсальной и может использоваться непосредственно потребителями для усовершенствования широкой номенклатуры керамического инструмента, выпускаемого инструментальной промышленностью.

4. Разработана и практически реализована опытно-промышленная технология изготовления цельных концевых фрез из перспективного керамического материала α - β /SiAlON с добавками наночастиц TiN, предусматривающая полный цикл производства инструмента – искровое плазменное спекание, многокоординатную алмазную заточку и комплексную модификацию поверхностного слоя. Выявленные рациональный состав керамической композиции, основные геометрические параметры цельных концевых керамических фрез и состав функционального покрытия, обеспечивают возможность создания инструмента по эксплуатационным характеристикам, не уступающего дорогостоящим керамическим фрезам зарубежного производства из SiAlON+Yb₂O₃.

Методология и методы исследования. Исследования, выполненные в рамках работы, базируются на использовании фундаментальных положений теории резания материалов, теории хрупкого разрушения керамических материалов, физических принципах генерации посредством плазмы тлеющего разряда пучков быстрых частиц различных газов, а также методов статистического анализа результатов экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования состояния поверхностного слоя керамических инструментов осуществлялось с использованием методов стереоскопической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии и профилометрии высокого разрешения. Для оценки влияния степени дефектности

на комплекс физико-технических характеристик ПС керамических пластин использовались как стандартизированные методики (определение трещиностойкости методом индентирования, оценка устойчивости к абразивному истиранию при контактировании с вращающимся шариком и трибологические высокотемпературные испытания по схеме «шар – диск»), так и оригинальная методика оценки способности режущих кромок противостоять скалыванию при воздействии внешней нагрузки. Для выбора рациональных составов функциональных покрытий для керамического инструмента использовался комплекс методик трибологических испытаний в условиях фреттинг-износа, абразивного воздействия и высокотемпературного трения-скольжения.

Для математического моделирования использовалась интерактивная среда программирования, численных расчетов и визуализации результатов MATLAB, наилучшим образом зарекомендовавшая себя для моделирования сложных технических систем, описываемых дифференциально-алгебраическими системами уравнений.

На защиту выносятся следующие Положения.

1. Взаимосвязи между предложенным обобщенным информативным критерием «индексом дефектности», характеризующим состояние поверхностного слоя керамического инструмента из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON, комплексом физико-механических характеристик и надежностью инструмента, характеризующуюся вариацией наработки на отказ.

2. Функциональные зависимости влияния факторов, связанных с состоянием поверхностного слоя инструмента (индексом дефектности и трещиностойкостью) и элементами режима механической обработки (скоростью резания и подачей), на интенсивность истирания керамических инструментов из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON при фрезеровании закаленной стали и точении никелевого сплава.

3. Метод и технологические решения для усовершенствования керамического инструмента широкой номенклатуры посредством комплексной модификации его поверхностного слоя, включающей воздействие пучками ускоренных частиц для удаления дефектного слоя и последующее осаждение на

«бездефектный» слой функциональных покрытий типа (TiZr)N, (TiAl)N/TiB₂ и (CrAlSi)N/DLC, обеспечивающей повышение надежности инструментов при эксплуатации.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов, полученных в рамках диссертационной работы, подтверждается применением системного подхода к решению поставленных задач, согласованием результатов теоретических исследований и экспериментальных данных, полученных с использованием современного оборудования и аттестованных методик, а также применением статистических методов обработки полученных данных.

Производственные испытания и промышленная апробация керамического инструмента широкой номенклатуры на ведущих отечественных предприятиях машиностроения и ОПК – АО «Производственное объединение «Стрела», АО «Лыткаринский завод оптического стекла», АО «Машиностроительная компания «Витязь», филиал «НИИД» АО «ОДК», АО «Белебеевский завод «Автономаль» и АО «Уфимское агрегатное предприятие «Гидравлика» подтвердили высокую эффективность разработанных и научно обоснованных технических и технологических решений, предложенных для повышения надежности инструмента при высокопроизводительной механообработке деталей из сталей повышенной твердости и труднообрабатываемых материалов.

Результаты исследований внедрены в образовательный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Основные положения диссертационной работы в период с 2005 по 2021 год были доложены автором на 30 международных и всероссийских авторитетных научно-технических конференциях. Диссертационные исследования проводились автором в рамках проектов «Разработка и исследование технологических методов направленного воздействия высокоэнергетических концентрированных потоков на спеченные матрицы из композиции оксидов, нитридов и карбидов тугоплавких

металлов для формирования сверхплотной инструментальной керамики с повышенным комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств при механической обработке материалов» (№ 11.1052.2014/К, период выполнения – 2014-2016 гг., заказчик – Минобрнауки РФ), «Технологические основы создания монолитного осевого керамического инструмента с повышенными эксплуатационными свойствами посредством спарк-плазменного спекания вискеризованного композиционного материала и осаждения нанокompозитных функциональных покрытий» (№ 18-19-00599, период выполнения – 2018-2020 гг., заказчик – Российский научный фонд) и «Разработка концепции и инструментария для комплексного анализа моно- и многослойных пленок на основе сложных нитридов и алмазоподобных структур для создания на их основе адаптивных функциональных покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами» (№ 0707-2020-0025, период выполнения – 2020-2022 гг., заказчик – Минобрнауки РФ).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Объект и предмет исследований диссертационной работы находятся в области изучения закономерностей и взаимосвязей технологических процессов формообразования инструментов из керамики путем удаления части начального объема керамического материала, а также технических средств реализации процессов на этапах создания и эксплуатации керамических инструментов. Изучение связей и закономерностей в указанной области осуществляется для создания новых и совершенствования существующих технологических процессов изготовления керамического инструмента широкой номенклатуры, обеспечивающего при эксплуатации повышение производительности и надежности механообработки деталей для нужд машиностроения и ОПК. По теме и содержанию материалов диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части п.2, п.3 и п.6 раздела «Области исследований» её паспорта.

Публикации автора по теме диссертации. Основные теоретические и прикладные результаты диссертации опубликованы в 161 печатной работе, в том числе 70 статей – в изданиях из перечня ВАК или их переводных версиях, 65 статей

– в изданиях, входящих в наукометрические базы Scopus и Web of Science, из которых 22 статьи – опубликованы в изданиях, входящих в первый квартиль (Q1). Кроме того, по тематике работы получено 20 патентов на изобретения, полезные модели и свидетельств на регистрацию программ для ЭВМ. Отдельные результаты диссертационного исследований опубликованы автором в 6 монографиях и справочных изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и Приложений А и Б. Объем работы: диссертация изложена на 325 страницах и включает 282 страницы основного текста (без учета приложений), 111 рисунков и 31 таблицу; список литературы включает 207 наименований.

Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

1.1. Современные керамические инструментальные материалы, изготавливаемые из них лезвийные режущие инструменты и области их возможного применения в машиностроении и ОПК

Благоприятная совокупность важнейших свойств инструментальной керамики (повышенные твердость, теплостойкость, низкое сродство с большинством обрабатываемых материалов) позволяет эксплуатировать керамический инструмент (КИ) на экстремально высоких скоростях резания, недостижимых для инструментов из твердого сплава, обеспечивая при этом высокое качество поверхности обработанных деталей. За счет этого применение КИ позволяет многократно увеличить производительность механической обработки по отношению к уровню, достигаемому применением твердосплавного инструмента [1,2]. Технологии чистового «твердого» точения закаленных конструкционных сталей (твердостью свыше 50 HRC) с использованием КИ были разработаны более 20 лет назад и нашли применение в ряде отраслей промышленности (в первую очередь в подшипниковой) как прекрасная альтернатива шлифованию, являющемуся чрезвычайно энергоемким процессом, в результате которого поверхностный слой обработанных деталей характеризуется неблагоприятным напряженно-деформированным состоянием, зачастую негативно влияющим на их эксплуатационные показатели [3–5]. Отмеченные базовые преимущества КИ дополняются безусловным выполнением высоких экологических требований, которые обеспечиваются возможностью обработки без использования смазочно-охлаждающих технологических жидкостей.

При всем многообразии компаний, осуществляющих выпуск КИ в промышленных масштабах (в России – Завод технической керамики, ООО «Вириал», Компания Микробор, за рубежом – Sandvik Coromant, Kennametal, Iscar, Kyocera, TaeguTec, Mitsubishi, Seco, Tungaloy и др.), фазовый и химический составы керамических инструментальных материалов (КИМ), используемых для изготовления лезвийного режущего инструмента, очень схожи и сводятся, главным образом, к 4 базовым композициям: на основе Al_2O_3 с добавками $TiC(TiN)$, MgO , ZrO_2 и др.; на основе Al_2O_3 с добавками, как правило, TiC , упрочненные волокнами и частицами SiC , TiB_2 ; на основе Si_3N_4 с добавками Al_2O_3 , Y_2O_3 и др.; на основе α - β $SiAlON$ с добавками $Y(Yb,Er)_2O_3$, BN , TiN и др. Необходимо подчеркнуть, что при рассмотрении КИМ на основе Al_2O_3 , в работе имеются в виду композиции так называемой «смешанной» керамики, содержащие значительное количество (до 40 об. %) добавок тугоплавких соединений и/или упрочняющих частиц, что способствует значительному улучшению комплекса физико-механических свойств материала [6]. Классическая оксидная «белая» керамика, содержащая в качестве основы оксид алюминия (Al_2O_3), легированная в небольших количествах оксидами циркония (ZrO_2), магния (MgO) и др., для использования в целях изготовления режущего инструмента определенно исчерпала свой потенциал, так как значительно хуже перечисленных выше современных КИМ сопротивляется разрушению при одновременном воздействии тепловых и силовых нагрузок.

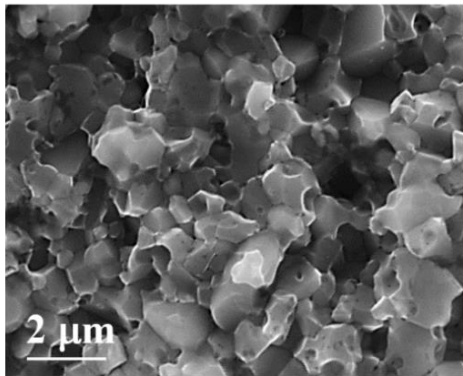
Для нужд металлообработки также известны примеры использования КИМ на основе AlN , SiC , ZrO_2 , но указанные материалы являются скорее экспериментальными, предназначенными для использования в лабораторных и исследовательских целях, а в инструментальной промышленности пока не получили распространения [7,8].

Следует отдельно отметить, что в настоящей работе к КИМ не были отнесены композиции на базе поликристаллического кубического нитрида бора (cBN), которые некоторыми исследователями сегодня классифицируются как инструментальная керамика. Указанные материалы следует рассматривать как

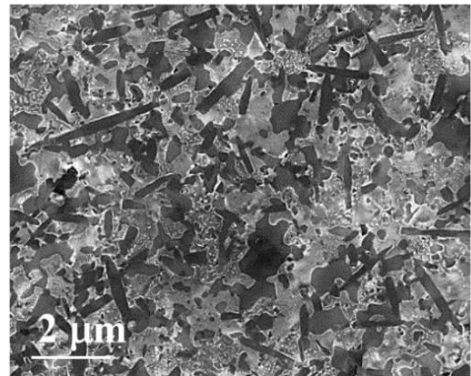
отдельную группу сверхтвердых инструментальных материалов, существенно отличающихся от инструментальных керамик как по структурным и физико-техническим характеристикам, так и по технологическим подходам к их получению [9].

На Рисунке 1.1 приведены характерные SEM-изображения микроструктур КИМ, из которых в настоящее время осуществляется изготовление представленного на рынке лезвийного режущего инструмента, выпускаемого в промышленных масштабах. Изображения получены на электронно-сканирующем микроскопе Tescan Vega 3LMH, который использовался для микроструктурных исследований в рамках выполнения работы.

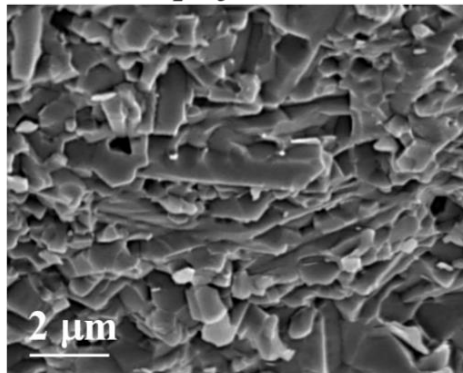
- ① *на основе Al_2O_3
с добавками $TiC(TiN)$,
 MgO , ZrO_2 и др.*



- ② *на основе Al_2O_3 с добавками TiC
и упрочняющими волокнами/
частицами SiC , TiB_2 и др.*



- ③ *на основе Si_3N_4
с добавками Al_2O_3 ,
 Y_2O_3 и др.*



- ④ *на основе α/β - $SiAlON$
с добавками $Y(Yb,Er)_2O_3$,
 BN , TiN и др.*

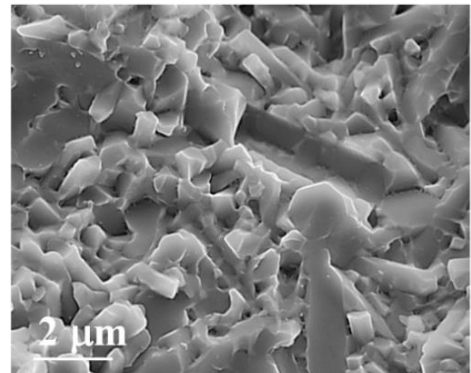


Рисунок 1.1 – SEM-изображения микроструктур КИМ, используемых в настоящее время в инструментальной промышленности для изготовления лезвийного режущего инструмента

В отличие от существовавших в начале 2000-х годов, современные КИМ представляют собой высокоплотные мелкозернистые спеченные композиции со средним размером зерна основной фазы $\sim 0,5\text{--}2,0$ мкм, который регулируется условиями предварительной обработки порошкового сырья, а также режимами термомеханического воздействия и длительностью процесса его последующего спекания. Снижение размеров зерен способствует повышению плотности и трещиностойкости алюмооксидной и нитридной керамик [10,11].

За последнее десятилетие материаловедцами и технологами был достигнут заметный прогресс в области повышения микроструктурной прочности, минимизации пор и других дефектов в спеченных КИМ, что позволило значительно увеличить трещиностойкость керамик и соответственно обеспечить их более высокое сопротивление развитию трещин при воздействии внешних нагрузок.

Благодаря разработке технологий получения керамических порошков, создания инновационных технологий спекания порошковых композиций и оптимизации их ключевых параметров, введению в состав спекаемой керамики мелкодисперсных частиц и нитевидных кристаллов (барьеров для развития трещин), сегодня имеются технологические подходы для получения в промышленных масштабах заготовок КИ с улучшенным комплексом физико-технических свойств [12–15].

В Таблице 1.1 представлены сведения об основных, заявляемых производителями физико-механических характеристиках базовых композиций КИМ, из которых в промышленных масштабах сегодня выпускаются различные типы лезвийного КИ:

- оксидно-карбидная керамика на основе $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}(\text{TiN})$;
- оксидно-карбидная керамика на основе $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, упрочненных волокнами SiC и др.;
- нитридная керамика на основе Si_3N_4 ;
- оксинитридная керамика на основе $\alpha\text{--}\beta$ SiAlON .

Таблица 1.1 – Усредненные физико-механические характеристики промышленно выпускаемых КИМ

Вариант композиции (состав) КИМ	Физико-механические характеристики КИМ			
	плот- ность (г/см ³)	предел прочности при изгибе (МПа)	трещино- стойкость (МПа·м ^{1/2})	твердость (HRA)
на основе Al ₂ O ₃ с добавками TiC(TiN), MgO, ZrO ₂ и др.	4,3±0,6	640±40	3,9±0,5	92,5...93
на основе Al ₂ O ₃ с добавками TiC, упрочненные частицами SiC, TiB ₂	4,3±0,2	680±25	4,6±0,6	92,5...93
на основе Si ₃ N ₄ с добавками Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ и др.	3,8±0,2	770±35	5,4±0,5	94...95
на основе α-β SiAlON с добавками Y(Yb,Er) ₂ O ₃ , BN, TiN и др.	3,9±0,4	860±50	6,1±0,9	93,5...94,5

Многообразие лезвийного инструмента из КИМ, выпускаемого инструментальной промышленностью, можно подразделить на сборный инструмент (токарные резцы, торцевые и концевые фрезы), оснащаемый сменными многогранными керамическими пластинами (СМКП) круглой, квадратной и других форм, а также цельный (монолитный) инструмент – появившиеся сравнительно недавно цельные концевые керамические фрезы (Рисунок 1.2). Выпускаемые производителями инструмента СМКП имеют различную форму режущей части – скругленную кромку и/или упрочняющую фаску.

Первые образцы сборного инструмента, оснащенного СМКП, впервые появились несколько десятилетий назад и непрерывно совершенствовались, а сегодня для их изготовления используются все рассмотренные выше варианты композиций КИМ.

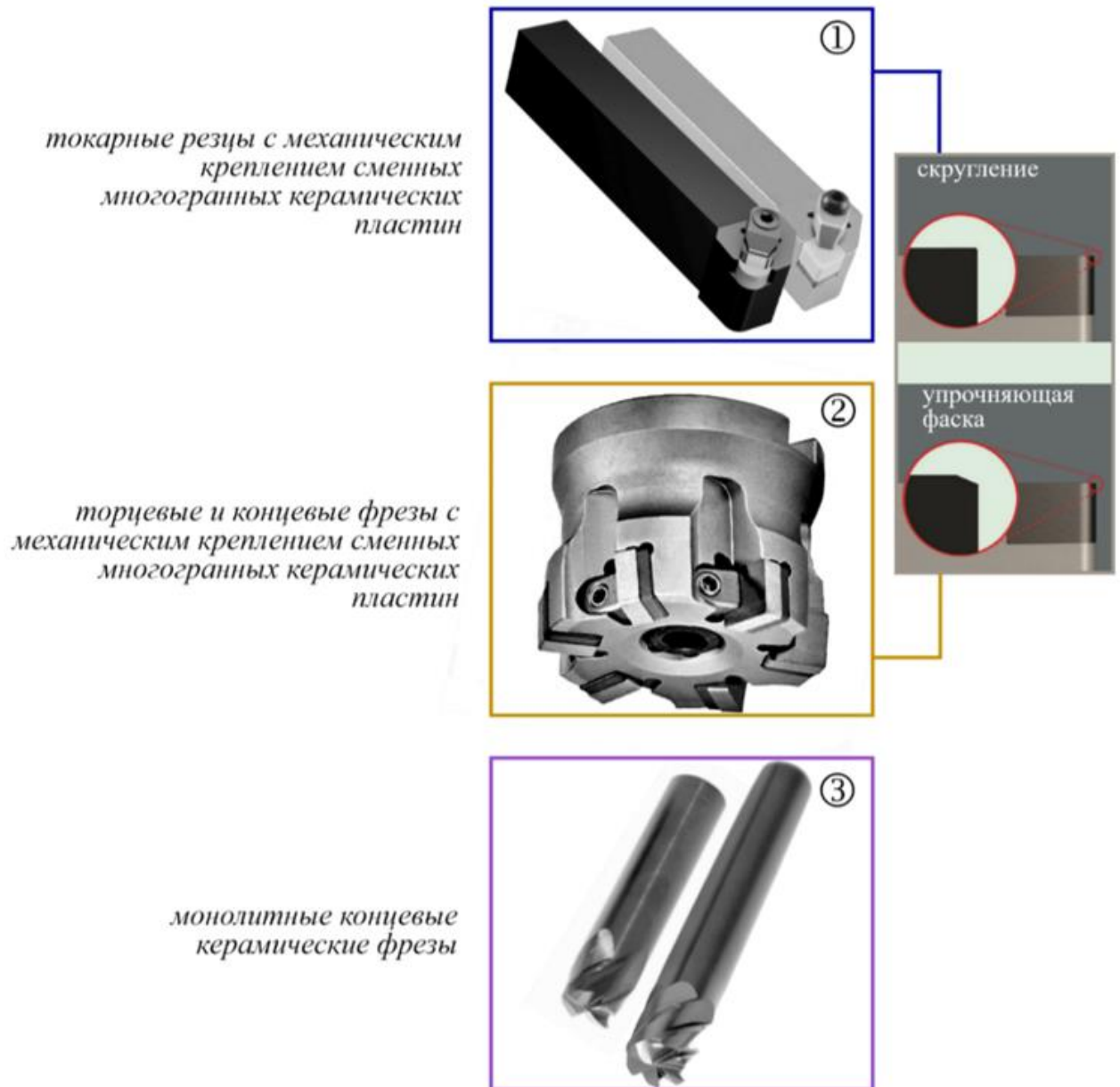


Рисунок 1.2 – Типы лезвийного инструмента из КИМ, выпускаемые инструментальной промышленностью: 1) и 2) – сборные резцы и фрезы, оснащенные керамическими пластинами; 3) – монолитные (цельные) концевые керамические фрезы

Цельные концевые керамические фрезы это появившийся сравнительно недавно и недостаточно изученный тип инструмента, изготавливаемый из КИМ на основе α - β SiAlON с различными добавками, и серийно выпускаемый зарубежными производителями Kennametal, Mitsubishi Materials, Iscar, Sandvik Coromant и некоторыми другими. Концевые керамические фрезы являются перспективным инструментом и возможной альтернативой монолитным твердосплавным фрезам,

являющимися сегодня наиболее востребованным и универсальным инструментом для обработки авиационных деталей из жаропрочных сплавов на основе никеля.

Главным преимуществом применения при обработке никелевых сплавов керамических фрез перед твердосплавным инструментом является более высокая теплостойкость КИМ и, как следствие, возможность эксплуатации изготовленного из них лезвийного инструмента на существенно больших скоростях резания [16,17]. Никелевые сплавы типа ХН45МВТЮБР, Inconel 718 и др. начинают разупрочняться при температурах резания 800 °С и выше, после чего их механическая обработка сопровождается существенно меньшими силовыми нагрузками на инструмент. Данным температурам соответствуют скорости резания свыше 500 м/мин. В указанном высокоскоростном режиме КИМ могут успешно эксплуатироваться, в то время как твердые сплавы стремительно теряют твердость (Рисунок 1.3, а), что исключает возможность их использования при обработке никелевых сплавов в высокоскоростном диапазоне и использовать эффект пластификации поверхностного слоя обрабатываемых никелевых сплавов.

На Рисунке 1.3, б представлен пример использования цельных концевых керамических фрез из материала SiAlON для высокоскоростной обработки турбинной лопатки из никелевого сплава на многокоординатном фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ [18].

Если проанализировать основные возможные области эффективного технологического применения лезвийного инструмента, оснащенного КИМ, для нужд машиностроения и ОПК, то их можно свести к 4 основным группам: 1) автомобильные детали из высокотвердых чугунов – блоки цилиндров, тормозные диски, барабаны и др.; 2) детали подшипников и штампового инструмента из закаленных сталей – кольца, пуансоны и др.; 3) детали из высокохромистых сталей для прокатных станов – рабочие валки; 4) детали из жаропрочных никелевых сплавов для авиационных двигателей – лопатки и диски турбин, оболочки камер сгорания и др. На Рисунке 1.4 представлена иллюстрация типовых деталей для обработки которых лезвийный инструмент, оснащенный КИМ, имеет значительный потенциал для применения в машиностроении и ОПК.

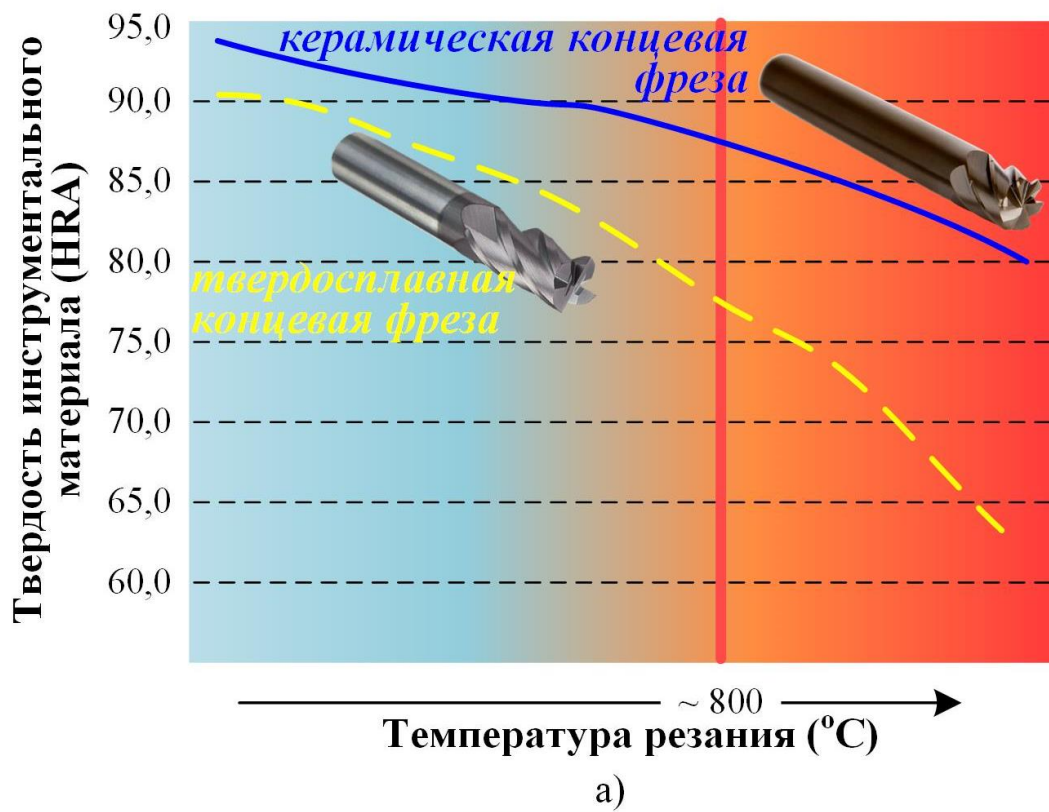
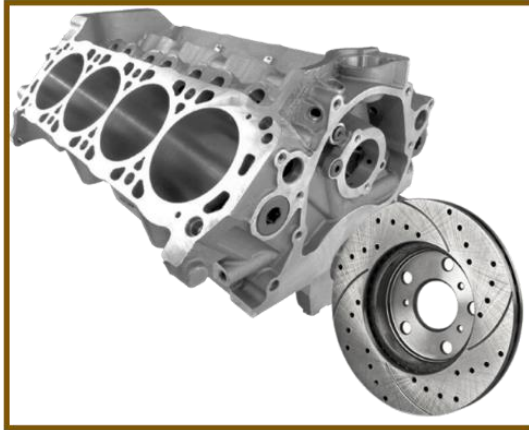


Рисунок 1.3 – Обработка деталей из жаропрочных сплавов концевыми фрезами из различных материалов: а) – изменение твердости фрез из твердого сплава и керамики с увеличением температуры резания; б) – процесс высокоскоростной обработки турбинной лопатки из никелевого сплава на многокоординатном станке с ЧПУ керамической фрезой

- ① *автомобильные детали из серых чугунов: блоки цилиндров, тормозные диски и барабаны и др.*



- ② *детали подшипников и штампового инструмента из закаленных сталей: кольца, пуансоны и др.*



- ③ *детали из высокохромистых сталей для прокатных станов: рабочие валки*



- ④ *детали из жаропрочных никелевых сплавов для авиационных двигателей: лопатки и диски турбин, оболочки камер сгорания*



Рисунок 1.4 – Основные области эффективного технологического применения лезвийного инструмента, оснащенного КИМ

Однако при всех перечисленных преимуществах лезвийного инструмента, оснащенного КИМ, и потенциальной возможности его использования для изготовления наиболее ответственных изделий массового производства машиностроения и ОПК, даже в условиях непрерывно увеличивающегося с каждым годом в мире количества исследований и разработок в области создания и совершенствования КИ, доля его промышленного применения в общем мировом

объеме рынка лезвийного инструмента находится на низком уровне и не демонстрирует значительного роста.

В качестве подтверждения сказанному можно рассмотреть наглядную статистику: если по состоянию на 1991 г. доля КИ на мировом рынке сменных многогранных пластин составляла около 4% [19], то по прошествии почти 30 лет этот показатель увеличился немногим более, чем в 2 раза. По данным международной аналитической компании «Dedalus Consulting» в 2018 г. на долю ИК, используемых в технологиях лезвийной обработки резанием, приходилось около 9% общего объема мирового рынка [20].

На сегодняшний день доля использования КИ на мировом рынке лезвийного инструмента составляет порядка 11-12%. Статистика по Российской Федерации до недавнего времени не вызывала оптимизма: в соответствии с данными дорожной карты «Использование нанотехнологий для создания высокоэффективного обрабатывающего инструмента», разработанной АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», доля сегмента ИК в общем объеме рынка обрабатывающего инструмента по состоянию на 2010 г. в нашей стране не превышала 1%.

Несмотря на имеющийся потенциал лезвийного инструмента из керамики для применения в стратегически важных отраслях промышленности, на сегодняшний день в Российской Федерации доля керамических инструментальных материалов по оценкам экспертов и данным ассоциации «Станкоинструмент» в общем объеме материалов, используемых для изготовления лезвийного инструмента, не превышает 3%.

На Рисунке 1.5 приведены диаграммы, содержащие данные о современном состоянии мирового (Рисунок 1.5, а) и российского (Рисунок 1.5, б) рынков лезвийного инструмента по итогам 2021 года и ориентировочных долях инструментальных керамик, твердых сплавов (ТС), быстрорежущих сталей (БРС), материалов на основе кубического нитрида бора (КНБ) и поликристаллического алмаза (ПКА), используемых для его изготовления.

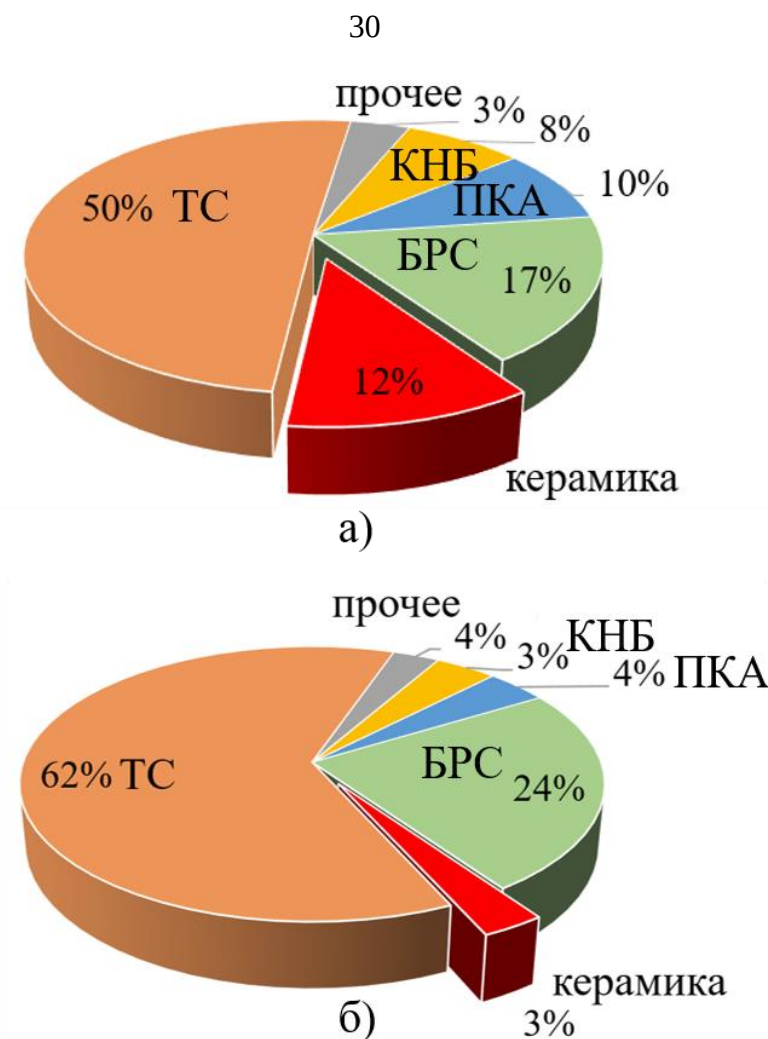


Рисунок 1.5 – Современное состояние рынка лезвийного инструмента и ориентировочные доли различных инструментальных материалов, используемых для его изготовления (2021 год): а) – мировой рынок; б) – российский рынок

1.2. Изучение характера разрушения поверхностного слоя керамического инструмента при воздействии теплосиловых нагрузок в процессе резания

Нереализованный технологический потенциал КИ и его более широкое распространение в промышленности ограничивается недостаточной эффективностью эксплуатации такого инструмента, характеризующейся пониженной надежностью (большим рассеиванием наработки на отказ или низкой стабильностью). Особенно ярко указанный недостаток выражен, когда КИ

эксплуатируется при сочетании повышенных термических и механических нагрузок. При работе на повышенных скоростях резания и относительно больших сечениях срезаемого слоя нередко наблюдается ускоренное (в ряде случаев – внезапное) разрушение рабочих (контактных) поверхностей КИ, что обусловлено целым рядом причин – структурной неоднородностью КИМ, заложенной в их природе, присутствующими в объемной структуре и поверхностном слое (ПС) инструмента дефектами технологической природы, которые могут формироваться на различных стадиях жизненного цикла инструмента – при изготовлении (спекании и алмазной заточке), а также в процессе эксплуатации [21–24]. Следует подчеркнуть, что сформировавшиеся на стадии изготовления КИ дефекты при воздействии интенсивных теплосиловых нагрузок при резании неизбежно приведут к формированию новых дефектов эксплуатационной природы. Дефекты изготовления (технологические дефекты) являются выраженными концентраторами напряжений [9,25], которые приводят к ускоренному разрушению рабочих поверхностей КИ, что снижает эффективность его эксплуатации.

Практический опыт показывает, что в процессе эксплуатации КИ в зависимости от исходного состояния поверхностного слоя инструмента, режимов механической обработки и свойств обрабатываемого материала возможен разнообразный характер разрушения контактных передней и задней поверхностей. Возможные варианты изнашивания КИ можно свести к следующим:

- постепенное истирание микроучастков на контактных поверхностях КИ (наиболее благоприятный вариант, характерный для инструмента с минимальным количеством дефектов);
- истирание микроучастков на контактных поверхностях КИ, сопровождающееся выпадением микрочастиц (выкрашиванием);
- истирание микроучастков на контактных поверхностях КИ с последующим разрушением – отделением микро- и макроучастков (сколами);
- отделение макроучастков (сколы) на контактных поверхностях КИ.

Ниже рассмотрены характерные варианты разрушения КИ на примере точения заготовок из закаленной стали ШХ15 ($60\div 62$ HRC) резцом с механическим креплением СМКП квадратной формы из материала ВСК71 (на основе Al_2O_3 с добавкой 20 об. % TiC) с упрочняющей фаской и геометрией режущей части $\gamma = -7^\circ$ и $\alpha = 7^\circ$ (исследовались пластины с различным исходным состоянием поверхностного слоя) при скорости резания $V=170$ м/мин, подаче $S=0,05$ мм/об и глубине $t=0,2$ мм (эксперименты выполнены автором диссертационной работы совместно с С.Н. Григорьевым и В.В. Кузиным).

На Рисунке 1.6 представлен наиболее благоприятный вариант разрушения контактных поверхностей условно «бездефектной» СМКП, который происходит в результате постепенного истирания микроучастков (фотография сделана на оптическом микроскопе после 25 минут эксплуатации инструмента). В результате контактирования передней поверхности со сливной непрерывной стружкой на ней образуется очаг износа в форме вытянутой лунки, а на задней поверхности КИ формируется очаг износа в виде фаски. В течение последующих 20 минут эксплуатации очаги износа на контактных поверхностях монотонно увеличивались (ширина лунки до 0,13 мм, а ширина фаски – до 0,31 мм) и признаков выкрашивания и присутствия сколов не наблюдалось.

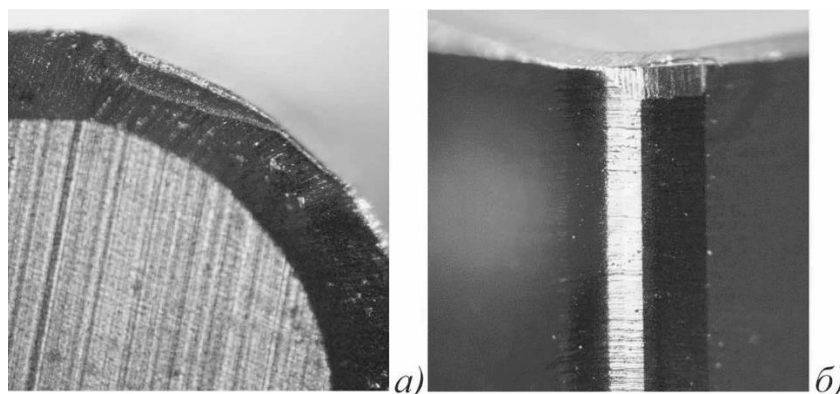


Рисунок 1.6 – Характер износа «бездефектной» СМКП через 25 минут эксплуатации: а) – по передней поверхности; б) – по задней поверхности

На Рисунке 1.7 показан характер износа при эксплуатации СМКП, на которой изначально присутствовало скопление пор на передней поверхности. Уже через 11 секунд эксплуатации было зафиксировано выпадение микрочастиц с последующим

сколом на передней поверхности через 60 секунд эксплуатации. На 2 минуте произошло увеличение площадки локального разрушения на передней поверхности, которая распространяясь на вспомогательную заднюю поверхность. На 4 минуте эксплуатации ширина участка разрушения на задней поверхности превысила 3,5 мм, что свидетельствует о полной потере СМКП работоспособного состояния. Очевидной причиной катастрофического разрушения инструмента является присутствие многочисленных пор в его ПС и, судя по всему, во внутреннем объеме.

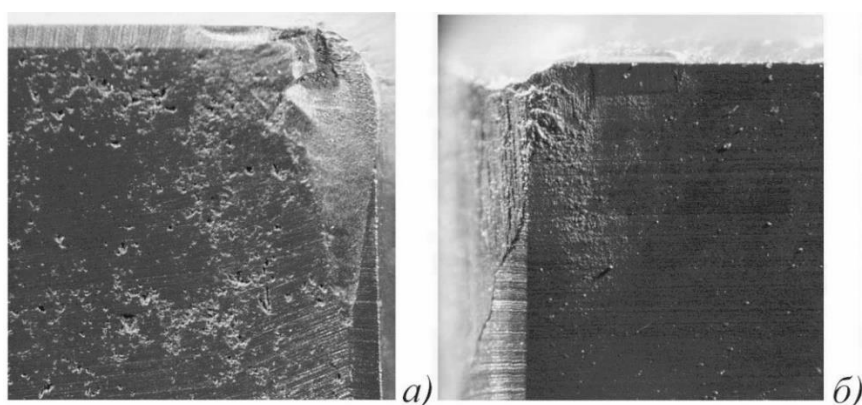


Рисунок 1.7 – Характер износа СМКП (с технологическими дефектами в виде пор) через 4 минуты эксплуатации: а) – по передней поверхности; б) – по задней поверхности

На Рисунке 1.8 показан характер износа СМКП на которой изначально были обнаружены технологические дефекты в виде локальных областей микроразрушения (микросколами) на передней поверхности и упрочняющей фаске. Установлено, что работоспособное состояние этим инструментом сохранялось в течении 35 минут эксплуатации, после чего произошло внезапное разрушение его ПС в виде макроскола округлой формы, граница которого проходит через переднюю поверхность и поверхность упрочняющей фаски и находится в непосредственной близости от вершины СМКП. Эксперимент с этим КИ продолжили для выявления дальнейшего характера разрушения. В дальнейшем на 36 минуте эксплуатации размер участков разрушений резко увеличился, а на задней поверхности произошло отделение макроучастка (скол) шириной 1,95 мм.

На Рисунке 1.9 показан характер износа СМКП на которой изначально были обнаружены технологические дефекты в виде локальных областей

микроразрушений (вырывов зерен) на задней поверхности. Установлено, что на 6 минуте эксплуатации размеры микроразрушений значительно увеличились, а на 9 мин эксперимента у КИ произошло разрушение ПС с образованием значительных макросколов как на передней, так и на задней поверхностях. Наибольшая глубина скола зафиксирована на некотором удалении от кромки в области наибольшего микроразрушения в исходном ПС. Размеры областей разрушения составили 1,14 и 0,72 мм на передней и задней поверхностях соответственно.

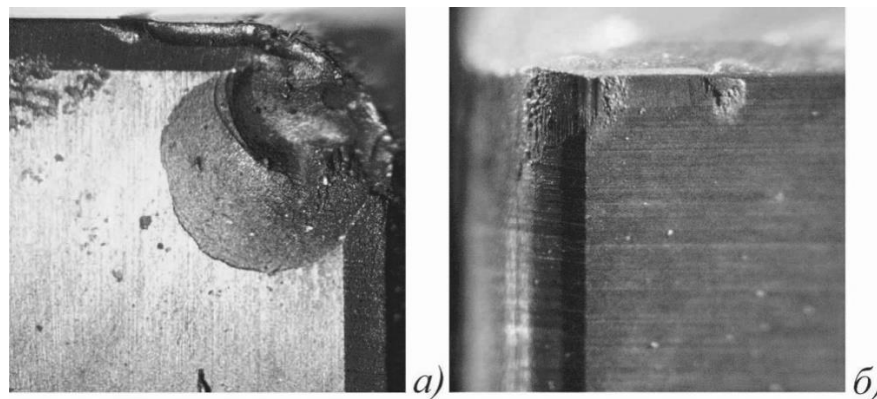


Рисунок 1.8 – Характер износа СМКП (с технологическими дефектами в виде сколов) через 35 минут эксплуатации: а) – по передней поверхности; б) – по задней поверхности

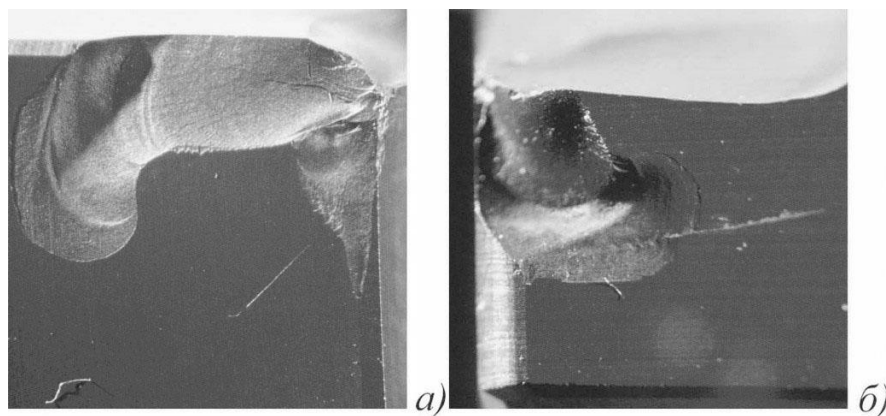


Рисунок 1.9 – Характер износа СМКП (с технологическими дефектами в виде микроразрушений на задней поверхности) через 9 минут эксплуатации: а) – по передней поверхности; б) – по задней поверхности

Продemonстрированный выше различный характер износа СМКП при наличии различных технологических дефектов изготовления приводит к выраженной эксплуатационной нестабильности КИ. Зачастую под действием критических тепловых и силовых нагрузок происходит внезапное разрушение их

режущей части. При этом ошибочно полагать, что благодаря сравнительно высокой теплостойкости КИ имеет превосходную сопротивляемость разрушению при воздействии термических нагрузок. Воздействие интенсивного теплового потока способно привести КИ к отказу так же внезапно, как и интенсивная силовая нагрузка [2, 26, 27]. Основную проблему нестабильности КИ окончательно решить пока не удалось. Между тем, широкие перспективы применения КИ при изготовлении деталей ответственного применения, в том числе из высокотвердых и труднообрабатываемых материалов, определяют актуальность решения проблемы повышения эксплуатационной надежности.

Представленные на Рисунках 1.6-1.9 возможные варианты износа СМКП иллюстрируют уже произошедший результат разрушения в процессе резания, но не объясняют механизмы ускоренного или внезапного разрушения рабочих поверхностей КИ, которые происходят при воздействии интенсивных теплосиловых нагрузок. Для более глубокого понимания происходящих процессов, необходимо рассмотреть структурные особенности КИМ на базе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON и возможные механизмы их структурного разрушения, систематизированные автором на Рисунке 1.10.

Известно, что спеченный КИМ по сути представляет собой поликристаллическое твердое тело, которое состоит из двух базовых фаз – кристаллической, состоящей из зерен, и стекловидной (аморфной), часто называемой межзеренной фазой, представляющей собой прослойки между зернами. Кроме отмеченных, в технических керамиках содержится некоторое количество газовой фазы, являющейся пора́ми между зернами [28–30]. При изготовлении инструментальной керамики стремятся минимизировать долю данной фазы, так как увеличение пористости приводит к повышению доли дефектов в объемной структуре и снижению ее прочности. Современные технологии подготовки порошков и спекания керамик позволяют получать практически беспористые композиции (с долей пор $\leq 0,1\%$).

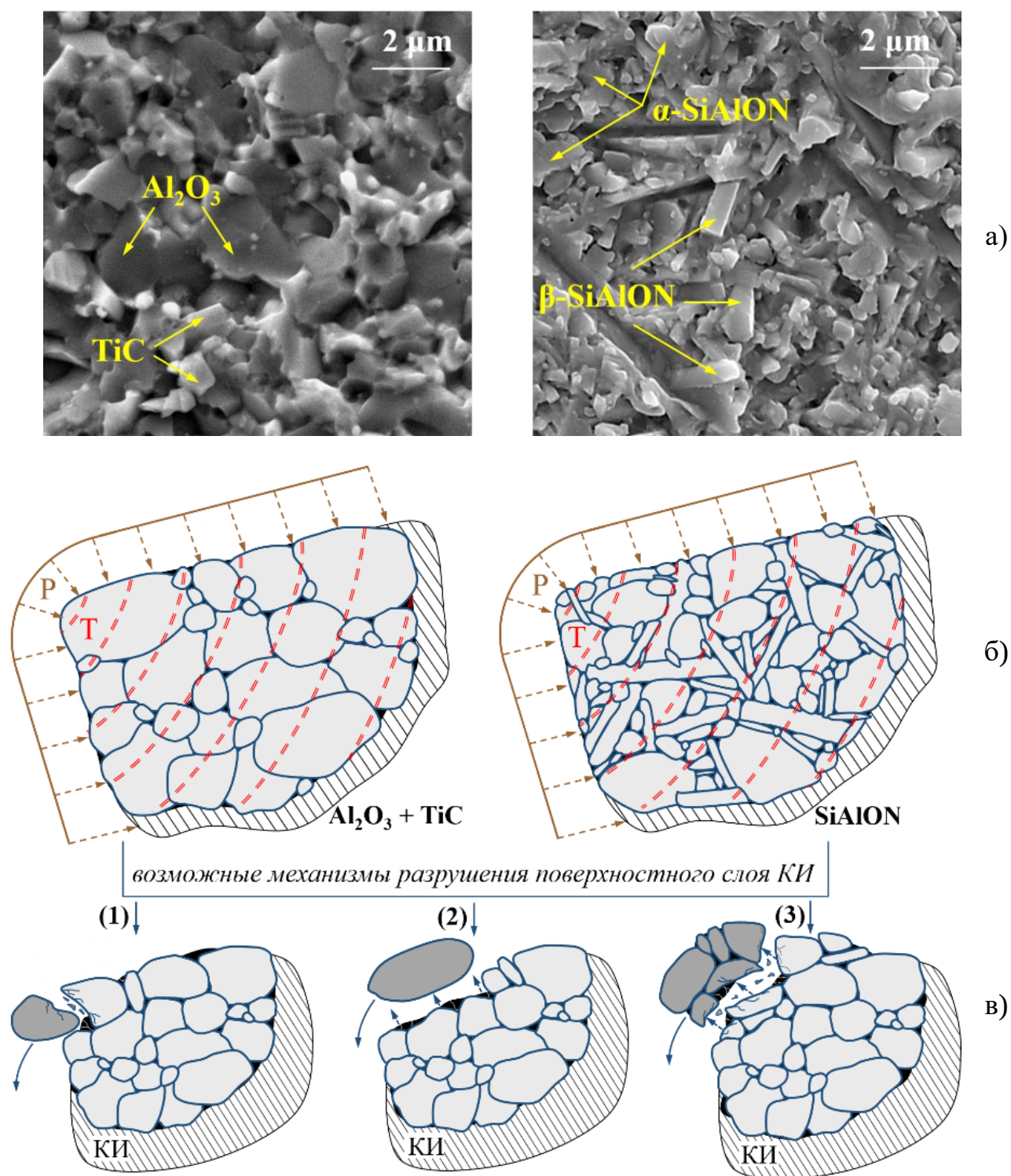


Рисунок 1.10 – Разрушение инструментальных керамик на базе $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ (слева) и SiAlON (справа) при внешних теплосиловых нагрузках: а) – SEM-изображения микроструктуры КИ; б) – модель ПС КИ при воздействии теплосиловых нагрузок; в) – возможные механизмы разрушения в виде внутризеренного (1), межзеренного (2) и смешанного (3)

Зерна кристаллической фазы инструментальных керамик могут иметь различные формы и размеры. На Рисунке 1.10, а представлены SEM-изображения микроструктур КИ, полученные автором при изучении изломов широко распространенных многофазных керамик на базе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON , являющихся объектами всесторонних исследований настоящей диссертационной работы.

Оксидно-карбидная керамика содержит зерна Al_2O_3 и TiC , имеющие форму неправильных многогранников, а также округлую форму с размерами 0,5...2,0 мкм. Керамика на основе SiAlON представлена зернами $\alpha\text{-SiAlON}$ в виде неправильных многогранников и округлой формы с размерами до 1,5 мкм, а также вытянутыми зернами $\beta\text{-SiAlON}$ длиной до 2,5 мкм с высоким аспектным отношением. На Рисунке 1.10, б представлена микроструктурная модель ПС керамик двух исследуемых типов при воздействии силовых (Р) и термических (Т) нагрузок в процессе резания. Вне зависимости от формы и размеров зерен инструментальной керамики под действием внешних нагрузок разрушение может протекать по одному из трех возможных механизмов (Рисунок 1.10, в).

В процессе эксплуатации в ПС КИ формируются «опасные микрзоны», создаваемые структурными концентраторами напряжений внутри или на границах структурных элементов керамики под действием внешних нагрузок. Базируясь на положениях известных работ в области механики разрушения твердых тел [33–36], в настоящей диссертационной работе были сформулированы механизмы возможного разрушения КИ под воздействием теплосиловых нагрузок (Рисунок 1.10), и выполнено их сопоставление с представленными на Рисунках 1.6-1.9 характерами износа СМКП.

1) Механизм внутризеренного (транскристаллитного) разрушения ПС КИ (Рисунок 1.10, в), в соответствии с которым действующие внешние нагрузки приводят к образованию микротрещины докритического размера в областях, где имеются поврежденности (дефекты), после чего она развивается по энергетически выгодной траектории. С течением времени процесс развития трещины переходит в стадию ее критического роста, который определяет характер разрушения ПС КИ.

Наиболее благоприятным случаем является частичное микроразрушение единичного зерна и остановка трещины на границе «зерно – межзеренная фаза». Описанный процесс может повторяться многократно и с точки зрения процесса изнашивания инструмента такой механизм разрушения выглядит как постепенное истирание микроучастков на контактных поверхностях КИ. Очевидно, что процесс развития трещины интенсифицируется при наличии в ПС дефектов технологической и эксплуатационной природы. В таком случае трещина практически мгновенно может выйти на поверхность КИ и привести к микроразрушению зерна.

2) Механизм межзеренного (межкристаллитного) разрушения с отделением единичного зерна (рисунок 1.10, б) под воздействием комплекса теплосиловых нагрузок и формирования в ПС КИ неблагоприятных локальных областей, в которых первоначально образуются отдельные дефекты, а затем их совокупности. Трещина на этапе стабильного роста не встречает преград при своем развитии по межзеренной фазе. Наличие множественных дефектов ускоряет развитие трещины и начинается этап критического роста с практически мгновенным выходом на поверхность. Это приводит к разрыву всех связей зерна и выносу его с поверхности КИ. С точки зрения процесса изнашивания инструмента такой механизм разрушения выглядит как истирание микроучастков на контактных поверхностях КИ с выпадением микрочастиц (выкрашиванием).

3) Механизм смешанного разрушения (транскристаллитное с отделением конгломерата зерен) (рисунок 1.10, в). Данный механизм является наиболее неблагоприятным и непредсказуемым вариантом разрушения ПС КИ, происходящим в результате вырыва конгломерата зерен из материала с последующим его выносом с поверхности КИ. Такой вариант возможен в случае критического сочетания эксплуатационных нагрузок и/или многочисленных дефектов, присутствующих в КИ. Под действием комплекса нагрузок неблагоприятные локальные области формируются во внутреннем объеме, на некотором удалении от поверхности КИ. Образовавшаяся трещина ускоряется и переходит в разряд критической и не встречая на своей траектории эффективных

барьеров для роста стремительно выходит на наружную поверхность КИ. В результате роста трещины по границам многих зерен с разворотом во внутренний объем ПС КИ отделяется конгломерат зерен от материала и выносится с поверхности КИ. Мгновенному разрушению ПС способствует присутствие большого числа совокупностей дефектов технологической и эксплуатационной природы, сконцентрированных в неблагоприятных микроразделах, расположенных на стыке зерен. С точки зрения процесса изнашивания инструмента такой механизм разрушения выглядит как отделение микро- и макроучастков (сколы) на контактных поверхностях КИ.

Описанные выше специфические особенности разрушения инструментальных керамик во многом определяют пониженную надежность (стабильность), проявляющуюся наиболее выражено при повышенных теплосиловых нагрузках на рабочие поверхности КИ. Сдерживающие промышленное применение КИ проблемы его недостаточной надежности, проявляющейся в виде часто встречающихся внезапных (сложнопредсказуемых) отказов инструмента из-за хрупкого разрушения режущей части, отмечены в значительном количестве работ российских и зарубежных исследователей [37–44]. Потеря работоспособного состояния КИ (превышение очага износа на рабочих поверхностях предельно допустимого значения) может произойти на различных стадиях его эксплуатации – как в период приработки, так и на стадии установившегося изнашивания. При этом интенсивность внезапных отказов возрастает при интенсификации режимов резания (скорости резания, подачи и глубины), увеличении теплосиловых нагрузок на контактные поверхности КИ и в условиях действия нагрузок циклического характера [44–49]. Поэтому основной областью промышленного применения КИ является высокоскоростная чистовая непрерывная обработка с малыми толщинами среза. Кроме того, данные экспериментальных исследований показывают [46, 50], что при достижении фаски износа на задней поверхности определенного значения (в зависимости от условий резания), происходит значительное изменение теплового состояния режущей части КИ и повышение интенсивности внезапных отказов инструмента.

На Рисунках 1.11 и 1.12 представлены результаты исследований, полученные автором диссертационной работы, демонстрирующие значительное влияние условий резания на уровень силовых и тепловых нагрузок в области контактного взаимодействия КИ с обрабатываемым материалом на примере точения закаленной стали 40Х твердостью 45...46 HRC резцом с механическим креплением СМКП из ВОК71 квадратной формы.

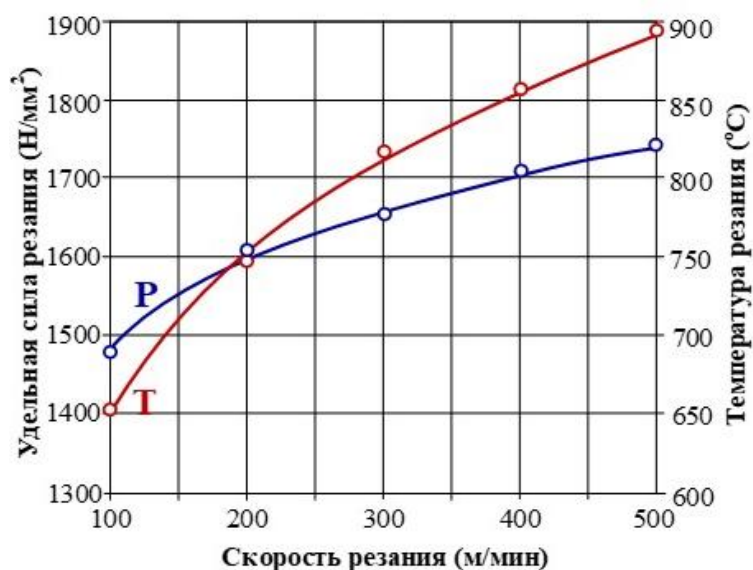


Рисунок 1.11 – Влияние скорости резания на удельную силу P и температуру резания T на контактных поверхностях СМКП при точении стали 40Х

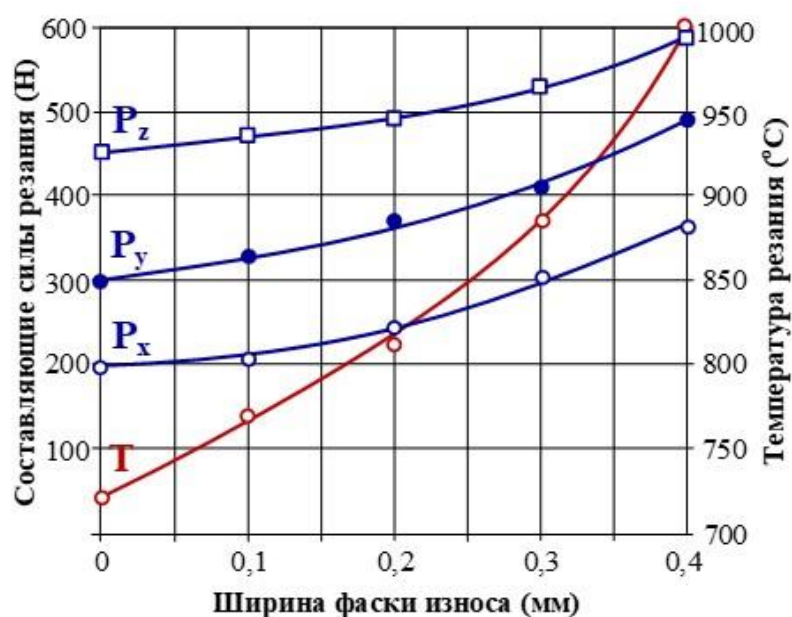


Рисунок 1.12 – Влияние размера фаски износа по задней поверхности СМКП на составляющие силы P и температуру резания T при точении стали 40Х

Экспериментальные данные наглядно демонстрируют (Рисунок 1.11), что с увеличением скорости резания повышаются силовые нагрузки на контактные площадки СМКП, увеличивая их механическую напряженность (данные представлены для обработки с подачей $S = 0,2$ мм/об и глубиной резания $t = 1$ мм). Увеличение скорости резания при точении стали 40Х приводит к повышению удельной силовой нагрузки на контактные площадки КИ. Важно отметить, что уменьшение твердости обрабатываемого материала приводит к снижению удельных нагрузок. С увеличением скорости резания температура в зоне обработки заметно увеличивается (указанная закономерность также характерна при увеличении подачи).

В результате износа КИ на задней поверхности формируется фаска износа, которая в определенной степени изменяет условия контактного взаимодействия КИ с обрабатываемым материалом. Приведенные на Рисунке 1.12 данные демонстрируют, что с увеличением ширины фаски износа на задней поверхности СМКП заметно возрастают составляющие силы резания, а также значительно повышается интенсивность теплового источника, действующего на задней поверхности, и температуры в зоне обработки (данные представлены для обработки со скоростью резания $V=400$ м/мин, подачей $S = 0,2$ мм/об и глубиной резания $t = 1$ мм).

Обобщая приведенные выше результаты аналитических и экспериментальных исследований, можно выделить следующие особенности КИ, которые способствуют его нестабильному поведению в процессе резания.

1) Хрупкий механизм разрушения рабочих поверхностей КИ с распространением трещин по трем возможным схемам, представленным на Рисунке 1.10; при этом процессы роста сформировавшихся трещин могут протекать стремительно и приводить к внезапному микро- и макоразрушению режущей части инструмента.

2) Структурная неоднородность керамики и присутствующие в объемной и поверхностной структуре КИ дефекты технологической природы, формируемые как в процессе спекания, так и на этапе алмазного шлифования; эти дефекты

являются очагами микроструктурных концентраторов напряжений, которые становятся источниками появления новых дефектов эксплуатационной природы при воздействии интенсивных теплосиловых нагрузок.

1.3. Оценка надежности керамического инструмента при воздействии теплосиловых нагрузок в процессе резания

Основной задачей при изучении и оценке надежности эксплуатации металлообрабатывающего инструмента, в частности КИ, является изучение структуры и интенсивности отказов, которые являются случайными событиями [51–54]. При одинаковых, как может показаться, условиях процесса резания на практике имеют место отличающиеся друг от друга по характеру и скорости нарастания кривые реализаций «износ – время резания», которые являются случайными функциями. Стохастический характер кривых изнашивания инструмента во времени связан со случайной природой процессов фрикционного взаимодействия на задней и передней поверхностях инструмента при трении об обрабатываемую заготовку и сходящую стружку соответственно. В случае эксплуатации КИ значительный вклад вносит случайный характер начального состояния инструмента, которое закладывается на различных технологических этапах изготовления КИ – при спекании заготовок и их алмазной заточке.

На Рисунке 1.13 представлены характерные экспериментальные кривые случайных реализаций «износ – время резания», полученные по результатам испытаний, выполненных С.Н. Григорьевым и В.В. Кузиным совместно с автором настоящей работы, резцов с механическим креплением СМКП квадратной формы из материалов на основе Al_2O_3+TiC и Si_3N_4 при точении закаленной стали 35ХГСА (44...48 HRC) на скорости резания $V=220$ м/мин, подаче $S=0,1$ мм/об и глубине $t=0,8$ мм. Данные получены при стойкостных испытаниях 15 режущих граней СМКП.

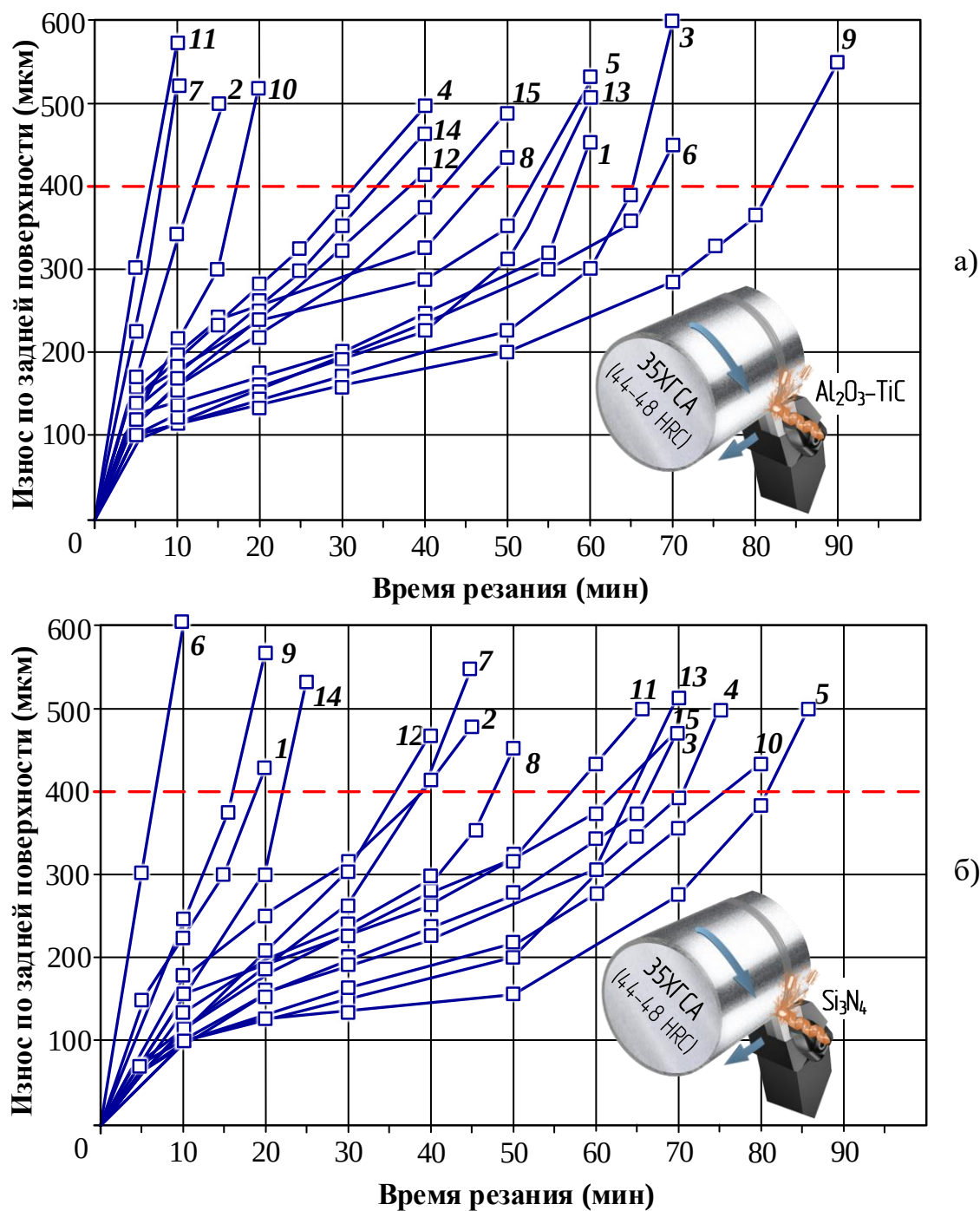


Рисунок 1.13 – Кривые реализаций «износ – время резания» при точении закаленной стали 35XГСА СМКП из различных материалов при $V=220$ м/мин, $S=0,1$ мм/об и $t=0,8$ мм:
а) – Al_2O_3+TiC ; б) – Si_3N_4

Видно, что кривые развития во времени износа по задней поверхности СМКП имеют выраженный веерный характер реализаций случайной величины. Такой характер развития износа во времени является труднопрогнозируемым, а наработка на отказ – время работы до достижения принятого критерия отказа (в данном случае 400 мкм) имеет большой разброс значений. В подобных случаях наиболее распространенная эксплуатационная характеристика КИ – средняя наработка до отказа (средняя стойкость или математическое ожидание наработки) является малоинформативным показателем и необходима оценка комплекса характеристик, способных достоверно характеризовать надежность КИ.

Представленный выше веерный характер реализаций «износ – время резания» свидетельствует о низкой надежности КИ, которая может быть комплексно оценена, например, математическим ожиданием и гамма-процентной наработкой до отказа – временем работы в течение, которого отказ инструмента не возникает с заданной вероятностью [55, 56]. В условиях высокотехнологичных производств при эксплуатации металлообрабатывающих инструментов на станках с ЧПУ обычно требуется обеспечить этот показатель на уровне не менее 95%.

Лабораторные исследования, связанные с оценкой надежности металлообрабатывающего инструмента, как правило, предполагают проведение его стойкостных испытаний и на основе полученных экспериментальных данных выявление закона распределения функции «износ – время» как случайной величины, а затем выполнение расчета характеристик надежности [57–60]. Однако, когда выборка образуется из сравнительно небольшого числа единиц совокупности (ограниченном количестве испытываемых инструментов), вероятность ошибки в выборе закона распределения и оценки его параметров увеличивается. В случае, когда функцию распределения «износ – время» можно приблизить и описать нормальным законом, разрешается принимать минимальный объем выборки не менее 10 единиц, при этом достоверность выполняемых расчетов будет возрастать при увеличении объема выборки [61,62]. Следует подчеркнуть, что надежность многолезвийного режущего инструмента снижается по мере увеличения числа лезвий [63].

В условиях реального производства при оценке надежности металлообрабатывающего инструмента и принятия решения о целесообразности его использования в процессах механообработки, наибольшее распространение получила оценка средней стойкости (наработки на отказ) с одновременной оценкой показателя ее вариации VarT (часто называемого показателем стабильности эксплуатации инструмента), характеризующего рассеивание (разброс) времени работы до достижения принятого критерия отказа [64–67]. VarT определяется как соотношение значений среднего квадратического отклонения и среднего арифметического значения стойкости КИ и является очень удобным показателем при проведении ускоренных сравнительных испытаний и их ограниченном объеме.

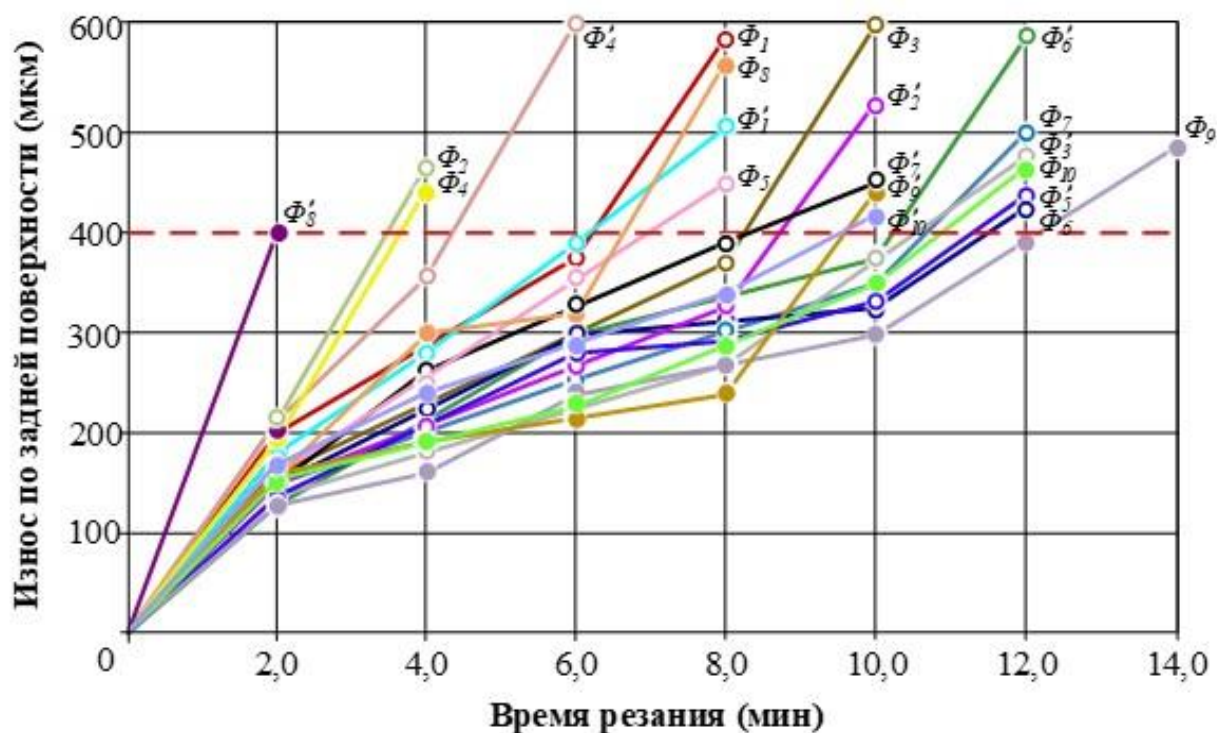
Несмотря на очевидный нереализованный потенциал использования КИ в процессах механообработки ответственных деталей для нужд машиностроения и ОПК, а также популярность рассматриваемой области исследований среди российских и зарубежных ученых, на сегодняшний день можно отметить небольшое число работ, где с позиций теорий надежности и вероятности, а также методов математической статистики, если не масштабно изучаются, то, как минимум, затрагиваются вопросы надежности эксплуатации (стабильности) инструмента из КИМ. Среди таких работ следует отметить [38, 40, 58, 68–70].

Фокус внимания известных работ в области повышения работоспособности КИ сосредоточен на операциях токарной обработки закаленных сталей и чугунов инструментом, оснащенным СМКП из КИМ на основе $Al_2O_3 + TiC$ и Si_3N_4 . В редких работах [68, 71, 72] в качестве обрабатываемого материала при точении используются жаропрочные сплавы на основе никеля, предназначенные для изготовления авиационных деталей. На сегодняшний день недостаточно изученными остаются вопросы обеспечения надежности КИ на операциях фрезерования (в частности, с увеличенными сечениями среза), которые сопровождаются циклическими механическими нагрузками, связанными с чередованием рабочих и холостых ходов. При этом операции торцевого фрезерования являются одними из наиболее востребованных технологий механообработки при изготовлении изделий машиностроения. Очевидно, что при

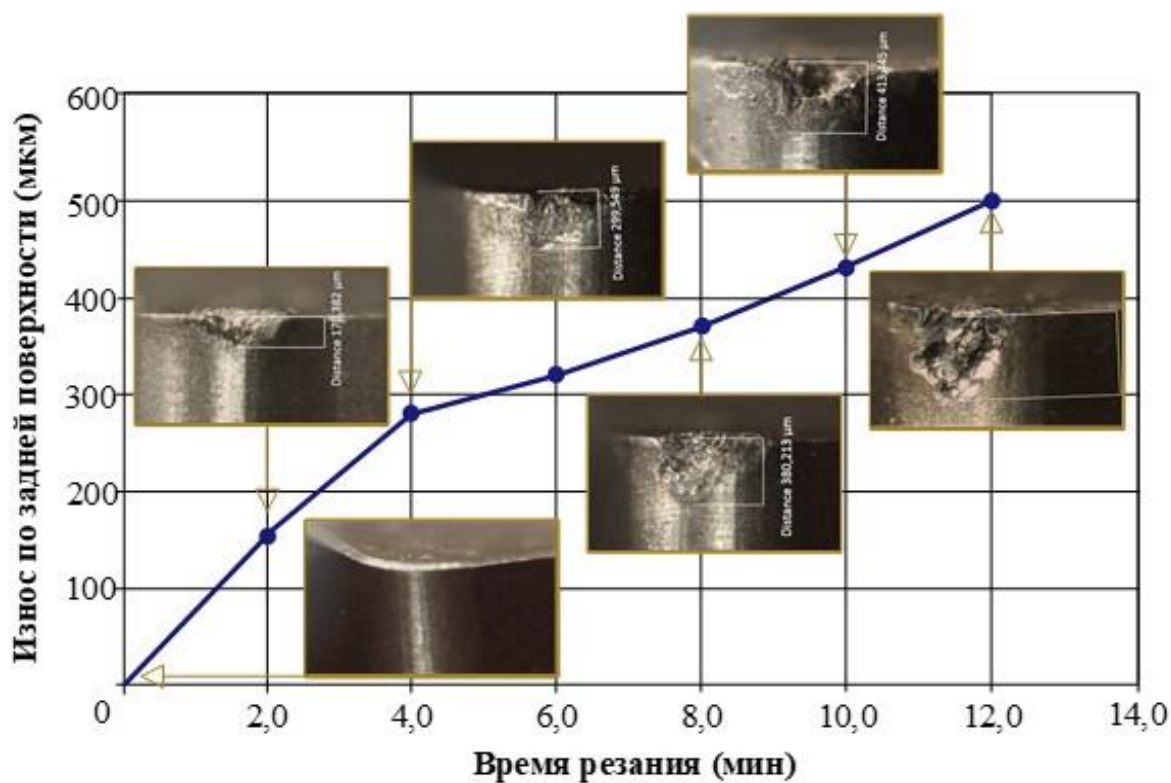
эксплуатации на операциях фрезерования описанные выше проблемы нестабильного поведения КИ будут только усугубляться. Кроме того, на текущий момент остаются мало изученными вопросы эксплуатационной стабильности СМКП из КИМ на основе α - β SiAlON при обработке жаропрочных сплавов на основе никеля. При этом керамические инструментальные материалы на базе SiAlON благодаря уникальному сочетанию физико-механических свойств имеют наибольшие перспективы применения для резания указанных обрабатываемых материалов [73–76]. Исследования эффективности применения цельных концевых керамических фрез и вопросы их совершенствования, сегодня находятся только на начальном этапе как в России, так и за рубежом.

На Рисунке 1.14 приведены данные результатов экспериментальных исследований, полученных в настоящей диссертационной работе при обработке на вертикально-фрезерном станке BM127 призматических заготовок из закаленной стали ШХ15 (60...62 HRC) торцевой насадной фрезой 160×50 мм с механическим креплением 10 квадратных СМКП из материала Al_2O_3+TiC с добавками ZrO_2 . Эксперименты проводились при режимах резания, обеспечивающих интенсивные теплосиловые нагрузки на КИ: скорость резания $V=380$ м/мин, подача $S=0,15$ мм/зуб и глубина $t=1$ мм. Были испытаны по две грани каждого зуба сборной фрезы. Очаги износа анализировались на оптическом микроскопе Stereo Discovery V12 Zeiss, который также использовался в дальнейших исследованиях в рамках работы.

Кривые реализаций «износ – время резания» в условиях действия на СМКП циклических механических нагрузок при одновременном термическом воздействии имеют выраженный веерообразный характер с различными скоростями изнашивания режущих граней после завершения этапа приработки (на стадии приработки был зафиксирован 1 случай скалывания). При указанном характере кривых нельзя ориентироваться на среднюю стойкость, так как данный эксплуатационный показатель не является информативным.



(a)



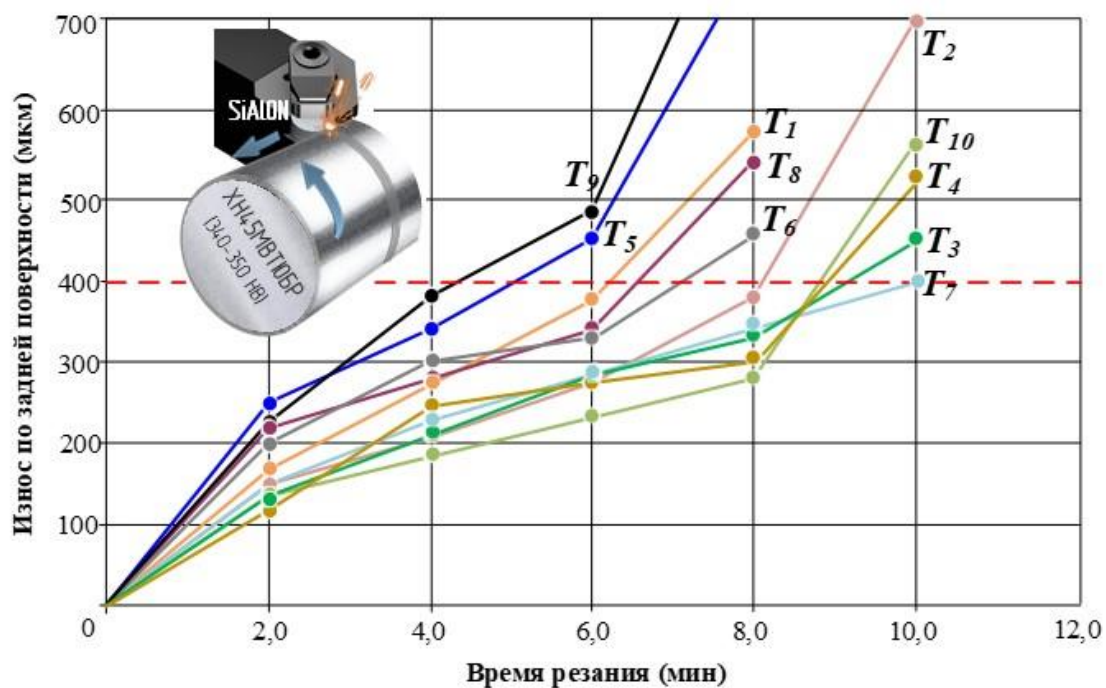
(б)

Рисунок 1.14 – Характер изнашивания СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ при фрезеровании закаленной стали ШХ15 при $V=380$ м/мин, $S=0,15$ мм/зуб, $t=1$ мм: а) – кривые реализаций «износ – время резания»; б) – усредненная кривая и кинетика развития очага износа режущих граней СМКП при различном времени резания

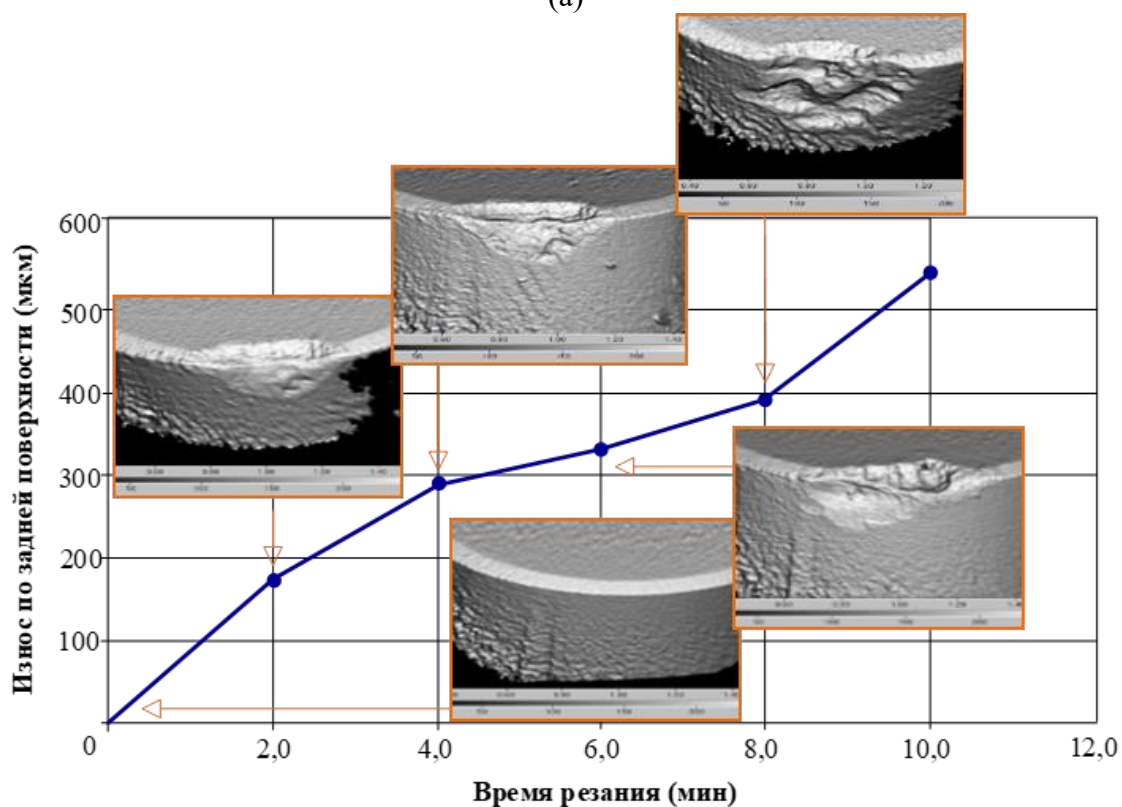
Обращает на себя внимание (Рисунок 1.14) чрезвычайно большая вариация стойкости СМКП при принятии в качестве критерия отказа предельного износа задней поверхности 400 мкм, обычно рекомендуемого для КИ. Если рассмотреть возможность применения распространенного подхода – снижения значения критерия отказа для уменьшения разброса средней стойкости и повышения стабильности КИ (например, до 250 или 300 мкм), то в рассматриваемом случае это не решит проблему низкой стабильности КИ при фрезеровании.

На Рисунке 1.15 приведены данные результатов экспериментальных исследований, полученных в рамках диссертационной работы, при обработке на токарном станке ZMM CU500MRD заготовок-прутков из жаропрочного сплава на основе никеля ХН45МВТЮБР ($\sigma_B=1130$ МПа) сборным токарным резцом с механическим креплением круглых СМКП из материала SiAlON. Эксперименты проводились при режимах резания, обеспечивающих интенсивные теплосиловые нагрузки на КИ: скорость резания $V=280$ м/мин, подача $S=0,15$ мм/об и глубина $t=1$ мм. Для выявления характера развития износа с течением времени резания были испытаны 10 граней СМКП. Анализ очагов изнашивания выполнялся на оптическом бесконтактном 3D-профилометре MicroCAD Premium, который также использовался в дальнейших исследованиях в рамках работы.

Полученные результаты лабораторных испытаний показывают, что на каждом этапе эксплуатации – при приработке и установившемся изнашивании скорость износа различных граней КИ существенно отличается. В условиях обработки никелевого сплава, когда результаты испытаний демонстрируют большой разброс стойкости СМКП в различные моменты времени резания, средняя стойкость является мало информативным эксплуатационным показателем инструмента. Можно предположить, что отмеченная низкая стабильность является следствием хорошо известных специфических особенностей строения жаропрочных никелевых сплавов, их склонностью к формированию в поверхностном слое при механической обработке высокотвердых соединений, их низкой теплопроводности и др. [77].



(a)



(б)

Рисунок 1.15 – Характер изнашивания СМКП из SiAlON при точении жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР при $V=280$ м/мин, $S=0,15$ мм/об, $t=1$ мм: а) – кривые реализаций «износ – время резания»; б) – усредненная кривая и кинетика развития очага износа режущих граней СМКП при различном времени резания

Приведенные выше экспериментальные данные наглядно подтверждают низкую эксплуатационную надежность КИ на операциях механообработки с повышенными теплосиловыми нагрузками, в том числе циклического характера, и во многом объясняют причины, сдерживающие более широкое распространение КИ в условиях машиностроительного производства.

1.4. Анализ состояния поверхностного слоя керамического инструмента, формируемого в процессе алмазного шлифования, и особенности контроля качества инструмента в производственных условиях

Классический подход к решению основной проблемы КИ долгие годы базировался на необходимости увеличения объемной прочности инструментальных керамик и их способности сопротивляться росту трещин при нагрузках, характерных для процесса резания. Прочностные характеристики инструментальных керамик, изготавливаемых из порошковых материалов, во многом зависят от дефектов, которые, как уже отмечалось выше, являются концентраторами напряжений и очагами зарождения трещин [78]. Для минимизации дефектов и улучшения трещиностойкости КИМ была создана концепция, базирующаяся на введении в состав керамик субмикронных частиц и/или нитевидных кристаллов, для которых характерны полиморфные превращения с образованием прослоек по границам зерен Al_2O_3 , Si_3N_4 и др., сдерживающих их рост в процессе спекания [79–81]. Современные технологии, основанные на принципах легирования, предложенных почти два десятилетия назад, а также инновационные решения для получения высокодисперсных порошков с контролируемыми свойствами и их подготовки, сегодня широко используются в промышленности и позволяют получать высокоплотные инструментальные керамики с улучшенными механическими свойствами. Также большой прогресс достигнут в процессах прессования инструментальных керамик

– уже ставшей традиционной технологии горячего изостатического прессования [82–84], сравнительно новой технологии искрового плазменного спекания, при реализации которой спекание порошковых композиций осуществляется в графитовых пресс-формах с одновременным воздействием на керамическую заготовку механических усилий и импульсов постоянного тока, активирующих диффузионные механизмы спекания [85–88]. Кроме того, разработана и получает производственное распространение еще одна перспективная технология – гибридное искровое плазменное спекание, комбинирующая процессы искрового плазменного спекания и горячего прессования, и предусматривающая возможность воздействия на спекаемую керамическую заготовку импульсами постоянного тока и индукционным нагревом [89, 90].

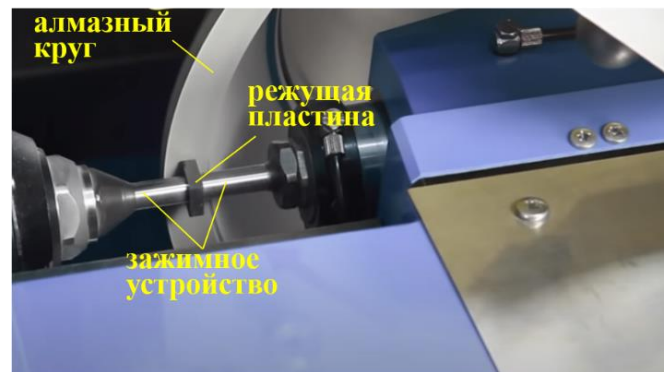
Спеченные керамические заготовки при изготовлении режущих инструментов (СМКП и концевых керамических фрез) в промышленных масштабах подвергаются финишному алмазному шлифованию. Сложные процессы, происходящие при разрушении припуска при алмазном шлифовании, оказывают негативное влияние на состояние ПС КИ, а присутствующие в нем дефекты не могут не влиять на эксплуатационные показатели инструмента.

Алмазная заточка керамических заготовок это финишный многоэтапный технологический процесс в цикле изготовления КИ, который выполняется с использованием многокоординатных прецизионных станков и предусматривает шлифование двух противоположных опорных (передних поверхностей), последующее шлифование боковых (задних) поверхностей, скругление режущих кромок и при необходимости формирование упрочняющих фасок. На Рисунке 1.16, а проиллюстрирована параллельная алмазная обработка на станке с ЧПУ WENDT WBM221 опорных поверхностей СМКП треугольной формы торцевой частью шлифовальных кругов с алмазоносным режущим слоем (зернистость кругов обычно составляет 80/63, значительно реже – 63/50). Пластины при этом загружаются в выемки специальных приспособлений (палет) и подаются в зону обработки. Верхний алмазный круг осуществляет обработку по схеме врезного шлифования, а приспособление с пластинами совершает возвратно-поступательное

движение. После окончания обработки приспособления с СМКП отводятся из зоны обработки для разгрузки и выполнения последующей операции.



а)



б)

Рисунок 1.16 – Многоэтапная алмазная заточка СМКП: а) – параллельная алмазная обработка опорных (передних) поверхностей; б) – алмазная обработка боковых (задних) поверхностей и режущих кромок

На Рисунке 1.16, б проиллюстрирована обработка торцом алмазного круга боковых поверхностей и режущих кромок СМКП на станке с ЧПУ WAIDA APX102/103. Фиксация пластины при этом осуществляется в зажимном устройстве (например, зажим цапфами), которое осуществляет вращательное движение для поочередного поворота режущих граней к торцевой поверхности алмазного круга, а также обеспечивает возможность угловых перемещений.

Также для двухстороннего шлифования противоположных опорных (передних поверхностей) СМКП некоторое распространение получил процесс планетарного алмазного шлифования [91]. В соответствии с одним из возможных

вариантов реализации указанного процесса, запатентованным с участием автора настоящей работы [92], заготовки в виде керамических пластин устанавливаются на плоскошлифовальном станке (типа Hahn Kolb ZL 700) между верхним и нижним шлифовальными кругами. Устройство для шлифования имеет планетарную головку с внутренним и внешним венцами, между которыми установлены дисковые приспособления – держатели пластин. Керамическим пластинам, установленным в выемки специальных приспособлений, придается планетарное вращение относительно шлифовальных кругов. Шлифовальным кругам сообщается вращательное движение, а верхний шлифовальный круг дополнительно воздействует на обрабатываемые пластины с необходимым давлением [92]. В Приложении А к тексту диссертационной работы приведены копии охранных документов, полученных с участием автора, на новые технические решения в области совершенствования инструмента из керамики.

Алмазное шлифование керамики является чрезвычайно энергоемким процессом, при котором съем ПС с керамической заготовки на необходимую глубину происходит в результате создания в нем напряжений, уровень которых превышает напряжение разрушения инструментальной керамики. На Рисунке 1.17 приведена схема воздействия на поверхностный слой керамической заготовки зерен шлифовального круга при финишной алмазной обработке.

В процессе шлифования спеченная керамическая заготовка подвергается комбинированному термомеханическому воздействию, в результате которого разрушается ПС и удаляется заданный припуск. При этом зона (область) термического и механического воздействия простирается существенно глубже величины срезанного припуска [93, 94]. При массовом изготовлении СМКП на многокоординатных прецизионных станках с ЧПУ для обеспечения высокой рентабельности производства при алмазной заточке назначаются высокопроизводительные режимы.

Механизмы, которые лежат в основе алмазного шлифования при формообразовании ПС керамик, значительно отличаются, от процессов, наблюдаемых при абразивной обработке конструкционных металлов и сплавов. В

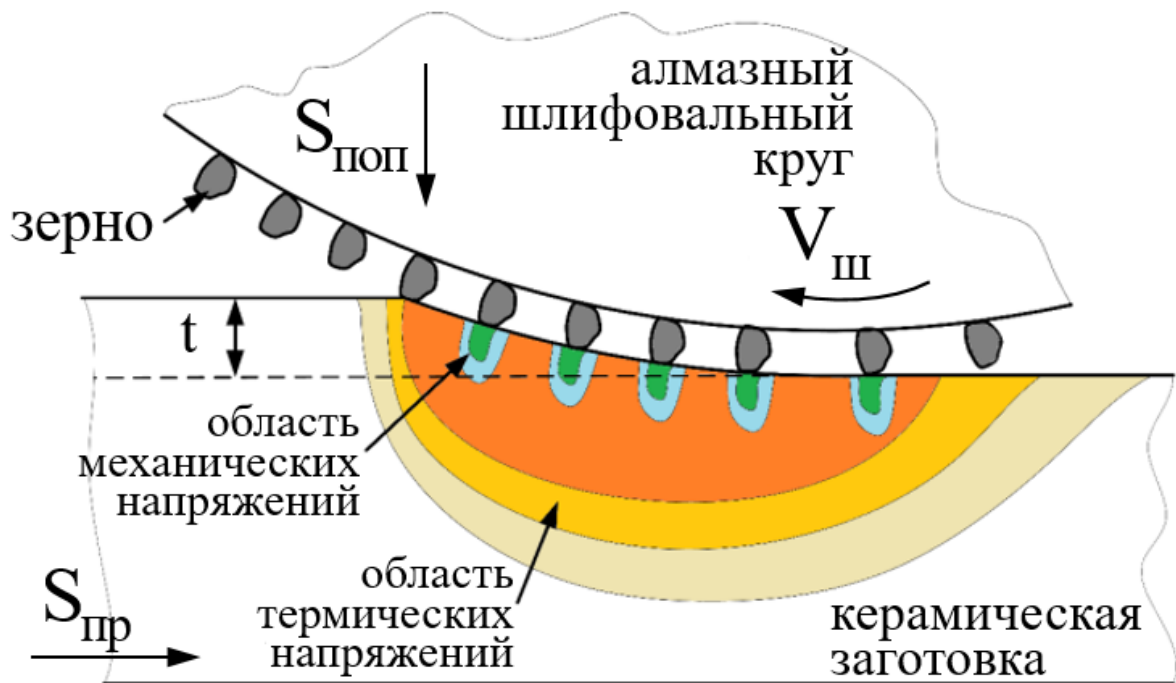


Рисунок 1.17 – Схема воздействия на поверхностный слой керамической заготовки зерен шлифовального круга при финишной алмазной обработке

работами различных исследователей показано [22, 95-97], что поверхностный слой, формируемый при алмазном шлифовании керамических заготовок при глубинах резания 0,02...0,04 мм (обычно назначаемых при массовом производстве СМКП), представляет собой характерные области (как правило, их сочетание), которые иллюстрируют различные механизмы посредством которых происходит разделение материала при удалении припуска. Микроструктурный анализ шлифованных керамических материалов позволяет выявить области преимущественной упругопластической деформации с относительно небольшим количеством микроразрушений, преимущественного хрупкого разрушения с выраженными микросколами и трещинами, а также зоны хрупко-пластического (смешанного) разрушения.

На Рисунке 1.18 приведены SEM-изображения характерных механизмов разрушения ПС СМКП, происходящих в процессе алмазной заточки, и выявленные в рамках настоящей диссертационной работы при микроструктурном анализе очаги

упругопластической деформации, хрупкого разрушения и смешанного разрушения.

Проведенные в рамках диссертационного исследования эксперименты, показывают, что при сложном термомеханическом воздействии на керамику в процессе алмазного шлифования в ее ПС формируются достаточно большие сжимающие напряжения (для материала на основе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ – до 800 МПа, а на основе Si_3N_4 – до 550 МПа), после чего наблюдается их достаточно резкое уменьшение и переход в напряжения растяжения, которые затем плавно снижаются и стабилизируются, что также влияет на поведение СМКП в процессе эксплуатации и увеличивает вероятность непрогнозируемого разрушения рабочих поверхностей инструмента [91]. Аналогичный характер напряженного состояния ПС шлифованной керамики отмечают авторы работы [93].

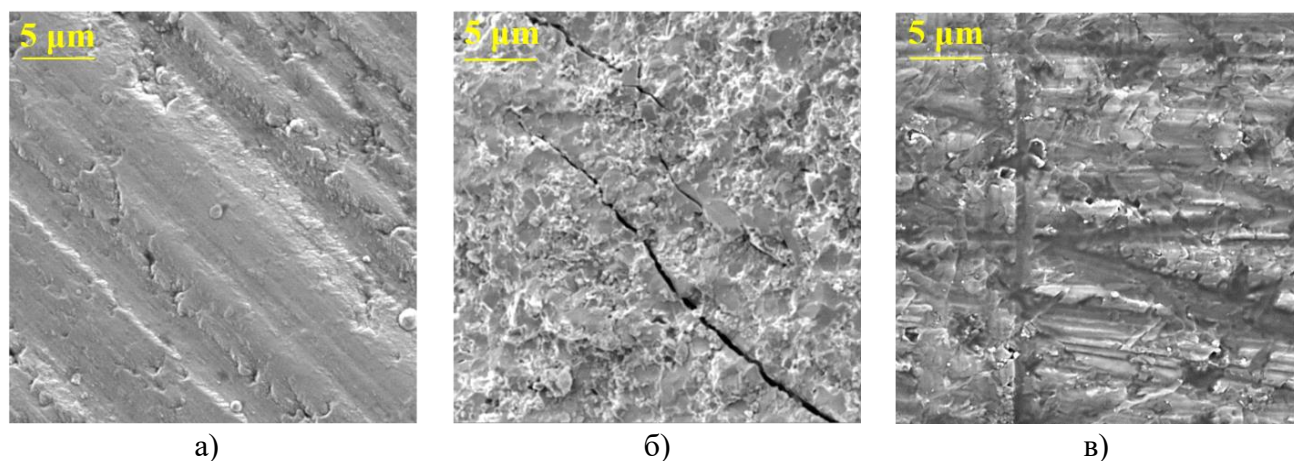


Рисунок 1.18 – Характерные области, выявленные при микроструктурном анализе поверхностного слоя инструментальной керамики после алмазного шлифования:

а) – упругопластической деформации; б) – хрупкого разрушения; в) – хрупко-пластического (смешанного) разрушения

Превалирование того или иного механизма в формировании поверхностного слоя при алмазной заточке, главным образом, зависит от параметров обрабатываемого материала (микроструктуры и фазового состава инструментальной керамики), характеристик алмазного круга (зернистости и микрогеометрии режущих зерен), условий шлифования (скорости резания, состава и объема используемой СОЖ) [95]. Микрорельеф ПС инструментальной керамики,

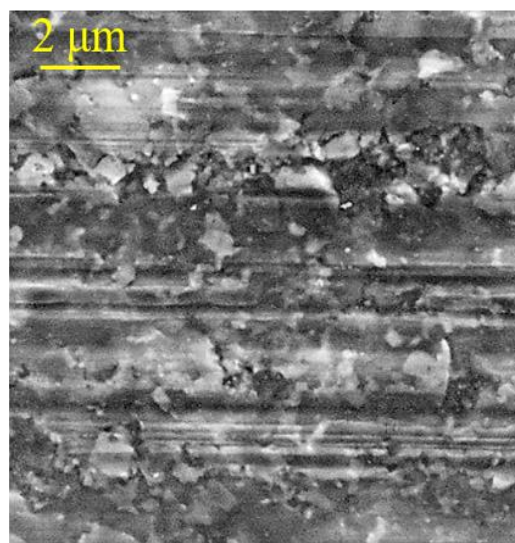
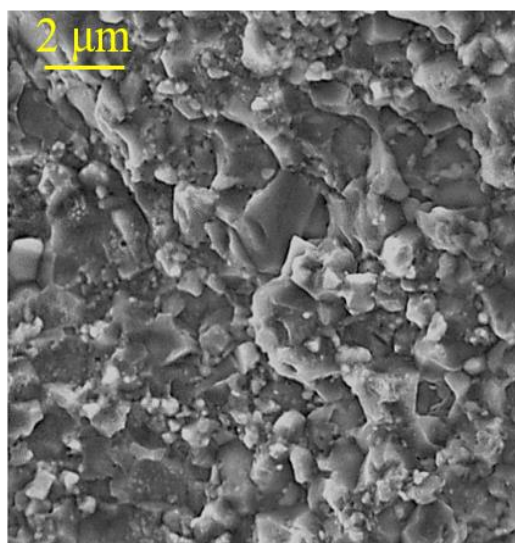
формируемый в результате алмазного шлифования, принято характеризовать параметрами шероховатости и волнистости, а также морфологическим рисунком, которые носят во многом случайный характер.

По сути в результате алмазной заточки на поверхности спеченной керамической заготовки формируется новый поверхностный слой от состояния и свойств которого во многом будет зависеть работоспособность КИ в процессе эксплуатации. На Рисунке 1.19 представлены полученные в рамках диссертационной работы SEM-изображения ПС керамики после спекания и после алмазного шлифования.

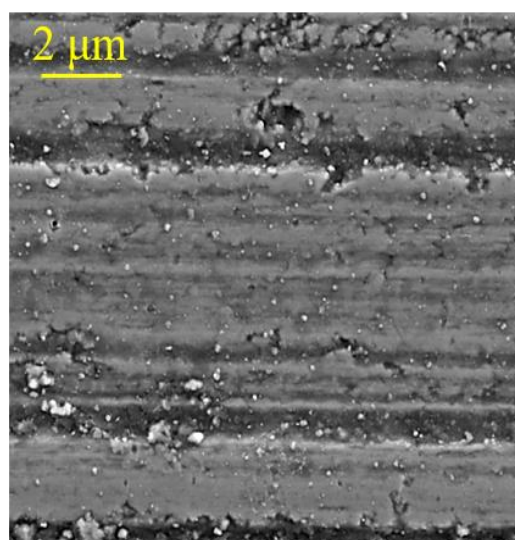
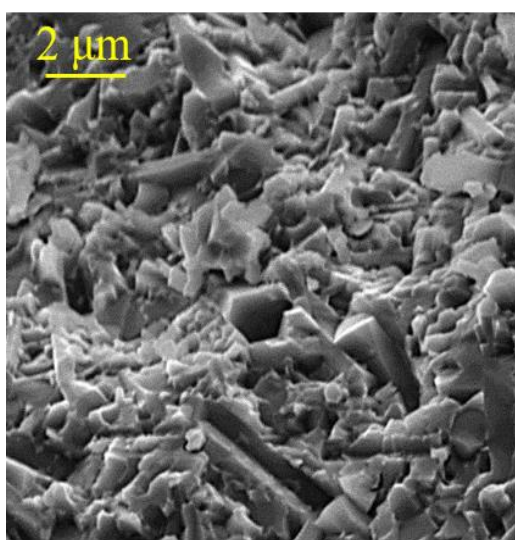
Представленные результаты хорошо иллюстрируют изменения микроструктуры поверхностного слоя передней поверхности спеченных заготовок из различных инструментальных керамик, происходящие в процессе алмазной заточки в условиях современного массового производства. Видно, что сформированный слой изобилует многочисленными технологическими дефектами.

На Рисунке 1.20 приведены SEM-изображения рабочих участков различных видов промышленно выпускаемого КИ. Установлено, что не только на передней и задней рабочих поверхностях обнаруживаются многочисленные дефекты, но и на упрочняющей фаске, а также на линии пересечения двух рабочих поверхностей (режущей кромке) в виде областей локального разрушения и даже сколов (последнее особенно выражено у керамических фрез). Дефекты на линии пересечения поверхностей проявляются через эффект «подрывания» граничных зерен керамического материала, слабо удерживаемых на линии пересечения. Отмеченное представляет особую опасность, так как резко повышает вероятность хрупкого разрушения контактных площадок КИ при воздействии интенсивных теплосиловых нагрузок в процессе резания.

Исследования, представленные в работе [96], на примере изучения состояния режущих концевых керамических фрез из SiAlON, формируемых при различных условиях шлифования, показывают, что наличие дефектов на режущих кромках фрез в виде микросколов способствует прогрессирующим неравномерным вырывам и интенсивному изнашиванию КИ при эксплуатации.



а)



б)

*микроструктура
спеченной керамики*

*микроструктура поверхностного
слоя шлифованной керамики*

Рисунок 1.19 – SEM-изображения, иллюстрирующие изменения микроструктуры поверхностного слоя спеченных керамических заготовок из различных материалов, происходящие в процессе алмазной заточки: а) – $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$; б) – Si_3N_4

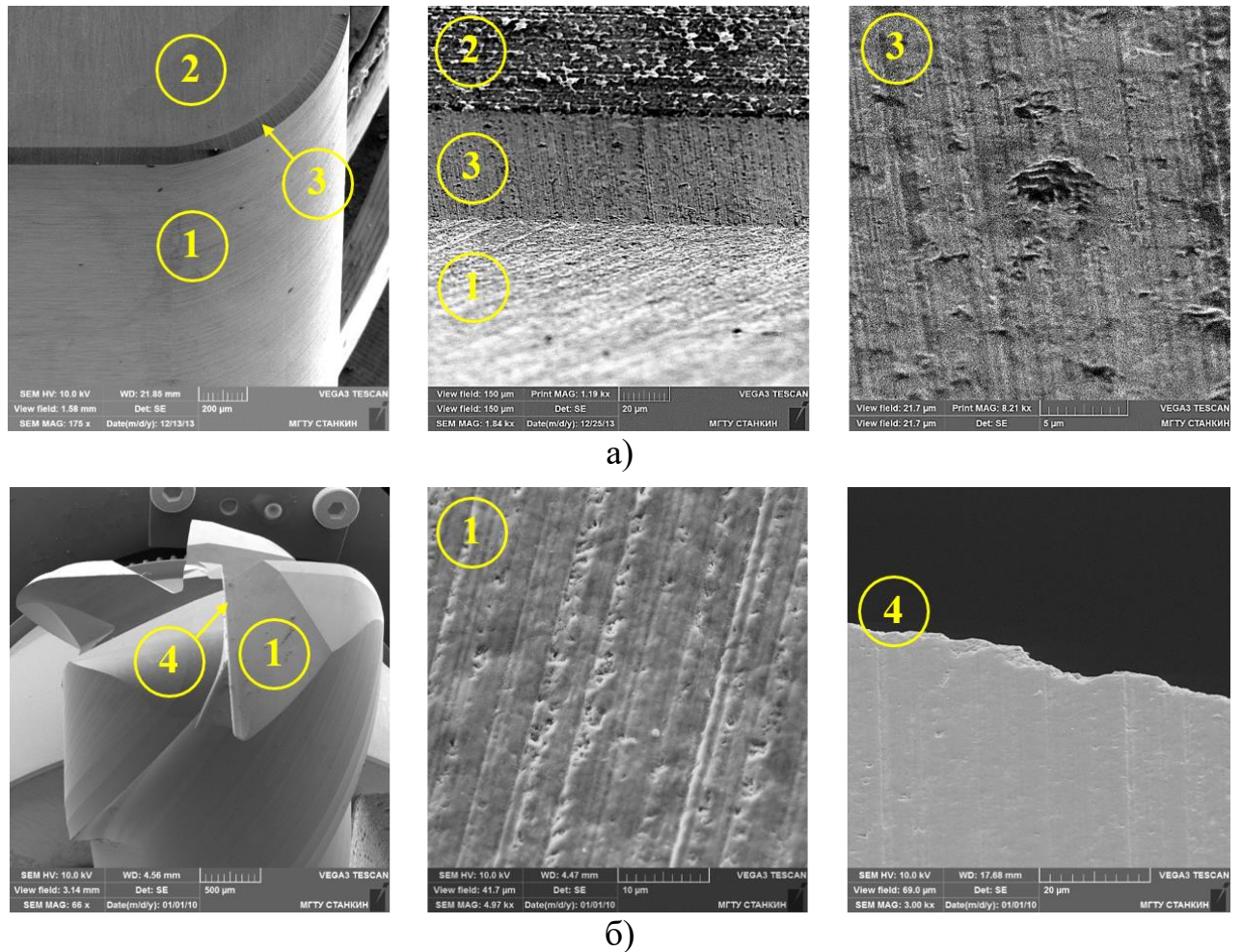


Рисунок 1.20 – SEM-изображения рабочих поверхностей (1 – задняя поверхность, 2 – передняя поверхность, 3 – упрочняющая фаска, 4 – режущая кромка) различных видов промышленно выпускаемого КИ: а) – квадратные СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$; б) – концевые керамические фрезы из SiAlON

В работе [97] на примере различных керамик всесторонне изучено влияние условий шлифования на величину областей локального разрушения, формируемых на кромках. Показано, что с увеличением зернистости алмазного круга заметно увеличивается размер и число этих дефектов. В частности, для керамики на основе Al_2O_3 увеличение среднего размера зерна с 18 мкм до 75 мкм увеличивает ширину участка возможного разрушения с 6 до 63 мкм. Кроме того, установлено, что появление областей локального разрушения негативно влияет на объемную прочность керамических образцов, которая заметно снижается.

В дополнение к сканирующей электронной микроскопии для комплексного изучения морфологии ПС керамического инструмента и его дефектности,

формируемых в процессе алмазной заточки, эффективным инструментарием является использование 3D-профилометрии. На Рисунке 1.21 представлены характерные профилограммы ПС СМКП из материала SiAlON, в настоящее время промышленно выпускаемых компанией Kennametal.

Представленные профилограммы получены в результате исследований СМКП на стилусном профилометре Dektak XT, осуществляющем комплекс электромеханических измерений посредством контактного сканирования необходимого участка поверхности алмазным наконечником с заданной скоростью перемещения. Специализированное ПО на основе результатов измерений осуществляет обработку информации, визуализацию и построение необходимых профилограмм. Указанное оборудование также использовалось в дальнейших исследованиях в рамках диссертационной работы.

Процесс формирования морфологии поверхности КИ при шлифовании усложняется случайным характером формы и расположения зерен в алмазном круге. Дополнительное воздействие оказывает трение между обрабатываемой поверхностью и связкой круга, а также многократные циклы нагрева и охлаждения локальных объемов керамики.

Классическими работами по теории трения и изнашивания доказано, что на протекание процессов контактного взаимодействия контртел сильно влияет морфология поверхности [98, 99]. Однако достоверно определить количественные показатели взаимосвязи состояния шлифованной поверхности с контактными характеристиками КИ не представляется возможным из-за многообразия морфологических рисунков и разнородности поверхностных дефектов, а также весьма сложной физической природы этой взаимосвязи. Использование для этих целей математического моделирования на базе распространенного метода конечных элементов предусматривает многочисленные допущения [25, 100–102].

Поэтому определение степени соответствия построенных моделей реальным КИ и теплосиловым нагрузкам, воздействующим на ПС в процессе резания, как правило, показывает невысокий уровень валидации, что минимизирует

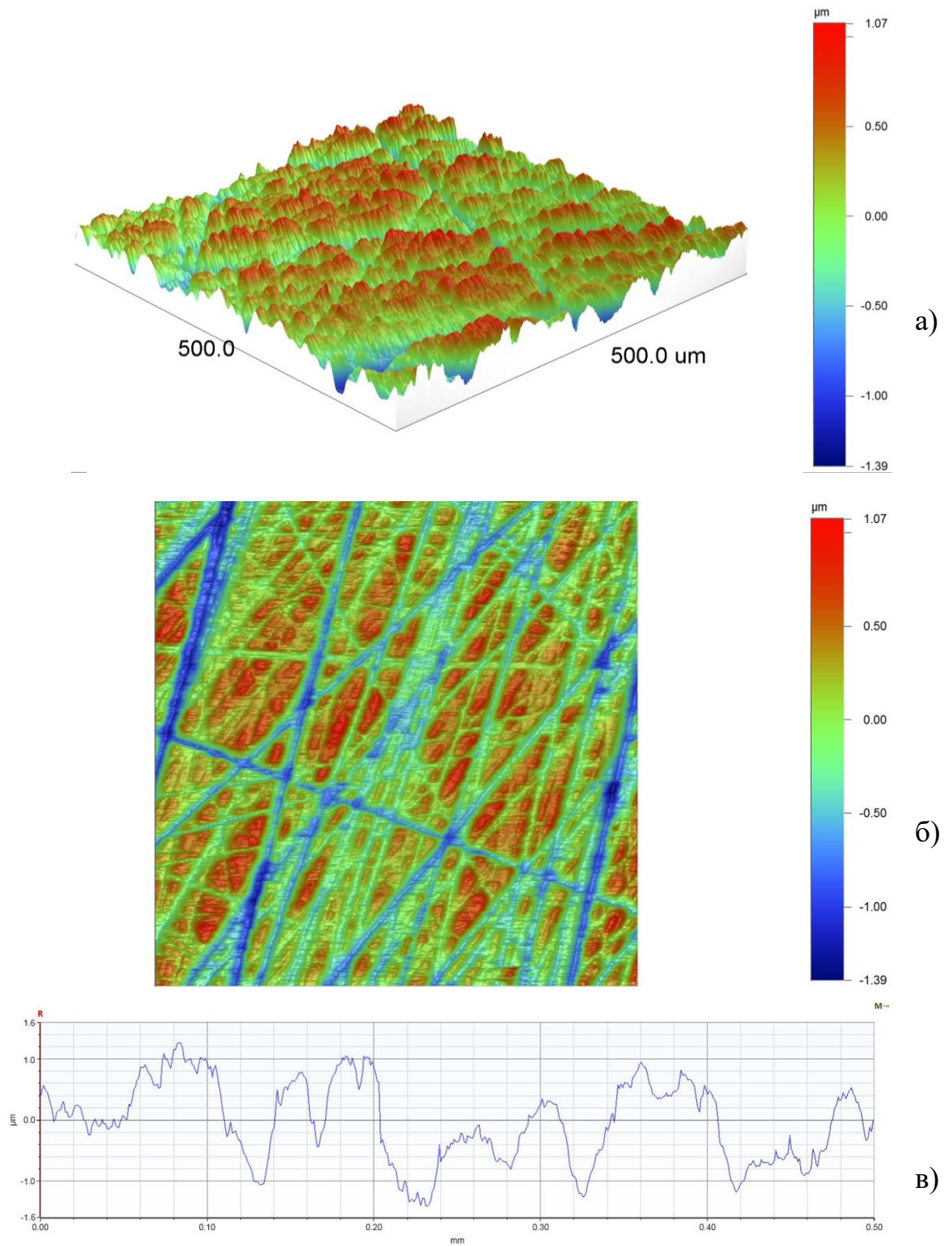


Рисунок 1.21 – Профилограммы поверхностного слоя СМКП из материала SiAlON: а) – 3D профилограмма; б) – вид сверху; в) – профиль поверхности по оси OX

практическую ценность математических моделей. На сегодняшний день отсутствуют работы, в которых был бы предложен системный подход к исследованию и оценке влияния степени дефектности ПС, формируемого в при алмазной заточке, на изнашивание КИ при воздействии теплосиловых нагрузок в процессе резания.

Для решения проблемы минимизации дефектности ПС изделий, изготавливаемых из различных керамик, сформировалось отдельное научное направление, связанное с совершенствованием и оптимизацией процесса алмазного шлифования, в рамках которого работали и продолжают исследовательскую деятельность многочисленные авторитетные ученые как в России [22, 25, 106–109], так и за рубежом [93–97, 103–105]. В результате многолетних исследований были получены фундаментальные результаты, устанавливающие закономерности и взаимосвязи влияния режимов шлифования, характеристик шлифовальных кругов и других условий алмазной заточки керамических изделий на состояние их ПС (шероховатость, волнистость, трещиностойкость и др.) и производительность процесса механообработки. Предложено множество технических и технологических решений, а также производственных рекомендаций для обеспечения формирования при алмазном шлифовании ПС с улучшенными характеристиками [110–115]. Одним из распространенных подходов, предлагаемых авторами для снижения толщины дефектного слоя, образующегося на поверхности керамики в процессе алмазного шлифования, является использование полирования в качестве финишной операции в технологическом цикле изготовления керамических изделий.

Несмотря на известные результаты многолетних исследований, используемые в настоящее время в инструментальной промышленности технологические подходы к изготовлению КИ не обеспечивают получение «бездефектных» изделий (отмеченное относится к инструментам как отечественного, так и зарубежного производства), поэтому основной областью их производственного применения уже долгие годы остаются операции высокоскоростной токарной обработки с малыми толщинами среза. В отличие от

изделий ракетнокосмической техники и авиации, изготавливаемых из технической керамики, к эксплуатационной надежности которых предъявляются максимально жесткие требования и для формообразования которых могут использоваться самые прогрессивные и дорогостоящие технологии изготовления, после окончательной обработки КИ в них присутствуют многочисленные поверхностные дефекты, которые закладываются в процессе алмазной заточки. Сменные многогранные керамические пластины являются быстроизнашиваемыми расходными изделиями массового производства с коротким сроком эксплуатации, поэтому изготовители режущего инструмента для обеспечения высокой рентабельности производства при использовании дорогостоящего многокоординатного шлифовального оборудования осуществляют алмазную заточку на высокопроизводительных режимах. С технико-экономической точки зрения невозможно использовать в условиях массового производства инструмента полировку как финишную операцию в технологическом цикле изготовления различных видов КИ, конструкция которых вызывает необходимость обработки передних и задних рабочих поверхностей, а также режущей части, содержащей фаски и кромки.

Изготовление СМКП в России и за рубежом регламентируется национальными и международными стандартами, а также внутренними регламентами инструментальных предприятий-изготовителей – ГОСТ 25003-81. Пластины режущие сменные многогранные керамические [116], ISO 9361-1-2014, 9361-2-2011. Indexable inserts for cutting tools - Ceramic inserts with rounded corners - Part 1, Part 2 [117, 118].

Международные стандарты четко формулирует требования к конструкторско-геометрическим параметрам (КГП) СМКП, однако не нормируют вопросы дефектности поверхностного слоя инструмента. Российский стандарт кроме требований к КГП регламентирует допустимый параметр шероховатости рабочих поверхностей (R_a) – задние и опорные поверхности пластин не должны превышать 0,32 мкм, а фаски режущих кромок – 0,4 мкм.

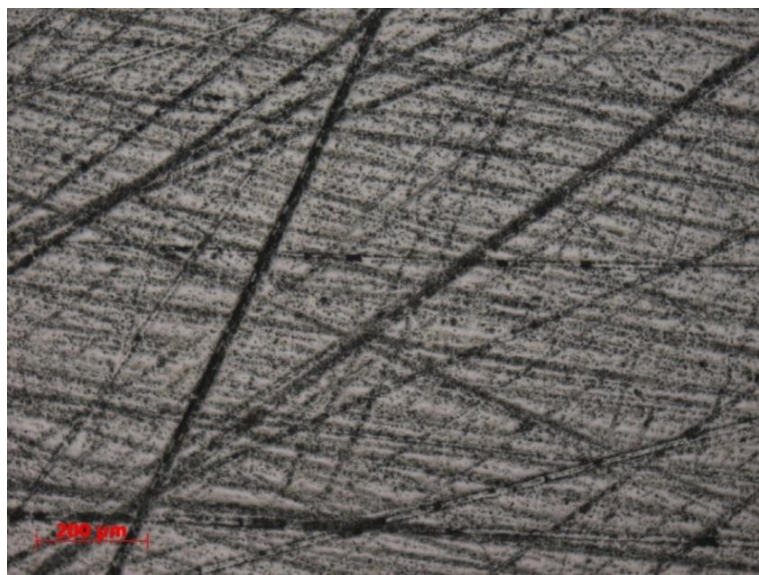
Следует обратить отдельное внимание, что выпускаемый отечественными и зарубежными производителями КИ, имеющий многочисленные дефекты ПС

(Рисунок 1.22, а) по параметру шероховатости рабочих поверхностей не превышает допустимых значений. Отмеченное было экспериментально многократно подтверждено в рамках выполнения настоящей работы при оценке параметра R_a для СМКП из КИМ различного состава, выпускаемого российскими и зарубежными инструментальными предприятиями.

Для оценки состояния ПС в соответствии с национальным стандартом Российской Федерации (ГОСТ Р ИСО 4287-2014) могут использоваться принципиально различные параметры морфологии (структуры) поверхности изделий [118]. При оценке шероховатости ПС по параметру R_a рассчитывают арифметическое среднее абсолютных значений ординаты $Z(x)$ в пределах базовой длины (длины выборки) в направлении оси X образца, используемой для оценки профиля (Рисунок 1.22, б).

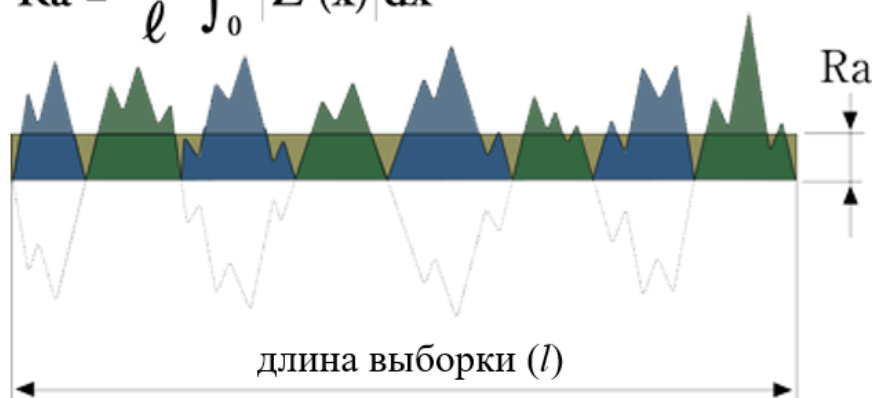
Однако контролируемый в обязательном порядке предприятиями-изготовителями СМКП параметр R_a совершенно неинформативен для оценки степени дефектности ПС, т.к. на значение параметра R_a не оказывают существенного влияния борозды, участки локального разрушения и другие дефекты, в большом количестве присутствующие на поверхностях КИ.

Наиболее информативным параметром, который мог бы использоваться на практике для изучения дефектности слоя КИ, является параметр R_t – общая высота профиля (Рисунок 1.22, в), оцениваемая как сумма наибольшей высоты пика профиля Z_p и наибольшей глубины впадины профиля Z_v в пределах длины оценки (длины оцениваемого участка образца), которая содержит несколько значений длины выборки в направлении оси X , используемой для оценки изучаемого профиля. При таком подходе значение параметра R_t учитывает всевозможные борозды, риски, трещины и другие дефекты, присутствующие в ПС. Значение указанного параметра для СМКП, выпускаемых различными производителями, может достигать до $\sim 4,0$ мкм.



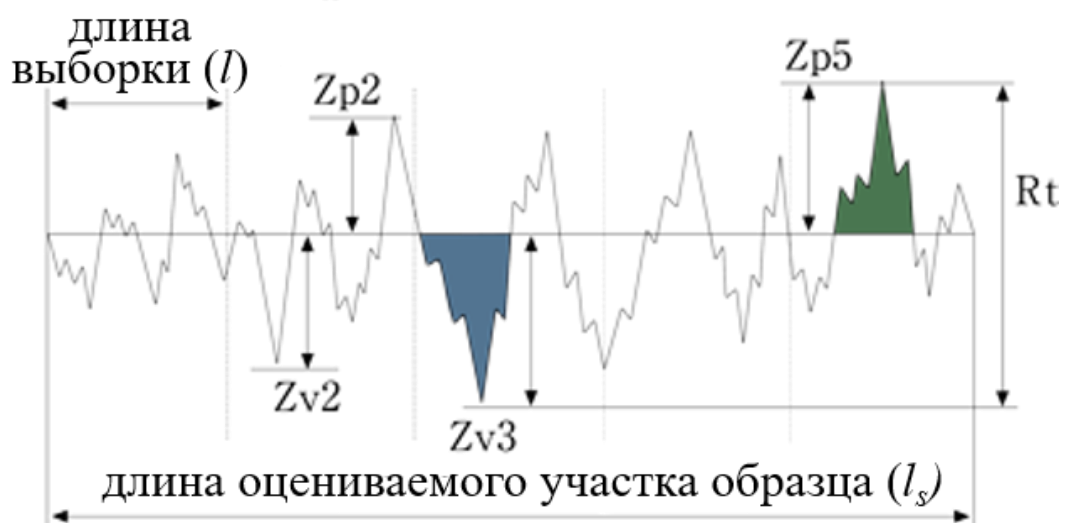
а)

$$R_a = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |Z(x)| dx$$



б)

$$R_t = \max(Z_{pi}) + \max(Z_{vi})$$



в)

Рисунок 1.22 – Оценка поверхностного слоя КИ после алмазной заточки: а) – характерная структура поверхности; б) – оценка шероховатости по параметру R_a ; в) – предлагаемый параметр R_t для оценки глубины дефектного слоя

Предложенный параметр R_t в дальнейшем использовался в рамках настоящей работы для оценки глубины дефектного слоя КИ, сформированного в процессе алмазной заточки.

В условиях инструментального производства при приемочном контроле СМКП в соответствии с ГОСТ 25003-81 должны оцениваться критические дефекты – трещины, сколы и налипания, наличие которых на поверхностях инструмента не допускается. Кроме того, не допускаются выкрашивания на рабочей части режущей кромки и на радиусе при вершине для пластин класса G (шлифованных по опорным и задним поверхностям с более жесткими допусками), а для пластин класса U (шлифованных по опорным и задним поверхностям) допускается наличие по одному очагу выкрашивания на рабочей части режущей кромки и на радиусе при вершине шириной и протяженностью $0,15 \times 0,30$ мм и $0,1 \times 0,2$ мм соответственно.

Требования к инструментарию для контроля указанных дефектов минимальные – визуально оптический контроль посредством инструментального микроскопа. Морфология дефектного ПС КИ, сформированного при алмазной обработке, как было показано выше, очень многообразна и специфична. Ее анализ и оценка возможны только с применением методов электронной микроскопии и профилометрии высокого разрешения, которые используются в исследовательских целях в лабораторных условиях, а в производственных условиях не предусмотрены.

На практике, используемые в производственных условиях подходы к оценке качества КИ, направлены на выявление ярко выраженных (грубых) дефектов, определяемых в результате принятой системы контроля, на основании которого осуществляется отбраковка инструмента. На Рисунке 1.23 приведена иллюстрация характерного грубого производственного дефекта квадратной СМКП в виде скола на передней поверхности, простирающегося на упрочняющую фаску и переходящего на заднюю поверхность.

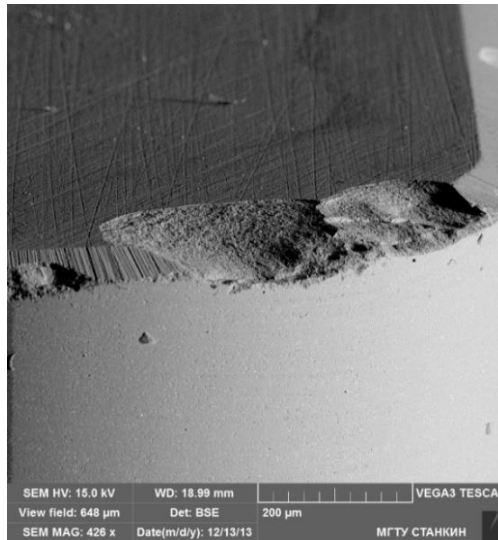


Рисунок 1.23 – Пример выраженного производственного дефекта квадратной СМКП в виде сколов режущей части

Для изделий из керамических инструментальных материалов в производственных условиях действующим стандартом предписано определение плотности, твердости и режущих свойств (при точении). Относительно методов контроля показателей надежности КИ требования не стандартизированы, а инструментальные предприятия-изготовители их регламентируют самостоятельно в соответствии с нормативно-технической документацией на выпускаемый режущий инструмент [116].

Несмотря на большое число известных работ, связанных с изучением состояния ПС керамического инструмента, формируемого в процессе алмазного шлифования, и отмечаемое многочисленными авторами его общего негативного влияния на работоспособность КИ, на сегодняшний день отсутствуют системные исследования, устанавливающие взаимосвязи между уровнем (степенью) дефектности и интенсивностью изнашивания инструмента в процессе резания.

1.5. Целенаправленное воздействие на состояние поверхностного слоя (модификация) керамического инструмента как направление для повышения его эффективности при эксплуатации

Для улучшения состояния ПС КИ, выпускаемого инструментальной промышленностью, и повышения эффективности эксплуатации инструмента при обработке ответственных изделий машиностроения и ОПК, получило развитие отдельное направление инженерии поверхности керамических изделий. Авторитетные научные коллективы и ведущие ученые осуществляют исследования и разработки в области целенаправленного воздействия (модификации) на состояние ПС КИ ионно-плазменными, лучевыми, механическими и комбинированными источниками для улучшения характеристик ПС. Рядом исследователей введен в оборот отдельный термин – «залечивание поверхностных дефектов» инструмента из керамики, который объединяет совокупность технологических подходов, ориентированных на минимизацию дефектов в ПС [1, 46, 120–125].

Достаточно распространенным источником энергетического воздействия на ПС различных керамик является использование лазерного излучения, создающего на малом участке высокую плотность теплового потока, которое приводит к локальному нагреву, расплавлению и испарению материала. В результате указанного воздействия на поверхности КИ формируется слой расплавленного материала, морфология которого зависит от энергетической характеристики лазерного импульса [126, 127].

Автором настоящей диссертационной работы с использованием лазерного воздействия на ПС КИ также создан и запатентован ряд технологических решений. В частности, разработан способ повышения износостойкости режущих пластин из керамики $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ при фрезеровании, включающий выполняемую после операции алмазного шлифования импульсную лазерную модификацию контактных участков керамических пластин при интенсивности излучения $36,7 \text{ Дж/см}^2$, частоте следования импульсов 70 кГц [128]. После импульсной лазерной модификации на поверхность керамических пластин методом плазмохимического газофазного осаждения наносится алмазоподобное покрытие толщиной $2,5\text{--}3,0 \text{ мкм}$ в плазме тлеющего разряда посредством запуска химической реакции и разрядной деструкции газовой смеси. В результате такой обработки улучшаются свойства ПС

оксидно-карбидной керамики, обеспечивается более высокая износостойкость контактных площадок КИ и уменьшаются случаи хрупкого разрушения режущей части керамических пластин при фрезеровании закаленных сталей на увеличенных подачах. Кроме того, был предложен и реализован технологический подход [129], заключающийся в комбинированном воздействии на ПС режущих пластин из керамики SiAlON посредством нанесения на контактные поверхности алмазоподобных покрытий и последующей лазерной модификации участков передней поверхности для получения специфического рельефа. Предложенное комбинированное воздействие на ПС изменяет характер адгезионного и фрикционного взаимодействия контактных площадок инструмента с обрабатываемым материалом, позволяет снизить интенсивность их истирания при токарной обработке жаропрочных никелевых сплавов с увеличенной подачей.

Несмотря на определенные положительные эффекты, которые потенциально могут быть достигнуты лазерным воздействием на ПС КИ, методы лазерной модификации инструментальных керамик пока находятся на уровне лабораторных и опытно-экспериментальных технологий и не рассматриваются как имеющие перспективы для широкого промышленного применения. Связано это со сложностью оптимизации режимов лазерного воздействия, необходимостью их подбора индивидуально для каждого состава керамики. Кроме того, из-за малой теплопроводности керамики после лазерного воздействия на ПС нередко наблюдаются микротрещины. С появлением технологий лазерной модификации, основанных на применении фемтосекундных лазерных импульсов, указанная проблема во многом была решена, так как отличительной особенностью фемтосекундной обработки является локализация воздействия, которая позволяет осуществлять микро- и нанообработку КИМ без повреждения ПС [130]. Однако технологическое оборудование для реализации указанных процессов является очень дорогостоящим и в условиях массового производства не обеспечивает высокую производительность обработки СМКП. Отмеченное значительно ограничивает применение методов лазерной модификации ПС КИ.

Подобных недостатков лишены различные технологии нанесения износостойких покрытий, которые за последние два десятилетия получили повсеместное промышленное распространение в качестве финишной операции в технологическом цикле изготовления режущих инструментов из быстрорежущих сталей и твердых сплавов. Нанесение покрытий является наиболее универсальным, производительным и распространенным технологическим подходом, широко используемым как инструментальными компаниями-производителями режущего инструмента, так и предприятиями машиностроения и ОПК, являющимися потребителями инструмента, и осуществляющими выбор и последующее нанесение функциональных покрытий на рыночный инструмент или инструмент собственного производства исходя из специфических условий его эксплуатации.

Некоторые инструментальные компании (например, Iscar и Sandvik) сегодня осуществляют выпуск СМКП с покрытиями. Относительно эффективности нанесения покрытий на КИ у ученых и специалистов машиностроительных предприятий нет единого мнения. Последние полагают, что формируемые на КИ покрытия, должны обеспечивать количественный эффект, сопоставимый с достигаемым для твердосплавного инструмента, для которого увеличение стойкости за счет покрытий в 2-4 раза по сравнению с базовым инструментом не считается экстраординарным. Нужно учитывать, что используемые для производства инструмента виды керамики на основе Al_2O_3 , Si_3N_4 и $SiAlON$ изначально обладают большей твердостью и меньшим коэффициентом трения, т.е. значениями более близкими к характеристикам функциональных покрытий. С учетом того, что КИ является более дорогим инструментом и эксплуатируется на скоростях резания существенно превышающих соответствующие значения для твердосплавного инструмента, увеличение стойкости КИ в 1,5-2 раза за счет применения функциональных покрытий следует расценивать как значимый результат, способный обеспечить технико-экономический эффект.

Еще одной существенной особенностью покрытий, формируемых на КИ, является их рациональная толщина. Если для быстрорежущей стали и твердого

сплава оптимальное значение обычно составляет 6,0-7,0 мкм, то для КИ, как было установлено в настоящей работе, предельная толщина наносимых покрытий составляет не более 4,0 мкм. При ее увеличении невозможно обеспечить высокую прочность адгезионной связи покрытий с керамическими подложками и наблюдаются их отслоение даже при незначительных внешних нагрузках.

Авторами работ [131, 132] исследовано влияние нанесения покрытий (TiAl)N и (CrAl)N толщиной 1,6-2,2 мкм методом вакуумно-дугового испарения на стойкость круглых СМКП из материала Si_3N_4 при точении чугуна марки HT250 твердостью 209 НВ (российский аналог СЧ25). Лабораторные испытания выполнялись при подаче 0,1 мм/об, глубине резания 0,5 мм и скорости резания, изменяемой в диапазоне 200, 300 и 400 м/мин (в качестве критерия отказа принят износ по задней поверхности 0,3 мм). Установлено, что при увеличении скорости резания с 200 до 400 м/мин резко снижается средняя стойкость инструмента СМКП – без покрытия на 60% (до 2 мин), а с покрытием (TiAl)N на 49% (до 4 мин). Для СМКП с покрытием (CrAl)N наблюдался большой очаг разрушения со сколом режущей части, что объясняется авторами пониженной прочностью адгезионной связи покрытия с керамической подложкой. При скоростях резания 200 и 300 м/мин нанесение покрытий (TiAl)N и (CrAl)N обеспечило увеличение стойкости в 1,7-1,9 раза.

Исследованиями авторов [133] изучено влияние нанесения двухслойного покрытия (TiAl)N/(AlCr)O общей толщиной 2,5 мкм на работоспособность СМКП круглой формы из материала Si_3N_4 при точении серого чугуна HT250 и закаленной стали AISI 4340 твердостью 52 HRC (российский аналог 40ХН2МА) при скорости резания 150 м/мин, подаче 0,1 мм/об и глубине резания 0,5 мм (в качестве критерия отказа принят износ по задней поверхности 0,3 мм). Нанесением указанного покрытия было достигнуто многократное увеличение (более чем в 3 раза) средней стойкости КИ как при обработке чугуна, так и в случае обработки закаленной стали.

В работе [134] представлены исследования влияния нанесения вакуумно-плазменных покрытий TiN толщиной 1 мкм на шероховатость обработанной

поверхности при точении СМКП ромбической формы с отверстием из материала $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiCN}$ закаленной хромомолибденовой стали AISI 4140 твердостью 52 HRC (российский аналог 42ХФА) в широком диапазоне режимов резания: скоростях резания 100, 170 и 240 м/мин, подачах 0,05, 0,10 и 0,15 мм/об и глубине 0,1, 0,2 и 0,3 мм. Дисперсионный анализ ANOVA, выполненный авторами, показал, что скорость резания является доминирующим параметром, влияющим на износ задней поверхности СМКП в процессе резания. Влияние подачи оказывает менее значимое влияние (ее вклад 27%), а вклад глубины резания незначителен (14,12%). На шероховатость обработанной поверхности главным образом влияет подача, а глубина резания оказывает незначительное влияние. Увеличение скорости резания значительно увеличивает износ задней поверхности и снижает чистоту (по параметру Ra) обработанной поверхности заготовки.

Влияние покрытий TiN на работоспособность КИ также рассмотрено авторами работы [135] на примере точения закаленной стали AISI 52100 (российский аналог ШХ15) твердостью 63 HRC СМКП треугольной формы с отверстием из материала $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiCN}$. Наиболее важные результаты, по мнению авторов, заключаются в том, что покрытие TiN в широком диапазоне режимов резания значительно повысило (до 3 раз) среднюю стойкость КИ, а также минимизировало число сколов на рабочих поверхностях СМКП. Однако полученные авторами результаты нельзя считать репрезентативными, так как в качестве критерия отказа в экспериментах были приняты размеры кратера (лунки) износа на передней поверхности СМКП, а выход из работоспособного состояния инструмента в рассматриваемых условиях резания происходит однозначно из-за достижения фаски износа по задней поверхности предельного значения.

В представленных в работе [136] исследованиях, изучается влияние покрытий TiN на работоспособность квадратных СМКП с отверстием из материала $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ при точении закаленной инструментальной штамповой стали AISI D3 твердостью 63 HRC (российский аналог X12). Установлено, что при скорости резания 150 м/мин, подаче 0,08 мм/об и глубине резания 0,2 мм формирование покрытия оказывает небольшое влияние на среднюю стойкость КИ, которая по

результатам лабораторных испытаний была увеличена в 1,27 раза (при принятом критерии отказа – фаске износа по задней поверхности 0,3 мм).

Авторами работы [137] выполнены комплексные исследования по оценке влияния покрытий различных архитектур и составов – TiN, TiN+(TiAlSi)N+TiN, TiN+(TiAlSi)N+(AlSiTi)N и (TiAl)N, сформированных методом физического вакуумно-плазменного осаждения, и покрытий TiCN+TiN и Al₂O₃+TiN, сформированных методом химического газофазного осаждения, на работоспособность СМКП из материала Al₂O₃+TiC при точении серого чугуна SL-25 твердостью 250 НВ (русский аналог СЧ25). Лабораторные испытания проводились при скорости резания 200 м/мин, подаче 0,15 мм/об и глубине резания 2,0 мм, а в качестве критерия отказа был принят износ по задней поверхности 0,2 мм. Установлено, что средняя стойкость КИ в зависимости от состава сформированного покрытия была увеличена в 1,2-1,5 раза, а максимальный эффект был достигнут нанесением покрытия (TiAl)N, которое при этом продемонстрировало наилучшую прочность адгезионной связи с керамической подложкой.

К сожалению, большинство известных работ, связанных с исследованием влияния различных покрытий на работоспособность КИ, направлены на изучение характера изнашивания рабочих поверхностей, оценку влияния сформированных покрытий на среднюю стойкость инструмента, а также на шероховатость поверхностного слоя обрабатываемой детали. Лишь небольшое количество исследований затрагивает вопросы качества осаждаемых покрытий с учетом состояния ПС КИ, сформированного в процессе алмазной заточки.

Например, в исследовании [138] приведены экспериментальные результаты оценки влияния нанесения покрытий (AlTi)N и их толщины (2,0...4,0 мкм) на работоспособность квадратных СМКП с отверстием из материала Al₂O₃+TiCN при точении закаленной стали AISI 52100 твердостью 62 HRC при скорости резания 189 м/мин, подаче 0,12 мм/об и глубине 0,5 мм. Для оценки работоспособности СМКП использовалась методика экспресс-испытаний в течении 120 сек. Как отмечено авторами работы, осаждение покрытия (AlTi)N на СМКП привело к

заметному снижению средней температуры в зоне резания, а в процессе резания нанесение покрытия обеспечило снижение износа по задней поверхности в 1,3-2,0 раза. Данный результат нельзя считать убедительным, т.к. установленное время резания 120 сек – это по сути лишь этап приработки КИ. При этом, авторы обращают внимание на важный аспект – они отмечают пониженную прочность адгезионной связи покрытий с керамической подложкой, которая уменьшается с увеличением толщины покрытия, и наблюдающиеся очаги отслоения покрытий при нагрузках, возникающих в процессе резания.

Если изучить микроструктуру шлифованных СМКП (Рисунок 1.24, а), используемых авторами [138] в экспериментах, то в ПС можно увидеть многочисленные дефекты в виде глубоких борозд и вырванных зерен. Последующее нанесение покрытий (AlTi)N толщиной до 4,0 мкм не способно «залечить» многочисленные дефекты, которые можно различить уже на поверхности покрытий (Рисунок 1.24, б).

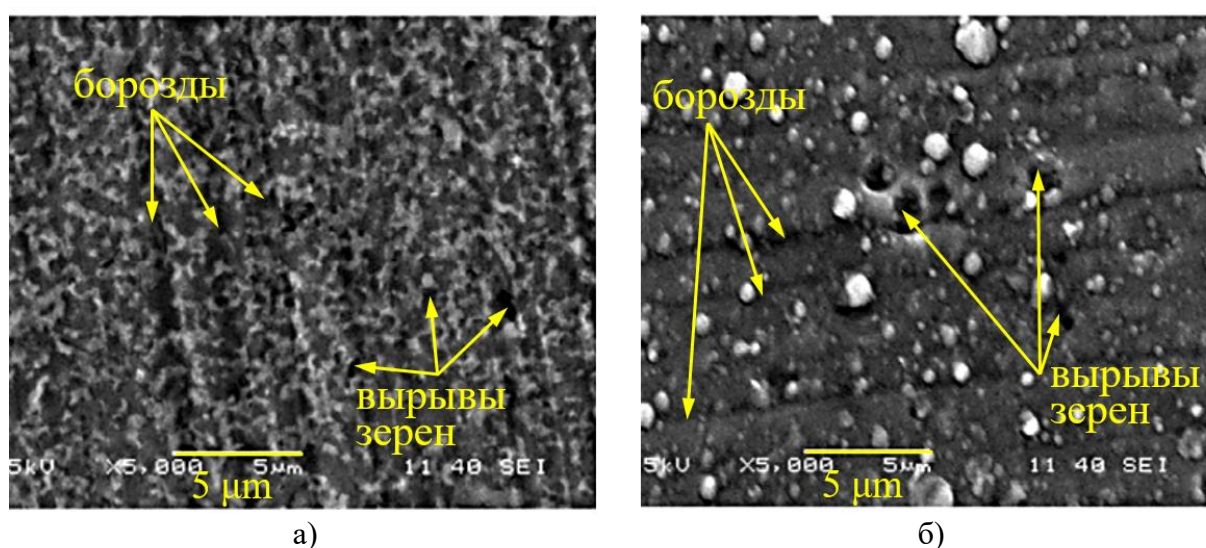


Рисунок 1.24 – SEM-изображения микроструктуры ПС СМКМ из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiCN}$: а) – после алмазного шлифования; б) – после нанесения покрытия (AlTi)N

Схожие микроструктуры можно наблюдать в работе [139], авторы которой изучали влияние вакуумно-плазменных покрытий (AlCr)N на характер изнашивания квадратных СМКП из материала $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{CeO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ при точении серого чугуна (Рисунок 1.25). На 3D-профилограммах ПС СМКП хорошо заметен дефектный слой, сформированный при алмазной заточке (Рисунок 1.25, а), который

даже после нанесения покрытия удастся лишь незначительно минимизировать (Рисунок 1.25, б).

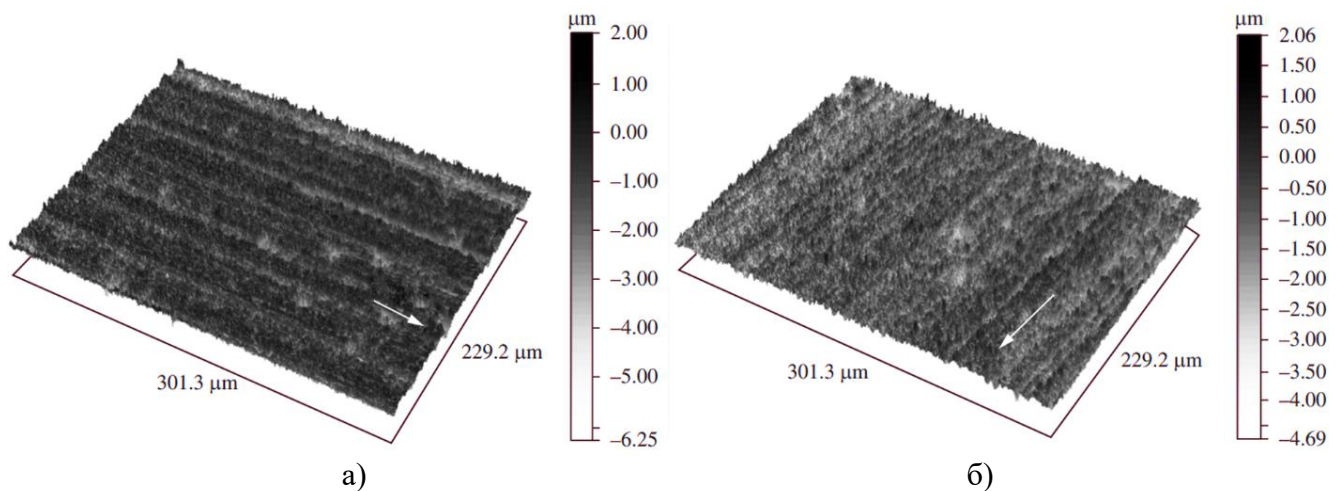


Рисунок 1.25 – 3D-профилограммы ПС СМКМ из $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{CeO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$: а) – после алмазного шлифования; б) – после нанесения покрытия (AlCr)N

Авторы работы [140], изучавшие влияние осаждения различных вакуумно-плазменных покрытий на характеристики инструментальной керамики на базе SiAlON при воздействии внешних нагрузок, делают особый акцент на том, что эксплуатационные свойства керамической подложки с покрытиями зависят в основном от их адгезии к подложке. В частности, в работе анализируется очень характерная микроструктура наиболее распространенного покрытия (TiAl)N толщиной порядка 3,0 мкм, осажденного на шлифованную подложку из SiAlON, имеющую характерные для операций алмазного шлифования дефекты (Рисунок 1.26). Можно увидеть, что сформированное покрытие практически копирует дефектный рельеф шлифованной подложки. Из-за пониженной прочности адгезионной связи даже без приложения высоких внешних нагрузок наблюдаются очаги отслоения тонкого покрытия.

В настоящей диссертационной работе были проведены комплексные исследования влияния состояния ПС на морфологию формируемых вакуумно-плазменных покрытий на основе однокомпонентных TiN, AlN и многокомпонентных нитридов (TiAl)N, (TiZr)N, (CrAlSi)N, (TiAlCr)N и прочность

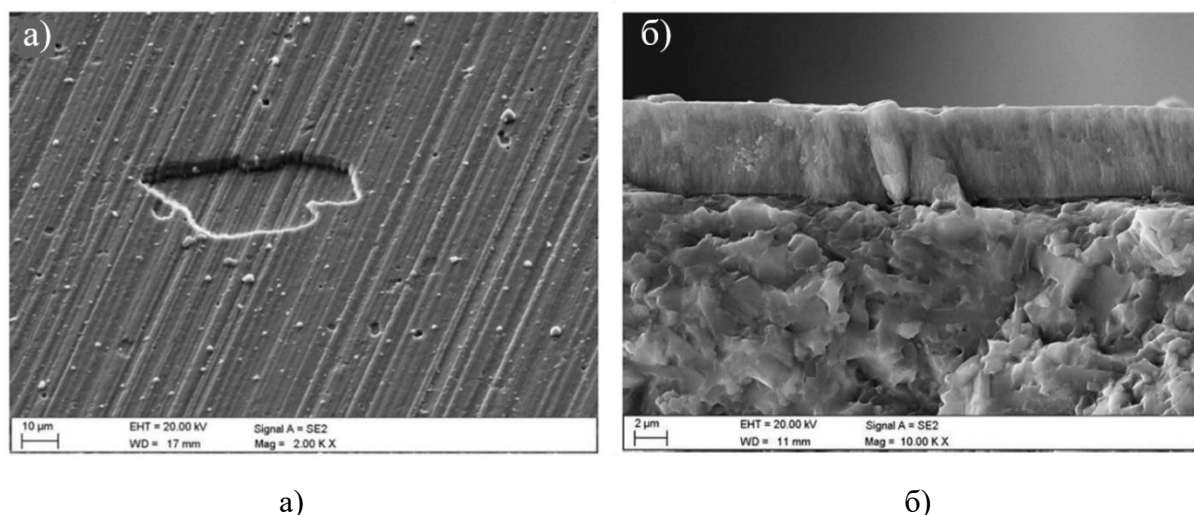


Рисунок 1.26 – SEM-изображения образца из SiAlON с нанесенным вакуумно-плазменным покрытием (TiAl)N: а) – микроструктура ПС; б) – поперечное сечение

их адгезионной связи с керамическими подложками. На Рисунке 1.27 приведены характерные профилограммы ПС СМКП из материала SiAlON, в настоящее время промышленно выпускаемых компанией TaeguTec с различными вариантами вакуумно-плазменных нитридных покрытий толщиной $\sim 3,0$ мкм. Представленные профилограммы показывают, что покрытие (CrAlSi)N практически копирует морфологический рисунок дефектного ПС шлифованной СМКП, а покрытие (TiAl)N некоторым образом видоизменяет его. Количественная оценка ПС по параметру R_t позволила установить, что (TiAl)N на 30-35% уменьшило его величину, а покрытие (CrAlSi)N – на 10-15%.

Оценка прочности адгезионной связи сформированных покрытий с керамическими подложками методом склерометрии с фиксацией спектра сигналов акустической эмиссии (Рисунок 1.28) на скрейтчтестере NANOVEA M1, выполненная в рамках настоящей работы, показала, что покрытия (TiAl)N и (CrAlSi)N отслаиваются при сравнительно небольших нагрузках – 31 Н и 29 Н соответственно (очень близкие значения были получены авторами работы [132]). Это чрезвычайно важное наблюдение, понимание причин которого во многом может объяснить недостаточную эффективность покрытий при их нанесении на КИ, имеющие многочисленные дефекты ПС.

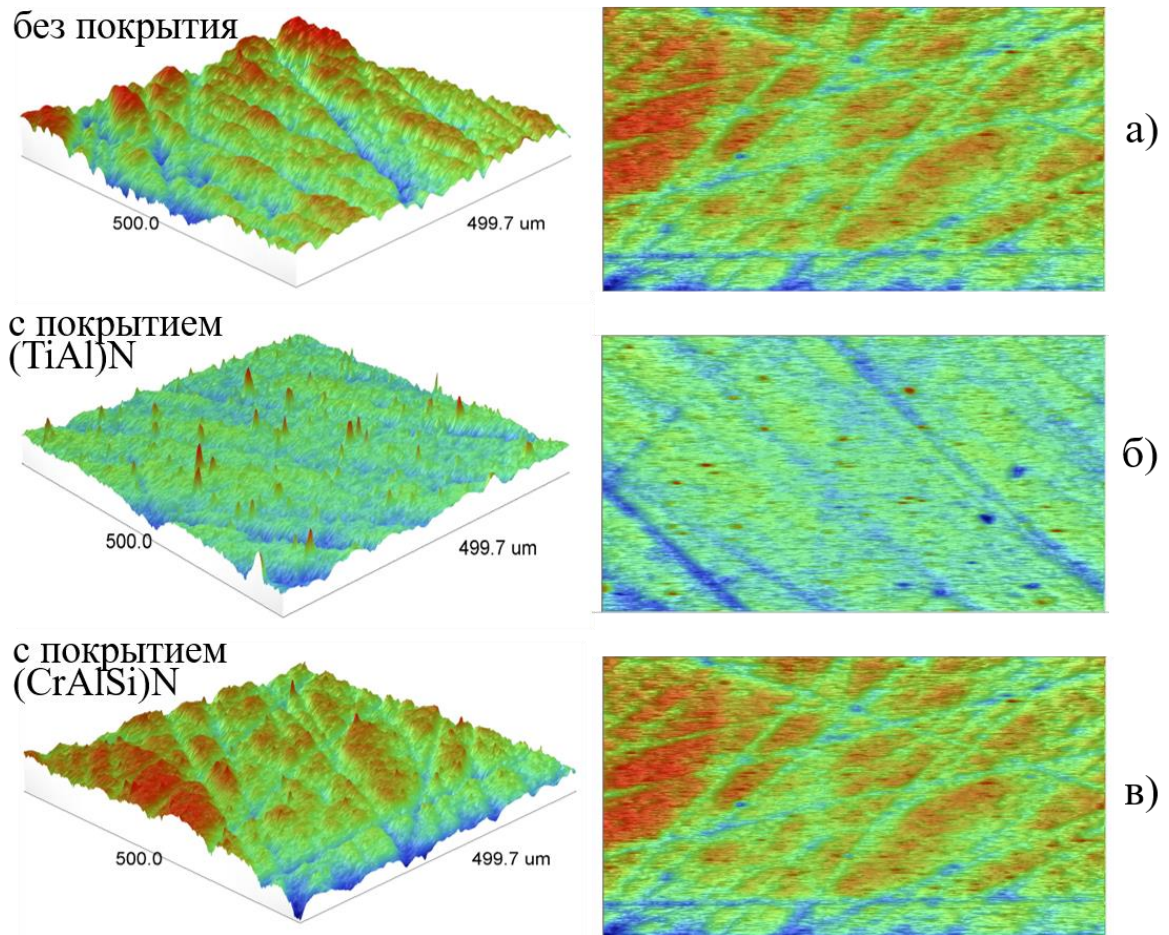


Рисунок 1.27 – 3D-профилограммы поверхностного слоя CMKP из материала SiAlON:
 а) – исходное состояние после алмазной заточки; б) – после нанесения покрытия (TiAl)N;
 в) – после нанесения покрытия (CrAlSi)N

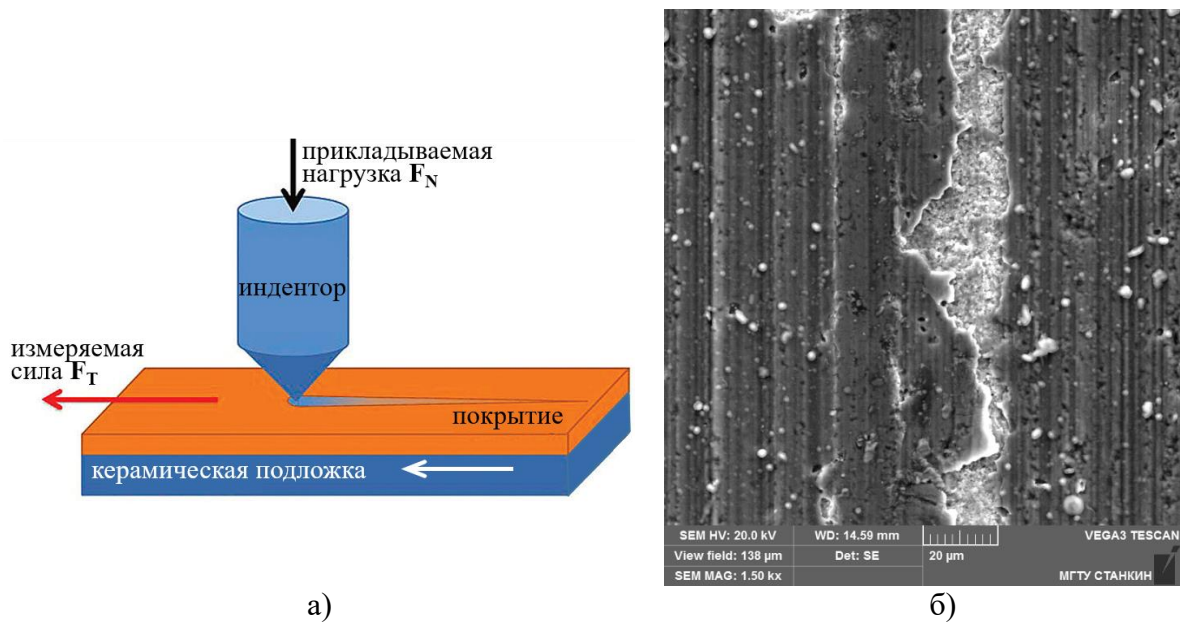


Рисунок 1.28 – Оценка прочности адгезионной связи нитридных покрытий с керамическими подложками методом склерометрии: а) – схема метода; б) – характер разрушения покрытия (CrAlSi)N при внешней нагрузке

Известно [141], что прочность адгезионной связи покрытий с подложкой во многом зависит от наличия и числа связей между контактирующими телами, а также определяется площадью фактического контакта между покрытием и подложкой, которая снижается при наличии многочисленных борозд и вырванных зерен на поверхности подложки. Кроме того, наличие на инструментальной подложке различных дефектов при осаждении тонких вакуумно-плазменных покрытий способствует формированию регулярных дефектов их роста в виде пористости и деформации кристаллитов [142].

Микродефекты на керамической подложке могут привести к разориентации осей растущих кристаллитов, а высокая плотность микронеровностей приводит к формированию большого объема пористости вблизи границы раздела «покрытие-подложка». Повышенная дефектность ПС подложки, сформированная при алмазном шлифовании, способствует формированию в покрытии высоких внутренних напряжений, которые при воздействии теплосиловых нагрузок в процессе резания могут привести как к небольшим, так и значительным очагам отслоения. Иными словами, дефектная керамическая подложка способствует формированию дефектных покрытий.

В качестве наглядного подтверждения сказанному, можно рассмотреть результаты, полученные в настоящей диссертационной работе, по нанесению в идентичных условиях покрытий AlN толщиной $\sim 3,0$ мкм методом магнетронного распыления в тлеющем разряде на СМКП из материала Si_3N_4 , подвергнутых алмазному шлифованию в производственных условиях (Рисунок 1.29, а), и на те же самые образцы СМКП, но прошедшие дополнительные доводку и полировку (Рисунок 1.29, б). Можно сделать вывод, что состояние ПС СМКП существенно влияет на процесс роста покрытия AlN и его конечную микроструктуру – при осаждении на дефектную керамическую подложку формируется пленка, отличающаяся пористостью и несплошностью, в то время как в микроструктуре пленки, сформированной на полированной подложке, таких выраженных дефектов не наблюдается.

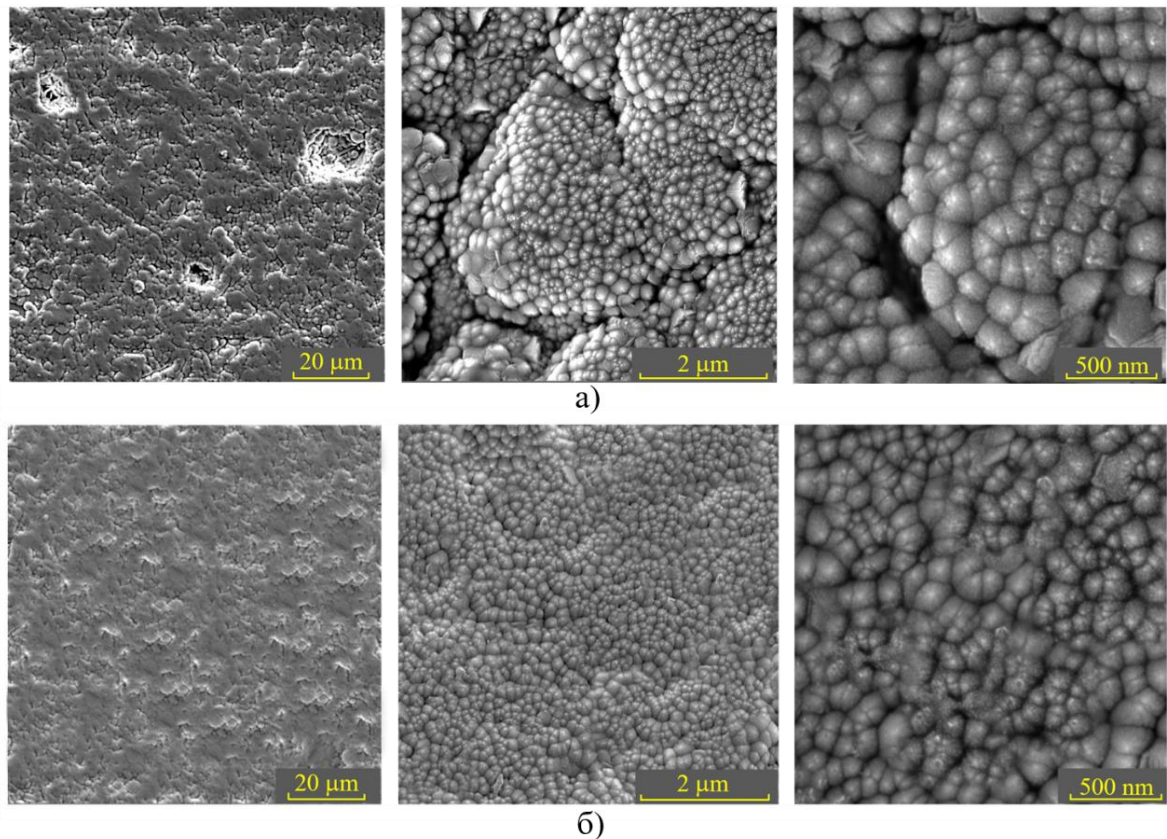


Рисунок 1.29 – SEM-изображения микроструктуры покрытий AlN, сформированных на СМКП из Si_3N_4 с различным состоянием ПС: а) – после алмазного шлифования; б) – после дополнительной доводки и полировки

Однако даже при описанном выше возможном негативном влиянии дефектного ПС на качество формируемых тонкопленочных покрытий, их нанесение на КИ, безусловно, изменяет условия контактного взаимодействия рабочих поверхностей КИ с обрабатываемой заготовкой и сходящей стружкой при резании, результатом которого является установленное различными авторами увеличение средней стойкости при резании. В основе этих изменений, судя по всему, лежат не эффект «залечивания поверхностных дефектов», а процессы, аналогичные тем, которые характерны и всесторонне описаны для твердосплавного инструмента [143–148].

Исследования механизмов изнашивания КИ, выполненные в настоящей диссертационной работе, позволяют сделать вывод, что основной вклад в снижение скорости изнашивания рабочих поверхностей КИ после нанесения покрытия вносит так называемый «краевой эффект» [125].

Указанный механизм наглядно иллюстрируют представленные на Рисунке 1.30 изображения развития в процессе точения при скорости резания 250 м/мин очагов износа на режущей части СМКМ из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ с покрытием $(\text{CrAlSi})\text{N}$ (эксперименты проведены автором диссертационной работы совместно с А.С. Верещакой и А.А. Верещакой).

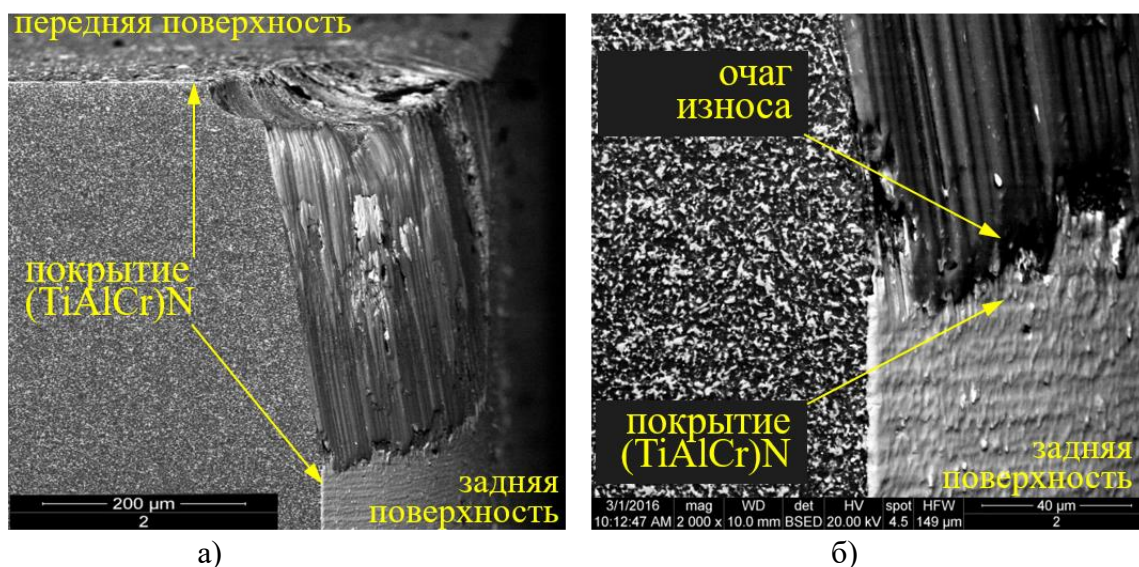


Рисунок 1.30 – SEM-изображения развития очагов износа на режущей части СМКМ из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ с покрытием $(\text{CrAlSi})\text{N}$: а) – на передней и задней поверхностях; б) – на задней поверхности

Видно, что глубина очагов износа в виде лунки на передней и фаски на задней поверхности многократно превышают толщину сформированного покрытия. Уже на стадии приработки покрытие изнашивается (разрушается) и отсутствует непосредственно в зоне контакта поверхностей КИ со сходящей стружкой и обрабатываемой заготовкой. Однако скорость роста очагов износа вдоль передней и задней поверхностей сдерживается краями площадок контакта, на которых сохраняется функциональное покрытие.

При определенной ценности известных результатов в области повышения работоспособности КИ посредством нанесения различных функциональных покрытий, их объединяет узкая постановка решаемых задач, связанная с обеспечением повышения средней стойкости инструмента и снижения шероховатости обработанной поверхности детали. К сожалению, они не решают вопросы, связанные с главной проблемой КИ – низкой эксплуатационной

стабильностью КИ на операциях механообработки. В частности, эксперименты, проведенные в рамках диссертационной работы, в условиях действия циклических нагрузок (при торцевом фрезеровании), показали, что вклад тонкопленочных покрытий при их осаждении на дефектный ПС СМКП в решение указанной проблемы несущественен.

Для оценки влияния нитридных покрытий на надежность (разброс наработки на отказ) КИ были проведены комплексные стойкостные испытания квадратных СМКП из материала Al_2O_3+TiC , которыми были оснащены сборные торцевые фрезы (количество зубьев – 10 штук). Условия испытаний СМКП с покрытиями в точности повторяли проведенные ранее, результаты которых представлены Рисунке 1.14. В качестве состава покрытия был выбран двухкомпонентный нитрид $(TiZr)N$, как продемонстрировавший наилучшие результаты при предварительных испытаниях [125]. На Рисунке 1.31 приведены оптические изображения, иллюстрирующие состояние ПС СМКМ из Al_2O_3+TiC после алмазной заточки и после нанесения покрытия $(TiZr)N$.

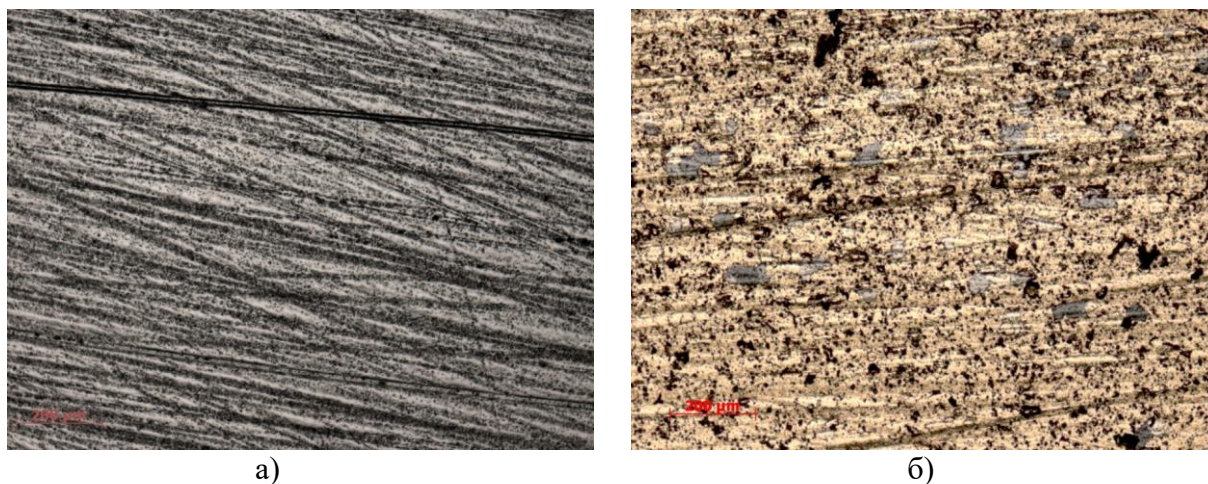


Рисунок 1.31 – Состояние поверхностного слоя СМКМ из Al_2O_3+TiC : а) – после алмазной заточки; б) – после нанесения покрытия $(TiZr)N$

Как и все промышленно выпускаемые пластины, используемые при испытаниях образцы имели выраженные дефекты ПС (Рисунок 1.31, а), которые сохранялись после нанесения покрытия толщиной $\sim 3,7$ мкм (Рисунок 1.31, б).

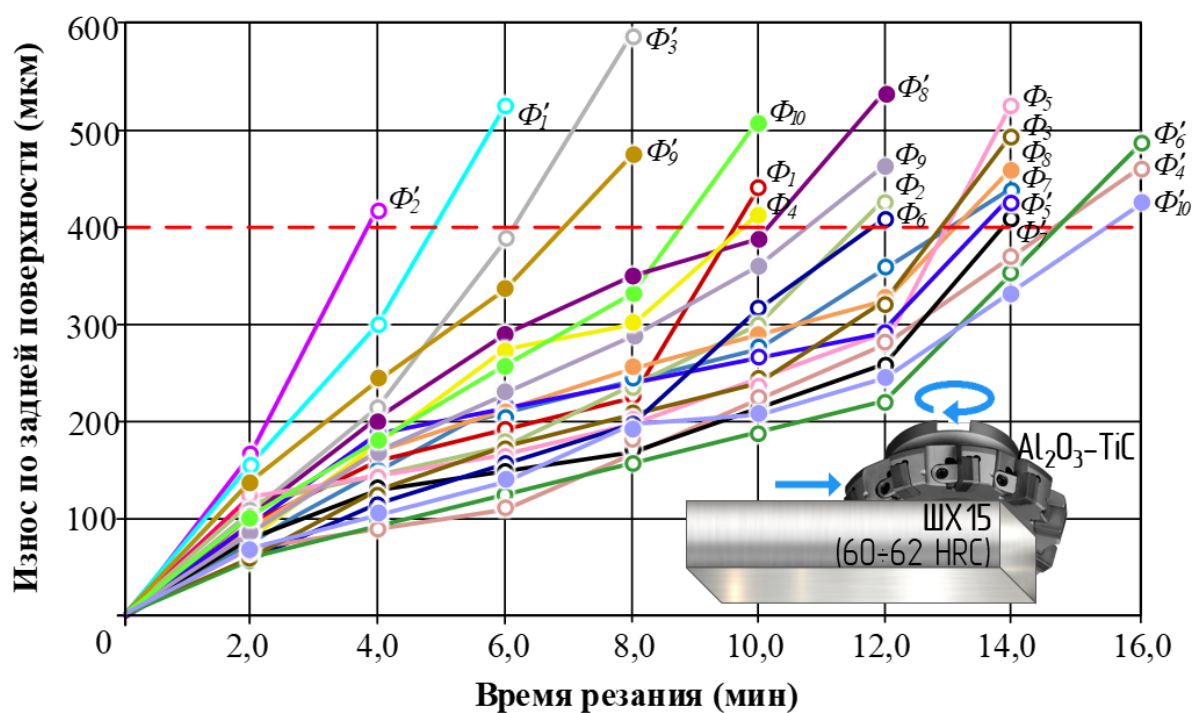
На Рисунке 1.32, а приведены кривые реализаций «износ – время резания», построенные по результатам испытаний 20 граней СМКП из Al_2O_3+TiC с

покрытием (TiZr)N, при фрезеровании закаленной стали ШХ15 при скорости резания 380 м/мин, подаче 0,15 мм/зуб и глубине $t=1$ мм. На Рисунке 1.32, б представлены зависимость средней стойкости СМКП с покрытиями от времени резания и кинетика развития очага износа на задней поверхности.

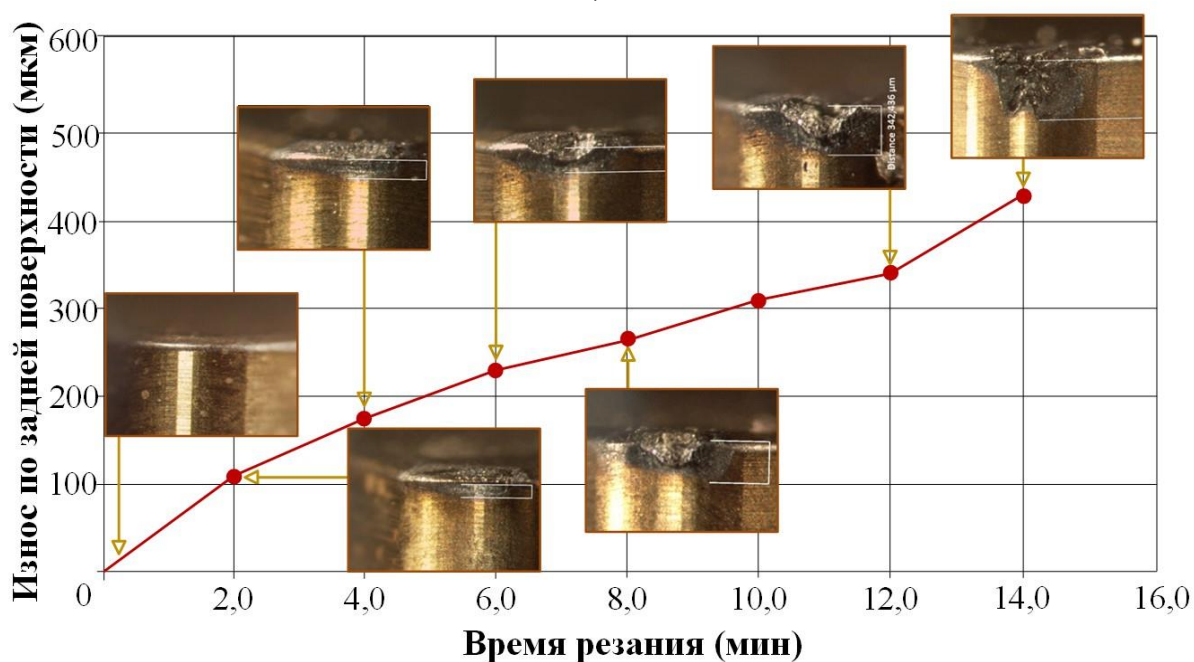
Приведенные экспериментальные данные показывают, что нанесение покрытий практически не повлияло на характер семейства кривых развития износа с течением времени резания, которые так же, как и в случае испытаний инструмента без покрытия (Рисунок 1.14, а), имеют веерообразный характер. Расчет показателя надежности эксплуатации (вариации стойкости $VarT$) показывает, что для двух видов СМКП (без покрытия и с покрытием (TiZr)N) он находится на одинаковом высоком уровне (~30%). Сравнение средней стойкости СМКП до достижения предельного износа по задней поверхности 400 мкм (Рисунок 1.14, б и Рисунок 1.32, б) показывает, что нанесение покрытия увеличивает в 1,4 раза этот показатель (13,2 мин относительно 9 мин).

Однако, как уже было отмечено выше, при веерообразном характере развитии кривых износа во времени, увеличение средней стойкости за счет нанесения покрытий не может расцениваться как значительный эффект, так как при этом не обеспечивается высокая стабильность эксплуатации КИ.

Имеющиеся литературные данные, а также результаты экспериментов, выполненных автором настоящей диссертационной работы, указывают на то, что дефектный слой, сформированный при алмазном шлифовании КИ, во многом ограничивает потенциальные возможности износостойких покрытий. Очевидно, что при высоком уровне дефектности ПС КИ эффект от применения покрытий значительно снижается; все преимущества рассматриваемого подхода к совершенствованию КИ будут нивелироваться традиционными проблемами. При этом основными объектами исследований известных работ, посвященных вопросам нанесения покрытий на КИ, являются главным образом операции точения чугунов и закаленных сталей сборными токарными резцами, оснащенными СМКП на основе КИМ $Al_2O_3+TiC(TiCN)$ и Si_3N_4 .



а)



б)

Рисунок 1.32 – Характер изнашивания СМКП из Al_2O_3+TiC с покрытием $(TiZr)N$ при фрезеровании закаленной стали ШХ15 при $V=380$ м/мин, $S=0,15$ мм/зуб, $t=1$ мм: а) – кривые реализаций «износ – время резания»; б) – усредненная кривая и кинетика развития очага износа режущих граней СМКП при различном времени резания

Практически неизученными остаются операции механообработки с повышенными теплосиловыми нагрузками, в том числе нагрузками циклического характера при фрезеровании, а также процессы резания труднообрабатываемых жаропрочных никелевых сплавов. Возможности использования износостойких покрытий для совершенствования цельных концевых керамических фрез на сегодняшний день остаются вне области исследований российских и зарубежных ученых, что в первую очередь объясняется чрезвычайно высокой стоимостью КИ данного типа, и, как следствие, необходимостью привлечения серьезных затрат на создание гаммы экспериментальных образцов для проведения испытаний (например, рыночная цена за единицу цельной керамической 4-х зубой фрезы диаметром 10,0 мм зарубежного производства превышает 500 Euro). Кроме того, в отличие от твердосплавных, концевые керамических фрезы не подлежат переточке, а для их стойкостных испытаний необходимы многокоординатные высокоскоростные обрабатывающие центры с ЧПУ с высокой стоимостью станкоминуты.

1.6. Выводы

1. Выполненный аналитический обзор показал, что сборный режущий инструмент, оснащенный СМКП, а также появившиеся сравнительно недавно цельные концевые керамические фрезы сегодня являются перспективными видами лезвийного режущего инструмента для решения широкого спектра технологических задач, связанных с высокоскоростной обработкой наиболее ответственных изделий для нужд машиностроения и ОПК – автомобильных компонентов, деталей подшипников и штампового инструмента из закаленных материалов, деталей из жаропрочных никелевых сплавов для авиационных двигателей и др.

2. Проведенный анализ позволил выявить, что специфические особенности разрушения инструментальных керамик, связанные со структурной неоднородностью и присутствующими в ПС дефектами технологической природы, во многом определяют пониженную надежность (стабильность), проявляющуюся наиболее выражено при повышенных теплосиловых нагрузках на контактные поверхности, в том числе циклического характера, что существенно ограничивает промышленное применение КИ. При этом внезапное разрушение (отказы) режущей части могут произойти на различных стадиях эксплуатации – как в период приработки, так и на стадии установившегося изнашивания

3. Систематизация характерных вариантов разрушения контактных передней и задней поверхностей в процессе эксплуатации КИ позволила выявить, что в зависимости от исходного состояния ПС инструмента и условий резания возможно протекание одного из четырех возможных вариантов: постепенное истирание микроучастков на контактных поверхностях (наиболее благоприятный вариант, характерный для инструмента с минимальным количеством дефектов); истирание микроучастков на контактных поверхностях, сопровождающееся выпадением микрочастиц (выкрашиванием); истирание микроучастков на контактных поверхностях с последующим разрушением – отделением микро- и макроучастков (сколами); отделение макроучастков (сколы) на контактных поверхностях КИ.

4. На основе выполненных экспериментальных исследований установлено, что кривые реализаций «износ – время резания» в условиях действия на рабочие поверхности КИ повышенных теплосиловых нагрузок имеют выраженный веерообразный характер с различными скоростями изнашивания режущих граней. Данный характер развития износа является труднопрогнозируемым, так как время работы до достижения принятого критерия отказа имеет большой разброс значений, а КИ не обеспечивает высокую надежность. Для объективной оценки эксплуатационных показателей КИ кроме средней стойкости необходима оценка показателя вариации его стойкости $VarT$, характеризующего рассеивание (разброс) времени работы до достижения принятого критерия отказа, которое может использоваться для оценки надежности.

5. При изготовлении СМКП в условиях массового производства инструментальные компании для обеспечения высокой рентабельности производства при использовании дорогостоящего многокоординатного шлифовального оборудования осуществляют алмазную заточку на высокопроизводительных режимах. Интенсивное термомеханическое воздействие, происходящее в процессе алмазного шлифования при формообразовании спеченных керамических заготовок, в результате которого удаляется заданный припуск, приводит к формированию нового ПС, изобилующего многочисленными дефектами, морфология которого чрезвычайно многообразна, а его характеристики во многом носят случайный характер (глубина дефектного слоя может достигать до ~4,0 мкм). При этом вклад дефектов, закладываемых на операциях финишной абразивной обработки, в эффективность эксплуатации КИ на сегодняшний день остается недостаточно изученным, а системные исследования, устанавливающие взаимосвязи между уровнем дефектности и изнашиванием инструмента в процессе резания, отсутствуют.

6. Выпускаемый отечественными и зарубежными производителями КИ, несмотря на присутствующие в его ПС многочисленные дефекты, по параметру шероховатости рабочих поверхностей (R_a) не превышает допустимых значений, установленных действующими стандартами. При этом параметр R_a совершенно неинформативен для оценки дефектности ПС, т.к. на него не оказывают существенного влияния борозды, участки локального разрушения и другие дефекты ПС. Информативным показателем, который может использоваться на практике для изучения дефектного слоя КИ, является параметр R_t – общая высота профиля, оцениваемая как сумма наибольшей высоты пика профиля и наибольшей глубины впадины профиля в пределах длины оцениваемого участка образца.

7. Для совершенствования КИ, выпускаемого инструментальной промышленностью, и повышения эффективности эксплуатации инструмента получило развитие отдельное направление инженерии поверхности, заключающееся в целенаправленном воздействии на состояние ПС КИ ионно-плазменными, лучевыми и комбинированными источниками для модификации

характеристик ПС, среди которых нанесение износостойких покрытий является наиболее универсальным, производительным и распространенным технологическим подходом. При этом предельная толщина наносимых на КИ покрытий существенно меньше соответствующих значений, рекомендуемых для твердосплавного инструмента, и ограничивается предельным значением 4,0 мкм, превышение которого приводит к их отслоению даже при незначительных внешних нагрузках.

8. Проведенным аналитическим обзором и экспериментальными исследованиями установлено, что использование широко распространенных инструментальных вакуумно-плазменных покрытий типа TiN, (TiAl)N, (TiZr)N, (CrAlSi)N, (TiAlCr)N и др. не обеспечивает значительного «залечивания» дефектов ПС, формируемых в процессе алмазного шлифования КИ, а лишь способно несколько минимизировать глубину дефектного слоя. Повышенная дефектность ПС керамической подложки способствует формированию дефектных покрытий (пористых и несплошных), характеризующихся пониженной прочностью адгезионной связи, что значительно снижает их эффективность при нанесении на КИ.

9. Несмотря на негативное влияние дефектного ПС керамической подложки на качество формируемых покрытий, их нанесение на КИ изменяет условия контактного взаимодействия рабочих поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом, результатом которого является увеличение средней стойкости при резании (по данным различных исследований в 1,2-3,0 раза) по сравнению с инструментом без покрытия. При этом нанесение покрытий не решает главную проблему КИ, связанную с низкой надежностью в условиях действия повышенных теплосиловых нагрузок – наработка на отказ инструмента имеет большую вариацию.

10. При определенной ценности известных результатов в области повышения работоспособности КИ посредством нанесения функциональных покрытий, их объединяет узкая постановка решаемых задач. Основными объектами исследований выполненных ранее работ являются операции точения чугунов и

закаленных сталей сборными токарными резцами, оснащенными СМКП из материалов $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}(\text{TiCN})$ и Si_3N_4 . Малоизученными остаются операции механообработки с повышенными теплосиловыми нагрузками, в том числе нагрузками циклического характера (при фрезеровании), а также процессы механической обработки жаропрочных никелевых сплавов с использованием инструментов из керамики. Возможности использования функциональных покрытий для совершенствования цельных керамических фрез на сегодняшний день остаются вне области исследований российских и зарубежных ученых.

1.7. Конкретизация объектов исследований работы

В качестве инструментов, являющихся объектами исследований диссертационной работы, были выбраны наименее изученные, но при этом потенциально очень востребованные предприятиями машиностроения и ОПК, следующие виды лезвийного инструмента из керамик $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON , выпускаемого инструментальными компаниями.

1) Сборный инструмент (Рисунок 1.33):

– торцевые насадные фрезы 160×50 мм с механическим креплением 10 квадратных СМКП $12,7 \times 4,76$ мм из КИМ на базе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, ориентировочный фазовый состав (выявлен посредством ПО PANalytical HighScore Plus и базы ICCD PDF-2) – 71 об.% Al_2O_3 – 25 об.% TiC – 4 об.% ZrO_2 ;

– токарные резцы с механическим креплением круглых СМКП $19,05 \times 7,90$ мм из КИМ на базе SiAlON , ориентировочный фазовый состав – 79 об.% Si_5AlON_7 – 17 об.% Si_3N_4 – 4 об.% Yb_2O_3 .

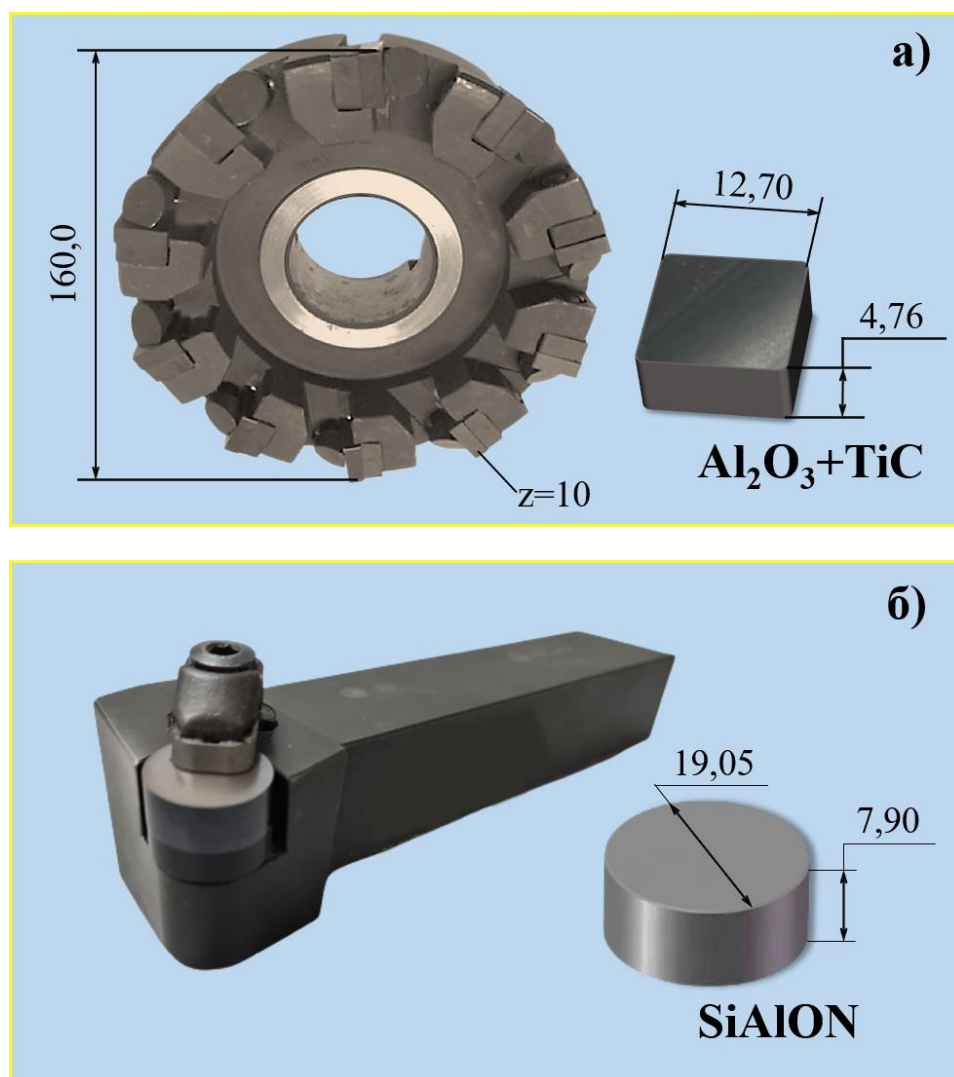


Рисунок 1.33 – Образцы сборного керамического инструмента, являющегося объектом исследований работы: а) – торцевые фрезы с квадратными СМКП; б) – токарные резцы с круглыми СМКП

2) Цельные концевые керамические фрезы 10,0×65,0 мм (Рисунок 1.34), выпускаемые зарубежными производителями из КИМ на базе SiAlON, ориентировочный фазовый состав – 72 об.% Si_5AlON_7 – 14 об.% Si_3N_4 – 8 об.% Al_2O_3 – 6 об.% Yb_2O_3 . Указанные образцы концевых фрез были использованы в качестве эталона, с которым сопоставлялись характеристики нового инструмента, изготавливаемого в рамках настоящей работы.

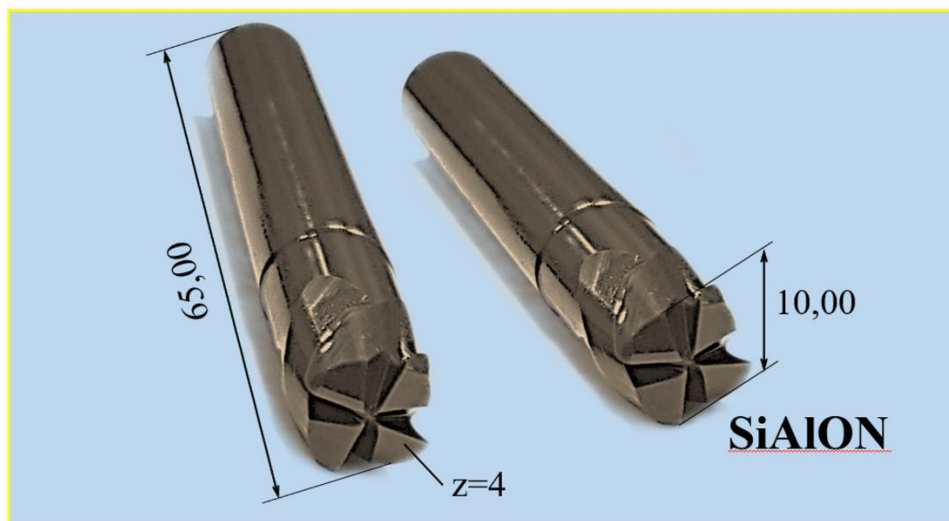


Рисунок 1.34 – Образцы цельных концевых керамических фрез, являющиеся объектом исследований работы

Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ДЕФЕКТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИСТИРАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

2.1. Изучение состояния поверхностного слоя шлифованного керамического инструмента и разработка обобщенного критерия для количественной оценки степени его дефектности

Как было подробно проанализировано в предыдущей главе, финишная алмазная обработка значительно изменяет исходную структуру ПС инструментальных керамик, сформированную на этапе их спекания. На Рисунке 2.1 проиллюстрирована трансформация микроструктуры спеченной керамики (СК) в шлифованную керамику (ШК), происходящая в результате ударного воздействия алмазных зерен и трения связки шлифовального круга по поверхности керамики и пластической деформации в условиях высокоскоростного нагрева локальных объемов керамики и последующего охлаждения.

Структурно-трансформированный дефектный ПС, контактирующий с обрабатываемой заготовкой при резании и воспринимающий весь комплекс эксплуатационных нагрузок, оказывает первостепенное значение на протекание процессов трения и изнашивания на рабочих поверхностях КИ. Поэтому исследование степени дефектности ПС инструментальных керамик, ее количественная оценка и установление вклада в эксплуатационные характеристики КИ является чрезвычайно важной задачей.

Для комплексного исследования КИ, подвергнутого алмазной обработке, использовался метод сканирующей электронной микроскопии на оборудовании Tescan VEGA3 LMH.

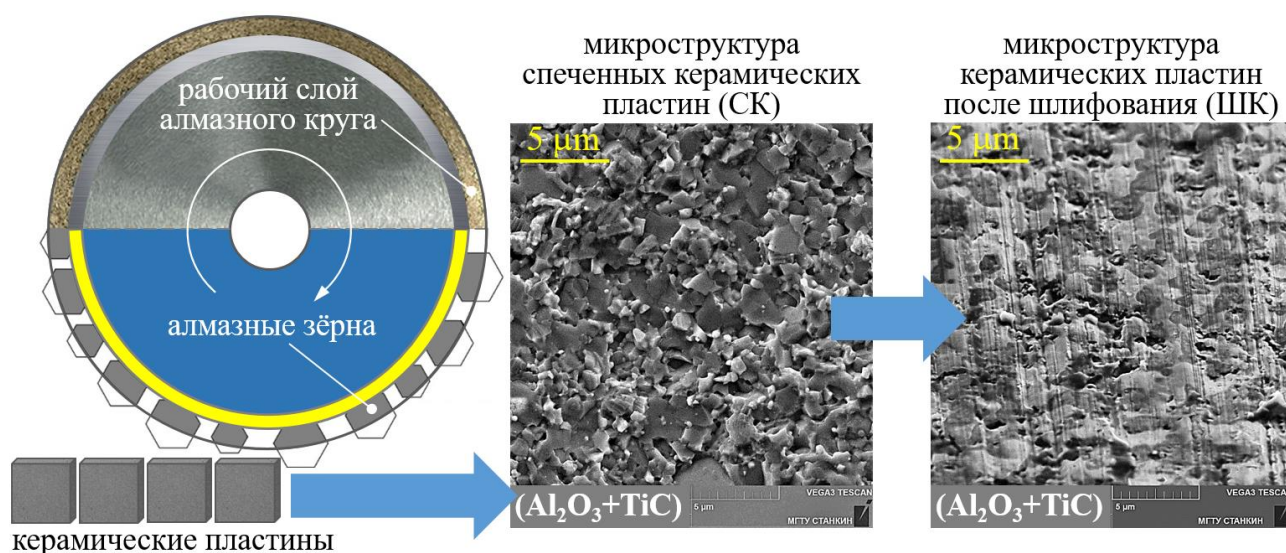
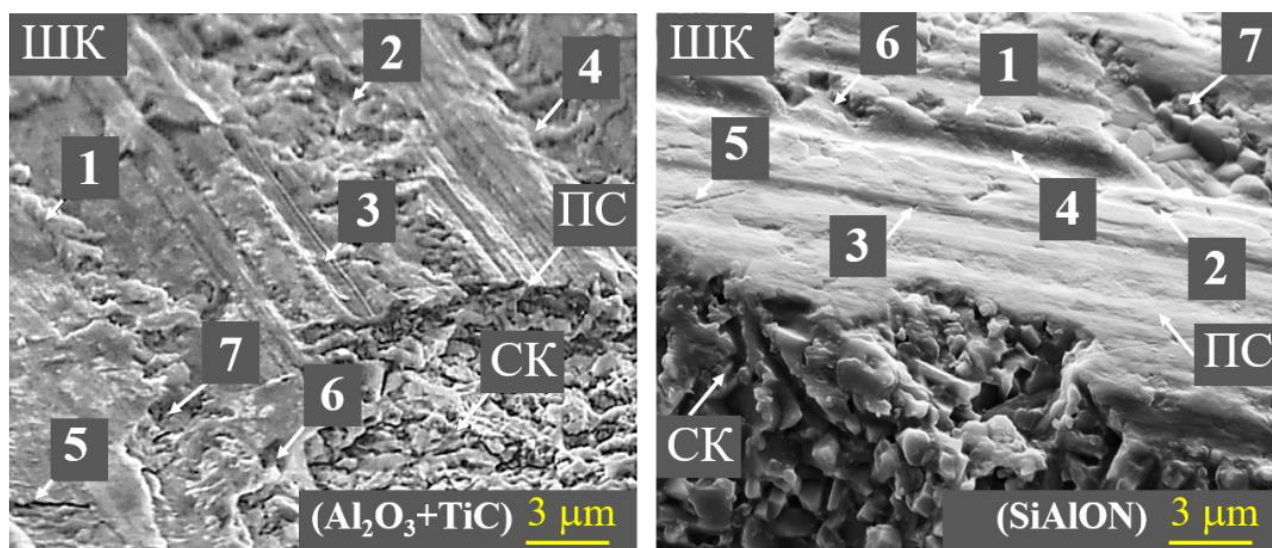
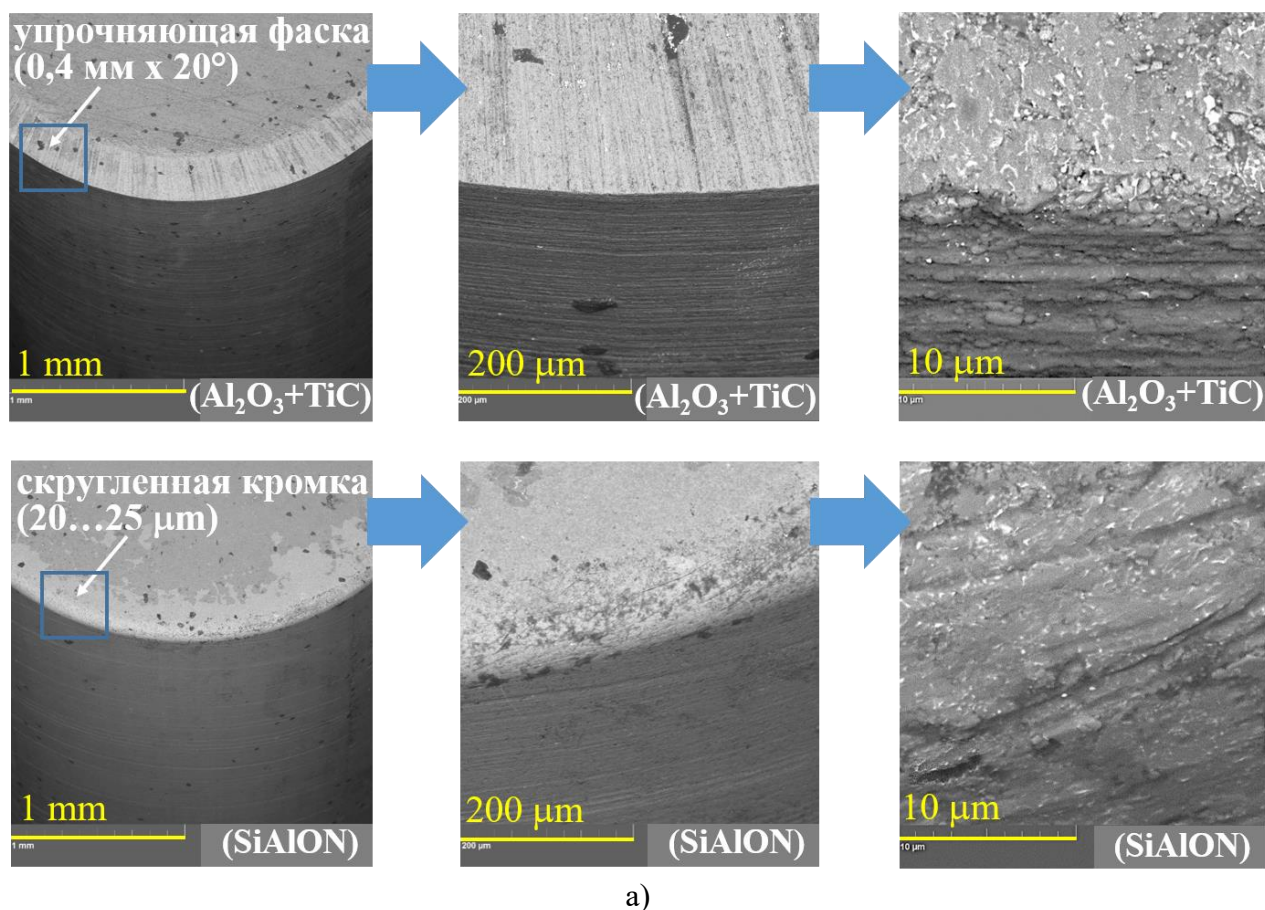


Рисунок 2.1 – Структурная трансформация поверхностного слоя спеченной инструментальной керамики, происходящая при воздействии алмазного круга в процессе шлифования

Исследованиям были подвергнуты наиболее востребованные промышленностью сменные многогранные керамические пластины (СМКП) из двух базовых композиций керамик – $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, основным назначением которой является обработка закаленных сталей, и SiAlON , предназначенная для обработки жаропрочных никелевых сплавов.

Микроанализ СМКП, представленных на рынке, показывает, что по химическому составу исследованные керамические композиции, выпускаемые различными производителями, имеют небольшие отличия (могут отличаться состав легирующих добавок и их содержание – как правило, не более чем на 2-3%), а морфология их ПС, сформированная при алмазном шлифовании, имеет минимальные различия и практически идентична в рамках одной базовой керамической композиции. Указанное относится к СМКП, изготовленных как из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, так и из SiAlON . Кроме того, эти особенности характерны для КИ с различной формой режущей части – со скругленной кромкой и с упрочняющими фасками.

На Рисунке 2.2, а представлены SEM-изображения при различном увеличении режущей части СМКП из двух композиций керамик – $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON .



- 1 – волнообразные микровыступы; 2 – микровпадины; 3 – неглубокие риски;
 4 – глубокие борозды (более 1 мкм); 5 – продольные микротрещины;
 6 – вырывы отдельных зерен; 7 – вырывы конгломератов зерен

б)

Рисунок 2.2 – Состояние поверхностного слоя пластин из инструментальных керамик на базе Al₂O₃+TiC и SiAlON после алмазной заточки: а) – общий вид режущей части СМКП; б) – микроструктура и классификация дефектов

Поверхностный слой СМКП изобилует многочисленными поверхностными дефектами и имеет сложный морфологический рисунок. Проведенные микроструктурные исследования позволили выявить и классифицировать характерные дефекты, присутствующие в ПС керамик на базе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON (Рисунок 2.2, б).

В результате ударного воздействия алмазных зерен и трения связки круга по поверхности высокоплотной керамики, а также происходящей локальной пластической деформации при высокоскоростном нагреве поверхностных участков керамики и их быстрого охлаждения, ПС инструментальных керамик имеет специфический рельеф, включающий совокупность дефектов. Наблюдаемые дефекты (Рисунок 2.2, б) можно классифицировать на следующие типы: волнообразные микровыступы (1), микровпадины (2), неглубокие риски (3), формирующиеся в результате проскальзывания «пассивных» алмазных зерен по поверхности керамики, глубокие борозды (4), спрофилированные алмазными зернами. Кроме того, отчетливо видны продольные микротрещины (5), появляющиеся во внутреннем профиле борозд и распространяющиеся вдоль поверхности в различных направлениях, вырывы единичных зерен (6) или их конгломератов (7), происходящие под действием силовых нагрузок.

Одновременно с общими признаками в структуре ПС шлифованной керамики выявлены специфические признаки, связанные с разной исходной структурой и свойствами материалов, а также с неодинаковым восприятием структурными элементами керамик ударных силовых и циклических тепловых нагрузок, сопровождающих процесс шлифования [149]. Например, для керамики из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ характерно наличие многочисленных глубоких борозд с трещинами по их границам, в то время как для керамики SiAlON – типичным является наличие большого количества вырывов зерен и их конгломератов.

Многие из выявленных дефектов, в частности, глубокие борозды, микротрещины и вырывы, являются микроструктурными концентраторами напряжений и при приложении внешней нагрузки могут стать триггерами для

ускоренного микроразрушения контактных площадок инструмента и снижения эффективности эксплуатации инструмента [149].

Количественная оценка степени дефектности поверхностного слоя СМКП, выпускаемых промышленностью, представляет большую сложность. Учитывая, что поверхность промышленно выпускаемых СМКП характеризуется совокупностью различных дефектов и экспериментальная оценка влияния отдельного дефекта на сопротивление разрушению КИ и другие показатели невозможна, в работе был предложен обобщенный критерий, который может позволить количественно определить степень дефектности ПС, и в дальнейшем выполнять оценку его влияния на интересующие эксплуатационные показатели КИ.

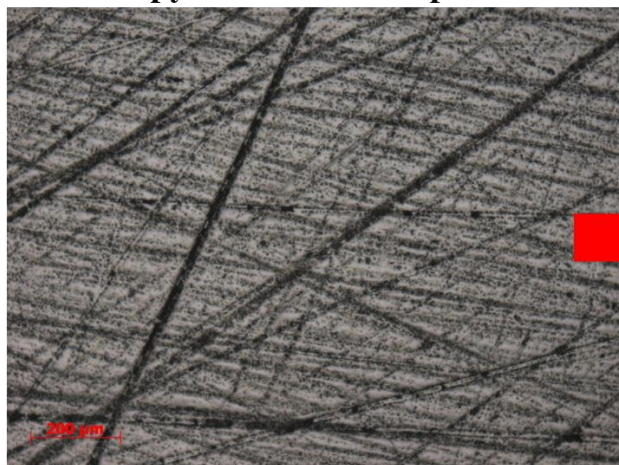
Для количественной оценки степени дефектности слоя КИ, формируемого на операциях алмазной заточки (или других операциях), предлагается критерий «индекс дефектности» $I_{\text{деф}}$ (мкм), который определяется согласно следующей зависимости:

$$I_{\text{деф}} = \rho_{\text{деф}} \cdot h_{\text{деф}}, \quad (2.1)$$

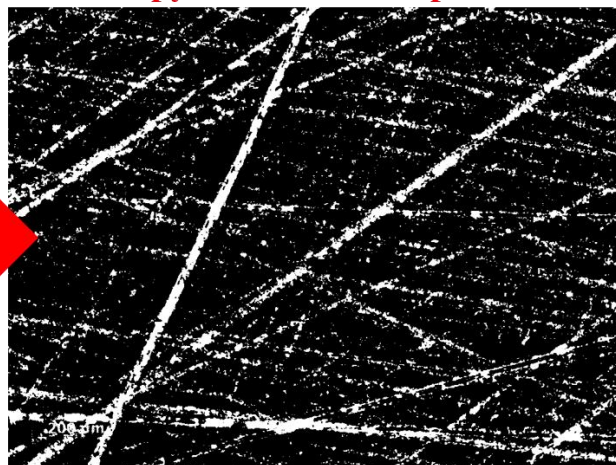
где $\rho_{\text{деф}}$ – плотность (суммарная площадь) дефектов на единицу площади поверхности КИ, определяемая как отношение суммарной площади дефектов на рассматриваемом участке керамического образца к общей площади исследуемого участка; $h_{\text{деф}}$ – максимальная глубина дефектного слоя (мкм) на рассматриваемом участке керамического образца.

На Рисунке 2.3 представлена иллюстрация универсальной методики, предложенной в рамках настоящей работы, которая может применяться в целях расчета составляющих индекса дефектности ($\rho_{\text{деф}}$ и $h_{\text{деф}}$) для любых инструментальных керамик. Для оценки плотности дефектов (Рисунок 2.3, а) можно использовать технику, основанную на контрастировании поверхностных дефектов наклонным («косым») освещением поверхности при анализе стереоскопического изображения. В проведенных исследованиях анализ ПС КИ выполнялся на стереомикроскопе Meiji Techno RZ в условиях, когда ось освещающего луча располагалась под углом 75° по отношению к оптической оси микроскопа.

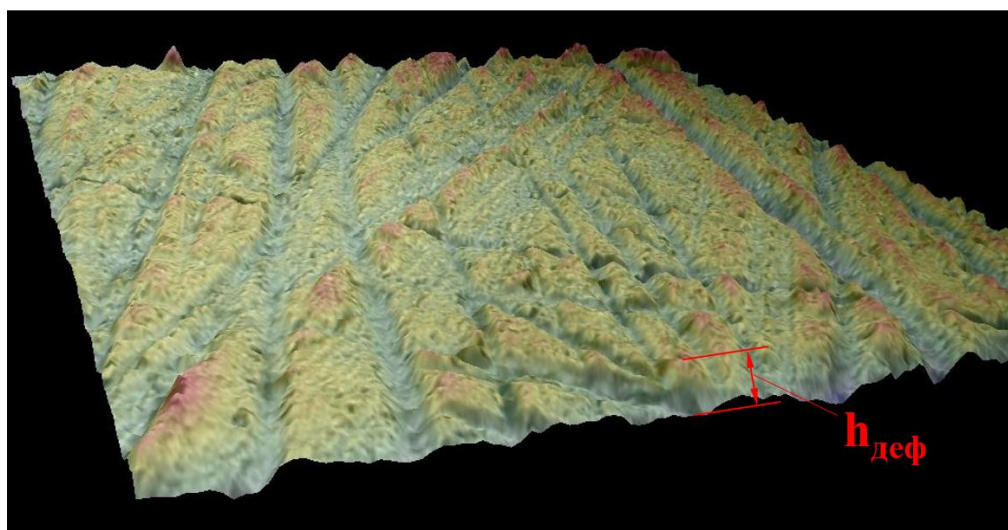
**оптическое изображение
дефектного поверхностного слоя
инструментальной керамики**



**контрастное изображение
дефектов в поверхностном слое
инструментальной керамики**



а)



б)

Рисунок 2.3 – Методика для оценки составляющих индекса дефектности поверхностного слоя керамического инструмента: а) – контрастирование поверхности наклонным освещением для расчета плотности дефектов; б) – глубина дефектного слоя (общая высота профиля)

Дефекты контрастировали с основной плоскостью керамических образцов (темный цвет – основная плоскость, светлый – дефекты ПС) и при помощи специализированного программного обеспечения для анализа изображений Thixomet было рассчитано количество светлых пикселей на исследуемом образце. На основе полученных данных для керамических образцов вычисляется отношение

суммарной площади дефектов на рассматриваемом участке керамического образца к общей площади исследуемого участка.

Для определения максимальной глубины дефектного слоя оценивается общая высота профиля (Рисунок 2.3, б), представляющая собой сумму наибольшей высоты пика профиля и наибольшей глубины впадины профиля. Указанный параметр по сути является показателем R_t , который был рассмотрен в предыдущей главе работы. Его измерение выполнялось на профилометре Dektak XT, оснащенный высокочувствительным стилусом.

2.2. Подготовка образцов режущих пластин из керамик на основе Al_2O_3+TiC и SiAlON с различным индексом дефектности поверхностного слоя для экспериментальных исследований

Для формирования гаммы керамических образцов с различным индексом дефектности промышленно выпускаемые СМКП квадратной формы из Al_2O_3+TiC и круглой формы из SiAlON были подвергнуты дополнительным операциям алмазной абразивной обработки – доводке и полированию.

Дополнительная обработка промышленных СМКП осуществлялась на доводочно-полировальном станке Lapmaster Wolters специальными доводочными и полировочными кругами с использованием различных алмазных суспензий (зернистостью 50/40, 40/28 при доводке и 10/7, 5/3 – при полировании) со скоростью резания 3 м/с.

Таким образом, для исследований было подготовлено по три группы СМКП из двух видов инструментальной керамики (Al_2O_3+TiC и SiAlON), прошедшие выбранные варианты дополнительной абразивной обработки и имеющие различное состояние ПС: после алмазного шлифования (I), после шлифования и доводки (II), после шлифования, доводки и полирования (III).

Характерные 3D-профилограммы и SEM-изображения микроструктуры ПС СМКП различных групп, представлены на Рисунке 2.4 (для образцов из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$) и на Рисунке 2.5 (для образцов из SiAlON). Представленные экспериментальные данные наглядно демонстрируют выраженные изменения, происходящие в ПС СМКП в результате применения дополнительных процессов обработки.

Следует отметить, что несмотря на выраженную дефектность «рыночных» СМКП после алмазной заточки, параметр шероховатости R_a (средняя высота микронеровностей) не превышал ограничений, накладываемых отечественным стандартом, и составил для СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ – 0,30...0,32 мкм, а для SiAlON – 0,28...0,30 мкм.

Применение дополнительной доводки значительно снижает значение параметра R_a – в 1,6-2,0 раза, уменьшает количество видимых микровыступов, рисок, уменьшает глубину борозд, но количество дефектов на поверхности сохраняется в значительном количестве. После доводки и полирования выраженные дефекты на поверхности СМКП из двух исследуемых композиций керамики не обнаруживались.

В дальнейшем для каждой из исследуемых групп СМКП определялся индекс дефектности. На Рисунке 2.6 проиллюстрирована оценка глубины дефектного слоя СМКП посредством контактного сканирования ПС стилусом для вычисления специализированным программным обеспечением общей высоты профиля, а на Рисунке 2.7 – определение плотности дефектов ПС СМКП, прошедших различные варианты абразивной обработки, посредством контрастирования дефектов наклонным освещением (расчет выполнялся для участка площадью 250000 мкм²).

Комплекс проведенных измерений и расчетов позволил определить индекс дефектности (в соответствии с зависимостью 2.1) для различных групп СМКП. В Таблицах 2.1 и 2.2 приведены средние значения рассчитанного индекса дефектности и измеренных значений его составляющих по результатам анализа 10 пластин каждой группы. Видно, что предложенный «индекс дефектности» является информативным параметром, чувствительным к изменению состояния ПС.

$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$

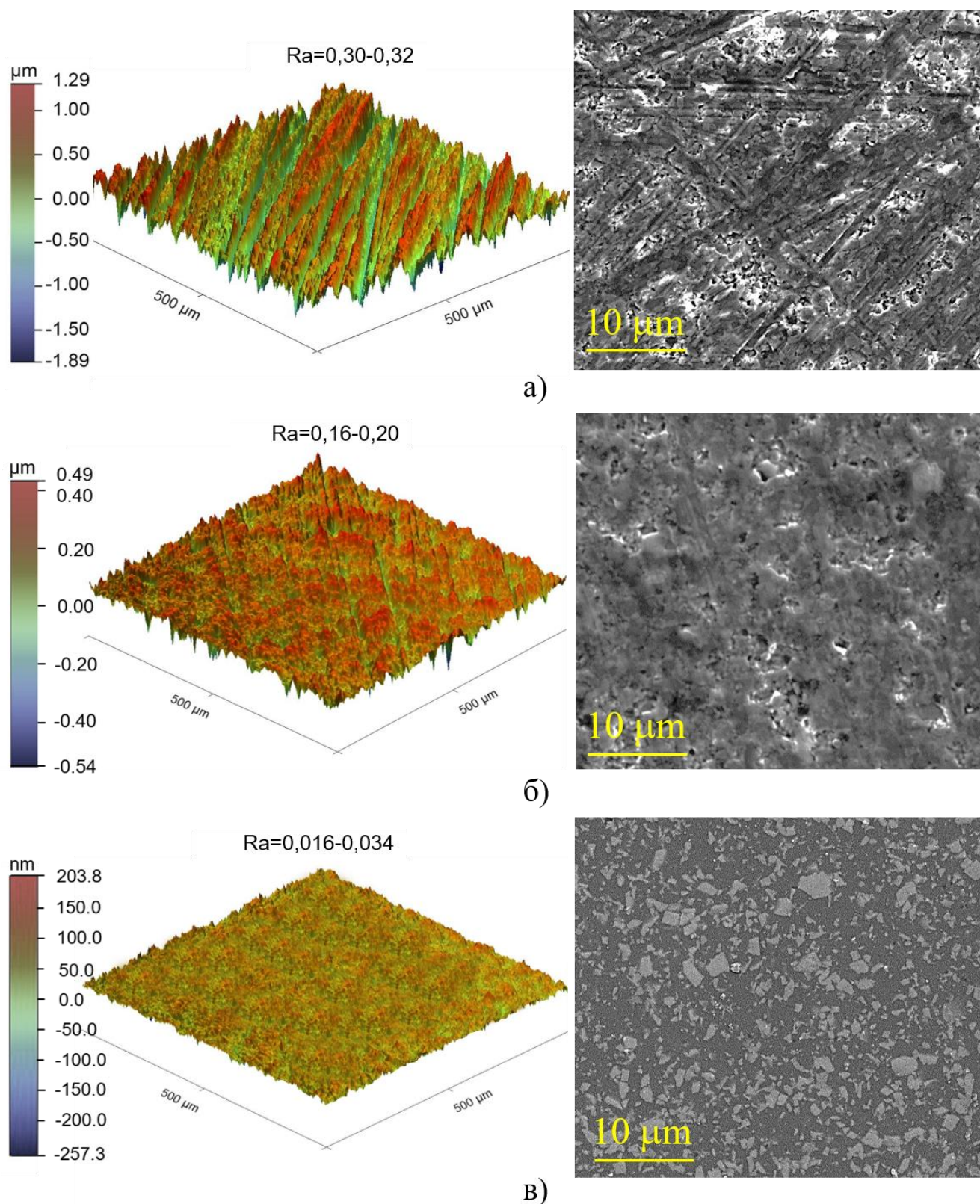


Рисунок 2.4 – 3D-профилограммы и SEM-изображения микроструктуры поверхностного слоя СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ после различных видов абразивной обработки: а) – алмазное шлифование;

б) – алмазное шлифование и доводка; в) – алмазное шлифование, доводка и полирование

SiAlON

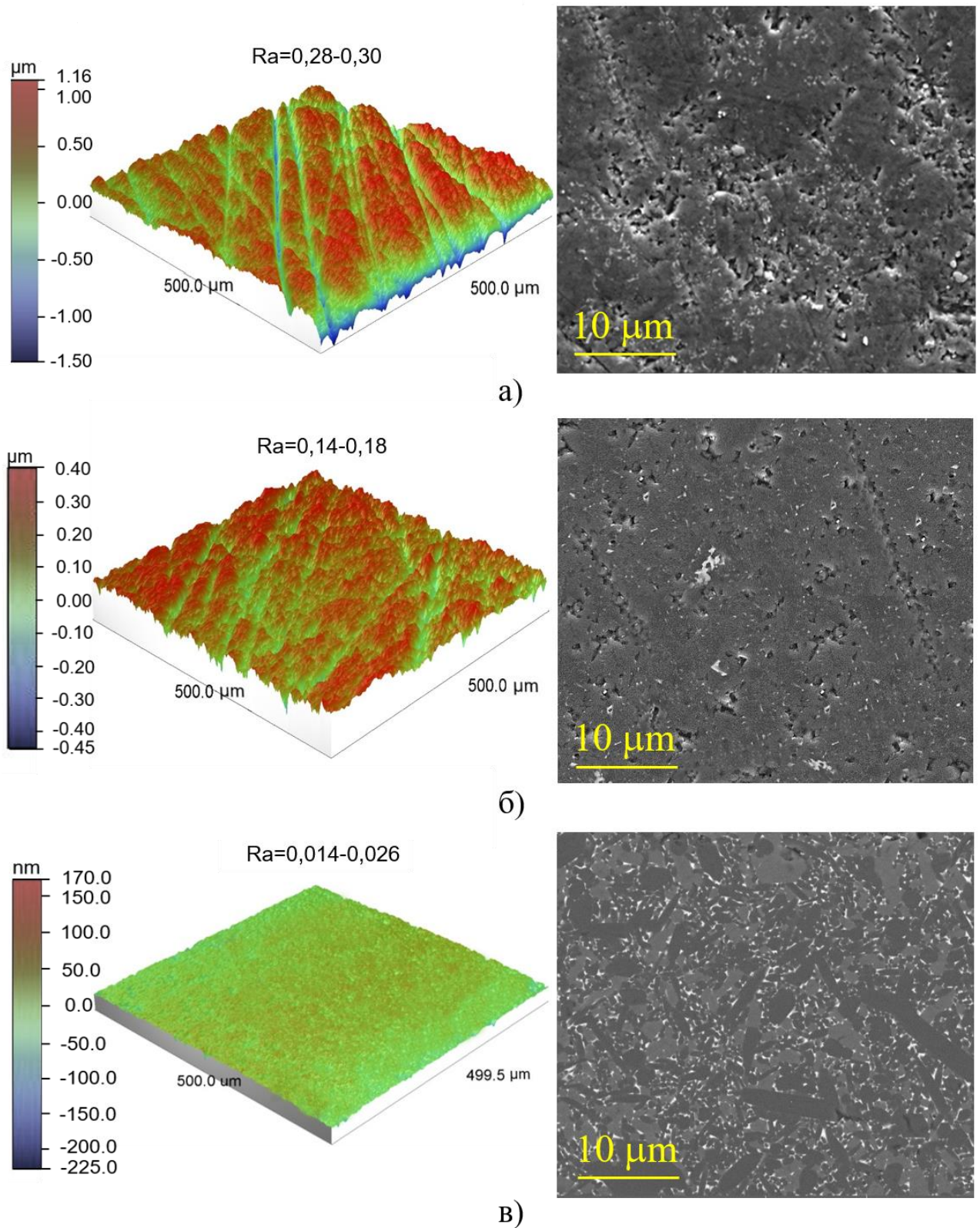


Рисунок 2.5 – 3D-профилограммы и SEM-изображения микроструктуры поверхностного слоя СМКП из SiAlON после различных видов абразивной обработки: а) – алмазное шлифование; б) – алмазное шлифование и доводка; в) – алмазное шлифование, доводка и полирование

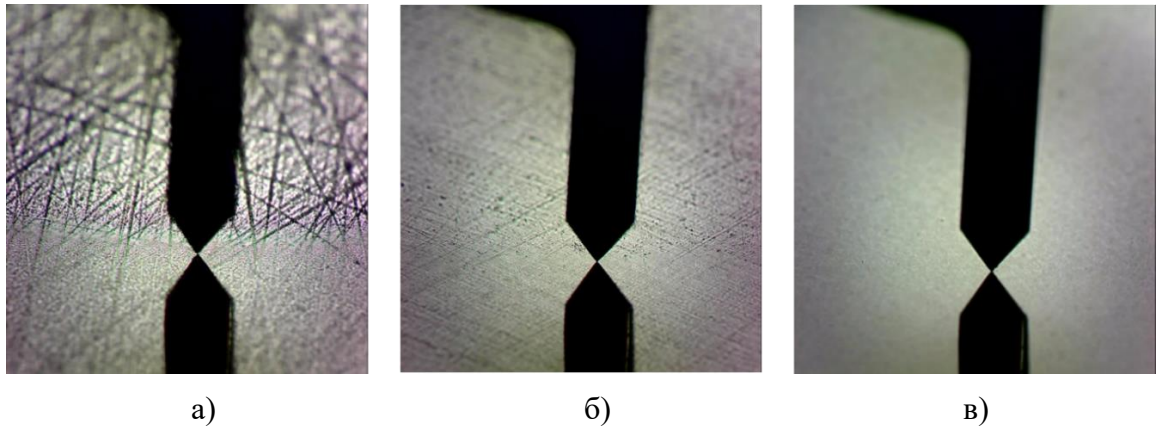


Рисунок 2.6 – Оценка глубины дефектного слоя СМКП после различных видов обработки посредством контактного сканирования поверхности стилусом: а) – алмазное шлифование; б) – алмазное шлифование и доводка; в) – алмазное шлифование, доводка и полирование

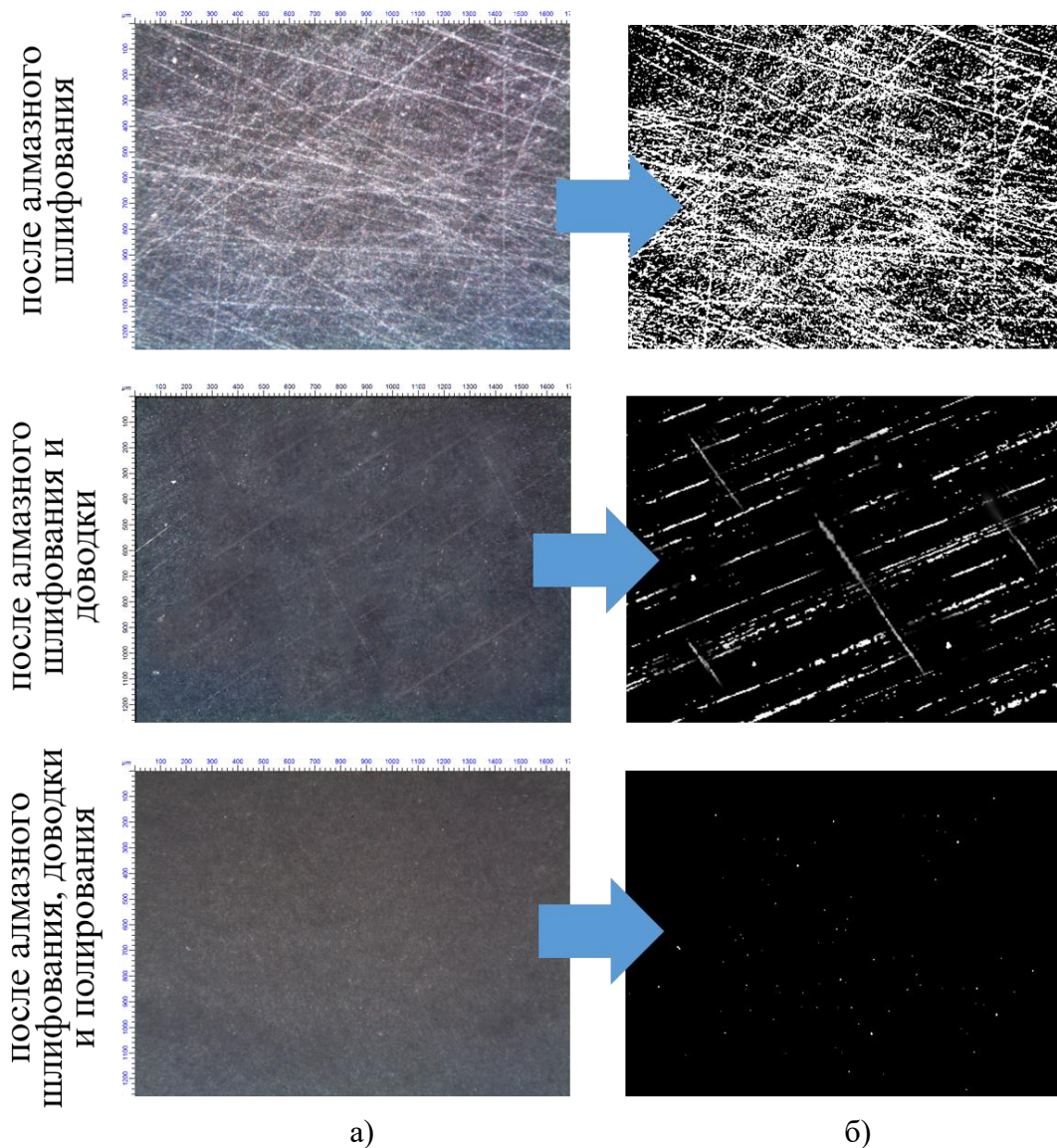


Рисунок 2.7 – Определение плотности дефектов поверхностного слоя СМКП, прошедших различные варианты абразивной обработки: а) – стереоскопическое изображение образцов; б) – изображение образцов при контрастировании дефектов наклонным освещением

Таблица 2.1 – Индекс дефектности поверхностного слоя и его составляющие для СМКП из материала $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$

№	Вариант абразивной обработки СМКП	Плотность дефектов	Мах. глубина дефектного слоя (мкм)	Индекс дефектности (мкм)
1.	Алмазное шлифование (I)	0,4	4,0	1,6
2.	Алмазное шлифование и доводка (II)	0,206	1,5	0,31
3.	Алмазное шлифование, доводка и полирование (III)	0,005	0,42	0,002

Таблица 2.2 – Индекс дефектности поверхностного слоя и его составляющие для СМКП из материала SiAlON

№	Вариант абразивной обработки СМКП	Плотность дефектов	Мах. глубина дефектного слоя (мкм)	Индекс дефектности (мкм)
1.	Алмазное шлифование (I)	0,354	3,6	1,274
2.	Алмазное шлифование и доводка (II)	0,153	1,32	0,2
3.	Алмазное шлифование, доводка и полирование (III)	0,004	0,37	0,0014

2.3. Исследование влияния индекса дефектности режущих пластин из керамик на основе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON на физико-механические и трибологические характеристики

С целью изучения влияния индекса дефектности СМКП, изготовленных из керамик на базе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON , на физико-механические и трибологические характеристики в работе был выполнен комплекс экспериментальных исследований в рамках которых оценивалось сопротивление режущих кромок СМКП скалыванию, трещиностойкость, микротвердость, устойчивость к абразивному истиранию и коэффициент трения при высокотемпературном нагреве.

Для оценки влияния индекса дефектности ПС СМКП на способность режущих кромок противостоять скалыванию при воздействии внешней нагрузки использовалась оригинальная методика. В работе [150] с позиций теории хрупкого разрушения Гриффитса обоснована возможность получения новой информации о механическом поведении керамических материалов при скалывании их кромок индентором Роквелла. Данный подход был взят за основу и усовершенствован исходя из эксплуатационных особенностей СМКП. На Рисунке 2.8 представлена принципиальная схема оригинальной методики, используемой в рамках диссертационной работы.

Испытания выполняли на скретч-тестере Revetest, оснащенный датчиком регистрации АЭ-сигнала, при воздействии на ПС алмазной пирамидкой с плавно увеличивающейся нагрузкой на индентор (P) от 20 до 40 Н. Алмазная пирамидка в качестве индентора была выбрана целенаправленно, чтобы создать вблизи режущей кромки максимальную концентрацию напряжений. Идентичность расположения точки приложения индентора L относительно режущей кромки строго контролировали. Эксперименты показали, что ширина скола B не является информативным параметром для оценки способности режущих кромок сопротивляться скалыванию (размер скола у всех образцов имел близкие значения), а усилие, при котором происходил скол, оказалось показателем, чувствительным к изменению состояния ПС керамических образцов.

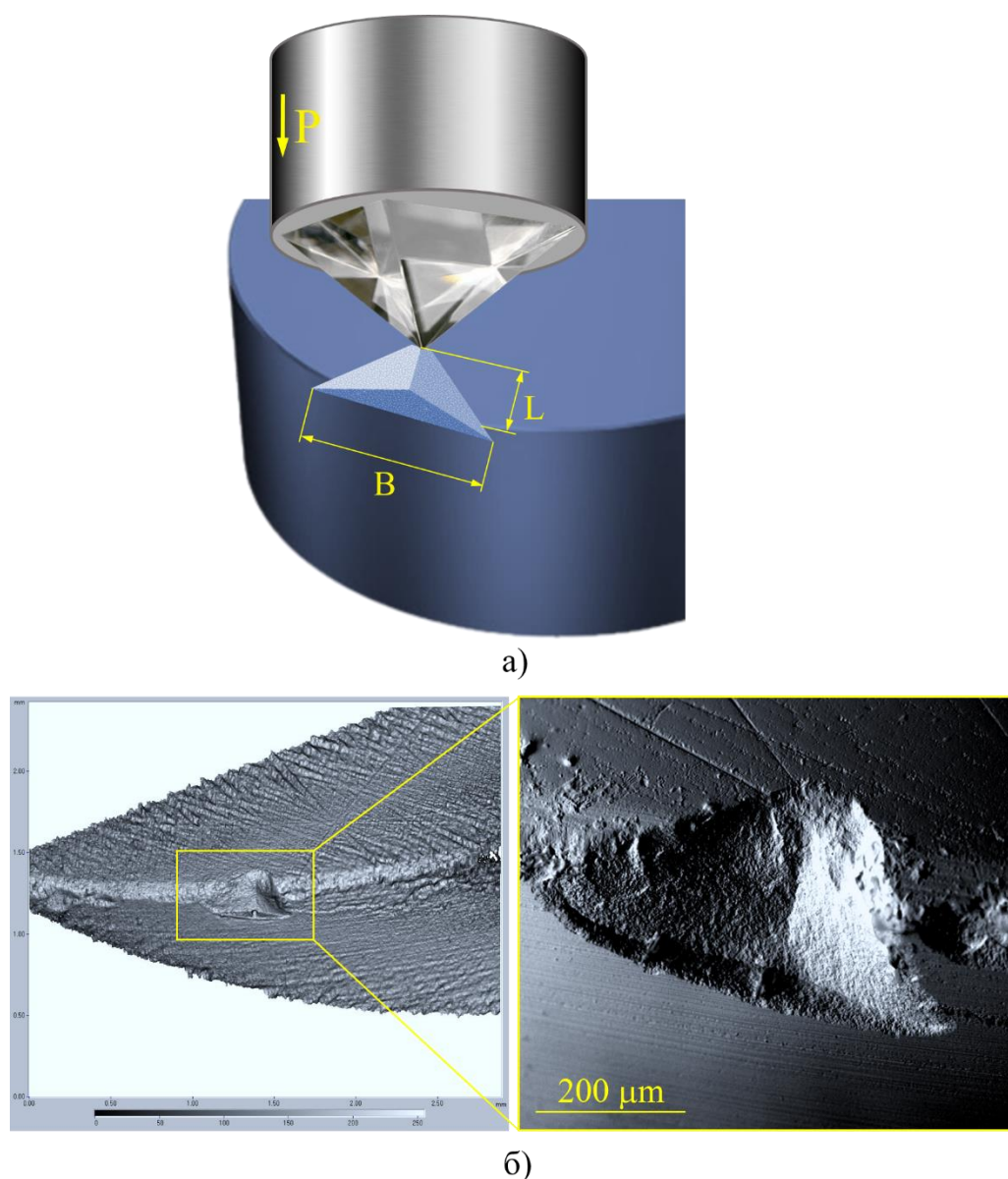


Рисунок 2.8 – Принципиальная схема методики, использовавшейся для оценки сопротивления режущих кромок СМКП скалыванию: а) – воздействие разрушающей нагрузки, создаваемой алмазной пирамидкой; б) – вид области скалывания режущей кромки

Момент скалывания и нагрузка ему соответствующая, идентифицировались по спектру АЭ-сигнала, который в момент разрушения резко увеличивался. В Таблице 2.3 приведены экспериментальные данные по результатам десяти измерений СМКП (квадратной формы из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и круглой из SiAlON) с различными индексами дефектности.

Таблица 2.3 – Нагрузки на индентор, соответствующие скалыванию режущих кромок СМКП с различным индексом дефектности

Разрушающая нагрузка (Н)	Материал СМКП и вид абразивной обработки					
	Al ₂ O ₃ +TiC			SiAlON		
	Алмазное шлифование (I)	Алмазное шлифование и доводка (II)	Алмазное шлифование, доводка и полирование (III)	Алмазное шлифование (I)	Алмазное шлифование и доводка (II)	Алмазное шлифование, доводка и полирование (III)
Среднее значение	24,1	25,1	29,1	28,9	29,6	37,6
Max значение	28	30	32	33	34	40
Min значение	21	22	28	26	26	36

Представленные результаты позволяют заключить, что применение дополнительной доводки СМКП не обеспечивает значительного влияния на сопротивление режущих кромок скалыванию. Выполнение в качестве дополнительных операций доводки в сочетании с полированием демонстрирует значительное влияние как на среднее значение разрушающей нагрузки, так и величину разброса этого показателя. Для СМКП из Al₂O₃+TiC зафиксировано увеличение разрушающей нагрузки на ~20%, а для SiAlON – на ~30%.

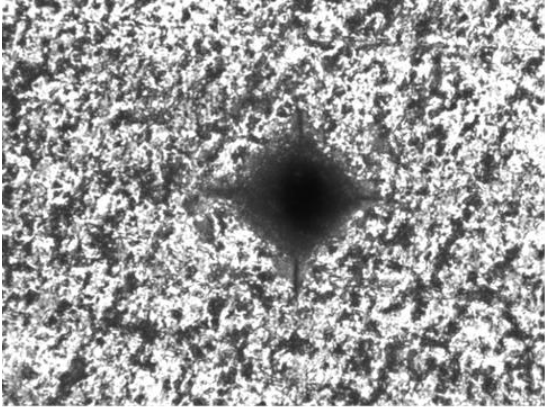
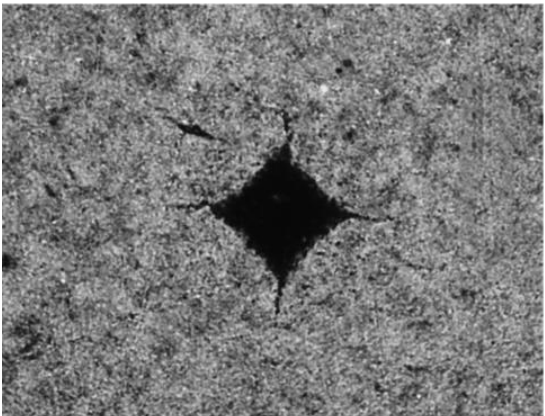
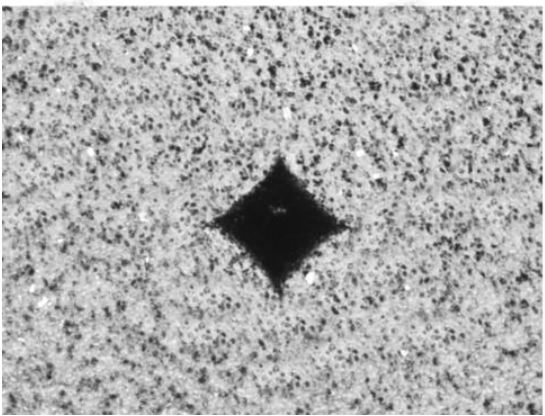
Трещиностойкость и микротвердость СМКП с различным индексом дефектности определялась на универсальном микротвердомере QnessQ10A методом индентирования пирамидой Виккерса. При оценке микротвердости нагрузка на индентор составляла 2 кг, а при оценке трещиностойкости – 5 кг. После выполнения индентирования измеряли значения диагоналей отпечатков и длины трещин, распространяющихся из углов отпечатков, на основании которых по известным зависимостям [13] определялись микротвердость HV различных образцов и коэффициент интенсивности напряжений K_s , который в механике разрушения относится к основным характеристикам трещиностойкости.

В Таблице 2.4 приведены результаты оценки коэффициента интенсивности напряжений (трещиностойкости) и микротвердости по данным десяти измерений СМКП из Al_2O_3+TiC и SiAlON с различными индексами дефектности.

Полученные результаты показывают, что для СМКП, имеющих различный индекс дефектности ПС, коэффициент интенсивности напряжений также отличается. Максимальные значения K_s зафиксированы у образцов с минимальным индексом дефектности, прошедших многоэтапную абразивную обработку, включающую дополнительные доводку и полирование. Отмеченное справедливо для СМКП из Al_2O_3+TiC и SiAlON. Таким образом, определенная взаимосвязь между дефектностью ПС и трещиностойкостью прослеживается, но в количественном соотношении увеличение коэффициента интенсивности напряжений не являлось очень весомым и составило ~5-7% для двух исследованных инструментальных керамик.

Различия в микротвердости СМКП, имеющих различный индекс дефектности ПС, оказались незначительными. Применение дополнительных доводки и полирования СМКП не оказало существенного влияния на указанный показатель и явной взаимосвязи между индексом дефектности и микротвердостью ПС (при используемой методике оценки) выявлено не было.

Таблица 2.4 – Коэффициент интенсивности напряжений и микротвердость поверхностного слоя СМКП с различными индексами дефектности

	Характерный вид образцов с различным индексом дефектности после индентирования для оценки трещиностойкости	для СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$		для СМКП из SiAlON	
		Кс (МПа*м ^{1/2})	HV (ГПа)	Кс (МПа*м ^{1/2})	HV (ГПа)
Алмазное шлифование (I)		3,68	14,71	4,94	15,99
Алмазное шлифование и доводка (II)		3,72	14,57	4,98	15,96
Алмазное шлифование, доводка и полирование (III)		3,84	15,2	5,26	16,09

Для изучения влияния индекса дефектности на истирание поверхностного слоя СМКП в условиях абразивного воздействия были проведены испытания на приборе CALOTEST в условиях давления на образцы с усилием 0,2 Н

вращающейся сферы из закаленной стали при подаче в зону контактирования абразивной суспензии на водной основе. Оптический анализ геометрических размеров лунок износа, а также их измерение на стилусном профилометре дали возможность количественно и качественно оценить объемный износ образцов. На Рисунке 2.9 приведены зависимости объемного износа СМКП из Al_2O_3 и SiAlON от времени тестирования и 3D-профилограммы лунок износа образцов после 20 минут испытаний.

Представленные зависимости объема изношенного материала от времени испытаний дают определенное представление о кинетике изнашивания ПС СМКП с различным индексом дефектности и их устойчивости к абразивному износу. Заметно, что наличие дефектов в поверхностном слое, значительно снижает способность керамики сопротивляться абразивному истиранию. Образцы с минимальным индексом дефектности, прошедшие дополнительные доводку и полирование, по сравнению с другими группами исследованных СМКП на всем протяжении испытаний демонстрировали существенно меньшие значения износа. По истечении 20 минут испытаний значение объемного износа образцов из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON, имеющих минимальный индекс дефектности, было в 1,8...1,9 раза меньше образцов из других контрольных групп.

Учитывая, что в процессе резания на контактные поверхности СМКП действуют повышенные термические нагрузки, были проведены высокотемпературные трибологические испытания ПС СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON с различным индексом дефектности (Рисунок 2.10).

Оценка изменения коэффициента трения (КТ) с течением времени выполнялась на трибометре ТНТ при вращении СМКП относительно неподвижного контртела (в качестве контртел выступали керамические шарики диаметром 6 мм) при нагрузке 1 Н, скорости скольжения 10 см/с и температуре испытаний 800 °С.

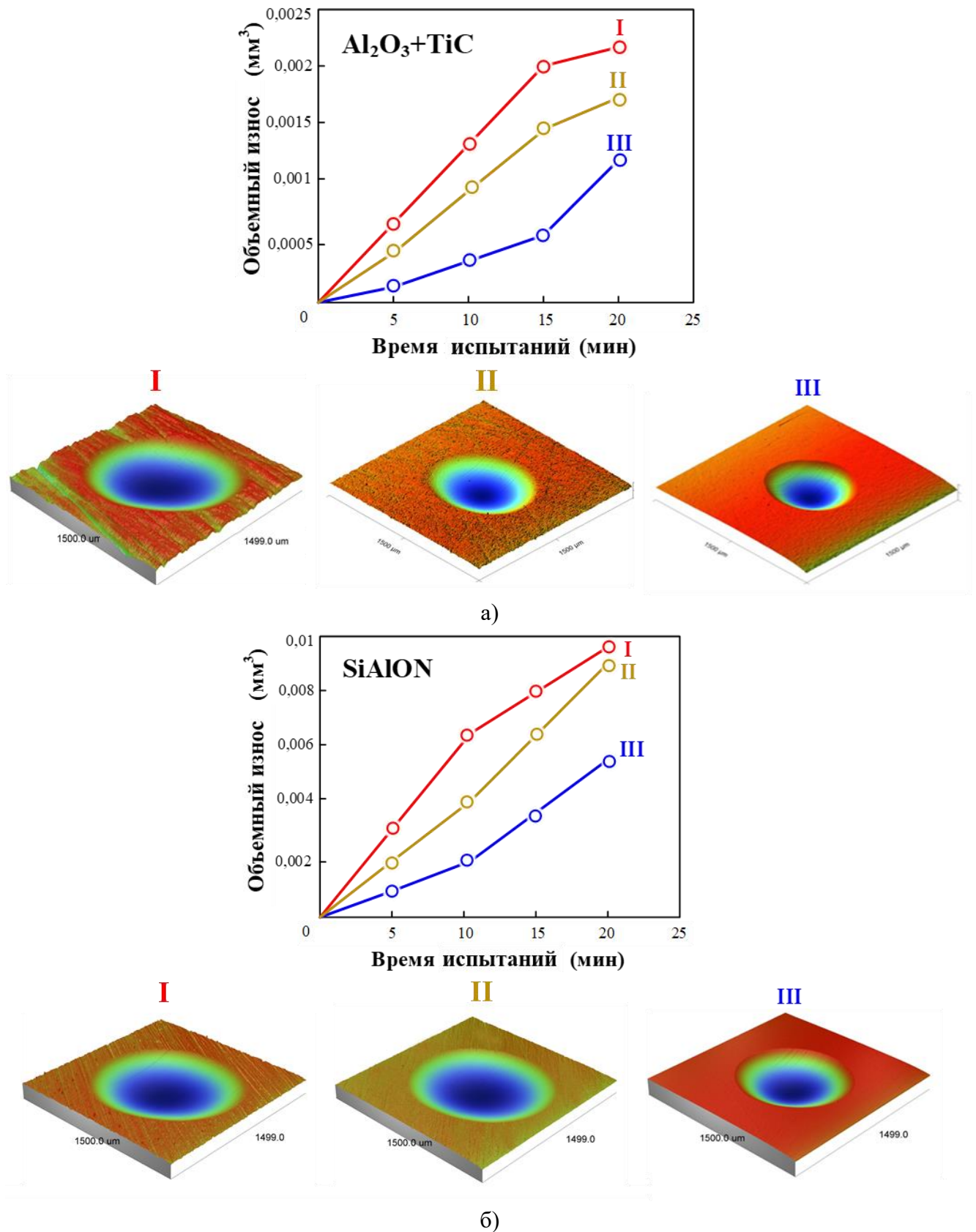


Рисунок 2.9 – Зависимости объемного износа СМКП с различным индексом дефектности поверхностного слоя (I – алмазное шлифование, II – алмазное шлифование и доводка, III – алмазное шлифование, доводка и полирование) от времени абразивного воздействия: а) – для СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$; б) – для СМКП из SiAlON

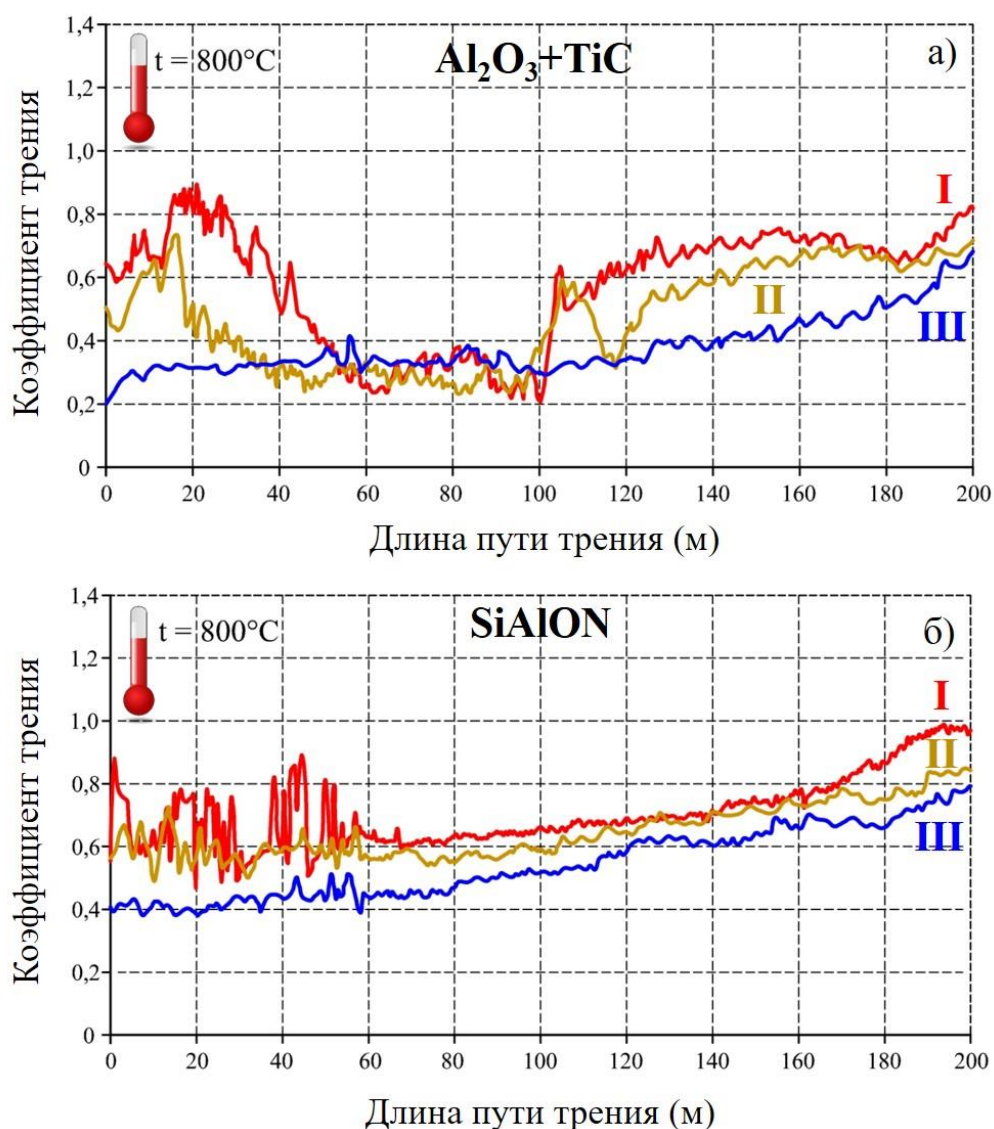


Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициента трения СМКП с различным индексом дефектности поверхностного слоя (I – алмазное шлифование, II – алмазное шлифование и доводка, III – алмазное шлифование, доводка и полирование) от длины пути трения: а) – для СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$; б) – для СМКП из SiAlON

Представленные на Рисунке 2.10 экспериментальные кривые показывают, что образцы с наименьшим индексом дефектности несколько снижают среднее значение КТ в сравнении с другими группами исследованных СМКП, а также изменяют характер изменения КТ во времени. Для образцов с высоким индексом дефектности КТ изменяется скачкообразно. Особенно это характерно для образцов из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$: КТ сначала растет, достигая максимальных значений, затем резко уменьшается, опять возрастает и лишь со временем стабилизируется. Такое немонотонное изменение КТ, судя по всему, является результатом чередования

процессов адгезионного схватывания контактирующих поверхностей и разрушения «мостиков» адгезионных связей. Для керамических образцов из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON , прошедших дополнительные доводку и полирование, изменение КТ на протяжении всего пути трения носит монотонный характер, что свидетельствует о более благоприятных условиях фрикционного взаимодействия с контртелом. Можно предположить, что отмеченные изменения характера контактного взаимодействия в условиях трения-скольжения также связаны со значительным уменьшением шероховатости ПС СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON , данные о которой приведены на Рисунках 2.4 и 2.5.

2.4. Исследование влияния состояния поверхностного слоя режущих пластин и элементов режима резания на интенсивность истирания керамики $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ при фрезеровании закаленной стали и керамики SiAlON при точении жаропрочного никелевого сплава

Представленные выше результаты экспериментальных исследований демонстрируют значительное влияние состояния ПС СМКП, которое может быть охарактеризовано предложенным индексом дефектности, на комплекс физико-механических и трибологических свойств при воздействии внешних нагрузок. Однако реальные эксплуатационные теплосиловые нагрузки, возникающие в процессе резания и действующие на контактные площадки КИ, очень специфичны. Только посредством изучения поведения СМКП с различным состоянием поверхностного слоя при резании можно выявить вклад индекса дефектности ПС в изнашивание КИ. При этом важной задачей является выбор показателя для оценки износостойкости, который с точки зрения классических положений теории резания являлся бы обобщающим показателем, учитывающим параметры КИ и достоверно отражал процесс его изнашивания.

Для решения задач настоящей работы был выбран обобщенный показатель «интенсивность истирания» J ($\text{мм}^3/\text{мин}$), предложенный А.М. Розенбергом [151], который описывается следующей зависимостью

$$J=W/\tau, \quad (2.2)$$

где τ – время резания (мин);

W – объемный износ инструмента (мм^3), определяемый по формуле

$$W = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \frac{t}{\sin \varphi} (1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \gamma) \cdot h_3^2, \quad (2.3)$$

где α , γ , φ – геометрические параметры инструмента; t – глубина резания (мм), h_3 – усредненная ширина площадки износа СМКП по задней поверхности (мм).

В настоящей работе в качестве временного интервала для определения износа СМКП была выбрана точка, соответствующая 4 мин. Выбор указанного значения обоснован тем, что его можно отнести к стадии установившегося изнашивания, а этап приработки режущих граней, который не является информативным для оценки их скорости изнашивания, уже завершен.

Для проведения экспериментов в условиях воздействия реальных теплосиловых нагрузок в процессе резания, использовалось два вида сборных инструментов, сведения о которых представлены в 1 главе (Рисунок 1.33).

1) Торцевые насадные фрезы были оснащены квадратными СМКП из материала $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, ПС которых имел различные индексы дефектности $I_{\text{деф}}$ (приведены средние арифметические значения): I группа – значение индекса дефектности 1,6 мкм (образцы, представленные на рынке, прошедшие алмазное шлифование); II группа – значение индекса дефектности 0,31 мкм (образцы после алмазного шлифования, дополнительно подвергнутые доводке); III группа – значение индекса дефектности 0,002 мкм (образцы после алмазного шлифования, дополнительно подвергнутые доводке и полированию). Данные о трещиностойкости СМКП, которая соответствует определенным индексам дефектности, приведены в Таблице 2.4.

При проведении экспериментов элементы режима резания варьировались на трех уровнях в следующем диапазоне: скорость резания V – 280...380 м/мин; подача S – 0,1...0,2 мм/зуб. Глубина резания t являлась постоянной величиной и во всех экспериментах составляла 1,0 мм. Обрабатывались призматические заготовки из закаленной стали ШХ15 (60÷62 HRC) на вертикально-фрезерном станке BM127.

2) Токарные резцы были оснащены круглыми СМКП из материала SiAlON, ПС которых имел различные значения индексы дефектности $I_{\text{деф}}$ (приведены средние арифметические значения): I группа – значение индекса дефектности 1,274 мкм (образцы, представленные на рынке, прошедшие алмазное шлифование); II группа – значение индекса дефектности 0,2 мм (образцы после алмазного шлифования, дополнительно подвергнутые доводке); III группа – значение индекса дефектности 0,0014 мкм (образцы после алмазного шлифования, дополнительно подвергнутые доводке и полированию). Данные о трещиностойкости СМКП, которая соответствует определенным индексам дефектности, приведены в Таблице 2.4.

При проведении экспериментов элементы режима резания варьировались на трех уровнях в следующем диапазоне: скорость резания V – 280...380 м/мин; подача S – 0,1...0,2 мм/об. Глубина резания t являлась постоянной величиной и во всех экспериментах составляла 1,0 мм. Обрабатывались заготовки в виде прутков из жаропрочного сплава на основе никеля ХН45МВТЮБР ($\sigma_B=1130$ МПа) на токарном станке с бесступенчатым приводом ZMM CU500MRD/1000.

Таким образом, при проведении экспериментов при фрезеровании и точении имели место две группы варьируемых факторов, связанных с состоянием поверхностного слоя СМКП (индекс дефектности и соответствующая ему трещиностойкость), и связанных с режимом резания – скорость резания и подача.

В Таблицах 2.5-2.7 приведены результаты экспериментальных исследований и данные об интенсивности истирания при эксплуатации СМКП из Al_2O_3+TiC с различными индексами дефектности при фрезеровании закаленной стали ШХ15 при варьировании элементов режима резания.

Таблица 2.5 – Интенсивность истирания СМКП из Al_2O_3+TiC (I группа по индексу дефектности) при фрезеровании закаленной стали ШХ15

№ п/п	V (м/мин)	S (мм/зуб)	I _{деф} (мкм)	K _c (МПа·м ^{1/2})	J _{ки} (мм ³ /мин)
1	280	0,1	1,6	3,68	0,00003
2	330	0,1	1,6	3,68	0,00014
3	380	0,1	1,6	3,68	0,0003
4	280	0,15	1,6	3,68	0,00033
5	330	0,15	1,6	3,68	0,00057
6	380	0,15	1,6	3,68	0,0011
7	280	0,2	1,6	3,68	0,0008
8	330	0,2	1,6	3,68	0,00125
9	380	0,2	1,6	3,68	0,0026

Таблица 2.6 – Интенсивность истирания СМКП из Al_2O_3+TiC (II группа по индексу дефектности) при фрезеровании закаленной стали ШХ15

№ п/п	V (м/мин)	S (мм/зуб)	I _{деф} (мкм)	K _c (МПа·м ^{1/2})	J _{ки} (мм ³ /мин)
1	280	0,1	0,31	3,72	0,00003
2	330	0,1	0,31	3,72	0,00007
3	380	0,1	0,31	3,72	0,0002
4	280	0,15	0,31	3,72	0,00021
5	330	0,15	0,31	3,72	0,0005
6	380	0,15	0,31	3,72	0,0009
7	280	0,2	0,31	3,72	0,0006
8	330	0,2	0,31	3,72	0,001
9	380	0,2	0,31	3,72	0,0019

Таблица 2.7 – Интенсивность истирания СМКП из Al_2O_3+TiC (III группа по индексу дефектности) при фрезеровании закаленной стали ШХ15

№ п/п	V (м/мин)	S (мм/зуб)	I _{деф} (мкм)	K _c (МПа·м ^{1/2})	J _{ки} (мм ³ /мин)
1	280	0,1	0,002	3,84	0,000006
2	330	0,1	0,002	3,84	0,00001
3	380	0,1	0,002	3,84	0,00007
4	280	0,15	0,002	3,84	0,00006
5	330	0,15	0,002	3,84	0,00013
6	380	0,15	0,002	3,84	0,0003
7	280	0,2	0,002	3,84	0,00019
8	330	0,2	0,002	3,84	0,0003
9	380	0,2	0,002	3,84	0,0007

В Таблицах 2.8-2.10 представлены результаты экспериментальных исследований и данные об интенсивности истирания при эксплуатации СМКП из SiAlON с различными индексами дефектности при точении жаропрочного никелевого сплава ХН45МВТЮБР при варьировании элементов режима резания.

На Рисунках 2.11 и 2.12 представлены графические зависимости интенсивности истирания при фрезеровании и точении от состояния поверхностного слоя СМКП при различном уровне теплосилового воздействия на КИ – при минимальном и максимальном в принятом диапазоне режима резания.

Таблица 2.8 – Интенсивность истирания СМКП из SiAlON (I группа по индексу дефектности) при точении никелевого сплава ХН45МВТЮБР

№ п/п	V (м/мин)	S (мм/об)	I _{деф} (мкм)	K _c (МПа·м ^{1/2})	J _{ки} мм ³ /мин
1	280	0,1	1,274	4,94	0,00073
2	330	0,1	1,274	4,94	0,0011
3	380	0,1	1,274	4,94	0,00174

Продолжение таблицы 2.8

4	280	0,15	1,274	4,94	0,0014
5	330	0,15	1,274	4,94	0,00187
6	380	0,15	1,274	4,94	0,00265
7	280	0,2	1,274	4,94	0,0024
8	330	0,2	1,274	4,94	0,003
9	380	0,2	1,274	4,94	0,0038

Таблица 2.9 – Интенсивность истирания СМКП из SiAlON (II группа по индексу дефектности) при точении никелевого сплава ХН45МВТЮБР

№ п/п	V (м/мин)	S (мм/об)	I _{деф} (мкм)	K _c (МПа·м ^{1/2})	J _{ки} мм ³ /мин
1	280	0,1	0,2	4,98	0,0006
2	330	0,1	0,2	4,98	0,0008
3	380	0,1	0,2	4,98	0,0016
4	280	0,15	0,2	4,98	0,0012
5	330	0,15	0,2	4,98	0,0016
6	380	0,15	0,2	4,98	0,0024
7	280	0,2	0,2	4,98	0,0018
8	330	0,2	0,2	4,98	0,0026
9	380	0,2	0,2	4,98	0,0032

Таблица 2.10 – Интенсивность истирания СМКП из SiAlON (III группа по индексу дефектности) при точении никелевого сплава ХН45МВТЮБР

№ п/п	V (м/мин)	S (мм/об)	I _{деф} (мкм)	K _c (МПа·м ^{1/2})	J _{ки} мм ³ /мин
1	280	0,1	0,0014	5,26	0,0004
2	330	0,1	0,0014	5,26	0,0006
3	380	0,1	0,0014	5,26	0,001
4	280	0,15	0,0014	5,26	0,0006

Продолжение таблицы 2.10

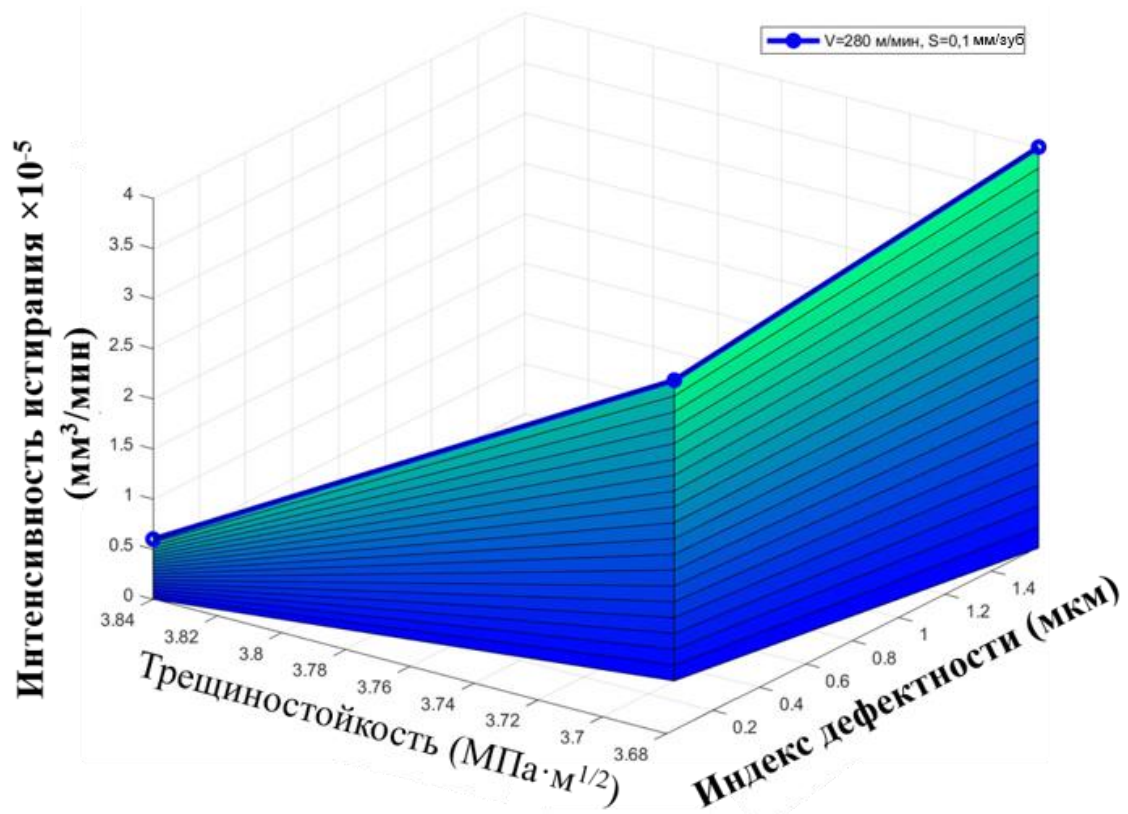
5	330	0,15	0,0014	5,26	0,0011
6	380	0,15	0,0014	5,26	0,0014
7	280	0,2	0,0014	5,26	0,001
8	330	0,2	0,0014	5,26	0,0015
9	380	0,2	0,0014	5,26	0,0019

Представленные ниже графические зависимости (Рисунки 2.11 и 2.12) демонстрируют очень сильное влияние состояния ПС СМКП, характеризующее индексом дефектности, на интенсивность их истирания в процессе эксплуатации во всем диапазоне принятых режимов резания.

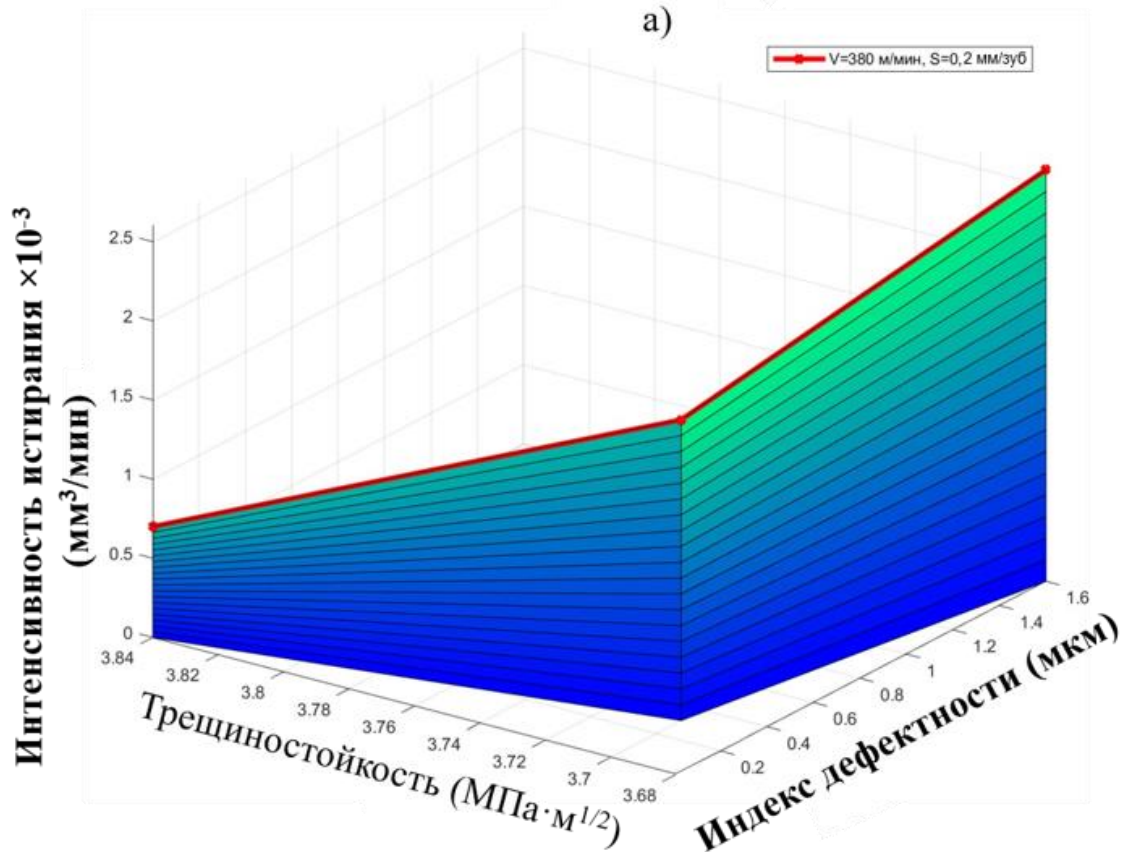
Особенно высока степень влияния индекса дефектности ПС на интенсивность истирания в условиях фрезерования. Так, использование СМКП из Al_2O_3+TiC III группы с наименьшим индексом дефектности при минимальном уровне теплосилового воздействия в принятом диапазоне режимов резания в 5 раз снижает интенсивность истирания при фрезеровании закаленной стали, а при максимальном теплосиловом воздействии – в 3,7 раза по сравнению с рыночными СМКП I группы, имеющими наивысший индекс дефектности.

Использование при точении СМКП из SiAlON III группы с наименьшим индексом дефектности при минимальном уровне теплосилового воздействия в принятом диапазоне режимов резания в 1,8 раза снижает интенсивность истирания при точении никелевого сплава, а при максимальном теплосиловом воздействии – в 2,0 раза по сравнению с рыночными СМКП I группы, имеющими наивысший индекс дефектности.

Следует отметить, что использование СМКП II группы как при фрезеровании, так и при точении оказывает незначительное влияние на снижение интенсивности истирания контактных поверхностей – по сравнению с СМКП I группы наблюдалось снижение указанного показателя не более чем в 1,2-1,3 раза.



а)



б)

Рисунок 2.11 – Влияние состояния поверхностного слоя СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ на интенсивность истирания при фрезеровании закаленной стали ШХ15 при различном режиме резания:

а) – $V=280 \text{ м/мин}$, $S=0,1 \text{ мм/зуб}$; б) – $V=380 \text{ м/мин}$, $S=0,2 \text{ мм/зуб}$

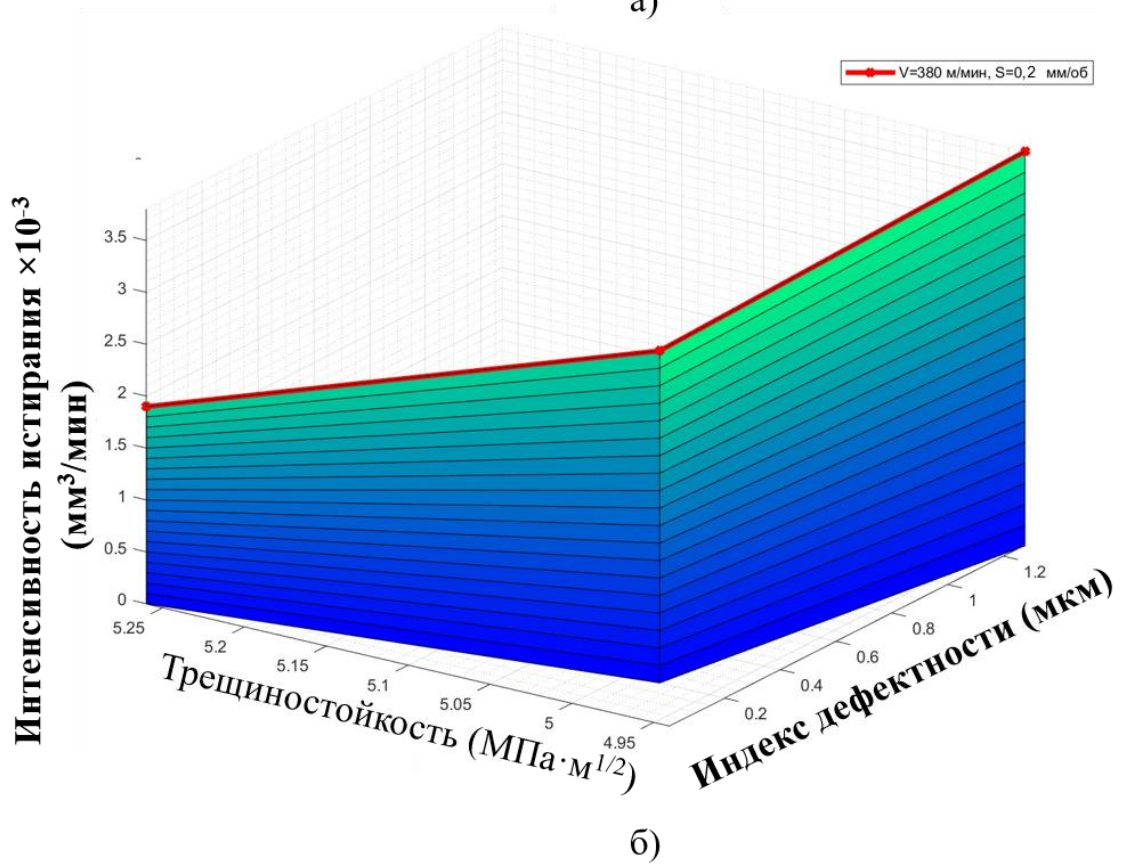
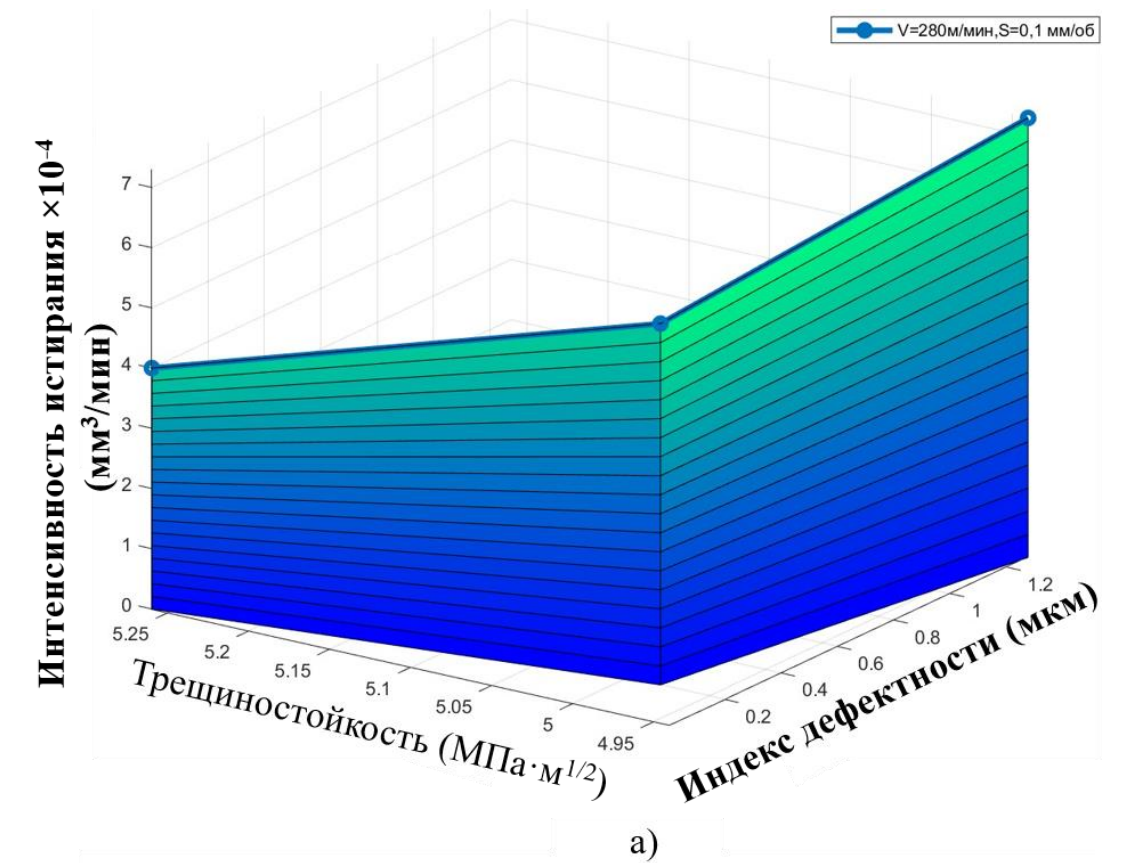


Рисунок 2.12 – Влияние состояния поверхностного слоя СМКП из SiAlON на интенсивность истирания при точении никелевого сплава ХН45МВТЮБР при различном режиме резания:

а) – $V=280 \text{ м/мин}$, $S=0,1 \text{ мм/об}$; б) – $V=380 \text{ м/мин}$, $S=0,2 \text{ мм/об}$

2.5. Разработка математических моделей зависимости интенсивности истирания режущих пластин из керамик на основе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON от состояния их поверхностного слоя и режима резания при фрезеровании закаленной стали и точении жаропрочного никелевого сплава

В настоящее время математическое моделирование сложных технологических систем лезвийной обработки с использованием режущих инструментов из керамик имеет важное научно-практическое значение для решения широкого спектра задач: сокращения проведения большого количества затратных натурных испытаний и получения достоверной информации для прогнозирования стойкости инструмента при воздействии эксплуатационных нагрузок; научно обоснованного выбора рациональных условий процесса резания, обеспечивающих требуемые выходные показатели процесса исходя из конкретных технологических задач; создания современной методологии исследований при освоении новых технологий обработки с использованием КИ.

Для построения математических моделей, отражающих важнейшие свойства системы лезвийной обработки режущим инструментом из керамики, за основу была принята следующая функциональная зависимость:

$$J = f(I_{\text{деф}}, K_c, V, S), \quad (2.4)$$

где J – интенсивность истирания керамического инструмента ($\text{мм}^3/\text{мин}$); $I_{\text{деф}}$ – индекс дефектности поверхностного слоя КИ (мкм); K_c – коэффициент интенсивности напряжений ($\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$); V – скорость резания ($\text{м}/\text{мин}$); S – подача ($\text{мм}/\text{об}(\text{зуб})$).

Оригинальность предложенной функциональной зависимости и моделей, разработанных на ее основе, определяется тем, что они учитывают не только факторы, связанные с условиями эксплуатации керамического инструмента, традиционно варьируемые при математическом моделировании процессов резания, но одновременно учитывают состояние ПС СМКП (предложенный «индекс дефектности» и трещиностойкость), которое, как было описано выше,

оказывает важное влияние на интенсивность истирания контактных поверхностей при воздействии эксплуатационных нагрузок. При построении математических моделей использовался массив экспериментальных данных, приведенных в Таблицах 2.5-2.7 (для фрезерования закаленных сталей СМКП из Al_2O_3+TiC) и Таблицах 2.8-2.10 (для точения никелевых сплавов СМКП из $SiAlON$).

При моделировании использовалась интерактивная среда программирования, численных расчетов и визуализации результатов MATLAB, наилучшим образом зарекомендовавшая себя при математическом моделировании сложных технических систем, описываемых дифференциально-алгебраическими системами уравнений.

Под математическими моделями процессов фрезерования и точения в широком диапазоне режимов резания (скорости V и подачи S) с использованием СМКП, имеющими различное состояние ПС, понимаются уравнения, связывающее выходной параметр Y (интенсивность истирания КИ) с факторами x_i , воздействующими на объект исследования ($x_1 - I_{деф}$, $x_2 - K_c$, $x_3 - V$, $x_4 - S$).

Для упрощения ввода исходных данных при моделировании осуществлялась кодировка переменных. Формула кодирования переменных имеет следующий вид:

$$x_i = \frac{x_i - \frac{x_{i\min} + x_{i\max}}{2}}{\frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}}, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (2.5)$$

Математическая модель в кодированных переменных для многолезвийной обработки (фрезерования) имеет следующий вид:

$$Y_{фр} = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \beta_5 x_1^2 + \beta_6 x_3^2 + \beta_7 x_4^2 + \beta_8 x_1 x_3 + \beta_9 x_1 x_4 + \beta_{10} x_3 x_4 + \beta_{11} x_1 x_3 x_4 + \beta_{12} x_2 x_3 + \beta_{13} x_2 x_4 + \beta_{14} x_2 x_3 x_4 \quad (2.6)$$

В Таблице 2.11 приведена матрица плана эксперимента F закаленной стали ШХ15 с использованием СМКП из Al_2O_3+TiC , а в Таблице 2.12 – данные вычисления элементов матрицы $(F^T F)^{-1} F^T$.

Таблица 2.11 – Матрица F планирования эксперимента при фрезеровании

№	K	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1^2	x_3^2	x_4^2	$x_1 x_3$	$x_1 x_4$	$x_3 x_4$	$x_1 x_3 x_4$	$x_2 x_3$	$x_2 x_4$	$x_2 x_3 x_4$
1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	0	-1	1	0	1	0	-1	0	0	0	1	0

Продолжение таблицы 2.11

3	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
4	1	1	-1	-1	0	1	1	0	-1	0	0	0	1	0	0
5	1	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	-1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	-1	0	0
7	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
8	1	1	-1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	-1	0
9	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
10	1	-0,614	-0,5	-1	-1	0,376	1	1	0,614	0,614	1	-0,614	0,5	0,5	-0,5
11	1	-0,614	-0,5	0	-1	0,376	0	1	0	0,614	0	0	0	0,5	0
12	1	-0,614	-0,5	1	-1	0,376	1	1	-0,614	0,614	-1	0,614	-0,5	0,5	0,5
13	1	-0,614	-1	-1	0	0,376	1	0	0,614	0	0	0	1	0	0
14	1	-0,614	-0,5	0	0	0,376	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	-0,614	-1	1	0	0,376	1	0	-0,614	0	0	0	-1	0	0
16	1	-0,614	-0,5	-1	1	0,376	1	1	0,614	-0,614	-1	0,614	0,5	-0,5	0,5
17	1	-0,614	-0,5	0	1	0,376	0	1	0	-0,614	0	0	0	-0,5	0
18	1	-0,614	-1	1	1	0,376	1	1	-0,614	-0,614	1	-0,614	-1	-1	-1
19	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1
20	1	-1	1	0	-1	1	0	1	0	1	0	0	0	-1	0
21	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1
22	1	-1	1	-1	0	1	1	0	1	0	0	0	-1	0	0
23	1	-1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	1	-1	1	1	0	1	1	0	-1	0	0	0	1	0	0
25	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1
26	1	-1	1	0	1	1	0	1	0	-1	0	0	0	1	0
27	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1

Таблица 2.12 – Вычисления элементов матрицы для фрезерования

15,8858	7,5723	7,5176	0,0357	-0,0042	-15,7170	0,4747	-0,7782	-0,3218	-0,4630	-0,0063	-0,6945	-0,2999	-0,4656	-0,6984
7,5723	3,7311	3,6755	0,0161	-0,0035	-7,5454	0,2861	-0,3265	-0,1592	-0,2291	-0,0053	-0,3437	-0,1493	-0,2313	-0,3469
7,5176	3,6755	3,6755	0,0161	-0,0035	-7,4906	0,2861	-0,3265	-0,1592	-0,2291	-0,0053	-0,3437	-0,1493	-0,2313	-0,3469
0,0357	0,0161	0,0161	0,0825	0,0001	-0,0374	0,0027	0,0000	0,0593	-0,0045	0,0002	-0,0067	0,0588	-0,0044	-0,0066
-0,0042	-0,0035	-0,0035	0,0001	0,0831	0,0020	0,0013	0,0019	-0,0033	0,0700	-0,0004	-0,0072	-0,0033	0,0698	-0,0075
-15,7170	-7,5454	-7,4906	-0,0374	0,0020	15,7528	-0,5842	0,6643	0,3179	0,4574	0,0030	0,6861	0,2949	0,4586	0,6880
0,4747	0,2861	0,2861	0,0027	0,0013	-0,5842	0,1893	-0,0251	-0,0104	-0,0149	0,0020	-0,0223	-0,0087	-0,0140	-0,0211
-0,7782	-0,3265	-0,3265	0,0000	0,0019	0,6643	-0,0251	0,1960	0,0162	0,0233	0,0029	0,0350	0,0162	0,0245	0,0368
-0,3218	-0,1592	-0,1592	0,0593	-0,0033	0,3179	-0,0104	0,0162	0,1668	-0,0040	-0,0050	-0,0060	0,1199	-0,0061	-0,0091
-0,4630	-0,2291	-0,2291	-0,0045	0,0700	0,4574	-0,0149	0,0233	-0,0040	0,2124	-0,0072	-0,0088	-0,0067	0,1720	-0,0132
-0,0063	-0,0053	-0,0053	0,0002	-0,0004	0,0030	0,0020	0,0029	-0,0050	-0,0072	0,1244	0,1014	-0,0049	-0,0075	0,1010
-0,6945	-0,3437	-0,3437	-0,0067	-0,0072	0,6861	-0,0223	0,0350	-0,0060	-0,0088	0,1014	0,3142	-0,0101	-0,0132	0,2514
-0,2999	-0,1493	-0,1493	0,0588	-0,0033	0,2949	-0,0087	0,0162	0,1199	-0,0067	-0,0049	-0,0101	0,1560	-0,0087	-0,0131
-0,4656	-0,2313	-0,2313	-0,0044	0,0698	0,4586	-0,0140	0,0245	-0,0061	0,1720	-0,0075	-0,0132	-0,0087	0,2149	-0,0178
-0,6984	-0,3469	-0,3469	-0,0066	-0,0075	0,6880	-0,0211	0,0368	-0,0091	-0,0132	0,1010	0,2514	-0,0131	-0,0178	0,3134

В дальнейшем определялся вектор коэффициентов β в модели методом наименьших квадратов:

$$\beta = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{Y}, \quad (2.7)$$

где $\mathbf{Y}_{\text{фр}}$ – результат исследуемой величины в экспериментах при фрезеровании, состоящих из 27 опытов.

$\mathbf{Y}_{\text{фр}} =$

[
 0,00003
 0,00014
 0,0003
 0,00033
 0,00057
 0,0011
 0,0008
 0,00125
 0,0026
 0,00003
 0,00007
 0,0002
 0,00021
 0,0005
 0,0009
 0,0006
 0,001
 0,0019
 0,000006
 0,00001
 0,00007
 0,00006
 0,00013
 0,0003
 0,00019
 0,0003
 0,0007
]

В результате была получена следующая величина вектора коэффициентов β :

[
 0,000739
 0,000279
 -1,89E-05
 0,000305
 0,00044
 -0,00035
 0,000121
 0,000102
 7,08E-05
 5,92E-05
 0,000247
]

7,03E-05
 -9,76E-05
 -0,0002
 -6,55E-05
]

Для вычисления среднего квадратичного отклонения модели была найдена следующая величина:

$$\sigma = (\mathbf{Y} - \mathbf{F}\beta)^T(\mathbf{Y} - \mathbf{F}\beta)/26 = 6.9822 \times 10^{-9} \quad (2.8)$$

В процентном отношении отклонение векторов результатов модели и исходных данных серии экспериментов при фрезеровании составляет допустимую величину, равную:

$$\frac{26\sigma}{Y^TY} \times 100 \% = 1,01 \% \quad (2.9)$$

Таким образом, состоятельная модель масштабированной с коэффициентом 10^4 величины интенсивности истирания $Y_{фр}$ при фрезеровании закаленной стали ШХ15 с использованием СМКП из $Al_2O_3 + TiC$ выражается приведенной ниже формулой в кодированных переменных:

$$10^4 Y_{фр} = 7,39 + 2,78x_1 - 0,189x_2 + 3,052x_3 + 4,4x_4 - 3,5x_1^2 + 1,21x_3^2 + 1,02x_4^2 + \\ + 0,707x_1x_3 + 0,59x_1x_4 + 2,46x_3x_4 + 0,703x_1x_3x_4 - 0,97x_2x_3 - 1,97x_2x_4 - 0,65x_2x_3x_4 \quad (2.10)$$

После выполнения декодировки выражения (2.10) зависимость интенсивности истирания при фрезеровании от факторов состояния поверхностного слоя СМКП и режима резания принимает следующий вид:

$$J_{фр} = (7,39 + 2,78 I_{деф} - 0,189Kc + 3,052V + 4,4S - 3,5 I_{деф}^2 + 1,2V^2 + 1,02S^2 + 0,707 I_{деф}V + \\ + 0,59 I_{деф}S + 2,46VS + 0,703 I_{деф}VS - 0,97KcV - 1,97KcS - 0,65KcVS) \cdot 10^{-4} \quad (2.11)$$

Аналогичным образом выполнялось моделирование для операции точения. При этом математическая модель в кодированных переменных для однолезвийной обработки (точение) имеет для следующий вид:

$$Y_{точ} = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \beta_5 x_1^2 + \beta_6 x_3^2 + \beta_7 x_4^2 + \beta_8 x_1 x_3 + \beta_9 x_1 x_4 + \\ + \beta_{10} x_3 x_4 + \beta_{11} x_1 x_3 x_4, \quad (2.12)$$

В Таблице 2.13 приведена матрица плана эксперимента F для точения жаропрочного никелевого сплава ХН45МВТЮБР с использованием СМКП из SiAlON, а в Таблице 2.14 – данные вычисления элементов матрицы.

Таблица 2.14 – Вычисления элементов матрицы для точения

[illegible]

В дальнейшем определялся вектор коэффициентов β в модели методом наименьших квадратов (по формуле 2.7) и $Y_{\text{точ}}$ – результат исследуемой величины в экспериментах при точении, состоящих из 27 опытов.

$Y_{\text{точ}} =$
 [
 0,00073
 0,0011
 0,00174
 0,0014
 0,00187
 0,00265
 0,0024
 0,003
 0,0038
 0,0006
 0,0008
 0,0016
 0,0012
 0,0016
 0,0024
 0,0018
 0,0026
 0,0032
 0,0004
 0,0006
 0,001
 0,0006
 0,0011
 0,0014
 0,001
 0,0015
 0,0019
]

В результате была получена следующая величина вектора коэффициентов β :

[
 -0,00099
 -0,00071
 -0,00122
 0,000505
 0,000751
 0,00249
 3,15E-05
 7,39E-05
 0,000108
 0,000213
 9,24E-05

6,99E-06
]

Для вычисления среднего квадратичного отклонения модели была найдена следующая величина:

$$\sigma = (\mathbf{Y} - \mathbf{F}\beta)^T(\mathbf{Y} - \mathbf{F}\beta)/26 = 1.5527 \times 10^{-8} \quad (2.13)$$

В процентном отношении отклонение векторов результатов модели и исходных данных серии экспериментов при точении составляет допустимую величину, равную:

$$\frac{26\sigma}{Y_T Y} \times 100\% = 0,442\% \quad (2.14)$$

Таким образом, состоятельная модель масштабированной с коэффициентом 10^4 величины интенсивности истирания $Y_{\text{точ}}$ при точении жаропрочного никелевого сплава ХН45МВТЮБР с использованием СМКП из SiAlON выражается приведенной ниже формулой в кодированных переменных:

$$10^4 Y_{\text{точ}} = -9,9 - 7,1x_1 - 12,2x_2 - 5,05x_3 - 7,51x_4 + 24,9x_1^2 + 0,315x_3^2 + 0,739x_4^2 + 1,08x_1x_3 + \\ + 2,13x_1x_4 + 0,924x_3x_4 + 0,0699x_1x_3x_4, \quad (2.15)$$

После выполнения декодировки выражения (2.15) зависимость интенсивности истирания при точении от факторов состояния поверхностного слоя СМКП и режима резания принимает следующий вид:

$$J_{\text{точ}} = (-9,9 - 7,1 I_{\text{деф}} - 12,2K_c - 5,05V - 7,51S + 24,9 I_{\text{деф}}^2 + 0,315V^2 + 0,739S^2 + 1,08 I_{\text{деф}}V + \\ + 2,13 I_{\text{деф}}S + 0,924VS + 0,0699 I_{\text{деф}}VS)10^{-4} \quad (2.16)$$

Результаты математического моделирования в виде регрессионных зависимостей для интенсивности истирания СМКП при фрезеровании (2.11) и точении (2.16) представляют собой полиномиальные выражения из переменных составляющих, полученных аналитическими и эмпирическими методами и учитывающие состояние ПС инструмента керамического инструмента (индекс дефектности и трещиностойкость), а также элементы режима лезвийной обработки (скорость резания и подача).

В процентном отношении отклонения векторов результатов модели и экспериментальных данных составляет 1,01 % для фрезерования и 0,442 % для точения, что подтверждает их корректность и обеспечивает возможность

практического использования полученных зависимостей для прогнозирования (предварительной оценки) интенсивности истирания КИ.

С использованием разработанных моделей и компьютерной программы была построена серия графических зависимостей интенсивности истирания СМКП при фрезеровании и точении для различных сочетаний состояния поверхностного слоя керамического инструмента (индексов дефектности и трещиностойкости) и элементов режима обработки резанием. В качестве примера на Рисунках 2.13 и 2.14 приведены графические зависимости интенсивности истирания от режимов резания в кодированных переменных при фрезеровании, а на Рисунках 2.15 и 2.16 – при точении. Зависимости представлены для двух групп дефектности СМКП: I группа – образцы, представленные на рынке, прошедшие алмазное шлифование (максимальный уровень дефектности); III группа – образцы после алмазного шлифования, доводки и полирования (минимальный уровень дефектности).

Анализ полученных результатов показывает, что определяющим по степени влияния на интенсивность истирания является предложенный в работе критерий – «индекс дефектности», характеризующий состояние ПС. Как показали результаты выполненного моделирования и обработки массива данных, индекс дефектности ПС вносит существенный вклад в процесс изнашивания контактных поверхностей и определяет интенсивность истирания КИ во всем исследуемом диапазоне элементов режима резания. При этом важно подчеркнуть, что индекс дефектности является управляемым фактором, а влиять на него, как было показано в разделе 2.2, возможно посредством применения различных методов финишной обработки КИ.

Как следует из графических зависимостей, представленных на Рисунках 2.13 и 2.15, наибольшему индексу дефектности ПС соответствует максимальный уровень интенсивности истирания поверхностного слоя СМКП при фрезеровании и точении. И наоборот, использование СМКП с наименьшим индексом дефектности (Рисунки 2.14 и 2.16) обеспечивает минимальную интенсивность их истирания при резании. Разница в интенсивности истирания при эксплуатации СМКП на режимах максимальной производительности составляет $\sim 3,8$ раза при фрезеровании и $\sim 1,8$ раза при точении.

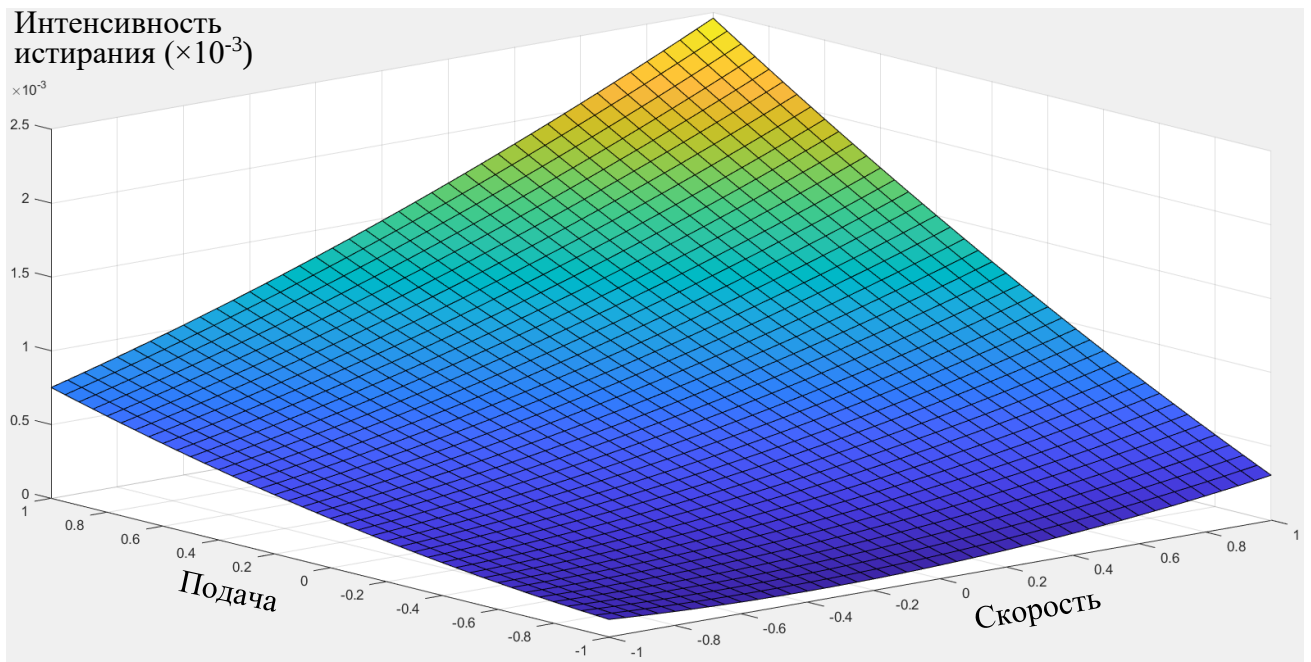


Рисунок 2.13 – Зависимость интенсивности истирания от режимов резания в кодированных переменных при фрезеровании закаленной стали СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ (максимальный уровень дефектности поверхностного слоя)

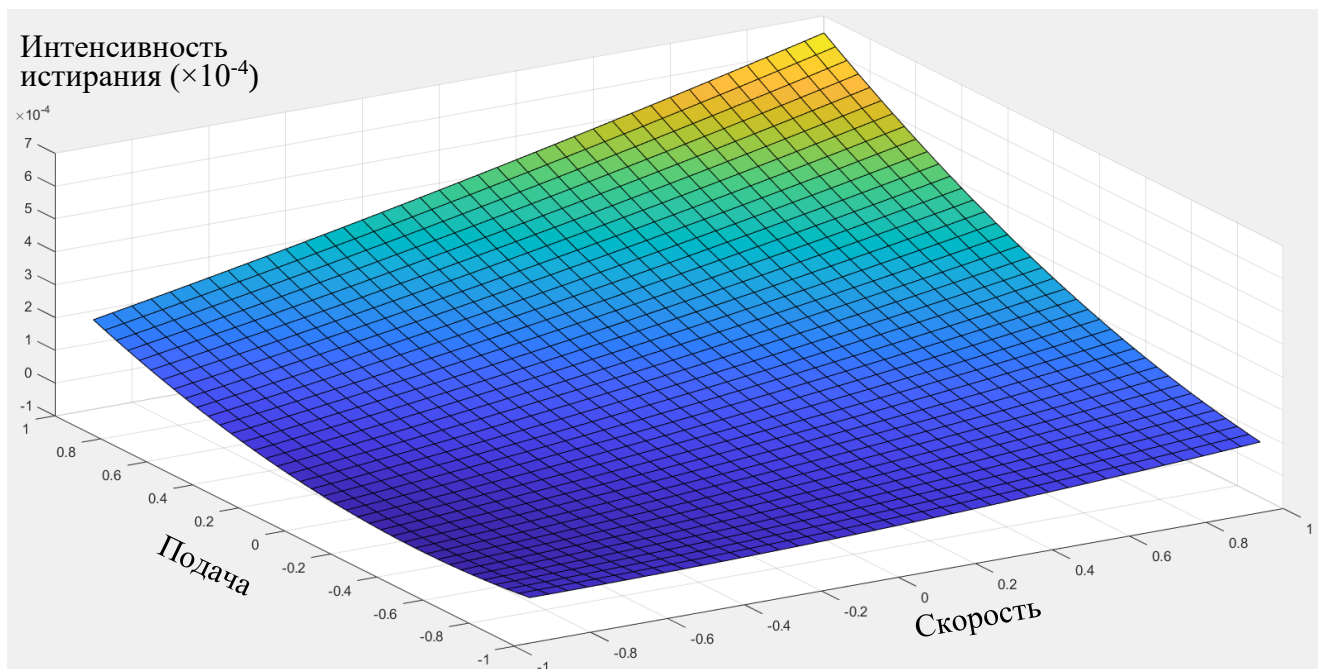


Рисунок 2.14 – Зависимость интенсивности истирания от режимов резания в кодированных переменных при фрезеровании закаленной стали СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ (минимальный уровень дефектности поверхностного слоя)

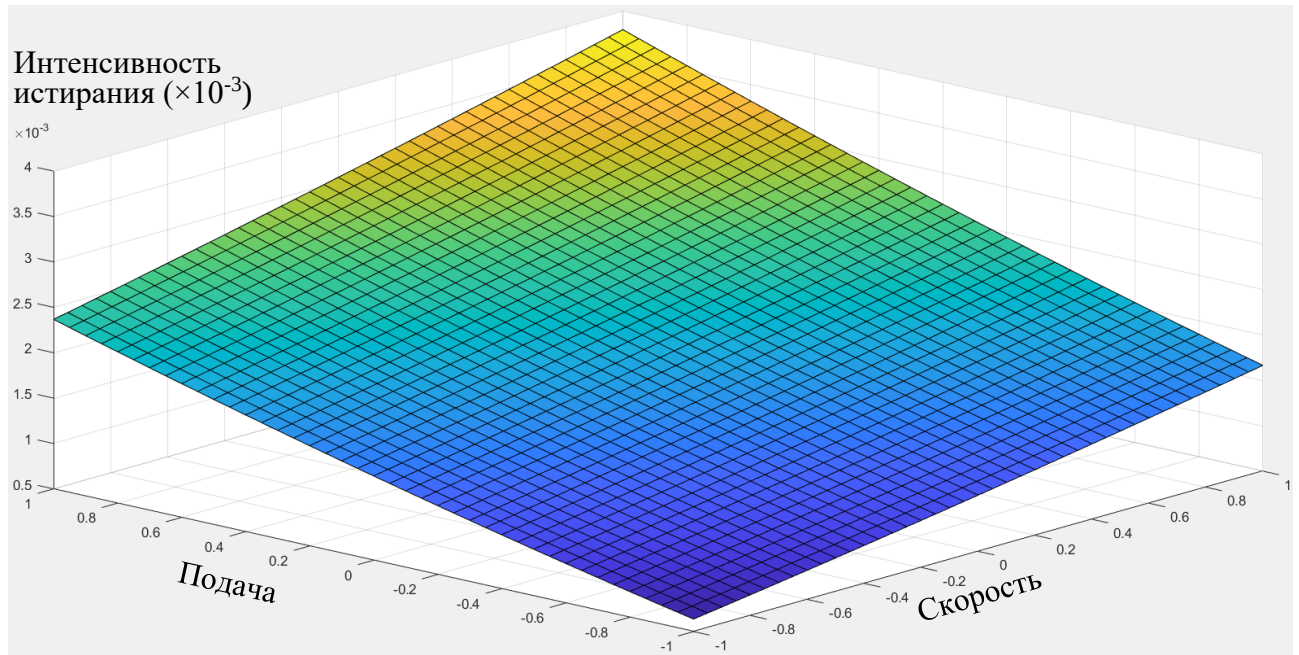


Рисунок 2.15 – Зависимость интенсивности истирания от режимов резания в кодированных переменных при точении жаропрочного никелевого сплава СМКП из SiAlON (максимальный уровень дефектности поверхностного слоя)

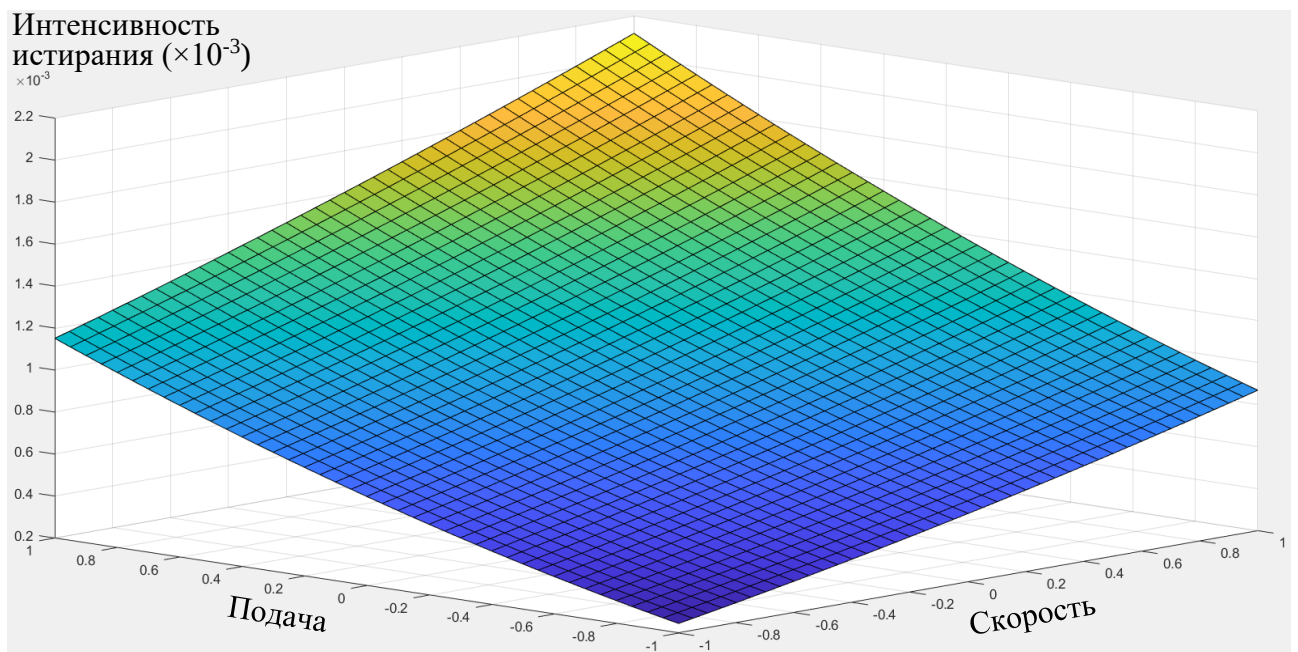


Рисунок 2.16 – Зависимость интенсивности истирания от режимов резания в кодированных переменных при точении жаропрочного никелевого сплава СМКП из SiAlON (минимальный уровень дефектности поверхностного слоя)

Следует отметить, что использование СМКП со средним уровнем дефектности не вносит значимого вклада в снижение интенсивности истирания при фрезеровании и точении. Таким образом, результаты, полученные посредством использования разработанных математических моделей, хорошо коррелируют с данными натурных испытаний, приведенных в разделе 2.4. Предложенные модели могут использоваться в качестве удобного инструментария для прогнозирования интенсивности истирания КИ и решения других технологических задач.

2.6. Исследование влияния индекса дефектности режущих пластин из керамик $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ и SiAlON на надежность при фрезеровании закаленной стали и точении жаропрочного никелевого сплава

Приведенные выше результаты демонстрируют высокую эффективность подхода, связанного с минимизацией дефектности ПС для снижения интенсивности истирания СМКП, но они не позволяют судить о надежности инструмента. Как было уже отмечено в 1 главе работы, в производственных условиях при принятии решения о целесообразности использования режущего инструмента в процессах механообработки наибольшее распространение получила методика оценки двух характеристик надежности – средней стойкости (наработки на отказ) и показателя ее вариации VarT (стабильности эксплуатации инструмента), характеризующей рассеивание времени работы до достижения принятого критерия отказа. Поэтому в рамках настоящей работы был проведен комплекс лабораторных испытаний для оценки влияния индекса дефектности режущих пластин из керамик $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ и SiAlON на стабильность их эксплуатации при фрезеровании закаленной стали и точении жаропрочного никелевого сплава.

Для проведения эксплуатационных испытаний использовалась III группа СМКП – образцы после алмазного шлифования, доводки и полирования (с минимальным индексом дефектности). Для того, чтобы можно было сопоставить

новые результаты с показателями надежности СМКП I группы с наивысшим индексом дефектности (рыночные образцы инструмента после алмазного шлифования), условия резания были идентичны испытаниям, которые были ранее проведены в диссертационной работы и представлены на Рисунках 1.14 и 1.15. Так как образцы СМКП II группы дефектности не продемонстрировали заметного вклада в снижение интенсивности истирания при нагрузках, возникающих в процессе резания, они не использовались при стойкостных испытаниях.

На Рисунке 2.17 представлены кривые реализаций «износ – время резания» при фрезеровании закаленной стали ШХ15 СМКП из Al_2O_3+TiC с минимальным индексом дефектности при $V=380$ м/мин, $S=0,15$ мм/зуб, $t=1$ мм. Экспериментальные кривые реализаций «износ – время резания» в условиях точения жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР СМКП из SiAlON с минимальным индексом дефектности при $V=280$ м/мин, $S=0,15$ мм/об, $t=1$ мм приведены на Рисунке 2.18. Сопоставление экспериментальных результатов, представленных на Рисунке 2.17 и 1.14 (при фрезеровании) и Рисунке 2.18 и 1.15 (при точении), позволяет выявить ярко выраженные характерные изменения при эксплуатации СМКП с минимальными индексами дефектности, достигаемыми многоэтапной алмазной обработкой, включающей шлифование, доводку и полирование.

Обращает на себя внимание тот факт, что несмотря на выраженное снижение средней скорости нарастания износа по задней поверхности СМКП на достаточно большом временном участке испытаний при фрезеровании и точении, итоговая разница в средней стойкости КИ с минимальными и максимальными индексами дефектности составляет не более 25%. Поэтому главным эффектом следует считать то, что использование «бездефектных» СМКП коренным образом меняет характер развития износа с течением времени. В случае эксплуатации рыночных СМКП, имеющих высокий индекс дефектности, кривые реализаций «износ – время» имеют выраженный веерный характер (Рисунок 1.14 и 1.15), а при резании «бездефектными» СМКП они имеют вид достаточно тесно переплетающихся пучков кривых (Рисунки 2.17 и 2.18) с относительно небольшими разбросами значений времени работы до отказа (при 400 мкм).

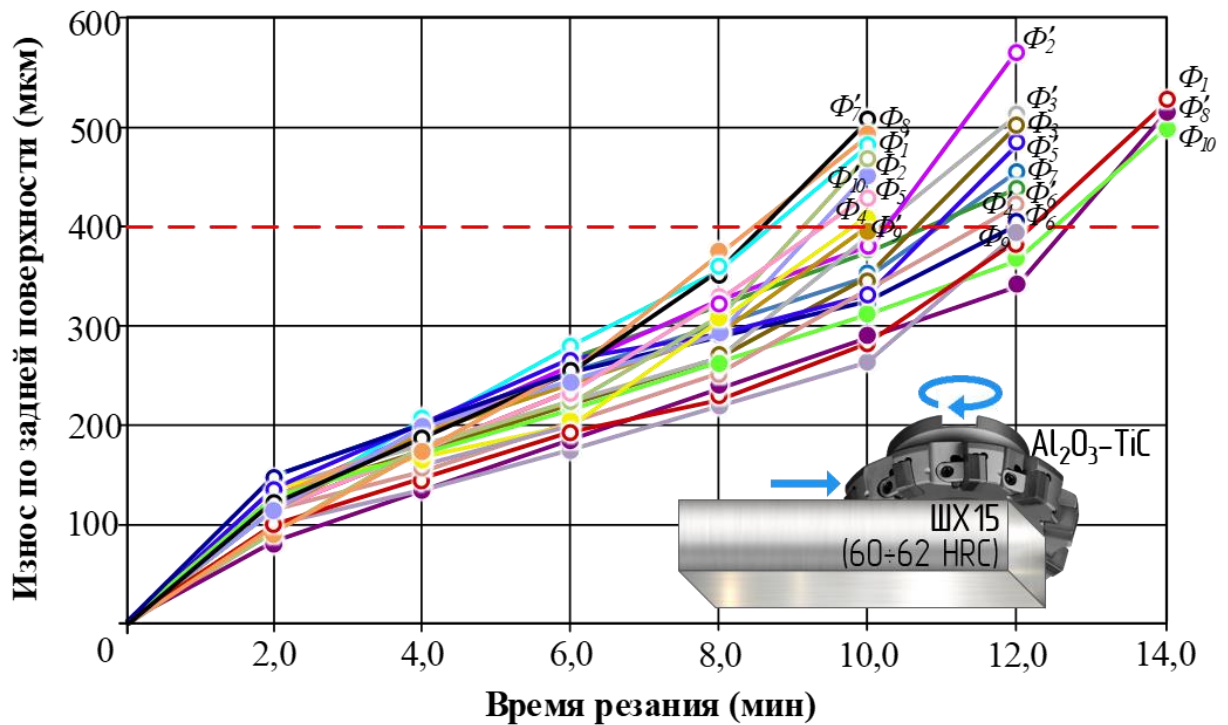


Рисунок 2.17 – Кривые реализаций «износ – время резания» при фрезеровании закаленной стали ШХ15 СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3\text{+TiC}$ с минимальным индексом дефектности ($V=380$ м/мин, $S=0,15$ мм/зуб, $t=1$ мм)

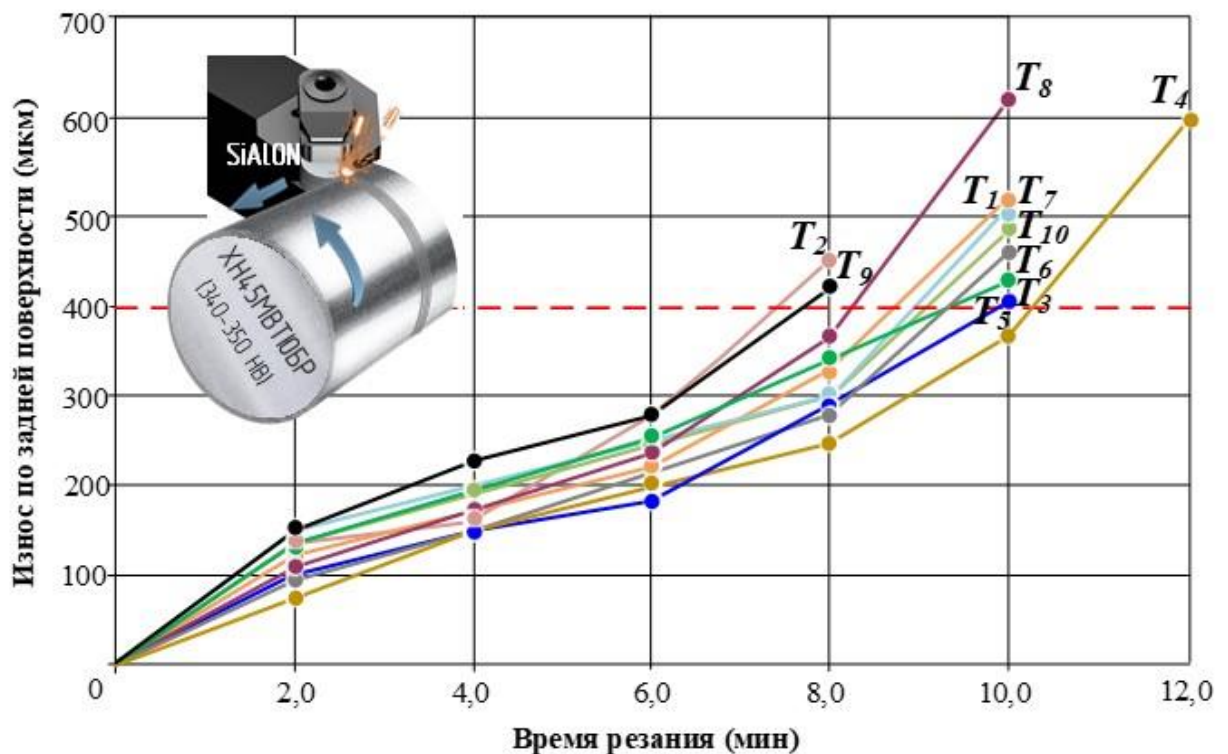


Рисунок 2.18. Кривые реализаций «износ – время» при точении жаропрочного сплава XH45MBTЮБР СМКП из SiAlON с минимальным индексом дефектности ($V=280$ м/мин, $S=0,15$ мм/об, $t=1$ мм)

Применение КИ с минимальным индексом дефектности обеспечивает чрезвычайно важный результат – показатель вариации стойкости VarT (определяемый как соотношение значений среднего квадратического отклонения и среднего арифметического) значительно уменьшается. В количественном выражении VarT при фрезеровании закаленной стали ШХ15 СМКП из Al_2O_3+TiC был уменьшен в 2 раза и составил 14% (по результатам испытаний 20 режущих граней), а при точении жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР СМКП из SiAlON – в 2,5 раза и составил 10% (по результатам испытаний 10 режущих граней).

Таким образом, можно считать доказанным, что наличие высокодефектного слоя на поверхности СМКП ключевым образом влияет на снижение их эксплуатационной надежности, характеризующейся чрезмерно большим разбросом времени работы КИ до отказа. Использование различных технологических подходов, направленных на модификацию ПС КИ и снижение его индекса дефектности, потенциально может обеспечить повышение надежности их эксплуатации.

При этом, несмотря на очевидный эффект, достигнутый применением многоэтапной финишной обработки (шлифование, доводка и полирование), указанную технологию нельзя назвать перспективной для широкого применения в инструментальной промышленности. Для СМКП, являющихся быстроизнашиваемыми расходными изделиями массового производства с коротким сроком эксплуатации, применение многоэтапной абразивной обработки значительно увеличит затраты на технологический цикл изготовления инструмента и, очевидно, не обеспечит рентабельность производства.

Поэтому в рамках дальнейших исследований в диссертационной работе осуществлялась разработка методологии и эффективных технологических решений для финишной обработки посредством модификации поверхностного слоя КИ, обеспечивающих минимизацию индекса дефектности инструмента, сегодня выпускаемого в промышленных масштабах, и решение проблемы недостаточной надежности при его эксплуатации в процессе резания.

2.7. Выводы

1. Проведенный комплекс исследований позволил выявить и классифицировать характерные дефекты, присутствующие в ПС выпускаемых промышленностью инструментов из керамик на базе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON . Предложенный для возможности комплексного анализа степени дефектности ПС обобщенный критерий – «индекс дефектности», представляет собой произведение плотности дефектов и максимальной глубины дефектного слоя. Разработанная методика для выполнения количественной оценки индекса дефектности включает определение плотности дефектов контрастированием поверхности наклонным освещением и глубины дефектного слоя по параметру R_t посредством профилометрии. Выявлено, что индекс дефектности является показателем, высокочувствительным к изменению состояния поверхностного слоя инструмента, влиять на которое можно посредством применения различных методов финишной обработки инструмента, модифицирующих состояние ПС.

2. Выполненные экспериментальные исследования влияния различных индексов дефектности ПС режущих пластин из керамик $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON на комплекс физико-механических и трибологических характеристик позволили установить, что минимизация индекса дефектности значительно повышает сопротивление режущих кромок скалыванию и устойчивость ПС к абразивному истиранию, а также благоприятно влияет (стабилизирует) условия фрикционного взаимодействия с контртелом при высокотемпературном нагреве.

3. Комплекс эксплуатационных испытаний СМКП из керамик $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON , классифицированных по трем группам дефектности, при фрезеровании закаленной стали и точении жаропрочного никелевого сплава показал высокую информативность использования индекса дефектности в качестве критерия состояния ПС и его сильное влияние на интенсивность истирания контактных поверхностей инструмента при воздействии эксплуатационных нагрузок в широком диапазоне режимов резания.

4. Разработанные на основе проведенного математического моделирования функциональные зависимости интенсивности истирания СМКП из керамик $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON при фрезеровании закаленной стали и точении жаропрочного никелевого сплава от факторов, связанных с состоянием ПС инструмента (индексом дефектности и трещиностойкостью), а также элементами режима лезвийной обработки (скоростью резания и подачей) могут использоваться в качестве удобного инструментария для прогнозирования интенсивности истирания инструмента из керамики в процессе эксплуатации и выбора элементов режима резания.

5. Выполненные аналитические исследования с использованием разработанных функциональных зависимостей показали, что определяющим по степени влияния на интенсивность истирания является предложенный критерий – «индекс дефектности». Наибольшему индексу дефектности ПС соответствует максимальный уровень интенсивности истирания поверхностного слоя СМКП при фрезеровании и точении. И наоборот, использование СМКП с наименьшим индексом дефектности обеспечивает минимальную интенсивность их истирания во всем исследованном диапазоне элементов режима резания. Разница в интенсивности истирания СМКП из керамик $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON при режимах максимальной производительности составляет величину $\sim 3,8$ раза при фрезеровании и $\sim 1,8$ раза при точении, что было установлено в результате математического моделирования и подтверждено выполненными натурными испытаниями.

6. Проведенный комплекс стойкостных испытаний СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ при фрезеровании закаленной стали ШХ15 и СМКП из SiAlON при точении жаропрочного никелевого сплава ХН45МВТЮБР показал, что применение инструмента с минимальным индексом дефектности ПС принципиально меняет характер развития износа с течением времени. Реализации «износ – время» имеют вид достаточно тесно переплетающихся пучков кривых, а коэффициент вариации наработки на отказ, характеризующий надежность инструмента, при фрезеровании

уменьшается в 2 раза, а при точении – в 2,5 раза по сравнению с использованием промышленно выпускаемых СМКП, имеющих высокий индекс дефектности.

Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ И ПОВЫШЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

3.1. Выявление взаимосвязи микроструктуры и морфологии формируемых покрытий с индексом дефектности керамических инструментов и задачи, решаемые модификацией их поверхностного слоя

Результатами экспериментальных исследований, представленными в предыдущих главах, показано, что наличие высокодефектного слоя на поверхности СМКП ключевым образом влияет на снижение их надежности, выражающейся в большом рассеивании времени работы КИ до отказа при воздействии эксплуатационных нагрузок, что определяет необходимость разработки и применения различных технологических подходов, направленных на модификацию ПС для снижения индекса его дефектности. Кроме того, можно предположить, что минимизация дефектов ПС создаст благоприятные условия для последующего осаждения функциональных покрытий.

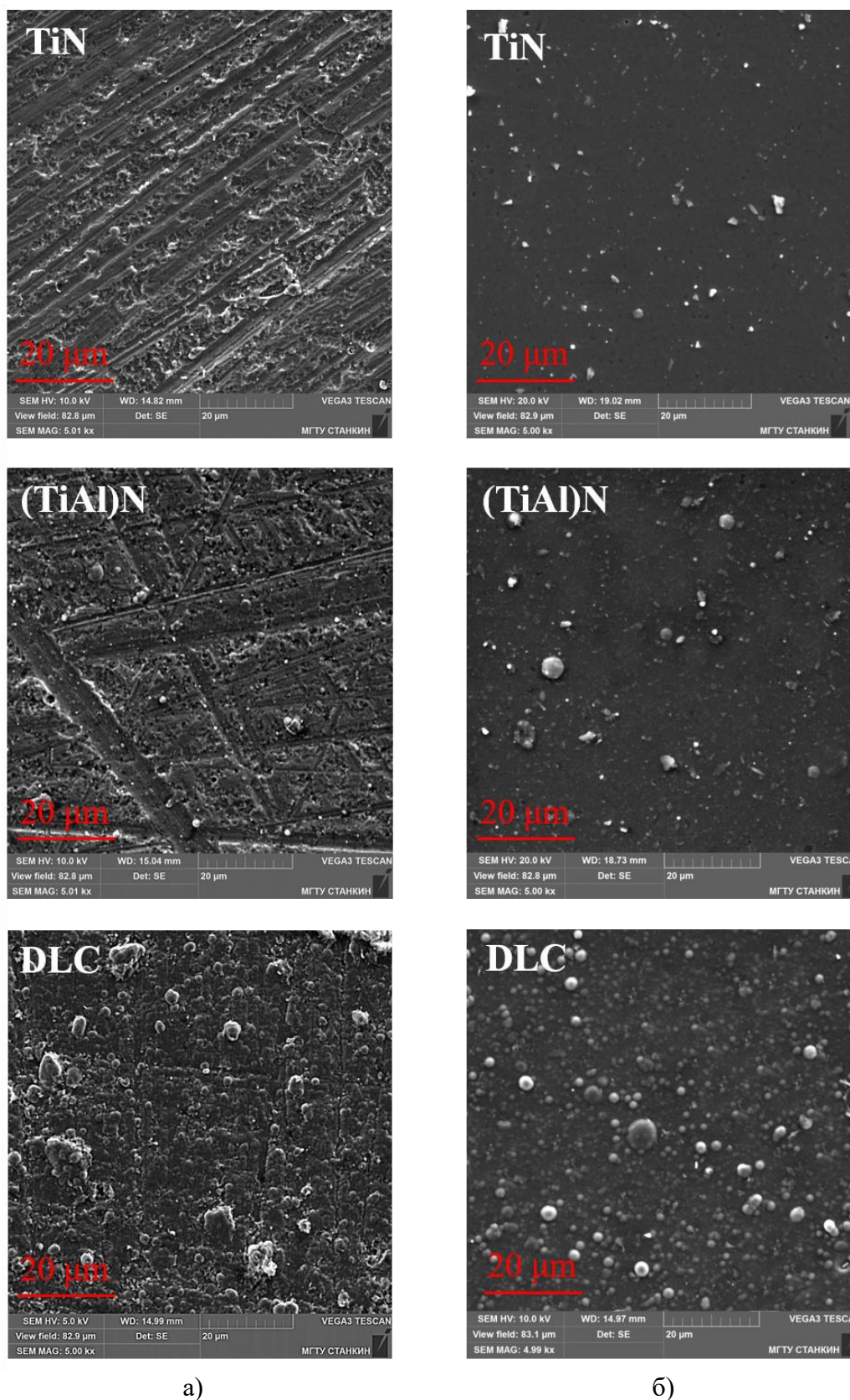
При описании аналитических и экспериментальных исследований в рамках 1 главы настоящей работы, были затронуты вопросы негативного влияния дефектного ПС керамической подложки на качество формируемых функциональных покрытий, нанесение которых изменяет условия контактного взаимодействия рабочих поверхностей КИ с обрабатываемым материалом и способно обеспечить увеличение средней стойкости инструментов при резании, но не может решить главную проблему КИ, связанную с низкой надежностью в условиях действия повышенных теплосиловых нагрузок.

Результаты проведенных в настоящей работе экспериментальных исследований по изучению инструментальных покрытий общей толщиной $\sim 3,6$

мкм на базе нитридов типа TiN, (TiAl)N, (TiZr)N, (CrAlSi)N, полученных вакуумно-дуговым испарением, диборидов TiB₂, осажденных магнетронным распылением, и алмазоподобных (DLC) пленок, сформированных газофазным осаждением, на СМКП из различных керамик, показывают, что микроструктура и морфология покрытий находится в сильной зависимости от индекса дефектности ПС. На Рисунке 3.1, а представлены SEM-изображения микроструктуры нитридных и DLC покрытий, сформированных на керамических подложках после алмазного шлифования (с максимальным индексом дефектности), а на Рисунке 3.2 приведены 3D-профилограммы ПС образцов после алмазного шлифования и нанесения покрытий. Видно, что морфологический рисунок покрытий во многом копирует характерные дефекты, присутствующие в ПС керамики, которые были классифицированы во 2 главе работы, а микроструктура включает различные поры и несплошности. При этом в результате осаждения покрытий наблюдается некоторое уменьшение глубины дефектного слоя.

Для того, чтобы дифференцировать дефекты сформированных покрытий на связанные с состоянием керамических подложек и с технологическими особенностями процессов конденсации, необходимо рассмотреть микроструктуры покрытий, осажденных при идентичных условиях на керамические подложки после многоэтапной абразивной обработки (Рисунок 3.1, б), включающей шлифование, доводку и полирование (с минимальным индексом дефектности). Сравнение данных Рисунков 3.1, а и 3.1, б показывает, что микроструктуры нитридных и DLC покрытий, осажденных на керамические подложки с минимальным индексом дефектности ПС, имеют лишь хорошо известные дефекты и особенности, связанные с процессами синтеза покрытий и роста кристаллитов [152–154].

Решение задачи разработки эффективных технологических подходов, обеспечивающих минимизацию дефектов ПС инструментов и создание благоприятной керамической основы для последующего осаждения функциональных покрытий, будет способствовать более полной реализации их



a)

б)

Рисунок 3.1 – SEM-изображения микроструктуры нитридных и DLC покрытий, сформированных на СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ с различным состоянием ПС керамической основы: а) – после алмазного шлифования; б) – после многоэтапной финишной обработки (шлифование, доводка и полирование)

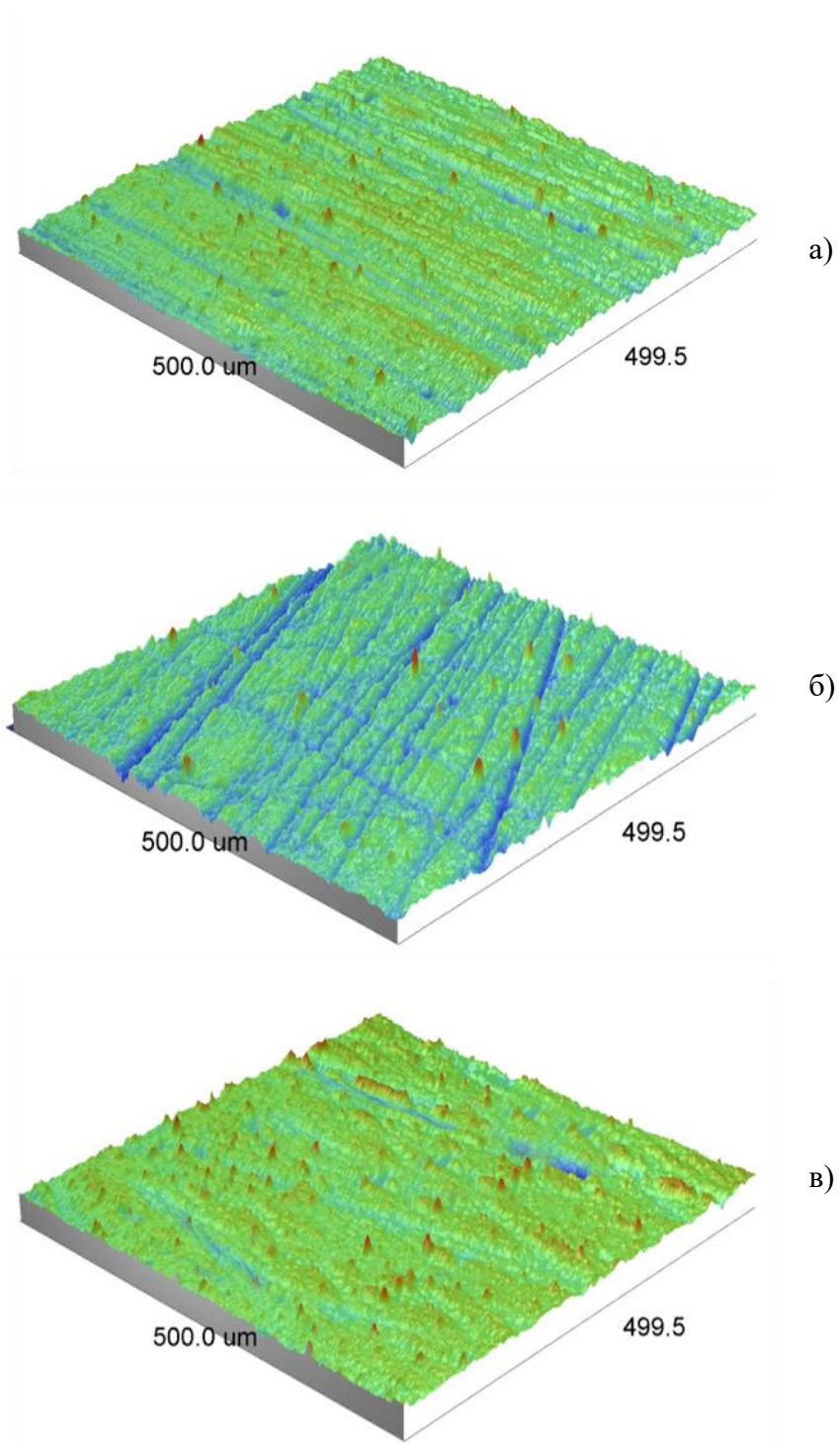


Рисунок 3.2 – Профилограммы поверхностного слоя СМКП из материала $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ после алмазного шлифования и нанесения различных покрытий: а) – TiN ; б) – $(\text{TiAl})\text{N}$; в) – DLC

потенциала при эксплуатации за счет одновременного повышения износостойкости контактных поверхностей КИ и обеспечения более высокой надежности в процессе резания.

В рамках выполнения работы с целью минимизации дефектности ПС керамики и улучшения его состояния исследовались возможности применения различных технологий модификации. Было изучено влияние на состояние ПС применения струйной обработки в воздушной и водной средах с использованием микрочастиц электрокорунда, электронно-лучевого воздействия, а также травления в плазме вакуумно-дугового разряда в широком диапазоне режимов процессов. На Рисунке 3.3 приведены характерные SEM-изображения и 3D-профилограммы микроструктуры ПС СМКП из Al_2O_3+TiC , сформированной в результате применения перечисленных технологических подходов. Как видно из фрагментов представленных экспериментальных данных, указанные технологии, удаляя дефектный слой, сформированный при алмазном шлифовании, оказывают дополнительное ударное или термическое воздействие на ПС инструментальной керамики и вносят новые, характерные для используемых процессов дефекты, не оказывая требуемого результата – снижения индекса дефектности СМКП (струйная обработка даже повысила указанный показатель). Кроме того, было установлено увеличение шероховатости ПС исходных СМКП по сравнению с параметром R_a , достигаемым алмазным шлифованием. Указанное особенно характерно для струйной обработки, после выполнения которой шероховатость ПС составляет более 0,6 мкм.

Поэтому в работе была поставлена задача создания метода модификации ПС, который бы удовлетворял комплексу требований, связанных с обеспечением высокой производительности процесса при обработке широкой номенклатуры КИ, высокой равномерности обработки инструмента с различными конструкторско-геометрическими параметрами (СМКП и цельных керамических фрез), отсутствием дополнительного повреждающего воздействия на ПС, искажения микрогеометрии и значительного ухудшения шероховатости инструмента, а также возможностью объединения процесса удаления дефектного слоя в одну финишную

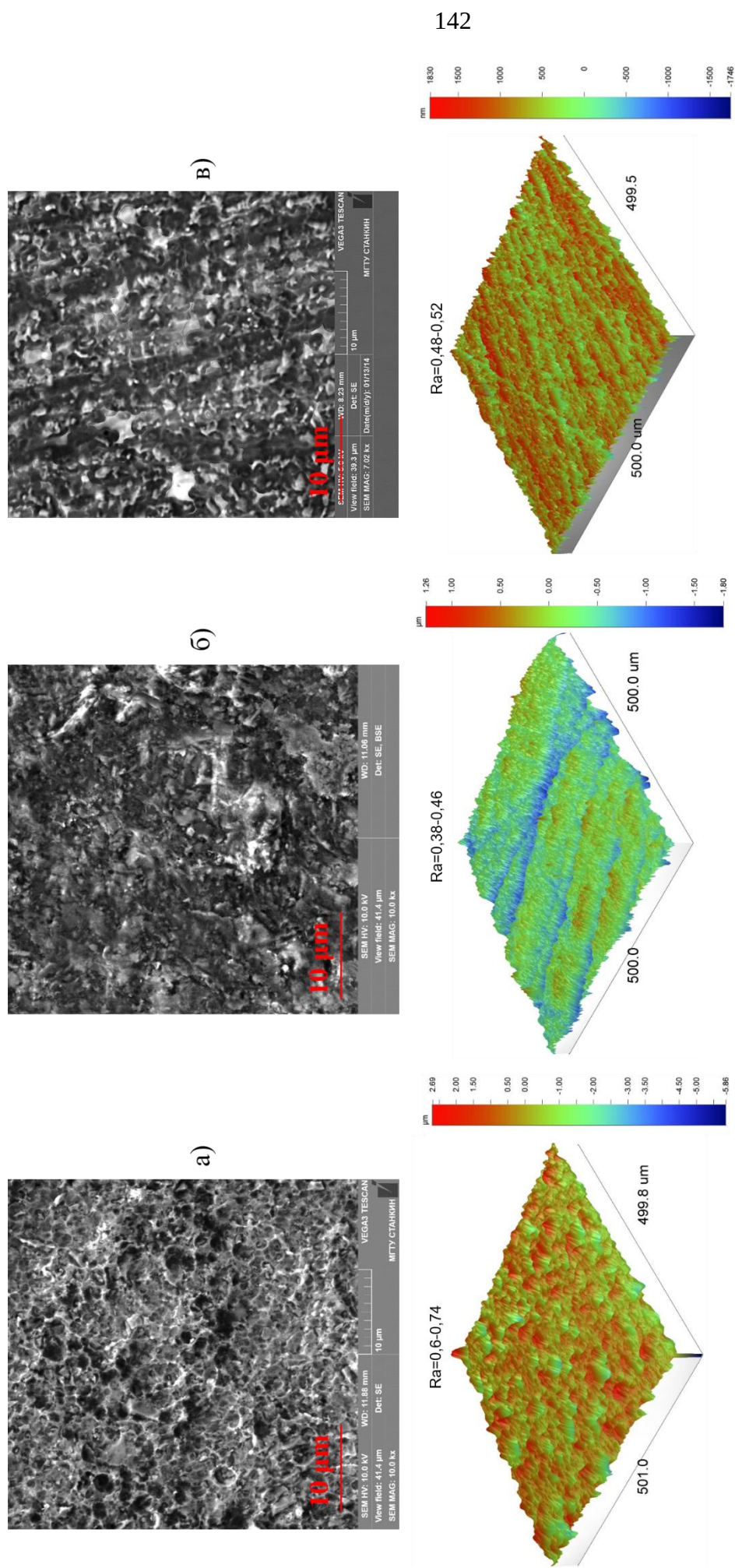


Рисунок 3.3 – SEM-изображения и 3D-профилотграммы микроструктуры поверхностного слоя СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ после применения различных технологий модификации поверхностного слоя: а) – пескоструйная обработка; б) – электронно-лучевая обработка; в) – обработка в плазме вакуумно-дугового разряда

технологическую операцию с процессом осаждения функциональных покрытий.

3.2. Разработка метода и технологического оборудования для комплексной модификации поверхностного слоя керамических инструментов посредством воздействия потоками ускоренных частиц для удаления дефектного слоя и последующего нанесения функциональных покрытий

Для контролируемого удаления с поверхности КИ тонкого дефектного слоя, сформировавшегося при алмазном шлифовании, могут быть использованы физические процессы (без высокотемпературного нагрева) в основе которых лежит энергетическое воздействие направленными потоками электронов, ионов или нейтральных частиц, генерируемых различными источниками энергии. Исходя из сформулированных в предыдущем разделе требований к разрабатываемому методу модификации ПС инструмента из керамики, в качестве источника энергетического воздействия были выбраны источники пучков ускоренных ионов и быстрых атомов инертных газов (например, аргона), генерируемые низкотемпературной плазмой тлеющего разряда.

Работам в области разработки и оптимизации параметров источников низкотемпературной плазмы тлеющего разряда, предназначенных для обработки различных материалов, посвящен ряд фундаментальных исследований в области физики плазмы [155–157]. Известные физические принципы генерации посредством плазмы тлеющего разряда пучков быстрых частиц различных газов были использованы в настоящей работе для создания на их основе источников энергетического воздействия и их последующего практического использования. На разработанные с участием автора настоящей диссертационной работы источники энергетического воздействия – источники пучков ускоренных частиц аргона (или другого инертного газа), на которых базируются новые технологические решения

модификации ПС инструмента из керамики широкой номенклатуры, были получены соответствующие патенты [158, 159].

По своей сути разработанный в работе подход для удаления дефектного слоя с поверхности КИ посредством обработки пучком ускоренных частиц аргона, можно классифицировать как разновидность технологий «сухого» травления (иногда называемых вакуумно-плазменным полированием), при которых удаление поверхностных слоёв керамического материала осуществляется за счёт физического распыления высокоэнергетическими частицами инертных газов (аргона, гелия и др.), не вступающих в химическую реакцию с материалом подложки [160–162]. Благодаря возможности варьирования параметрами процессов обработки в широких пределах (в первую очередь энергией частиц, бомбардирующих ПС), возможно их использование для решения широкого спектра технологических задач.

В соответствии с предложенным методом модификации инструмента из различных керамик на ПС предусматривается комплексное воздействие, включающее бомбардировку (травление) дефектного слоя КИ быстрыми атомами аргона и последующее осаждение на «бездефектный» ПС инструмента из керамики функциональных покрытий. На Рисунке 3.4 представлена последовательность основных стадий предложенного метода комплексной модификации КИ. На I стадии происходит бомбардировка дефектного слоя КИ быстрыми атомами аргона и распыление (по сути выбивание) микрочастиц из ПС керамики на требуемую глубину (II стадия). На III стадии поверхность «бездефектного» КИ активируется низкоэнергетическими атомами аргона для обеспечения лучшей прочности адгезионной связи формируемого покрытия, а частицы материала, например Ti-Al, испаряемые с поверхности катода при вакуумно-дуговом осаждении (или распыляемые из мишени при магнетронном осаждении) из различных тугоплавких материалов взаимодействуют с реакционным газом (азотом), присутствующим в атмосфере вакуумной камеры, в результате чего начинается процесс конденсации и рост пленки с общей толщиной не более 4,0 мкм (IV стадия).

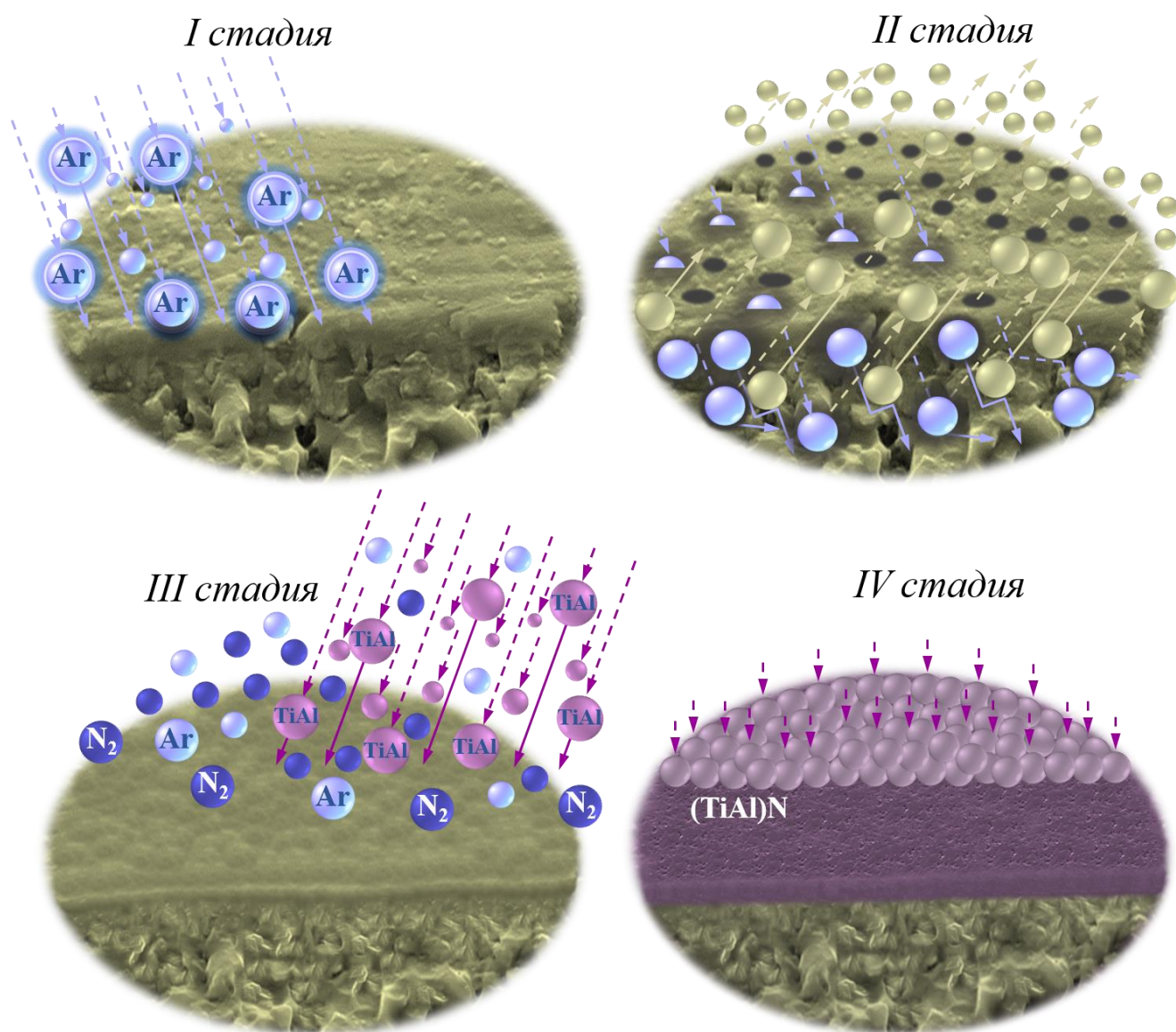


Рисунок 3.4 – Основные стадии метода комплексной модификации инструментов из керамики, включающей травление пучком ускоренных частиц аргона и нанесение функциональных покрытий

Для возможности реализации разработанного метода и его применения для комплексной модификация инструмента из различных керамик в рамках выполнения работы была создана опытная технологическая установка, общий вид которой приведен на Рисунке 3.5.

Обработка КИ выполняется в рабочей вакуумной камере из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, имеющей форму шестигранной призмы высотой 85 см и диаметром вписанной окружности 60 см. Вакуумная камера установки (Рисунок

3.6, а) имеет технологические окна для установки сменных фланцев с различным оборудованием (например, испарителей и магнетронов) в зависимости от решаемых технологических задач. Для контроля и регулирования технологических параметров процесса обработки установка оснащена системой управления.



Рисунок 3.5 – Общий вид опытной технологической установки, созданной для комплексной модификации керамического инструмента

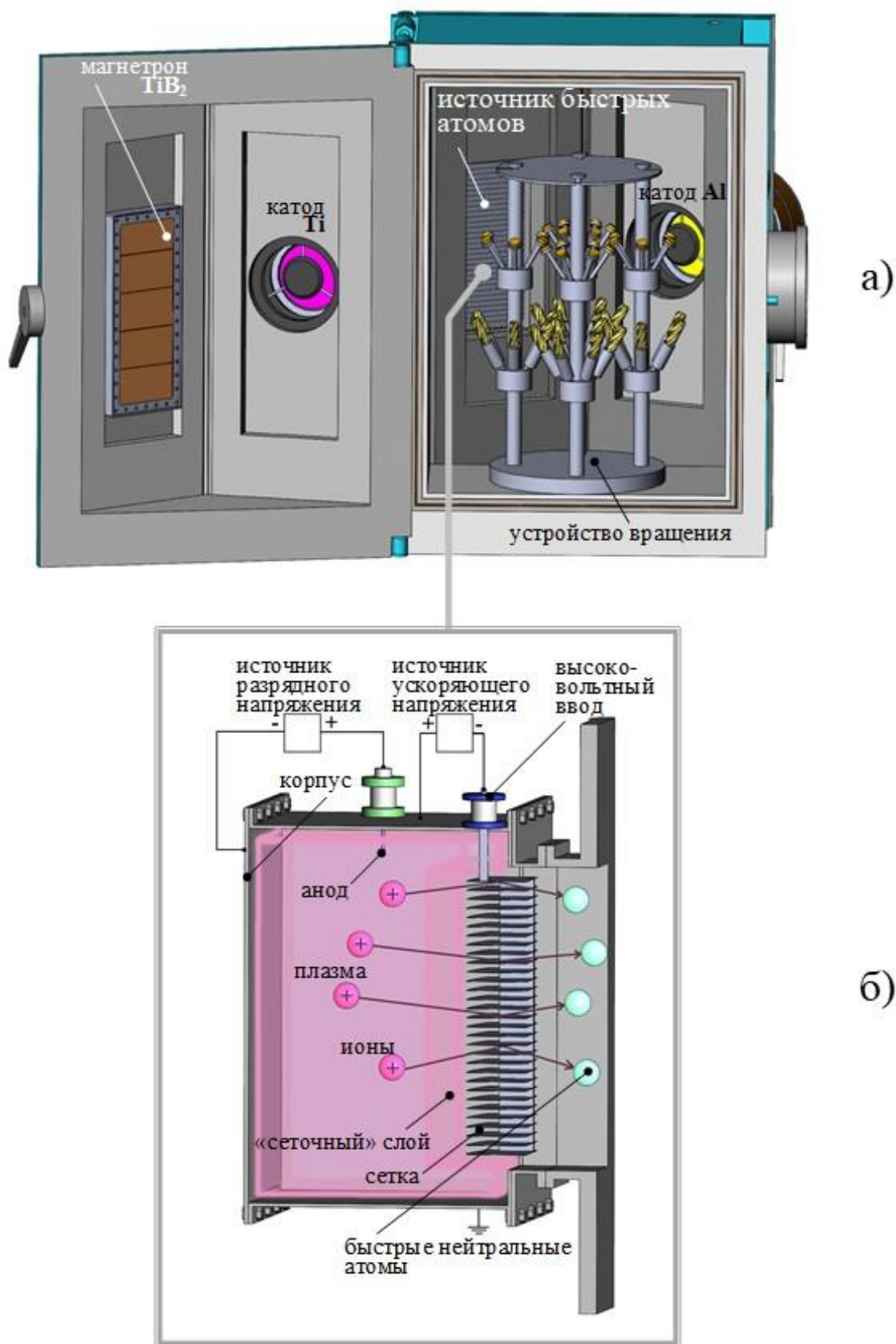


Рисунок 3.6 – Принцип работы опытной технологической установки для комплексной модификации керамического инструмента: а) – внутреннее устройство вакуумной камеры; б) – схема источника быстрых нейтральных атомов аргона

На нижнем основании камеры установлен поворотный стол с вертикальным держателем, совершающим планетарное вращение. В зависимости от конструкторско-геометрических особенностей КИ могут использоваться различные приспособления для фиксации как СМКП, так и керамических фрез.

На Рисунке 3.6, а видна лишь сетка источника пучка быстрых атомов аргона, которые бомбардируют ПС инструмента и распыляют его после поступления в камеру технологической установки, давление в которой составляет 0,2 Па. Поэтому на Рисунке 3.6, б приведена дополнительная схема для понимания принципа функционирования источника пучка быстрых атомов аргона, смонтированного на боковой стенке технологической установки. При включении источника разрядного напряжения между анодом и корпусом источника зажигается тлеющий разряд в полум катоде (полум катодом является корпус). Для поддержания разряда на анод подается напряжение разряда 400 В, а ток разряда составляет 2 А. При проведении экспериментов на сетку из набора пластин подавалось высокое отрицательное напряжение (-5 кВ), в результате чего между плазмой и сеткой формируется «сеточный» слой, через который из плазмы «вытягиваются» положительные ионы аргона в сторону сетки (находящейся под отрицательным потенциалом). Ионы, проходя через «жалюзи» из пластин нейтрализуются, присоединяя электроны из пластин сетки. Угол касания к пластинам чрезвычайно мал, поэтому энергетические потери также минимальны. После прохождения сетки нейтральные атомы аргона, поступающие в камеру технологической установки, где размещены образцы КИ, имеют энергию ~ 5 кэВ (значение энергий дополнительно контролировалось спектрографом).

После удаления дефектного слоя на созданной технологической установке предусмотрена возможность активации поверхности керамических образцов низкоэнергетическими атомами аргона (0,1...0,3 кэВ) и осаждения покрытий различных составов и архитектуры в соответствии с традиционными принципами вакуумно-дугового испарения, магнетронного распыления, а также газофазного осаждения алмазоподобных (DLC) в смеси ацетилена, тетраметилсилана и аргона.

На реализуемые новые технологические решения для обработки

керамических изделий быстрыми атомами [163–165], а также системы для нанесения различных функциональных покрытий [166, 167], которые являлись базой для создания опытной технологической установки для комплексной модификации инструмента из керамики, с участием автора настоящей работы были получены соответствующие патенты (в Приложении А к тексту диссертационной работы приведены копии охранных документов).

Энергия атомов аргона, бомбардирующих КИ, являющаяся ключевым параметром процесса модификации, была выбрана 5 кэВ на основании результатов проведенных экспериментальных исследований зависимости коэффициента распыления двух используемых керамических материалов на основе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON от энергии бомбардирующих ПС частиц Ar . Как видно из данных, приведенных на Рисунке 3.7, коэффициент распыления двух керамических материалов резко возрастает при увеличении энергии частиц до значения ~ 5 кэВ, а при дальнейшем увеличении энергии рост коэффициента замедляется, что, судя по всему, связано с возрастанием энергетических потерь на нагрев обрабатываемых керамических образцов. Установлено (Рисунок 3.8), что зависимость глубины травления частицами аргона от времени обработки для двух исследованных видов инструментальных керамик носит линейный характер, но скорость травления существенно различается и составляет для $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ – 5,9...6,0 мкм/ч, а для SiAlON – 8,8...8,9 мкм/ч. Относительно шероховатости обработанной поверхности образцов, то для двух видов керамики параметр R_a имел близкие значения и на протяжении 120 минут воздействия составлял 0,14...0,16 мкм для керамики $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и 0,12...0,14 мкм для керамики SiAlON . Для гарантированного удаления поверхностного дефектного слоя и возможной переходной зоны, сформированных при алмазном шлифовании, обработку рекомендуется проводить на глубину 7,5-8,0 мкм, что для керамического материала $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ составляет 75-80 минут, а для SiAlON – 50-55 минут. В результате применения предложенного технологического подхода при обработке СМКП из различных инструментальных керамик частицами аргона с энергией 5 кэВ обеспечивается полное удаление дефектного слоя [168].

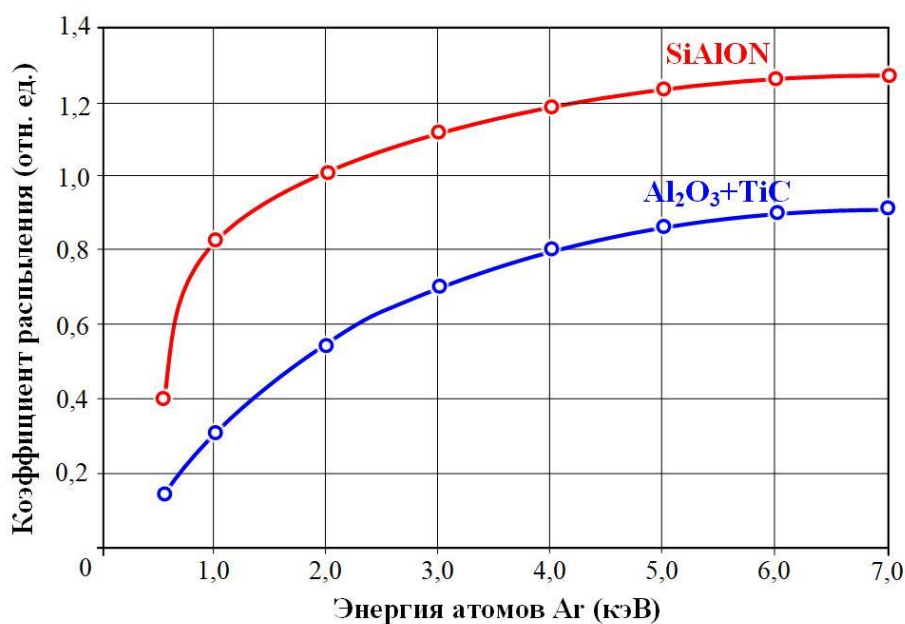


Рисунок 3.7 – Зависимости коэффициента распыления различных инструментальных керамик от энергии атомов аргона, бомбардирующих поверхностный слой

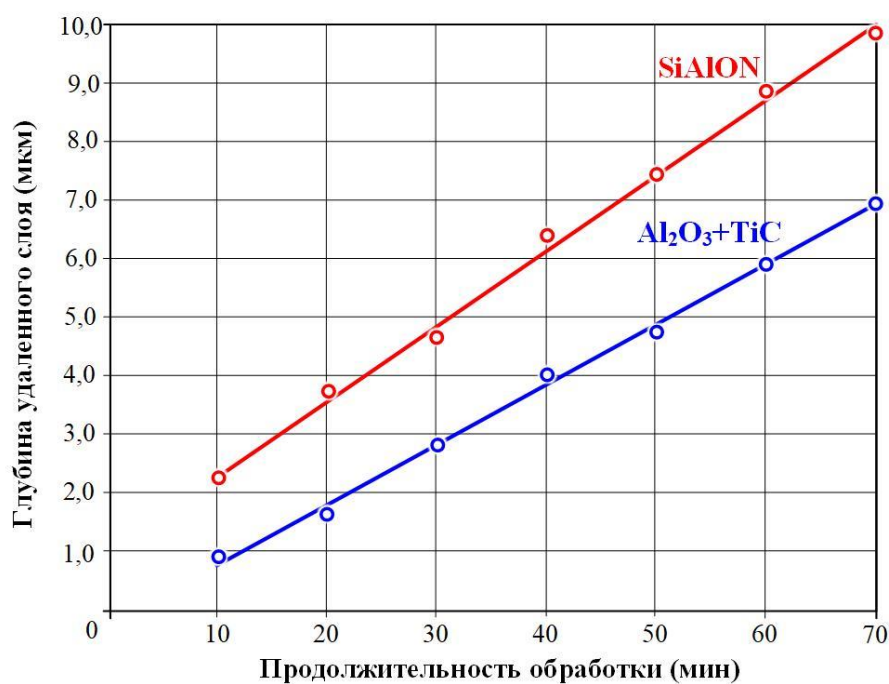
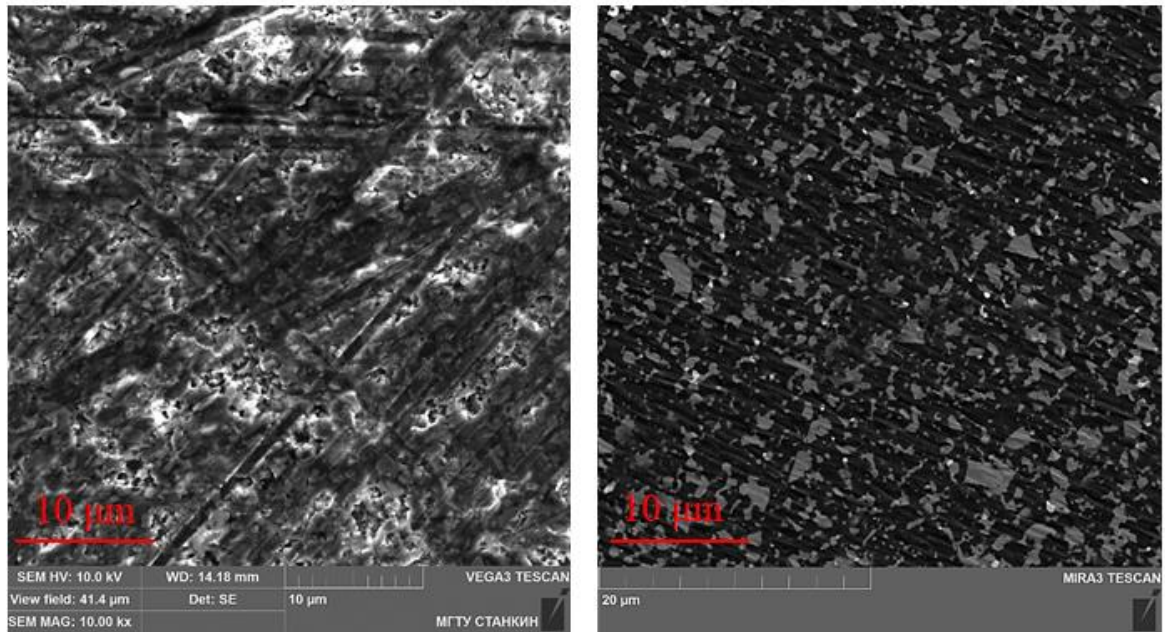
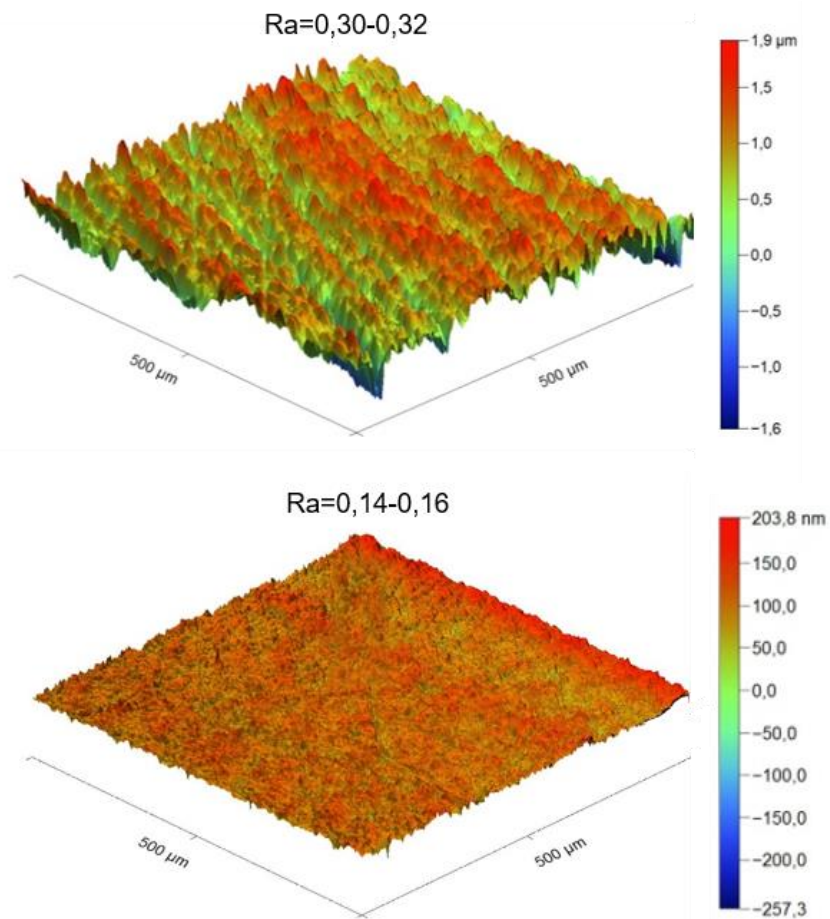


Рисунок 3.8 – Зависимости глубины удаленного слоя от продолжительности обработки поверхностного слоя атомами аргона для различных инструментальных керамик

На Рисунках 3.9 и 3.10 приведены сравнительные результаты исследования микроструктур и профилограммы поверхностного слоя одних и тех же образцов СМКП из Al_2O_3+TiC и SiAlON после алмазного шлифования и после обработки на опытной технологической установке атомами аргона с энергиями 5 кэВ в течении 75 и 50 минут соответственно.

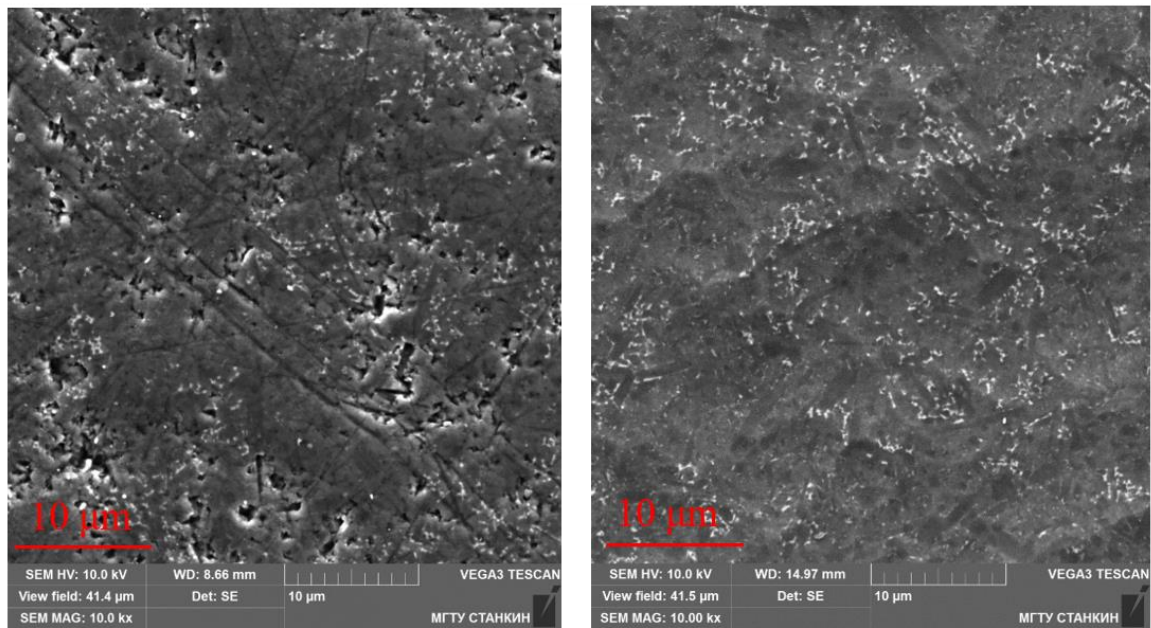


а)

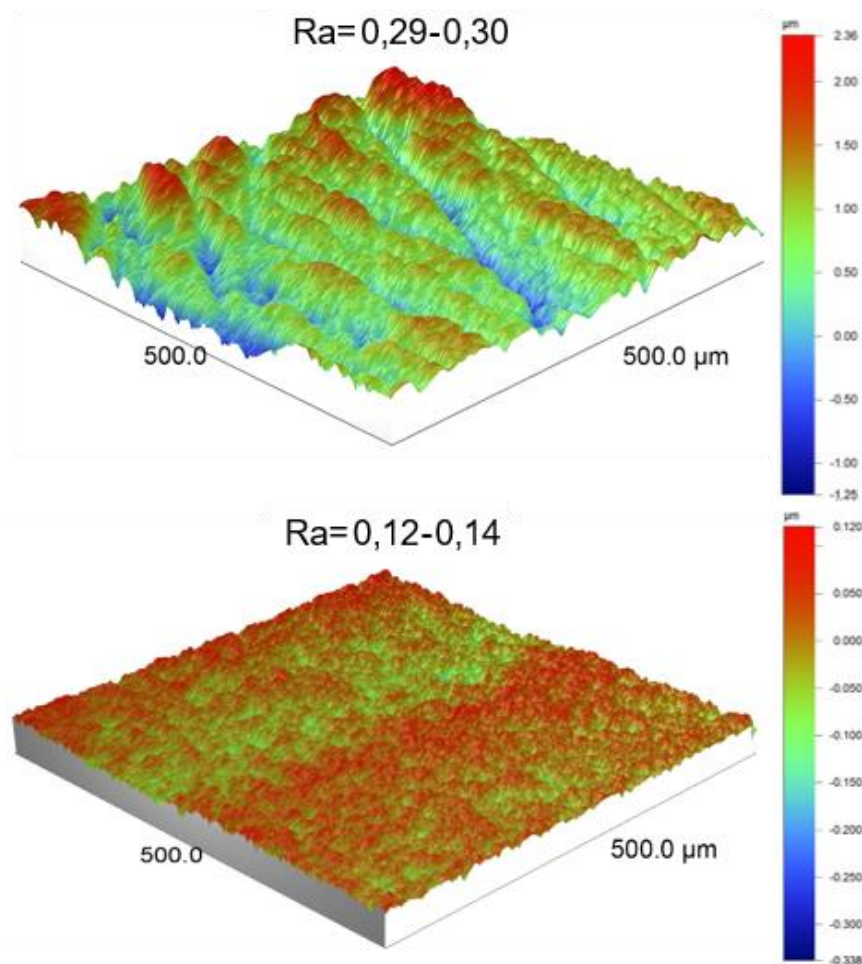


б)

Рисунок 3.9 – Микроструктура и морфология СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ после различных видов обработки: а) SEM-изображения поверхности после алмазного шлифования (слева) и травления атомами аргона (справа); б) – 3D-профилограммы поверхностного слоя после алмазного шлифования (сверху) и травления атомами аргона (снизу)



а)



б)

Рисунок 3.10 – Микроструктура и морфология СМКП из SiAlON после различных видов обработки: а) – SEM-изображения поверхности после алмазного шлифования (слева) и травления атомами аргона (справа); б) – 3D-профилограммы поверхностного слоя после алмазного шлифования (сверху) и травления атомами аргона (снизу)

На образцах, обработанных пучком атомов аргона, видна ярко выраженная трансформация ПС, сопровождающаяся удалением всех дефектов, которые были подробно описаны в предшествующей главе и в большом количестве присутствовали на исходных образцах. На СМКП после модификации видна еще одна особенность, характерная для образцов после воздействия ускоренными частицами аргона – поверхность имеет небольшую волнистость (перепад высот $\sim 0,5$ мкм). Это, по-видимому, связано с тем, что в процессе планетарного вращения образцов в камере технологической установки меняется углы падения частиц относительно обрабатываемых поверхностей керамических образцов.

Комплекс проведенных измерений и расчетов позволил определить индекс дефектности (в соответствии с предложенной зависимостью 2.1 и разработанной методикой, изложенной во 2 главе) для СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON после травления пучком атомов аргона. В Таблицах 3.1 и 3.2 приведены средние значения рассчитанного индекса дефектности по результатам измерений 10 пластин каждого вида керамики. Для возможности сравнения в Таблицах 3.1 и 3.2 приведены данные об индексах дефектности СМКП, которые имели пластины после многоэтапной абразивной обработки, включающей шлифование, доводку и полирование.

Таблица 3.1 – Индекс дефектности поверхностного слоя и его составляющие для СМКП из материала $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ после различных видов обработки

№	Вариант поверхностной обработки СМКП	Плотность дефектов	Мах. глубина дефектного слоя (мкм)	Индекс дефектности (мкм)
1.	Алмазное шлифование	0,4	4,0	1,6
2.	Травление атомами аргона	0,012	0,6	0,007
3.	Алмазное шлифование, доводка и полирование	0,005	0,42	0,002

Таблица 3.2 – Индекс дефектности поверхностного слоя и его составляющие для СМКП из материала SiAlON после различных видов обработки

№	Вариант поверхностной обработки СМКП	Плотность дефектов	Мах. глубина дефектного слоя (мкм)	Индекс дефектности (мкм)
1.	Алмазное шлифование	0,354	3,6	1,274
2.	Травление атомами аргона	0,011	0,48	0,005
3.	Алмазное шлифование, доводка и полирование	0,004	0,37	0,0014

Приведенные экспериментальные данные показывают, что в сравнении с многоэтапной абразивной обработкой, включающей шлифование, доводку и полирование, технология травления атомами аргона обеспечивает формирование слоя с несколько большей степенью дефектности, но многократно снижает указанный показатель по отношению к промышленно выпускаемым СМКП, формообразование которых осуществляется посредством алмазного шлифования. Кроме того, предложенный технологический подход также обеспечивает многократное снижение индекса дефектности в сравнении с исследованными в предыдущей главе СМКП, которые после алмазного шлифования были подвергнуты доводке (экспериментальные результаты были представлены в Таблицах 2.1 и 2.2).

Установлено, что последующее осаждение функциональных покрытий различного состава на СМКП, поверхность которых была подвергнута предварительному травлению атомами аргона с энергией 5кэВ, обеспечивает формирование пленок, морфология которых принципиально отличается от тех, которые формируются на керамических образцах после алмазного шлифования. На Рисунке 3.11 приведены 3D-профилограммы покрытий TiN, (TiAl)N, DLC и TiB₂, сформированных на СМКП из материала Al₂O₃+TiC после травления атомами аргона.

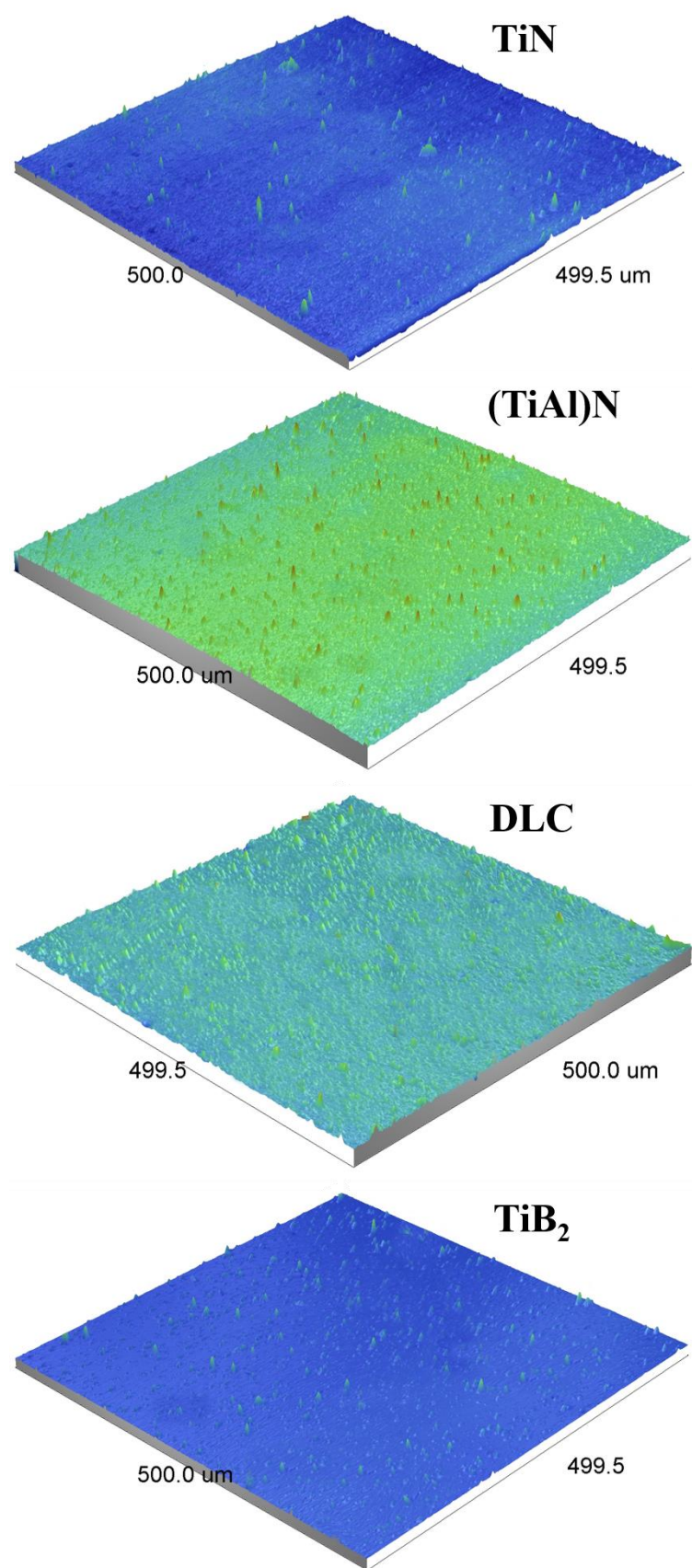


Рисунок 3.11 – Профилограммы поверхностного слоя СМКП из материала $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ после травления атомами аргона и нанесения покрытий TiN, (TiAl)N, DLC и TiB_2

Как было показано экспериментальными данными, представленными на Рисунке 3.2, морфологический рисунок сформированных покрытий во многом копирует профиль ПС керамической подложки и присутствующие в нем дефекты. В случае осаждения покрытий на «бездефектные» СМКП (Рисунок 3.11), все исследованные покрытия характеризуются высокой сплошностью, а и их морфология зависит от физико-технологических особенностей процесса синтеза. Кроме того, осаждение покрытий на поверхность СМКП после удаления дефектного слоя пучком ускоренных частиц, обеспечивает более благоприятное их напряженное состояние. Например, при нанесении DLC покрытий (с подслоем из (CrAlSi)N) на промышленно выпускаемые СМКП из SiAlON, имеющие многочисленные дефекты, сформированные алмазным шлифованием, прочность их адгезионной связи с подложкой была на очень низком уровне, наблюдались многочисленные поры и локальные очаги отслоения покрытий на тех участках, где подложка имела дефекты (Рисунок 3.12, а). При нанесении идентичных DLC-покрытий на СМКП из SiAlON после удаления дефектного слоя посредством травления атомами аргона, сформированные покрытия имели однородную микроструктуру, в которой отсутствовали поры, а очагов отслоения не наблюдалось (Рисунок 3.12, б).

3.3. Комплексные трибологические исследования различных функциональных покрытий и выбор перспективных составов для нанесения на керамические инструменты

Учитывая, что имеющиеся в источниках научно-технической информации технологические рекомендации по выбору составов функциональных покрытий касаются вопросов их нанесения преимущественно на режущие инструменты из твердых сплавов, в настоящей работе были проведены комплексные трибологические исследования гаммы покрытий, сформированных на

инструментах из керамики, для выбора по их результатам наиболее перспективных составов.

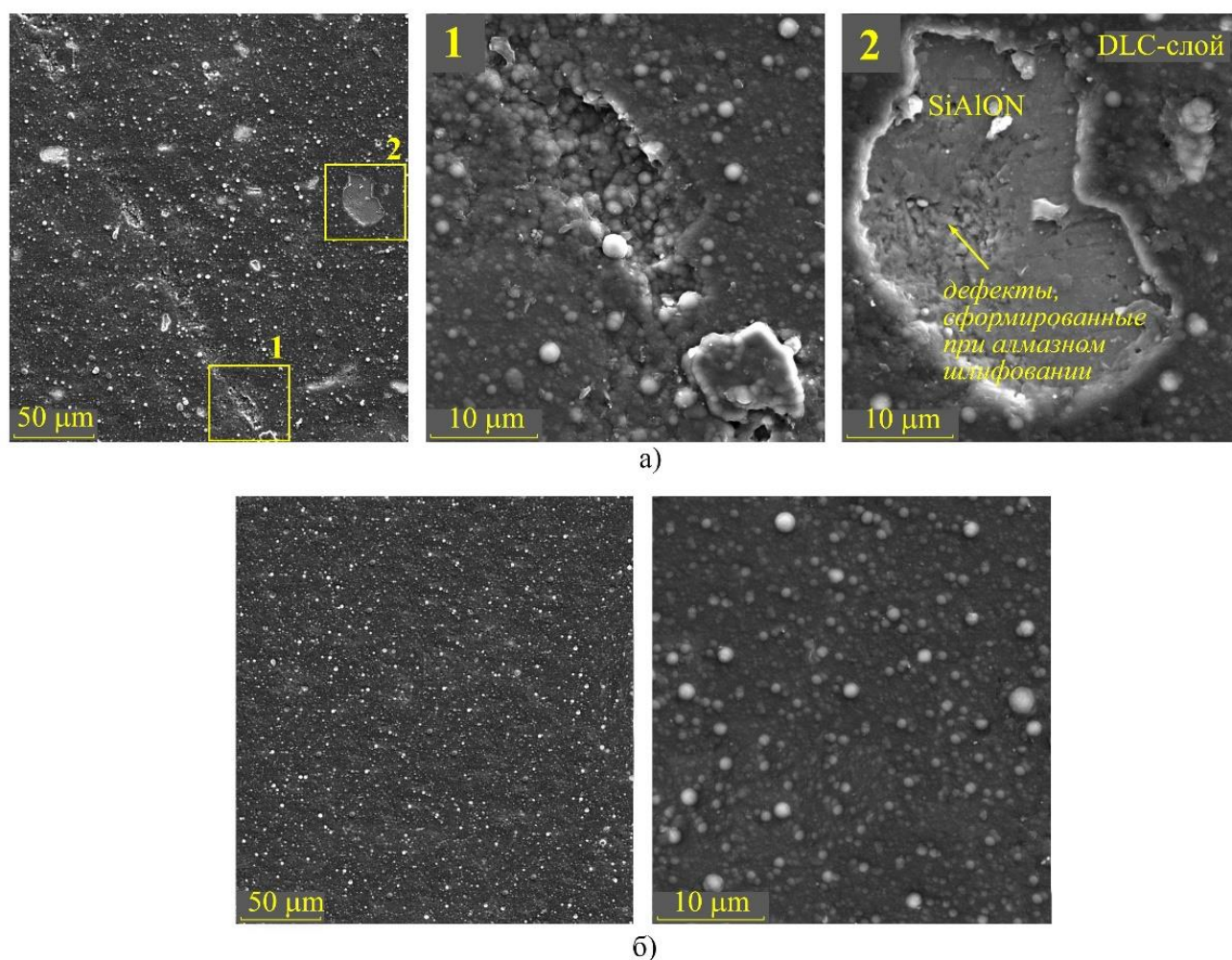


Рисунок 3.12 – SEM-изображения микроструктуры DLC-покрытий, сформированных на поверхности СМКП из SiAlON, прошедших различные варианты поверхностной обработки:

а) – алмазное шлифование; б) – травление атомами аргона

На образцы из СМКП с использованием опытной технологической установки, представленной на Рисунке 3.5, после удаления дефектного слоя посредством травления атомами аргона наносились покрытия различных составов – TiN, (TiAl)N, (TiZr)N, (CrAlSi)N, DLC и TiB₂. Формировались как однослойные покрытия, так и их различные сочетания (двуслойные композиции).

Покрытия TiN, (TiAl)N, (TiZr)N, (CrAlSi)N формировались методом вакуумно-дугового испарения катодов, а TiB₂ – посредством магнетронного распыления мишени. DLC-покрытия осаждались плазмохимическим газофазным

осаждением в плазме тлеющего разряда при химической реакции и разложении компонентов газовой смеси ацетилена C_2H_2 (объемная доля 90%), аргона Ar (объемная доля 8%) и тетраметилсилана $Si(CH_3)_4$ (объемная доля 2%) [129].

Образцы с покрытиями подвергались трем видам трибологических исследований в ходе которых оценивался комплекс следующих показателей.

1. Оценивалась устойчивость СМКП с покрытиями к механическому изнашиванию (фреттинг-износ) при контактировании с контртелом в условиях колебательного микросмещения, составляющего 8 мкм. Вследствие малой амплитуды микросмещений соприкасающихся поверхностей, повреждения сосредотачиваются на небольших площадках контакта, а разрушение сопряженных поверхностей проявляется в формировании мелких участков, в которых скапливаются продукты износа. С течением времени вследствие разрушения узлов схватывания и усталостного повреждения микронеровностей мелкие участки износа увеличиваются и сливаются друг с другом, образуя очаг износа. Испытания проводились на машине трения, возбуждающей возвратно-поступательное относительное скольжение контактной пары «закаленный шарик диаметром 8 мм – плоскость СМКП с покрытием» с помощью электромагнитного вибратора [169]. Нормальная сила в контакте составляла 10 Н, частота перемещений – 100 Гц, количество циклов трения – 10^5 . Коэффициент трения рассчитывался по мгновенным значениям силы трения, определяемой пьезоэлектрическим датчиком, и перемещения. Анализ очагов износа выполнялся на конфокальном микроскопе Olympus. На Рисунках 3.13 и 3.14 на примере СМКП из Al_2O_3+TiC с различными покрытиями приведены экспериментально установленные значения коэффициентов трения и объемного износа образцов в условиях фреттинг-износа.

2. Оценивалась устойчивость СМКП с покрытиями к абразивному истиранию на приборе CALOTEST при подаче абразивной суспензии в область контакта между керамическим образцом с покрытием и вращающимся шаром, воздействующим с усилием 0,2 Н. В результате контактирования на поверхности образца формируется сферическая лунка износа, количественная оценка объема которой позволяет судить об устойчивости к абразивному истиранию.

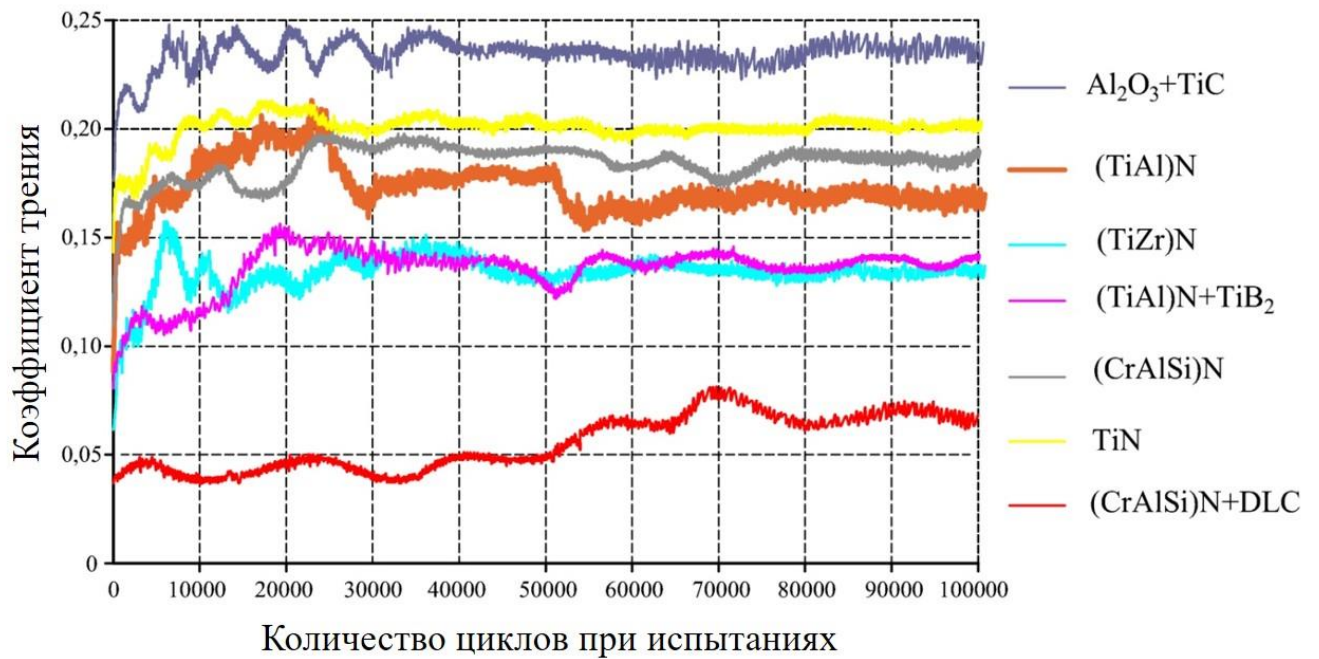


Рисунок 3.13 – Зависимость коэффициента трения СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ с различными покрытиями от количества циклов испытаний при фреттинг-изнашивании

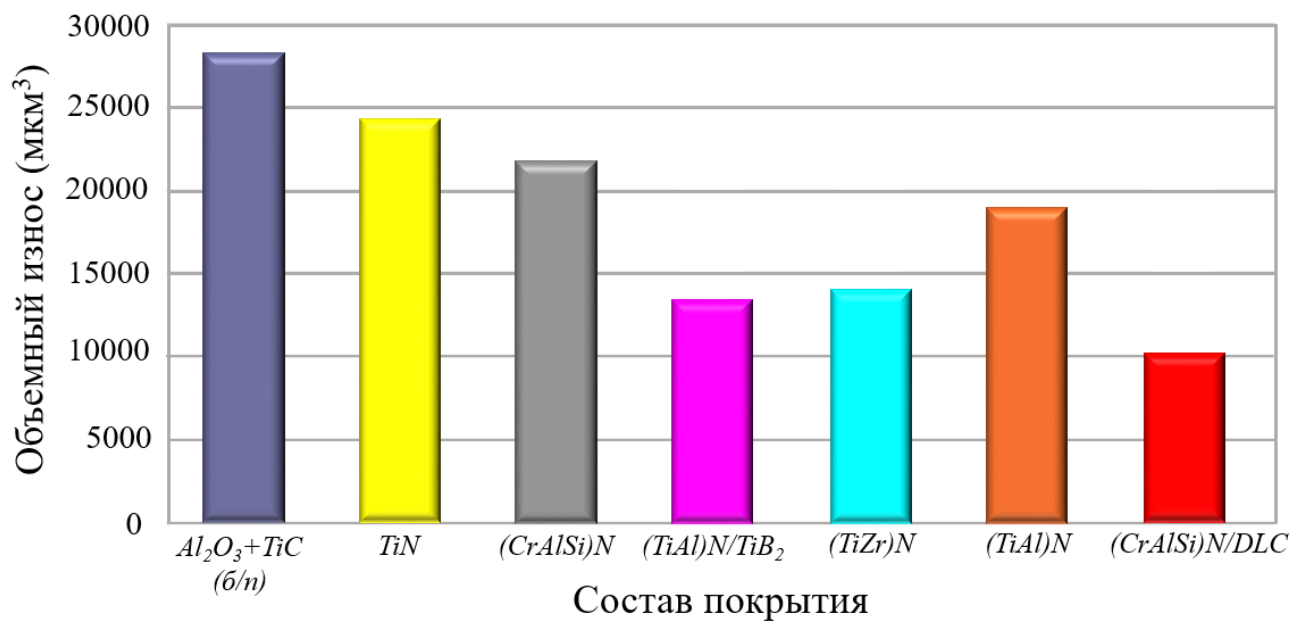


Рисунок 3.14 – Значения объемного износа СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ с различными покрытиями после 100000 циклов при фреттинг-изнашивании

На Рисунке 3.15 приведены характерные лунки износа СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ с различными покрытиями после абразивного воздействия в процессе испытаний, а на Рисунке 3.16 – экспериментально полученные зависимости объемного износа СМКП от времени абразивного воздействия. Кроме того, для возможности сопоставления данные приведены для СМКП, прошедших перед нанесением покрытий два варианта обработки ПС– алмазное шлифование и травление атомами аргона.

3. Оценивалась устойчивость СМКП с покрытием к изнашиванию в условиях высокотемпературного трения-скольжения при контактировании с контртелом (керамическим шариком диаметром 6 мм) при нагрузке 1 Н, скорости скольжения – 10 см/с, радиусе перемещения – 2 мм и температуре нагрева до 800 °С на трибометре ТНТ. Определение изменения коэффициента трения с течением времени выполнялась при вращении СМКП относительно неподвижного контртела. Приведенный объемный износ образцов с покрытиями определялся с использованием среднего значения площади сечения дорожки износа, которое оценивалось по результатам измерения 5 поперечных профилей дорожки износа на профилометре Dektak. На Рисунках 3.17 и 3.18 на примере СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ с различными покрытиями приведены экспериментально установленные значения коэффициентов трения и объемного износа образцов при трении-скольжения.

Проведенные трибологические испытания еще раз подтвердили, что состояние керамической основы (степень ее дефектности) существенно влияет на функционирование покрытий. В частности, представленные на Рисунке 3.15 профилограммы характерных лунок износа после испытаний на устойчивость к абразивному истиранию СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, демонстрируют, что покрытия, осаждаемые на керамические подложки с предварительно удаленным дефектным слоем, значительно лучше сопротивляются разрушению. В процессе испытаний ряда образцов с покрытиями, осажденными на дефектные керамические подложки, наблюдалось их отслоение при приложении внешней нагрузки. Отмеченное особенно характерно для покрытия TiN.

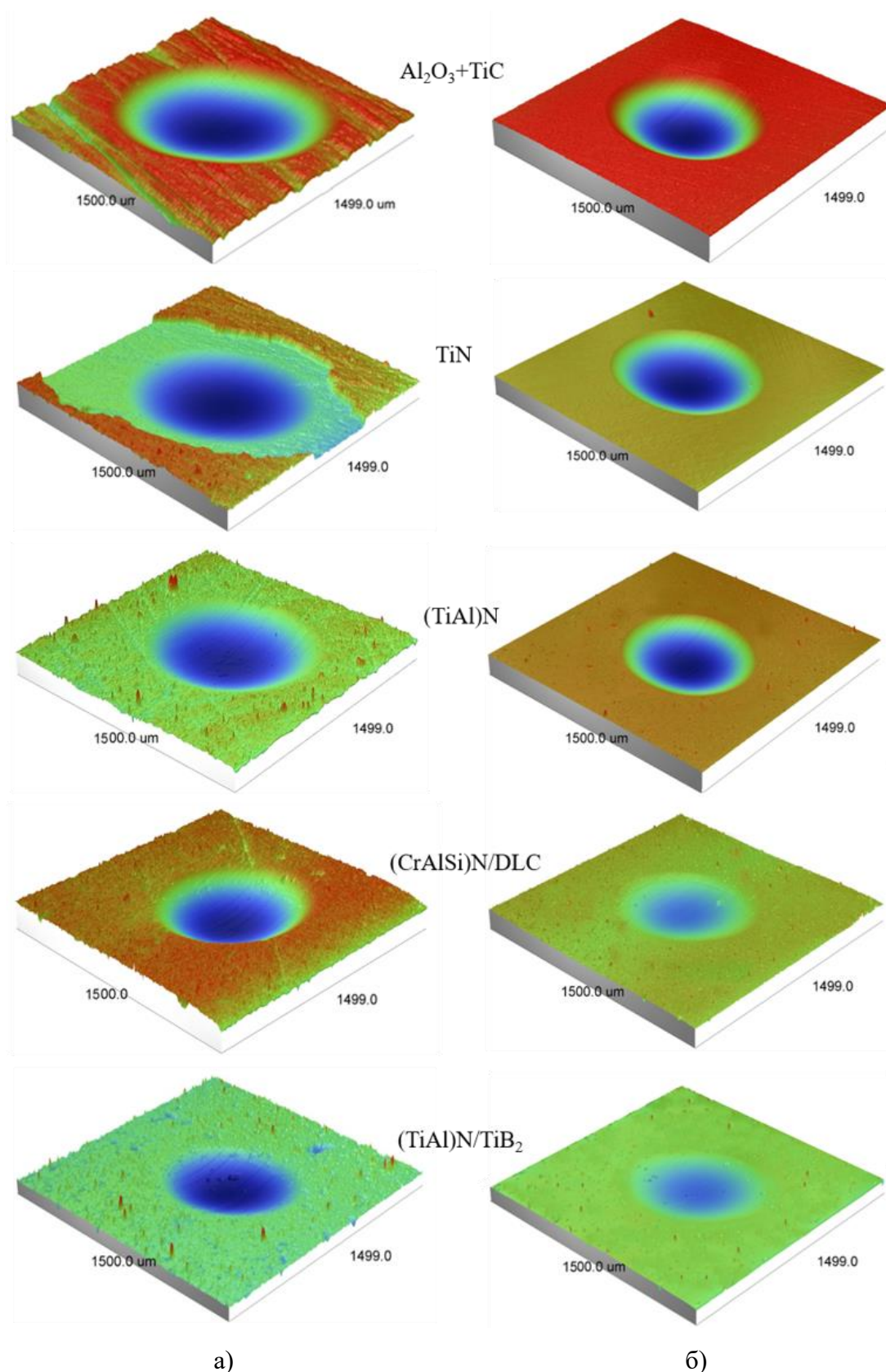
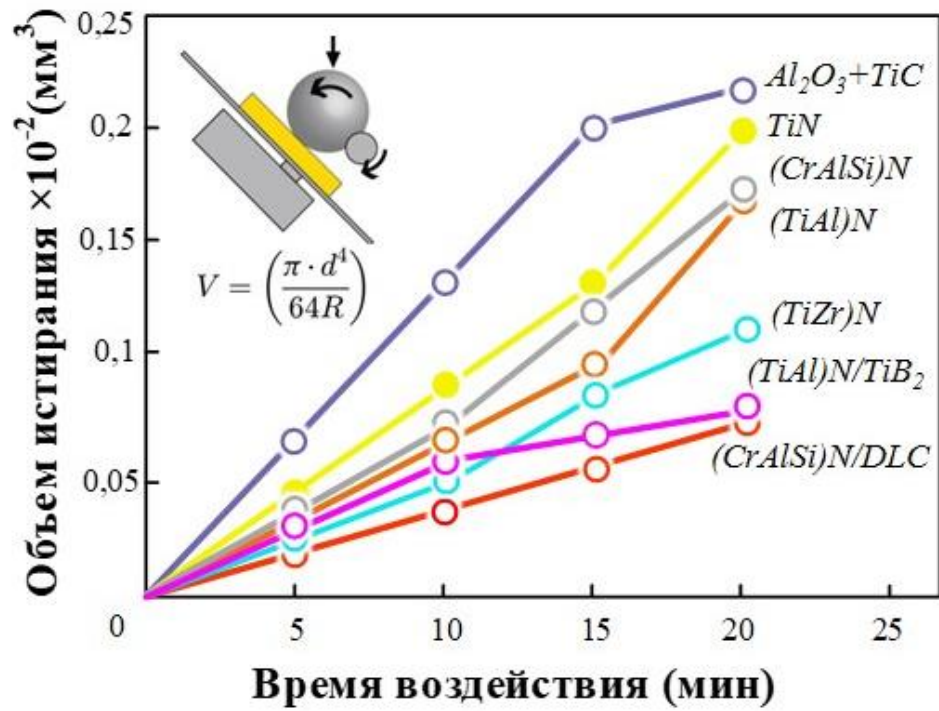
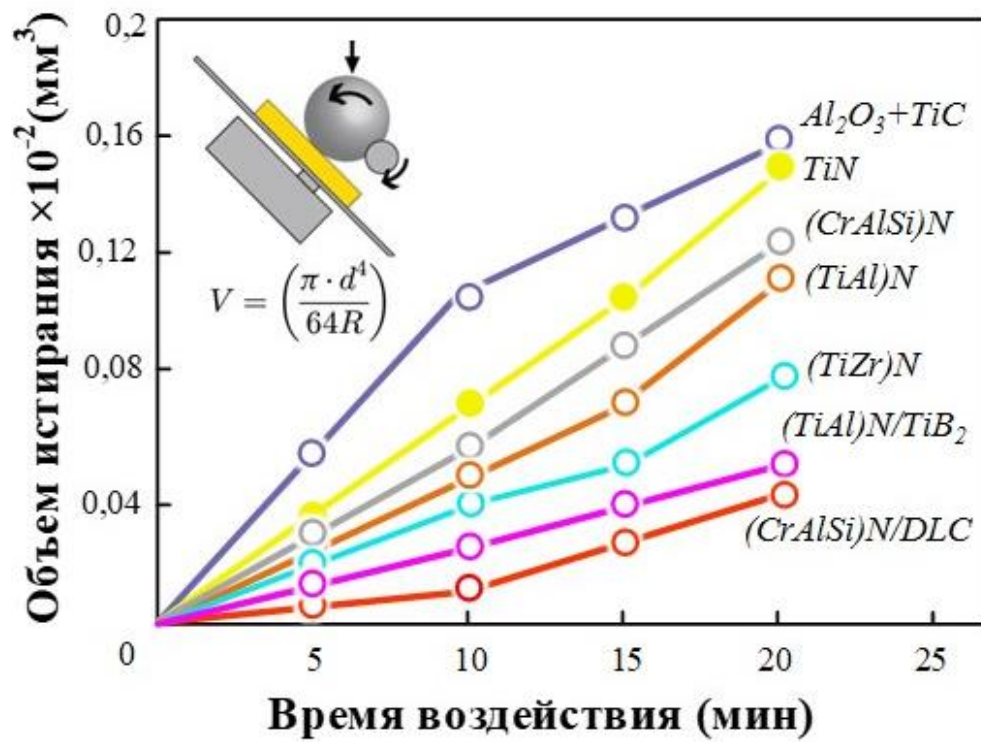


Рисунок 3.15 – Профилограммы лунок износа после испытаний на устойчивость к абразивному истиранию СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ с различными покрытиями, сформированными на подложках после двух вариантов поверхностной обработки:
 а) – алмазное шлифование; б) – травление атомами аргона



а)



а)

Рисунок 3.16 – Зависимость объемного износа от времени абразивного воздействия на СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ с различными покрытиями, сформированными на подложках после двух вариантов поверхностной обработки: а) – алмазное шлифование; б) – травление атомами аргона

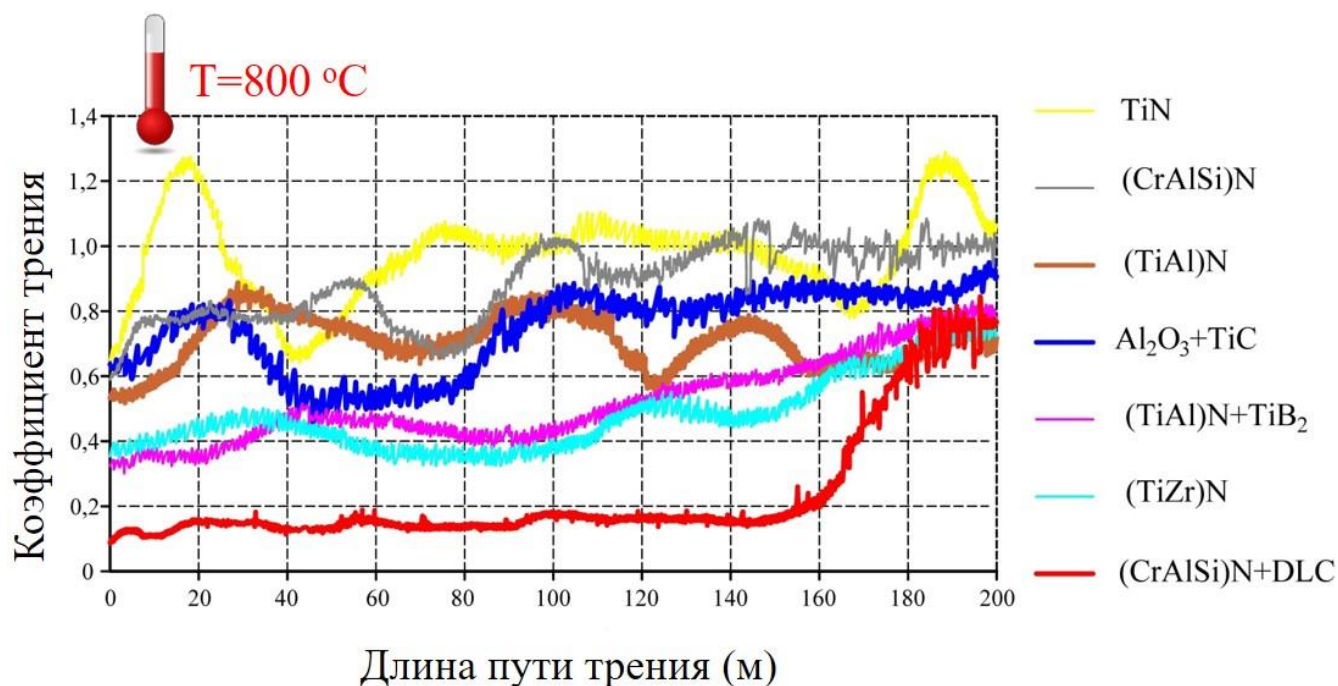


Рисунок 3.17 – Изменение коэффициента трения СМКП из Al₂O₃+TiC с различными покрытиями с увеличением дистанции трения-скольжения в условиях высокотемпературного нагрева

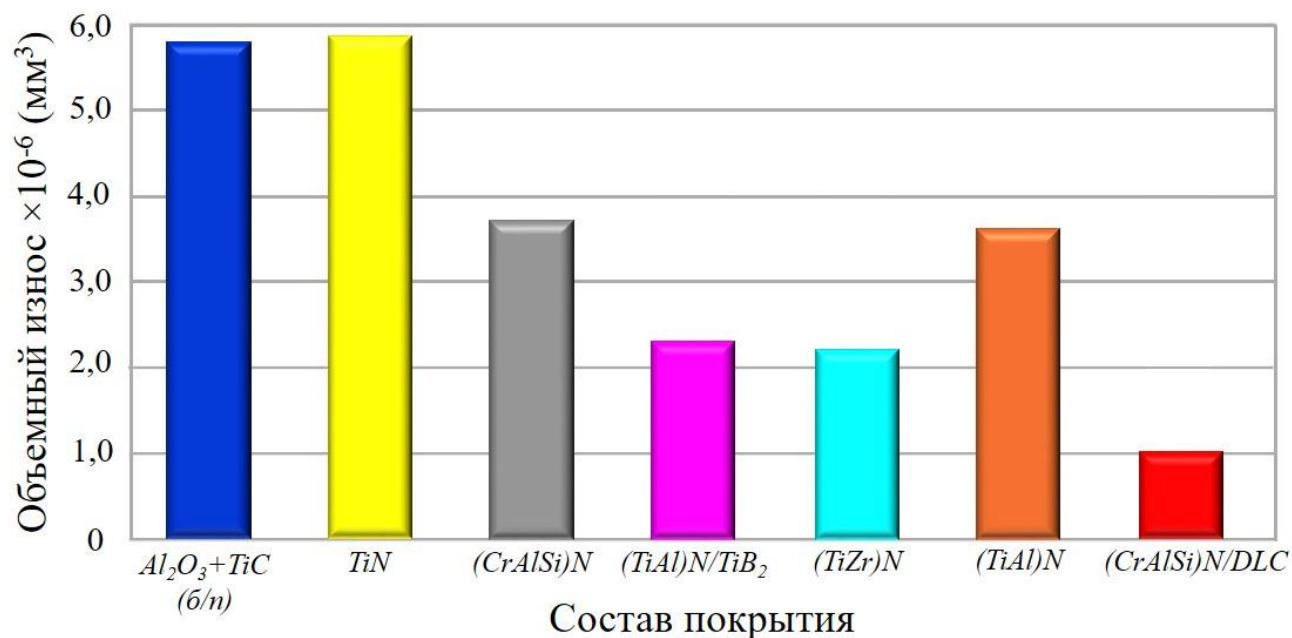


Рисунок 3.18 – Значения объемного износа СМКП из Al₂O₃+TiC с различными покрытиями после прохождения дистанции 200 м при высокотемпературном трении-скольжении

Стоит отметить, что покрытие TiN даже при его нанесении на «бездефектные» керамические подложки и обеспечении удовлетворительной прочности адгезионной связи, при всех видах трибологических испытаний демонстрировало худшие результаты, поэтому не может быть рекомендовано для использования в качестве функционального покрытия для КИ. Из гаммы исследованных нитридных покрытий наилучшие результаты в условиях фреттинг-износа, абразивного истирания и трения-скольжения с точки зрения сопротивления процессам изнашивания показало покрытие (TiZr)N. Другие исследованные нитридные композиции – (TiAl)N и (CrAlSi)N в качестве самостоятельных покрытий в сравнении с (TiZr)N показали существенно больший объемный износ при воздействии широкого спектра внешних нагрузок в процессе трибологических испытаний. При этом нитридные покрытия (TiAl)N и (CrAlSi)N продемонстрировали высокие показатели в качестве подслоев перспективных антифрикционных покрытий DLC и TiB₂, максимальная толщина которых ограничивается 2,0 мкм. С увеличением указанной толщины при формировании пленок DLC и TiB₂ значительно повышается уровень внутренних напряжений и возрастают случаи их отслаивания при воздействии внешних нагрузок. Поэтому для обеспечения максимальной для КИ общей толщины покрытия (~3,8 мкм) данные соединения следует использовать в качестве внешнего слоя покрытия и носить их на предварительно сформированный подслой. Следует отметить, что указанные двухслойные покрытия показали наилучшие трибологические характеристики при их нанесении на керамическую основу из Al₂O₃+TiC и SiAlON.

На Рисунке 3.19 представлены SEM-изображения изломов СМКП из Al₂O₃+TiC с типовыми вариантами покрытий – (TiZr)N, (TiAl)N/TiB₂ и (CrAlSi)N/DLC, которые были выбраны по результатам комплексных трибологических испытаний, как составы, показавшие наилучшую износоустойчивость в условиях фреттинг-износа, абразивного воздействия и высокотемпературного трения-скольжения. В дальнейшем указанные составы покрытий использовались для нанесения на КИ и проведения его испытаний в лабораторных и производственных условиях.

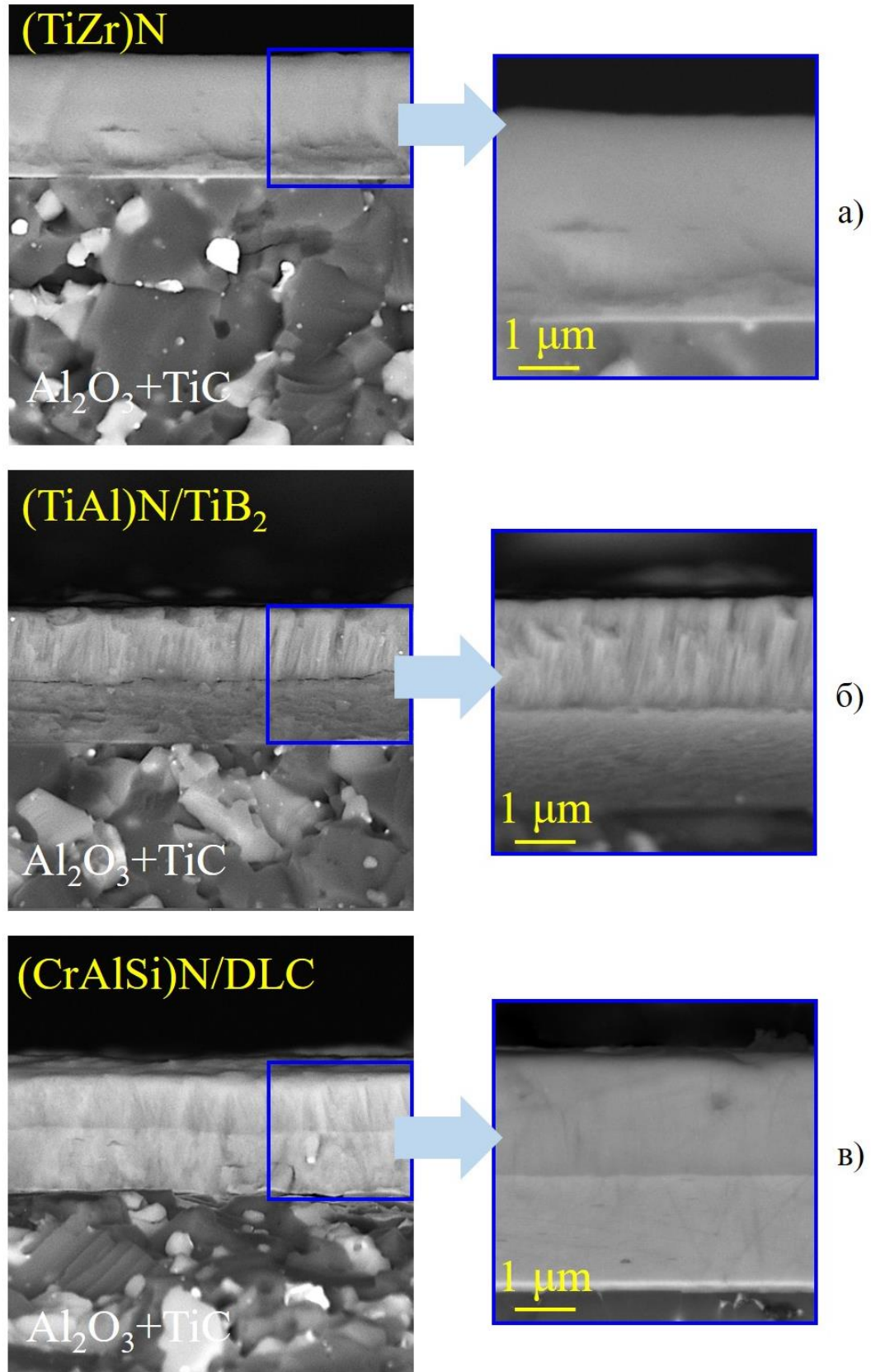


Рисунок 3.19 – SEM-изображения изломов образцов с типовыми вариантами покрытий для нанесения на инструмент из керамики, выбранными на основе результатов трибологических исследований: а) – (TiZr)N; б) – (TiAl)N/TiB₂; в) – (CrAlSi)N/DLC

3.4. Лабораторные стойкостные испытания режущих пластин из керамик $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON после комплексной модификации поверхностного слоя при фрезеровании закаленной стали и точении жаропрочного никелевого сплава

Для оценки влияния комплексной модификации, включающей травление пучком ускоренных частиц аргона и последующее формирование функциональных покрытий, на эффективность эксплуатации СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON была проведена серия лабораторных испытаний при фрезеровании закаленной стали и точении жаропрочного никелевого сплава. Для возможности сопоставления новых результатов с данными, ранее полученными в рамках настоящей работы, условия лабораторных испытаний (элементы режима резания) были идентичны представленным на Рисунках 1.14 и 1.32 (при фрезеровании закаленной стали квадратными пластинами из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$) и Рисунке 1.15 (при точении жаропрочного никелевого сплава круглыми пластинами из SiAlON).

На Рисунке 3.20 представлены кривые реализаций «износ – время резания», а на Рисунке 3.21 – усредненные кривые развития очага износа при фрезеровании закаленной стали ШХ15 СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ после комплексной модификации, включающей травление пучком ускоренных частиц аргона и нанесение покрытий $(\text{TiZr})\text{N}$ при $V=380$ м/мин, $S=0,15$ мм/зуб, $t=1$ мм. Обращает на себя внимание вид кривых износа, которые в отличие от веерного характера, выявленного для СМКП после алмазного шлифования и нанесения покрытий (Рисунки 1.14 и 1.32), выглядят как переплетающийся пучок кривых с существенно меньшим разбросом времени работы до отказа. Аналогичный характер был выявлен для СМКП, прошедших многоэтапную алмазную обработку, включающую доводку и полирование (Рисунок 2.17).

Приведенные исследования показали, что доминирующий износ при фрезеровании закаленной стали СМКП из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ развивается во всех случаях по главной задней поверхности и состояние ПС не изменяет характера

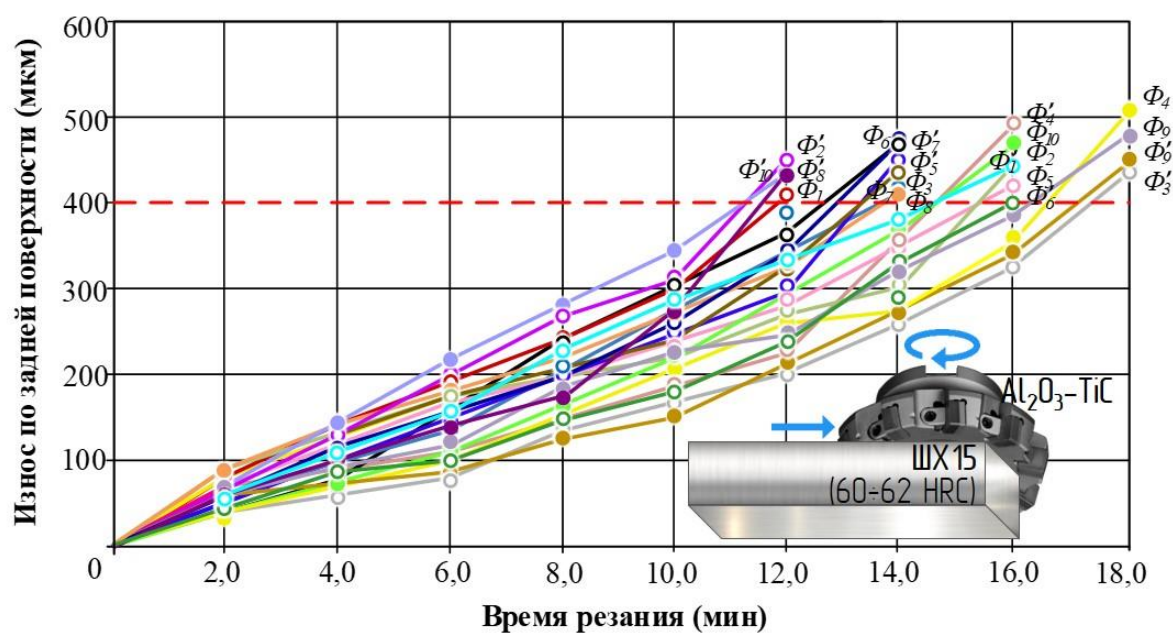


Рисунок 3.20 – Кривые реализаций «износ – время резания» при фрезеровании закаленной стали ШХ15 СМКП из Al_2O_3+TiC после комплексной модификации поверхностного слоя ($V=380$ м/мин, $S=0,15$ мм/зуб, $t=1$ мм)

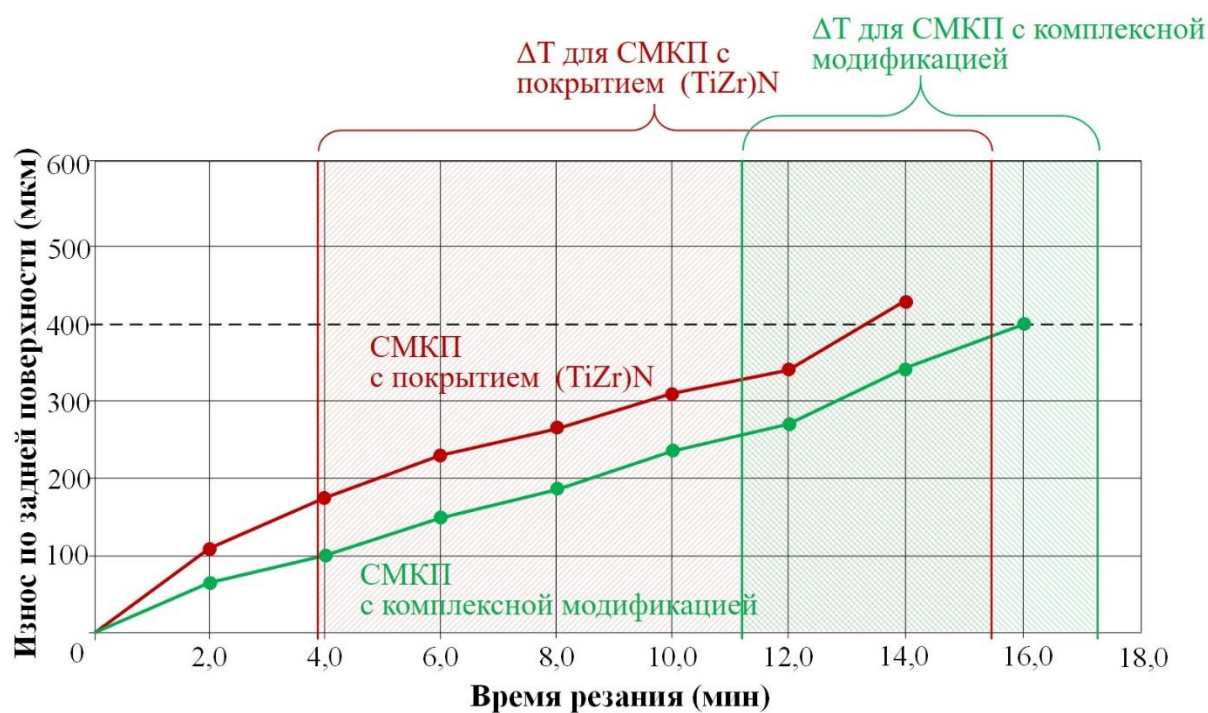


Рисунок 3.21 – Усредненные кривые развития очага износа по задней поверхности и диапазон изменения наработки до отказа ΔT режущих граней СМКП из Al_2O_3+TiC с покрытиями (TiZr)N, сформированными на подложках с различным состоянием поверхностного слоя, с увеличением времени резания при фрезеровании закаленной стали ШХ15

расположения очага износа.

При этом комплексная модификация СМКП сдерживает развитие очага износа по задней поверхности – при выбранных условиях резания средняя стойкость (наработка на отказ) инструмента составила ~16 мин, что относительно исходных СМКП, присутствующих на рынке, обеспечивает увеличение указанного показателя в 1,7 раза. На Рисунке 3.21 приведены усредненные кривые развития очага износа по задней поверхности режущих граней СМКП при различном времени резания для исходных (дефектных) образцов с покрытием (TiZr)N и образцов, прошедших комплексную модификацию – травление пучком ускоренных частиц аргона и нанесение покрытия (TiZr)N. Там же приведены данные о диапазоне изменения наработки до отказа ΔT при испытаниях двух групп СМКП, имеющих различное состояние ПС. По сравнению с исходными СМКП с покрытием (TiZr)N применение комплексной модификации обеспечивает некоторое увеличение средней стойкости (в 1,2 раза). Важнейшим результатом комплексной модификации является значительное уменьшение разброса значений стойкости режущих граней (на Рисунке 3.21 области диапазона ΔT выделены соответствующим цветом). Вариация стойкости $VarT$ для СМКП после комплексной модификации в соответствии с выполненными расчетами составила 14%, что в 2 раза меньше, чем у исходных СМКП и образцов с покрытиями (TiZr)N.

Для исследования эффективности применения комплексной модификации для СМКП из SiAlON, включающей травление пучком ускоренных частиц аргона и нанесение покрытия (CrAlSi)N/DLC, была проведена серия лабораторных испытаний при наружном продольном течении заготовок из жаропрочного никелевого сплава ХН45МВТЮБР в условиях процесса резания, аналогичных приведенным на Рисунке 1.15. На Рисунке 3.22 приведены результаты, полученные для трех вариантов СМКП – исходных (1), с покрытиями (CrAlSi)N/DLC (2) и с комплексной модификацией, включающей травление пучком атомов аргона и нанесение (CrAlSi)N/DLC (3). Анализ экспериментальных результатов (Рисунок 3.22) позволяет выявить определенные отличия в характере и скорости развития очага износа по задней поверхности для СМКП с различным состоянием ПС.

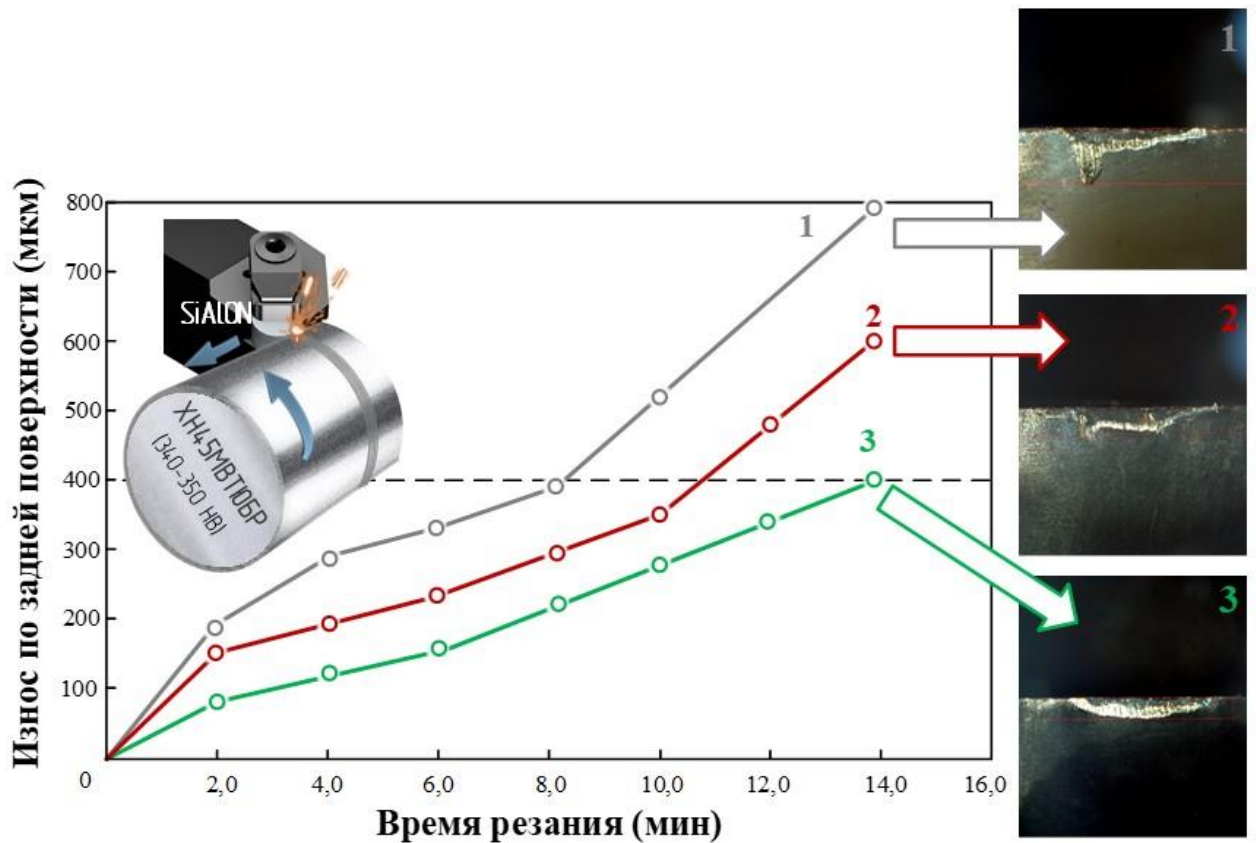


Рисунок 3.22 – Усредненные кривые развития очага износа по задней поверхности режущих граней СМКП из SiAlON с различным состоянием поверхностного слоя с увеличением времени резания при точении никелевого сплава ХН45МВТЮБР при $V=280$ м/мин, $S=0,15$ мм/об и $t=1$ мм (1 – исходные СМКП, 2 – с покрытиями (CrAlSi)N/DLC, 3 – после комплексной модификации)

У исходных образцов и СМКП с покрытиями на всех стадиях изнашивания наблюдается более высокая скорость развития очага износа по задней поверхности относительно образцов после комплексной модификации. Кроме того, как показали проведенные исследования, точение никелевого сплава сопровождается интенсивным лункообразованием на передней поверхности исходных СМКП, которое практически блокируется при применении покрытий (CrAlSi)N/DLC (Рисунок 3.23). Применение комплексной модификации ПС позволило увеличить среднюю стойкость КИ при точении сплава ХН45МВТЮБР в лабораторных условиях в 1,7 раза относительно исходных СМКП из SiAlON и в 1,3 раза в сравнении с образцами с покрытиями (CrAlSi)N/DLC.

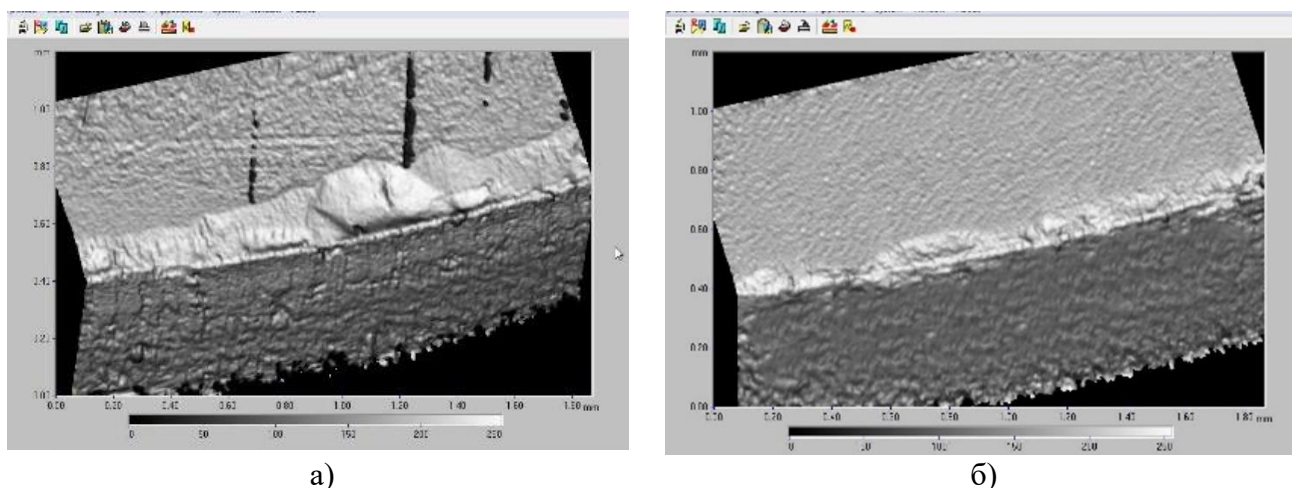


Рисунок 3.23 – Трехмерные изображения изношенной режущей части СМКП из SiAlON с различным состоянием ПС при продольном точении сплава ХН45МВТЮБР: а) – исходные СМКП; б) – после комплексной модификации

Оценка влияния комплексной модификации на надежность СМКП из SiAlON проводилась в производственных условиях, результаты которых представлены в 5 главе настоящей диссертационной работы.

3.5. Выводы

1. В результате выполненных исследований установлено, что микроструктура инструментальных покрытий на базе нитридов типа TiN, (TiAl)N, (TiZr)N, (CrAlSi)N, диборидов TiB₂ и алмазоподобных (DLC) пленок находится в сильной зависимости от индекса дефектности ПС керамических подложек, с увеличением которого в покрытиях значительно возрастает количество пор и несплошностей. Морфологический рисунок сформированных покрытий во многом копирует характерные дефекты, присутствующие в ПС керамических пластин. При осаждении покрытий на подложки с минимальным индексом дефектности ПС, их микроструктура обуславливается особенностями процессов синтеза покрытий и роста кристаллитов элементов покрытий.

2. Экспериментальные исследования возможности использования различных процессов модификации ПС (струйной обработки с использованием микрочастиц электрокорунда, электронно-лучевого воздействия, а также травления в плазме вакуумно-дугового разряда в широком диапазоне режимов) выявили низкую эффективность их применения для минимизации индекса дефектности керамических пластин.

3. Для эффективного удаления дефектного слоя с поверхности инструментов из различных керамик высокую эффективность демонстрирует разработанный технологический подход, базирующийся на «сухом» травлении (бомбардировке) ПС пучком ускоренных частиц аргона, при котором происходит физическое распыление слоя на требуемую глубину. Рациональное значение ключевого параметра процесса травления – энергии атомов Ar было установлено экспериментально и составило 5 кэВ для инструментальных керамик на основе $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON. Зависимость глубины травления от времени обработки носит линейный характер, а скорость травления составляет для $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ – 5,9...6,0 мкм/ч, а для SiAlON – 8,8...8,9 мкм/ч. Предложенный технологический подход позволяет многократно снизить индекс дефектности ПС по отношению к промышленно выпускаемым керамическим пластинам, формообразование которых осуществляется алмазным шлифованием.

4. Разработанный метод комплексной модификации инструментов из различных керамик, включающей травление дефектного слоя быстрыми атомами Ar и последующее осаждение на «бездефектный» ПС различных функциональных покрытий, может быть реализован на созданной опытной многофункциональной технологической установке, которая в едином технологическом цикле позволяет выполнять предварительное травление дефектного ПС режущих пластин и концевых фрез и осуществлять последующее осаждение широкой гаммы покрытий на базе нитридов, диборидов и алмазоподобных пленок.

5. Проведенные комплексные трибологические испытания функциональных покрытий различных составов в условиях фреттинг-износа, абразивного воздействия и высокотемпературного трения-скольжения позволили выбрать и

рекомендовать для инструментов из керамики ряд типовых перспективных составов – (TiZr)N, (TiAl)N/TiB₂ и (CrAlSi)N/DLC.

6. Комплекс проведенных лабораторных стойкостных испытаний СМКП из Al₂O₃+TiC при фрезеровании закаленной стали ШХ15 и СМКП из SiAlON при точении жаропрочного никелевого сплава ХН45МВТЮБР показали, что применение разработанного метода и технологических решений для комплексной модификации позволяет увеличить среднюю стойкость керамического инструмента и значительно повысить его надежность при эксплуатации за счет уменьшения разброса наработки на отказ. СМКП из Al₂O₃+TiC, прошедшие комплексную модификацию – травление дефектного слоя и нанесение покрытий (TiZr)N, при фрезеровании закаленной стали обеспечили увеличение средней стойкости в 1,7 раза и уменьшение вариации наработки на отказ в 2 раза относительно промышленно выпускаемого инструмента. СМКП из SiAlON, прошедшие комплексную модификацию – травление дефектного слоя и нанесение покрытий (CrAlSi)N/DLC, позволили увеличить среднюю стойкость при точении жаропрочного никелевого сплава в 1,7 раза в сравнении с исходным инструментом.

Глава 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕЛЬНЫХ КОНЦЕВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ФРЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

4.1. Потребность в разработке опытно-промышленной технологии изготовления цельных концевых керамических фрез и последовательность операций для ее реализации

В настоящее время жаропрочные никелевые сплавы типа ХН45МВТЮБР, ХН51КВМТЮБ, ХН77ТЮР и др. являются основным конструкционным материалом для изготовления работающих при высоких термических нагрузках ответственных деталей в авиационной промышленности, энергетическом машиностроении и других высокотехнологичных отраслях промышленности. Изготовление сопловых и рабочих турбинных лопаток, обтекателей, блисков и др. деталей имеет особую технологическую сложность из-за необходимости высокоточной обработки сложнофасонных поверхностей. Высокие эксплуатационные характеристики никелевых сплавов определяют сложности при их механической обработке, осуществляемой на многокоординатных станках с ЧПУ. С позиций теории резания обработка сложнофасонных деталей является чрезвычайно сложным процессом из-за выраженной нестационарности, определяемой прерывистым характером резания и постоянным изменением его режима, взаимными перемещениями по сложным траекториям заготовки и фрезы, непрерывной трансформацией сечений удаляемого припуска и изменяющимся характером эксплуатационных нагрузок на зубья фрезы [170]. При этом коэффициент обрабатываемости резанием жаропрочных никелевых сплавов составляет порядка 0,25 по сравнению с обработкой конструкционной стали 45.

Объем фрезерных операций при производстве сложнофасонных деталей из жаропрочных никелевых сплавов нередко достигает до 50%. В таких условиях особую важность приобретает проблема многократного повышения производительности обработки, для решения которой на мировом инструментальном рынке сравнительно недавно появились цельные концевые керамические фрезы, изготавливаемые из материала на основе SiAlON.

Впервые цельная концевая керамическая фреза была запатентована в 2014 году компанией Kennametal [171], а затем в 2016-2018 гг. другими ведущими зарубежными компаниями – Walter AG [172], Mitsubishi [173] и Iscar [174] также были получены соответствующие патенты. В России впервые патент на цельную концевую керамическую фрезу был получен в 2020 году коллективом разработчиков из ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», в состав которого входит автор настоящей диссертационной работы [175].

Благодаря особым физико-механическим свойствам, рассмотренным в 1 главе (Рисунок 1.3), указанный инструмент позволяет осуществлять обработку никелевых сплавов на скоростях резания, превышающих до 6 раз соответствующие скорости для твердосплавных концевых фрез. Распространение цельных концевых керамических фрез сдерживается часто имеющимися место случаями внезапного микроразрушения контактных площадок из-за действующих циклических теплосиловых нагрузок, а также все еще чрезвычайно высокой стоимости керамических фрез, представленными на рынке и выпускаемыми компаниями Mitsubishi, Kennametal, Sandvik Coromant и Iscar. К сожалению, несмотря на чрезвычайно высокую стоимость единицы цельных концевых фрез они так же, как СМКП не лишены недостатков и их ПС содержит большое количество дефектов, включая многочисленные вырывы зерен на режущей кромке. На Рисунке 4.1 представлены характерные изображения дефектов на режущих кромках промышленно выпускаемых керамических фрез. С учетом описанных в предыдущих главах результатов, имеются основания полагать, что наличие таких дефектов будет снижать эффективность эксплуатации инструмента.

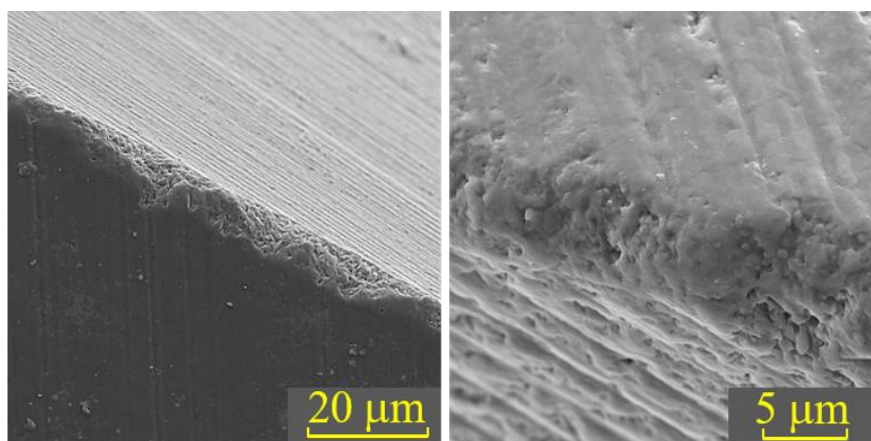


Рисунок 4.1 – Характерные дефекты, формируемые в процессе алмазной заточки режущих кромок цельных концевых керамических фрез из SiAlON, выпускаемых зарубежными производителями

Поэтому разработанный метод и технологические решения в области комплексной модификации ПС КИ, описанные в 3 главе работы, целесообразно апробировать также на цельных концевых керамических фрезах.

В перспективе можно прогнозировать расширение использования цельных концевых керамических фрез и внедрение их в механообрабатывающие производства российских предприятий машиностроения и ОПК. На сегодняшний день цельные концевые керамические фрезы зарубежного производства используются отечественными предприятиями в целях опытной эксплуатации. Кроме того, отдельные высокотехнологичные предприятия в рамках собственных инструментальных производств самостоятельно осуществляют изготовление опытных образцов концевых керамических фрез посредством алмазной заточки спеченных керамических заготовок (стержней) из материала SiAlON, представленными на рынке главным образом компаниями KHP – Suzhou Kingyork New Material, Sta Refractory и др. Однако указанные керамические заготовки характеризуются невысокой воспроизводимостью свойств от партии к партии.

Учитывая предельно высокую стоимость цельных керамических фрез зарубежного производства, невозможность их использования для исследования влияния модификации их ПС на эксплуатационные показатели при проведении лабораторных и производственных испытаний с получением статистически значимых данных, а также необходимость разработки и апробации новых

технологических подходов к созданию инновационного КИ, которые в дальнейшем могли бы использоваться для нужд отечественных предприятий, в настоящей диссертационной работе решалась важная научно-техническая задача – разработка и реализация опытно-промышленной технологии изготовления цельных концевых керамических фрез. Под указанной технологией понимается полный цикл мелкосерийного производства керамических фрез на серийном оборудовании для исследовательских или коммерческих целей.

В качестве объекта (эталона) на примере которого должна быть реализована разрабатываемая опытно-промышленная технология, была выбрана концевая керамическая фреза, по конструкторско-геометрическим параметрам аналогичная коммерческим фрезам, выпускаемым компанией Kennametal (ее общей был представлен в главе 1 на Рисунке 1.34). С указанными фрезами в процессе лабораторных испытаний сопоставлялись показатели образцов нового инструмента, созданного в рамках настоящей работы.

На Рисунке 4.2 представлена 3D-модель концевой керамической фрезы, изготавливаемой в рамках выполнения настоящей диссертационной работы, а на Рисунке 4.3 - ее эскизный чертеж.

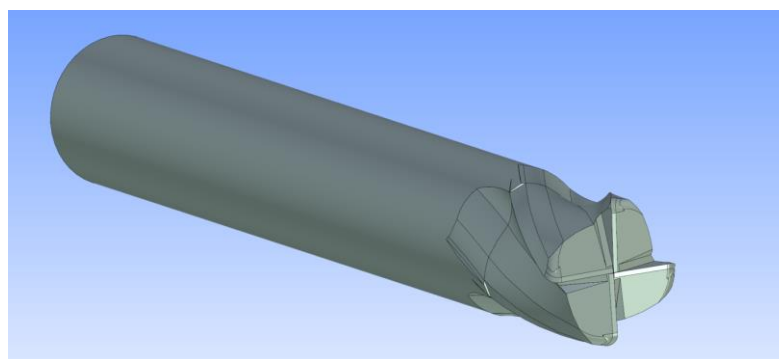


Рисунок 4.2 – 3D-модель цельной концевой керамической фрезы для обработки жаропрочных никелевых сплавов

При разработке опытно-промышленной технологии ориентировались на передовую технологическую базу ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН». Полный технологический цикл изготовления цельных концевых керамических фрез из материала SiAlON включал в себя последовательное выполнение перечисленных ниже основных операций (Рисунок 4.4).

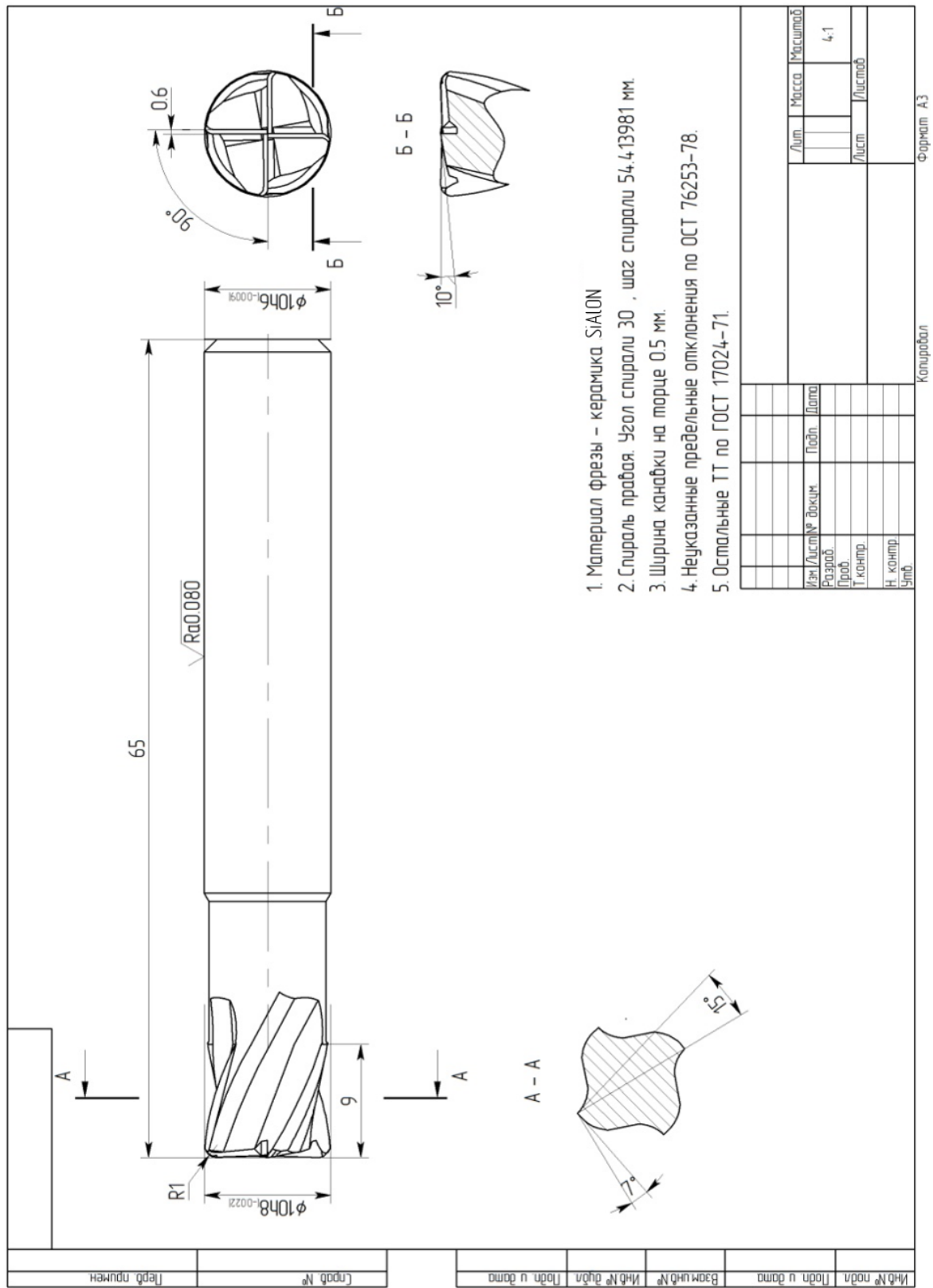
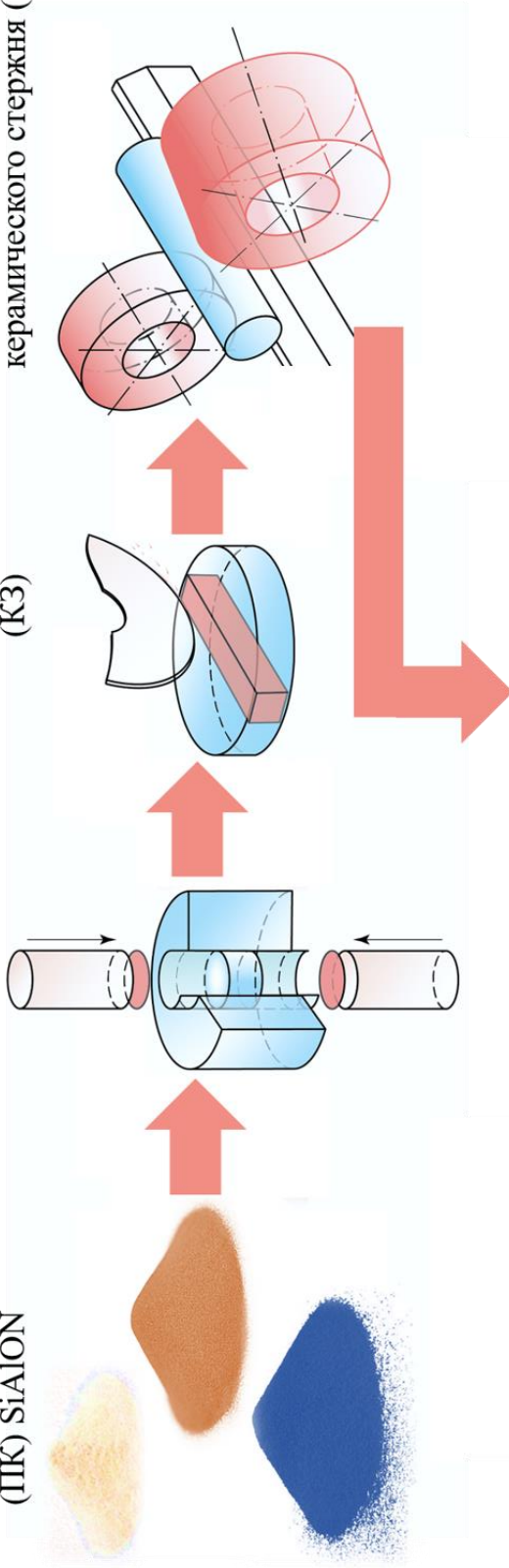


Рисунок 4.3 – Эскизный чертеж цельной концевой керамической фрезы

- I.** Приготовление порошковых композиций (ПК) SiAlON
- II.** Искровое плазменное спекание ПК
- III.** Раскрой спеченной керамической заготовки (КЗ)
- IV.** Наружное шлифование КЗ для формирования керамического стержня (КС)



- V.** Алмазное шлифование (заточка) КС и формообразование режущей части цельной концевой керамической фрезы

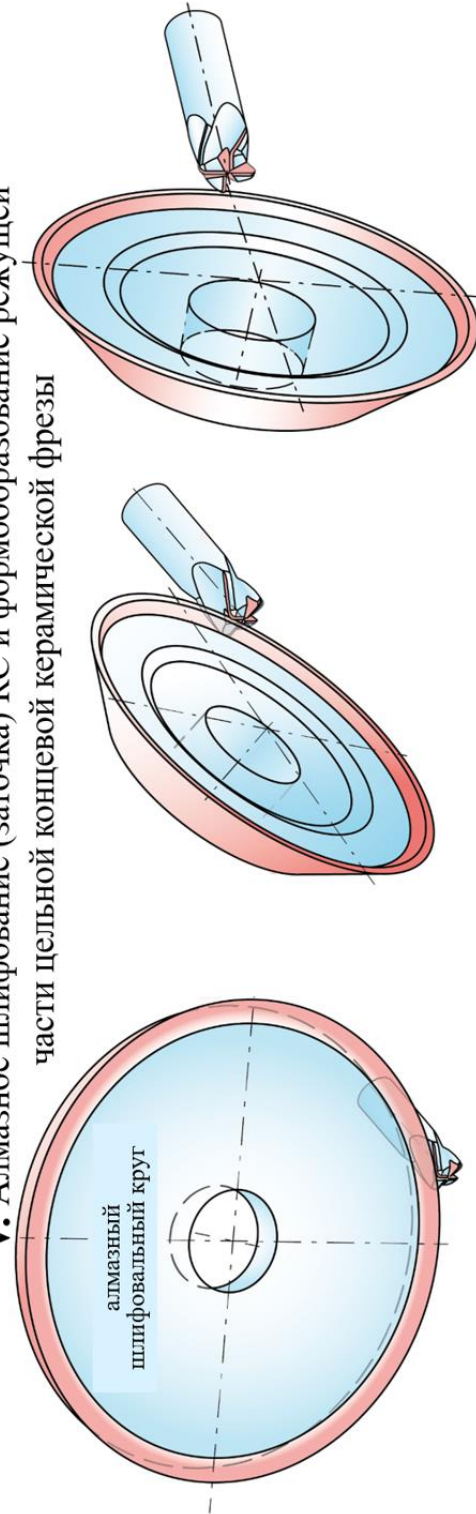


Рисунок 4.4 – Последовательность операций при изготовлении цельных керамических фрез с использованием технологической базы ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

- 1) Выбор состава и приготовление порошковой композиции на основе SiAlON.
- 2) Высокотемпературное искровое плазменное спекание порошковой композиции в графитовой матрице, задающей форму будущей заготовки (в виде керамических дисков) посредством силового воздействия верхнего и нижнего пуансонов и пропускании через спекаемый материал мощных импульсов постоянного тока.
- 3) Раскрой спеченных керамических дисков на четырехугольные заготовки-параллелепипеды на дисковом абразивно-отрезном станке (размеры устанавливаются исходя из основных габаритных размеров керамических стержней и припуска на последующее шлифование).
- 4) Формообразование четырехугольных заготовок наружным шлифованием и получение керамических стержней.
- 5) Формообразование керамических стержней на шлифовально-заточном станке с ЧПУ (алмазная заточка винтовой стружечной канавки, передней поверхности и режущей части) и получение цельных концевых керамических фрез требуемой конструкции и геометрии.

Изготовленные образцы концевых керамических фрез на финишном этапе подвергались комплексной модификации, включающей сухое травление пучками частиц аргона и формирование функциональных износостойких покрытий.

4.2. Выбор состава и подготовка порошковой композиции, искровое плазменное спекание керамических заготовок для цельных концевых фрез

Для повышения физико-механических свойств спекаемой керамики на основе SiAlON (сиалона) большой и пока еще не в полной мере реализованный потенциал имеет введение легирующих компонентов. Большое значение имеет стабилизация в процессе спекания кристаллических (зеренных) высокотемпературных фаз, которая осуществляется путем легирования определенными стабилизирующими элементами на основе оксидов редкоземельных элементов (РЗЭ) – Nd, Sm, Gd, Dy, Y, Yb и Er [176–178], которые

вводятся в виде микро- и наночастиц в порошковую композицию до 7 об.%. Помимо стабилизирующей функции оксиды РЗЭ интенсифицируют процессы спекания за счет ускорения протекания диффузии при спекании керамик и обеспечивают получение высокоплотных образцов. Мировые производители, осуществляющие промышленный выпуск цельных керамических фрез, спекают порошковые композиции на основе α/β -сиалонов с добавлением стабилизирующих добавок Y_2O_3 и Yb_2O_3 . При очевидных положительных эффектах введение оксидов РЗЭ (в особенности иттербия), усложняет процесс подготовки порошковой композиции, а также удороживает стоимость и без того дорогостоящей конечной продукции.

Перспективным процессом спекания керамики на основе SiAlON является использование техники искрового плазменного спекания (ИПС), при котором нагрев спекаемой порошковой композиции и используемой пресс-формы осуществляется за счет пропускания через них высокочастотных низковольтных импульсов постоянного электрического тока. По сравнению с традиционным горячим прессованием такой процесс позволяет существенно сократить время выдержки при максимальной температуре (порядка нескольких минут). Благодаря прямому пропусканию электрического тока уменьшается рост зерна, так как это позволяет обеспечить высокие скорости нагрева и охлаждения керамического материала [17, 87, 179]. Значительные резервы имеет подход, связанный с введением в порошковую композицию на основе α/β -сиалонов до 20 мас.% наночастиц TiN, способных обеспечить при ИПС оптимальное соотношение между твердостью, прочностью и трещиностойкостью спеченных керамических заготовок [180–183]. Кроме того, как было показано работами зарубежных исследователей, а также экспериментами, выполненными в рамках настоящей диссертационной работы [184], введение TiN в порошковую композицию способствует повышению электро- и теплопроводности спеченных керамик, что обеспечивает улучшение их обрабатываемости алмазным шлифованием и даже потенциально может позволить осуществлять обработку керамических заготовок перспективным электроэрозионным способом, который не мог ранее использоваться для

традиционных керамик на основе SiAlON и Si_3N_4 , являющихся диэлектриками. Поэтому в рамках настоящей диссертационной работы при изготовлении керамических заготовок на основе SiAlON был выбран именно указанный технологический подход.

В качестве исходных керамических порошков в работе использовались порошки производства отечественной компании Плазмотерм: α -SiAlON и β -SiAlON с размерами частиц $1,0 \pm 0,5$ мкм и TiN с размерами частиц 15-175 нм. Для смешивания порошковой керамической композиции использовался коллоидный метод, так как он позволяет осуществлять смешивание с минимальными временными и энергетическими затратами. На Рисунке 4.5 приведены SEM-изображения исходных порошков SiAlON и TiN.

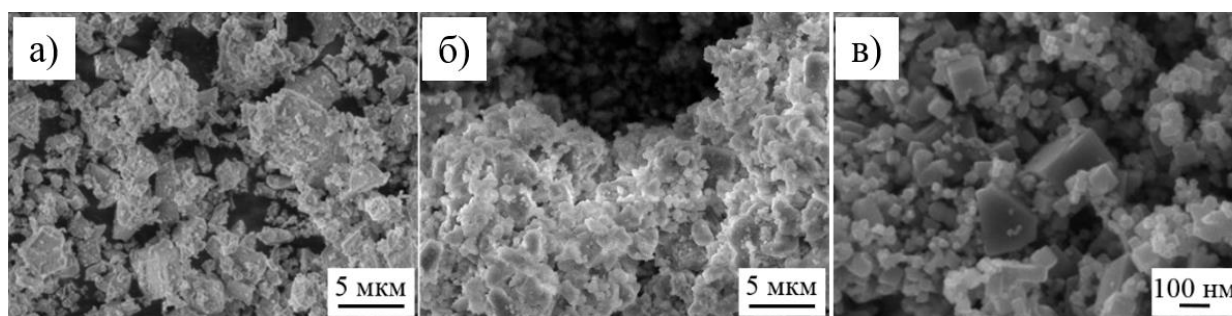


Рисунок 4.5 – СЭМ-изображения исходных порошковых материалов: а) – α -SiAlON, б) – β -SiAlON; в) – TiN

С использованием изопропилового спирта и керамических мелящих тел в полиэтиленовом контейнере на протяжении 24-х часов на шаровой мельнице были изготовлены приведенные ниже 3 варианта суспензий на основе порошковых композиций SiAlON.

Вариант 1: керамическая основа α - β SiAlON 80 мас.% (α -SiAlON 90 мас.% + β -SiAlON 10 мас.%) + TiN 20 мас.%; шифр порошковой композиции 80%(90 α 10 β)+20%TiN.

Вариант 2: керамическая основа α - β SiAlON 90 мас.% (α -SiAlON 90 мас.% + β -SiAlON 10 мас.%) + TiN 10 мас.%; шифр порошковой композиции 90%(90 α 10 β)+10%TiN.

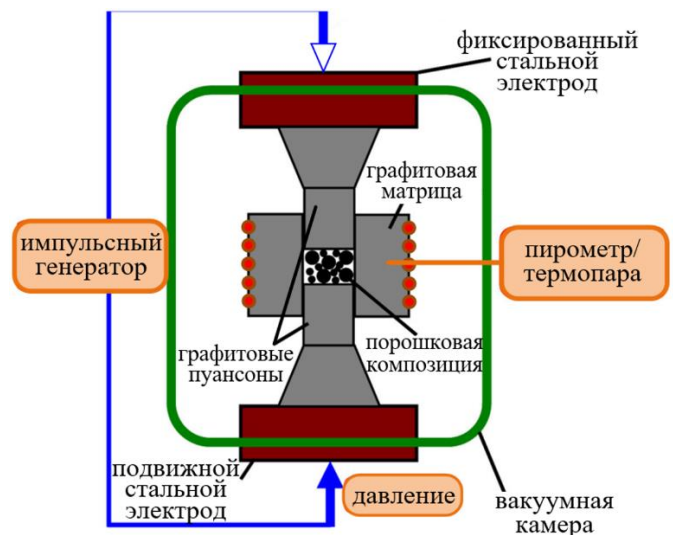
Вариант 3: керамическая основа α - β SiAlON 80 мас.% (α -SiAlON 70 мас.% + β -SiAlON 30 мас.%) + TiN 20 мас.%; шифр порошковой композиции 80%(70 α 30 β)+20%TiN.

Полученные суспензии были просушены с использованием вакуумного сушильного шкафа, а после просушивания, порошки были просеяны с использованием вибромашины и специального сита.

После выполнения всех подготовительных операций, порошковые композиции подвергались ИПС на технологической установке FCT Systeme общий вид которой и принципиальная схема приведены на Рисунке 4.6.



а)



б)

Рисунок 4.6 – Технология истрогого плазменного спекания керамических заготовок: а) – общий вид технологической установки; б) – схема реализации процесса

Пресс-форма для истрогого плазменного спекания керамических заготовок состоит из комплекта основных элементов – матрицы, нижнего и верхнего пуансонов (Рисунок 4.7). Для предотвращения адгезионного схватывания и прилипания спекенного образца к внутренним поверхностям матрицы и пуансона дополнительно использовался комплект вспомогательных расходных элементов, изготовленных из графитовой фольги, которой прокладывались внутренняя поверхность матрицы и пуансоны.



а)



б)

Рисунок 4.7 – Общий вид пресс-формы для искрового плазменного спекания керамических заготовок: а) – матрица; б) – нижний и верхний пуансоны

На Рисунке 4.8 представлен рабочий чертеж спроектированных и изготовленных для решения задач настоящей работы матрицы и пуансона, обеспечивающих получение керамических заготовок в форме дисков диаметром 80 мм и толщиной 12 мм. Центральная часть спекенных дисков после раскроя использовалась для изготовления концевых керамических фрез, а оставшиеся части в качестве образцов для проведения металлографических, трибологических и других исследований.

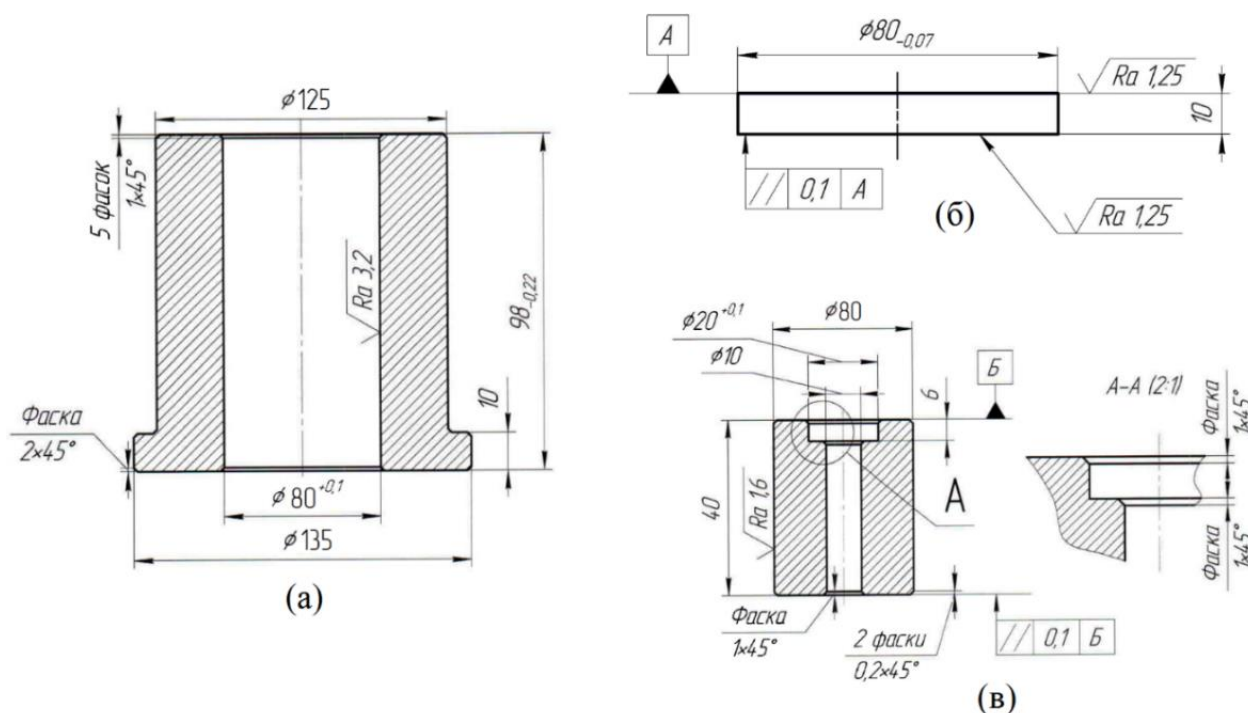


Рисунок 4.8 – Рабочий чертеж специальной пресс-формы для спекания керамических заготовок 80×12 мм: а) – графитовая матрица; б) – графитовый диск; в) – графитовый пуансон

Для сборки пресс-формы осуществлялся следующий комплекс мероприятий: размещение в цилиндрической полости матрицы графитовой фольги (длина и ширина графитовой фольги строго соответствовала высоте и длине окружности цилиндрической полости используемой матрицы); последовательное помещение в полость матрицы диска графитовой фольги, графитовой шайбы, нижнего и верхнего пуансонов с предустановленной полостью; засыпка в пресс-форму для спекания навески порошков; последовательное помещение в полость пресс-формы диска графитовой фольги, графитовой шайбы и цилиндрического пуансона с отверстием; помещение пресс-формы на гидравлический пресс CARVER для предварительной прессовки порошков до максимального давления в пресс-форме 5 МПа; транспортировка пресс-формы на участок спекания.

После помещения пресс-формы в рабочую камеру и ее закрытия, включался режим создания низкого вакуума до уровня $10^{-2} \div 10^{-3}$ Па, а затем установка переводилась в режим рабочего цикла ИПС.

Предварительно проведенные эксперименты показали, что давление при ИПС и время выдержки практически идентично влияют на основные физико-механические характеристики спекаемых заготовок из 3 различных композиций, обеспечивая наилучшие показатели при давлении 80 МПа и времени выдержки на максимальной температуре – 30 минут. Поэтому значения указанных параметров во всех экспериментах было постоянным. Влияние температуры при ИПС в интервале 1600...1750 °С оказывало очень неоднозначное влияние на характеристики спекаемых заготовок в зависимости от состава порошковой композиции. Поэтому при спекании этот параметр варьировался на четырех уровнях и составлял – 1600, 1650, 1700 и 1750 °С.

По окончании рабочего цикла и остывания керамической заготовки опускался верхний поршень-электрод, рабочую камеру открывали и извлекали пресс-форму со спеченной заготовкой. Демонтаж пресс-формы и извлечение спеченной заготовки производили с использованием настольного двухколонного пресса. После спекания заготовки выполнялась контрольная операция по

измерению геометрических параметров, а также микроскопический контроль на отсутствие пор, сколов и трещин на поверхностях спеченных заготовок.

Керамические заготовки из материалов на базе SiAlON+TiN, спеченные из 3 различных порошковых композиций при варьировании температурного режима ИПС, в дальнейшем испытывались для определения следующих основных физико-механических характеристик для выбора наилучшего варианта для изготовления цельных концевых керамических фрез.

1) Твердость определялась при нагрузке 2 кг методом индентирования пирамидой Виккерса на универсальном микротвердомере QnessQ10A. Время воздействия индентора под нагрузкой составляло 10 сек.

2) Плотность определялась методом гидростатического взвешивания, основанном на законе Архимеда и сопоставлении значений массы керамических образцов в обычных условиях на воздухе и при помещении образца в жидкость. Для измерений использовалась дистиллированная вода, взвешивание производилось на высокоточных аналитических весах GR-300.

3) Прочность определялась методом 3-точечного изгиба при комнатной температуре на универсальной испытательной машине AutoGraph AG-X. Скорость нагружения при испытаниях составляла 0,5 мм/мин.

4) Трещиностойкость определялась при схеме нагружения, аналогичной испытаниям на прочность, на оборудовании AutoGraph. На поверхность керамических образцов алмазным диском был нанесен односторонний надрез, перпендикулярный его продольной оси. При испытаниях образцы устанавливались надрезом вниз и нагружались.

Кроме того, исследовалась структура спеченных керамических заготовок посредством сканирующей электронной микроскопии, а также осуществлялся их EDX-анализ посредством специализированной системы Oxford Instruments INCA Energy. С помощью пучка электронов в процессе EDX-анализа атомы исследуемого образца возбуждались и испускали характерное для химического элемента излучение. При исследовании энергетического спектра указанного

излучения на специализированном ПО были получены данные о качественном и количественном составе спеченных образцов.

На Рисунке 4.9 представлены экспериментально полученные данные об изменениях твердости и процента теоретической плотности, а на Рисунке 4.10 – прочности при изгибе и трещиностойкости для различных составов порошковых композиций – $80\%(90\alpha 10\beta) + 20\% \text{TiN}$ (1), $90\%(90\alpha 10\beta) + 10\% \text{TiN}$ (2) и $80\%(70\alpha 30\beta) + 20\% \text{TiN}$ (3) при температуре ИПС, варьируемой в диапазоне 1600...1750 °С.

Из представленных данных видна общая характерная тенденция влияния температурного режима при ИПС на физико-механические свойства – наилучшее сочетание свойств во всех случаях достигается при температуре процесса 1700 °С. Дальнейшее увеличение температуры приводит к резкому снижению свойств спеченного керамического материала (исключение составляет твердость, которая при 1750 °С сохраняется на прежнем уровне для всех образцов). Можно предположить, что более высокая температура спекания способствует протеканию рекристаллизационных процессов, ведущих к интенсификации процессов роста зерен. Очевидно, что температура 1700 °С является рациональным значением для ИПС порошковых композиций на основе $\text{SiAlON} + \text{TiN}$. Судя по тому, что при данной температуре образцы имеют максимальную теоретическую плотность, в этих условиях формируются керамики, имеющие минимальное количество пор. Этим во многом объясняются максимальные значения при 1700 °С прочности при изгибе и трещиностойкости.

Анализ приведенных на Рисунках 4.9 и 4.10 зависимостей, показывает, что из 3 исследованных вариантов спеченных керамик, наилучшее соотношение «твердость – плотность – прочность – трещиностойкость» во всех случаях имел вариант 1: керамическая основа α - β SiAlON 80 мас.% (α - SiAlON 90 мас.% + β - SiAlON 10 мас.%) + TiN 20 мас.%.

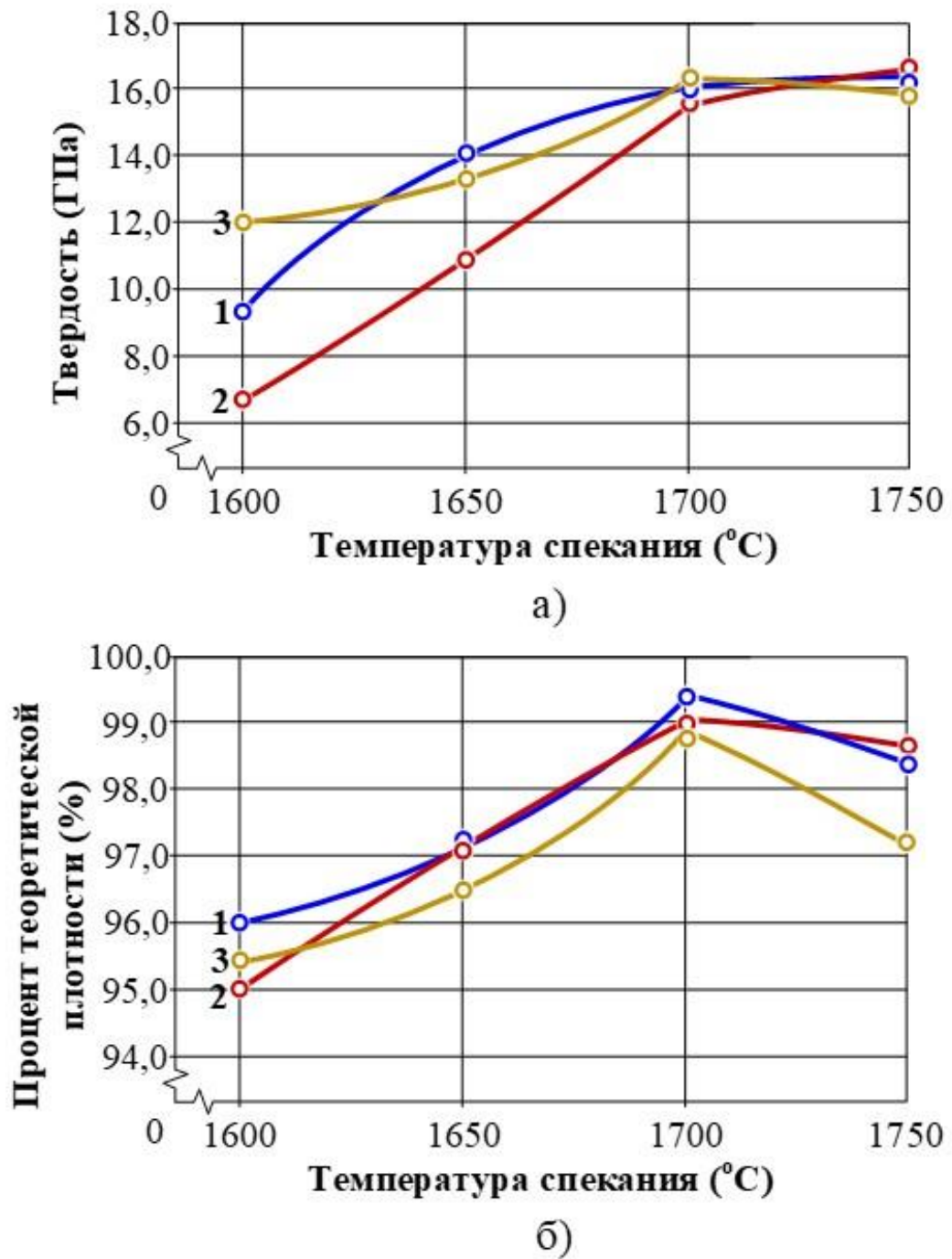
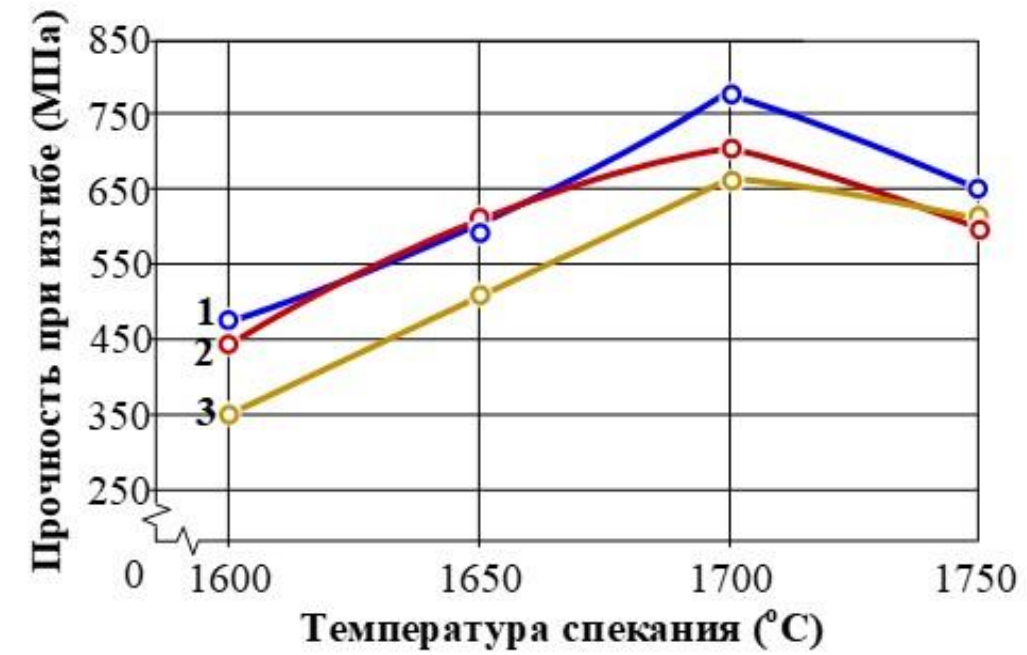
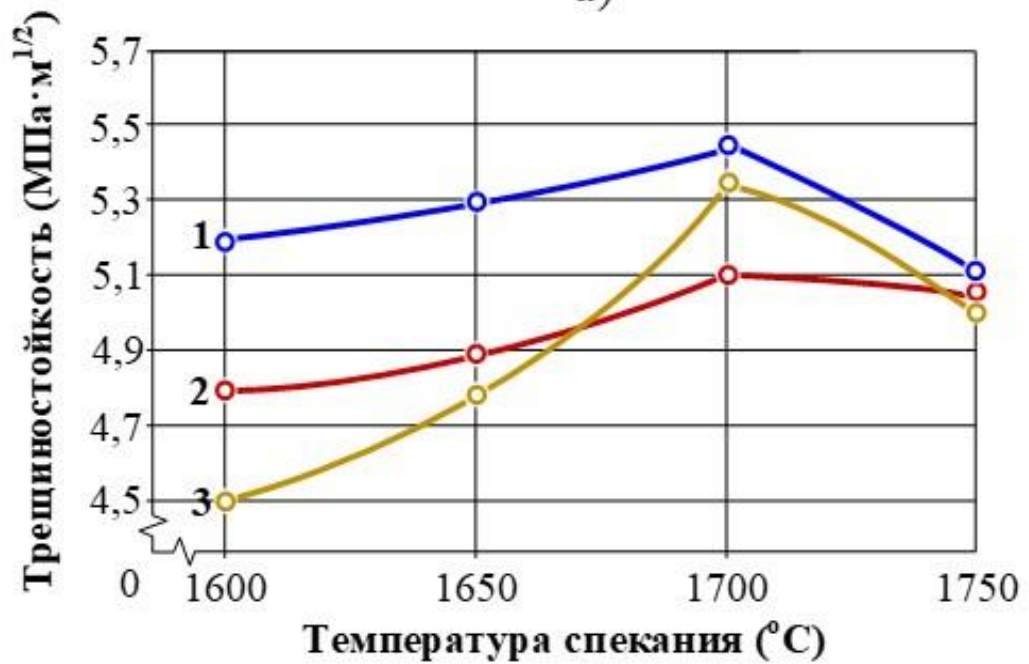


Рисунок 4.9 – Зависимости физико-механических характеристик керамических материалов, спеченных из различных порошковых композиций – 80%(90 α 10 β)+20%TiN (1), 90%(90 α 10 β)+10%TiN (2) и 80%(70 α 30 β)+20%TiN (3), от температуры искрового плазменного спекания: а) – твердость; б) – процент теоретической плотности



а)



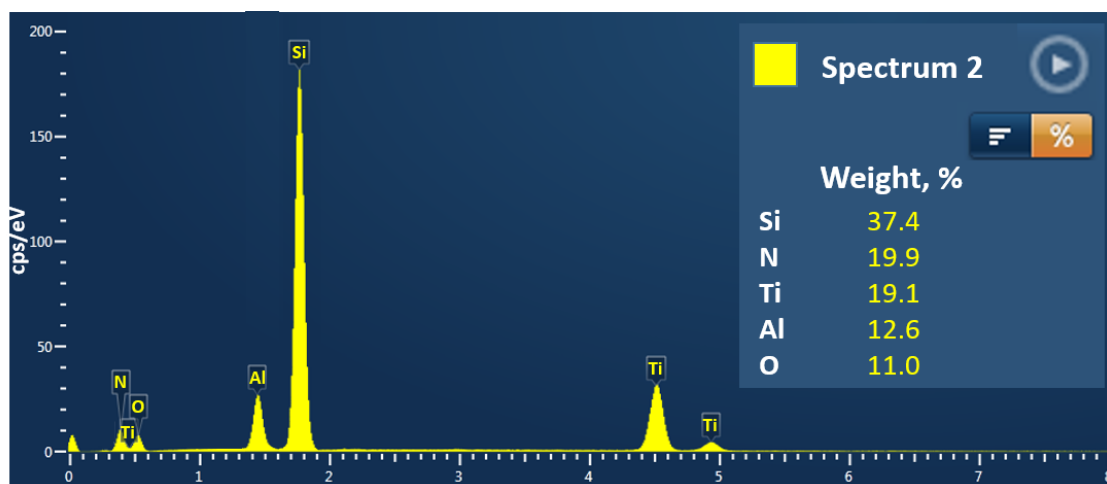
б)

Рисунок 4.10 – Зависимости физико-механических характеристик керамических материалов, спеченных из различных порошковых композиций – 80%(90 α 10 β)+20%TiN (1), 90%(90 α 10 β)+10%TiN (2) и 80%(70 α 30 β)+20%TiN (3), от температуры искрового плазменного спекания: а) – прочность при изгибе; б) – трещиностойкость

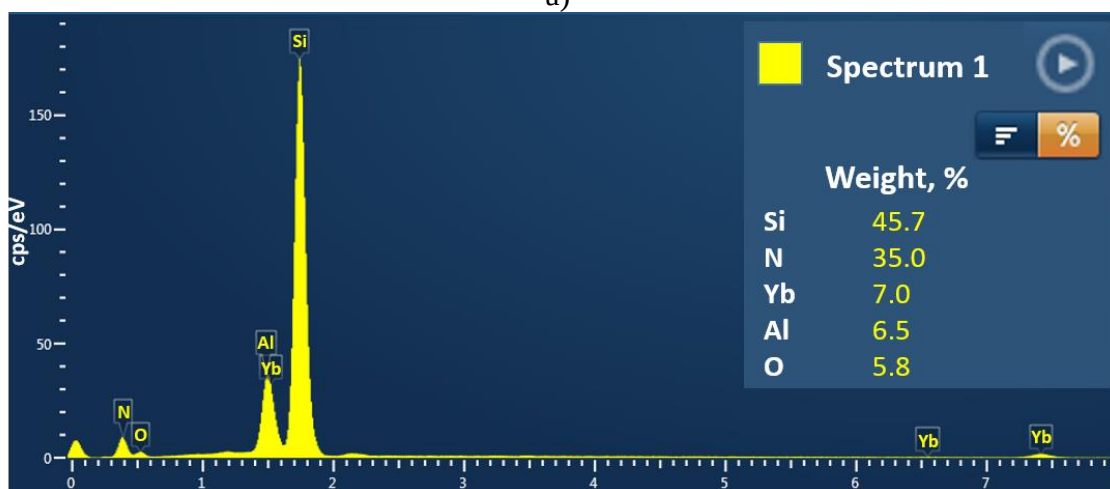
Экспериментально полученные кривые для различных порошковых композиций позволяют заключить, что введение при спекании частиц TiN в объеме 10 мас.% (кривые 2) недостаточно и не обеспечивает высокого уровня свойств керамики на базе α - β SiAlON (главным образом указанное касается трещиностойкости), в то время как введение в порошковую композицию TiN в объеме 20 мас.% (кривые 1) обеспечивает наилучшее сочетание свойств. При этом рациональным составом керамической основы SiAlON является следующее соотношение между фазами: α -SiAlON 90 мас.% и β -SiAlON 10 мас.%. Экспериментально показано, что увеличение содержания β -SiAlON до 30 мас.% в керамической порошковой композиции заметно снижает прочностные характеристики спеченного материала (кривые 3).

Следует отметить, что полученные посредством ИПС в рамках выполнения работы образцы керамики на основе SiAlON++TiN экспериментального состава (вариант 1), спеченные из отечественных порошков, по достигнутой твердости превышали соответствующие значения для керамик на базе SiAlON, спекаемых с использованием дорогостоящих стабилизирующих добавок Yb_2O_3 , а по прочностным характеристикам лишь немного уступали лучшим зарубежным аналогам. Тем не менее, указанное свидетельствует об имеющемся потенциале для дальнейшего развития выбранного направления исследований. Выявленный наилучший состав (вариант 1) керамических заготовок из SiAlON+TiN был отобран для изготовления цельных концевых керамических фрез.

В рамках диссертационной работы также проводился сравнительный микроструктурный анализ экспериментальной керамики SiAlON+TiN (вариант 1) с керамикой SiAlON+ Yb_2O_3 , используемой для изготовления коммерческих керамических фрез зарубежного производства, предназначенных для обработки никелевых сплавов и принятых в работе в качестве эталона. На Рисунке 4.11 представлены результаты элементного количественного EDX-анализа двух вариантов керамики на базе SiAlON.



а)

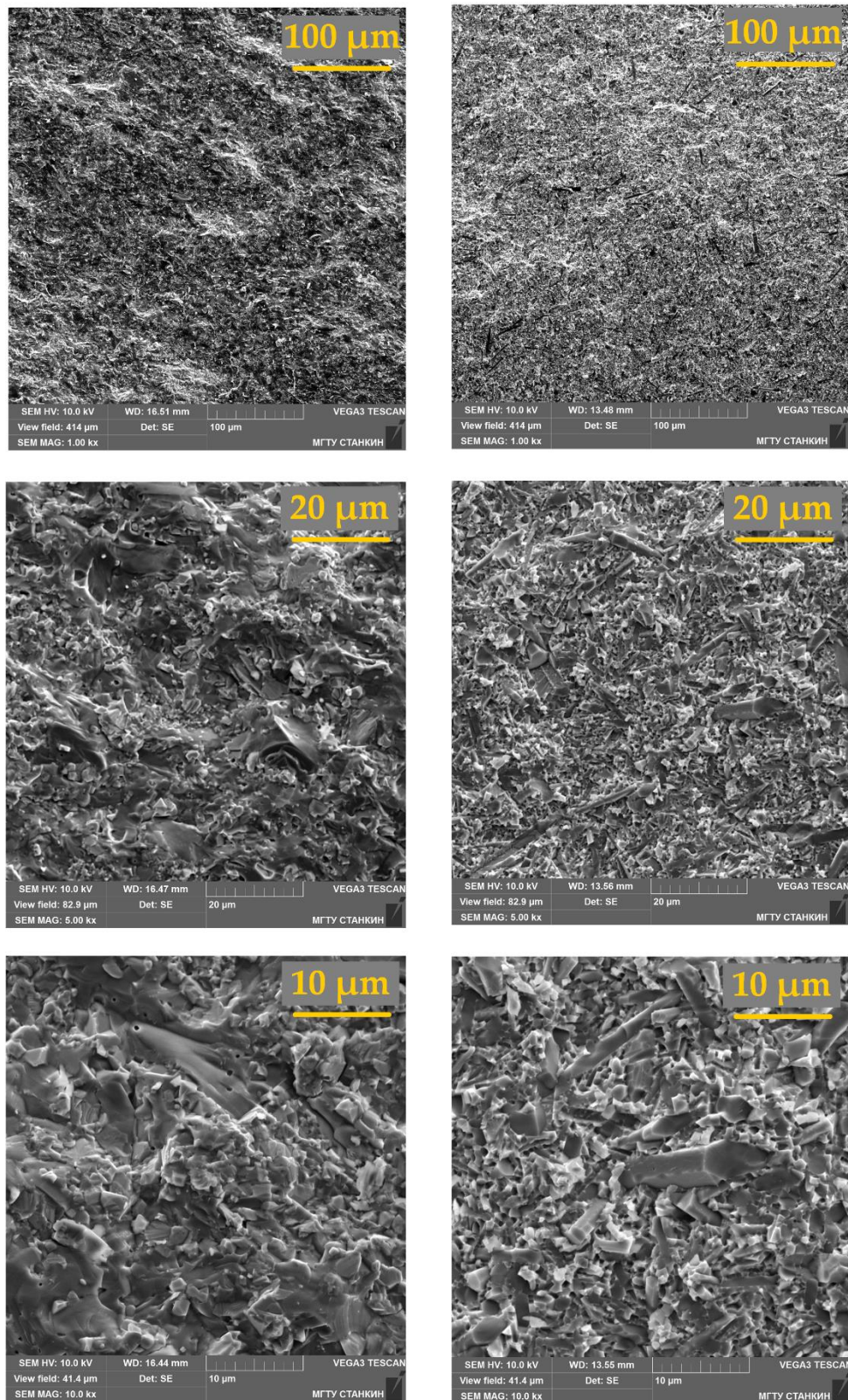


б)

Рисунок 4.11 – Результаты элементного количественного EDX-анализа спеченных керамических материалов на основе SiAlON: а) – экспериментальная керамика SiAlON+TiN; б) – промышленная керамика зарубежного производства SiAlON+Yb₂O₃

Приведенные результаты дают представление о содержании элементов в спеченных керамиках на базе SiAlON. Экспериментальная керамика содержит ~37,4% Si, 19,1% Ti и 12,6% Al, а зарубежная керамика существенно отличается по элементному составу и содержит ~45,7% Si, 7,0% Yb, 6,5% Al.

На Рисунке 4.12 представлены результаты микроструктурного SEM-анализа изломов двух типов керамик на основе SiAlON, которые демонстрирует существенные различия у экспериментального образца SiAlON+TiN (Рисунок 4.12, а) и промышленной керамики SiAlON+Yb₂O₃ (Рисунок 4.12, б).



а)

б)

Рисунок 4.12 – SEM-изображения x1000, x5000, x10000 микроструктур поверхности изломов спеченных керамических материалов на основе SiAlON: а) – экспериментальная керамика SiAlON+TiN; б) – промышленная керамика зарубежного производства SiAlON+Yb₂O₃

Сравнение SEM-изображений изломов спеченных керамических образцов, показывает, что оба образца содержат значительное количество α -модификации SiAlON как доминирующей фазы, причем для эталонного образца указанная фаза имеет большие однородность и мелкозернистость. Экспериментальная керамика характеризуется равноосными и неравноосными зернами с размером зерен до 2,8 мкм, в то время как для образцов зарубежного производства размер зерен не превышал 2,0 мкм. Также у обоих образцов наблюдается некоторое содержание β -модификации SiAlON (у коммерческих образцов данная фаза более выражена и имеет формы продолговатых частиц). Для качественной оценки равномерности распределения в керамических образцах основных элементов, а также Ti- и Yb-содержащих фаз, были получены контрастные карты распределения элементов по излому образцов, посредством EDX-анализа (Рисунок 4.13).

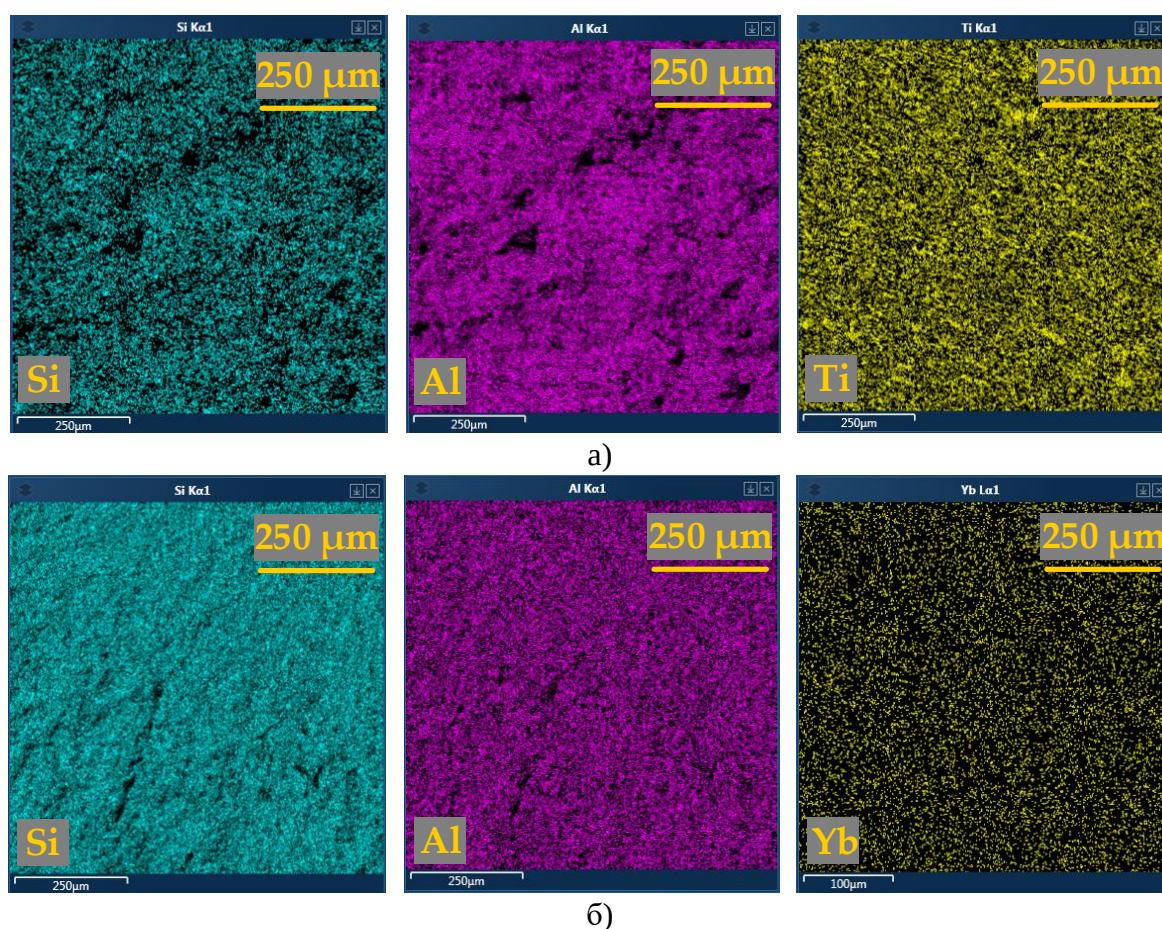
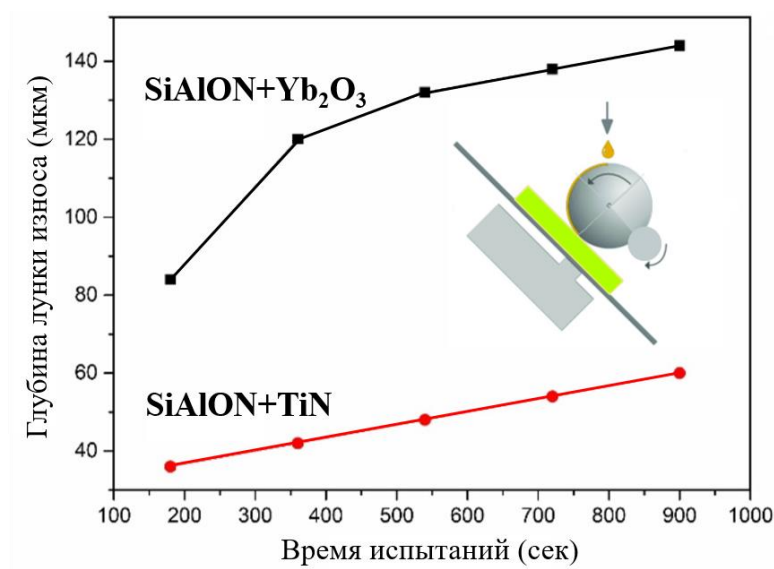


Рисунок 4.13 – Распределение химических элементов на поверхности изломов спеченных керамических материалов на основе SiAlON: а) – экспериментальная керамика SiAlON+TiN; б) – промышленная керамика зарубежного производства SiAlON+Yb₂O₃

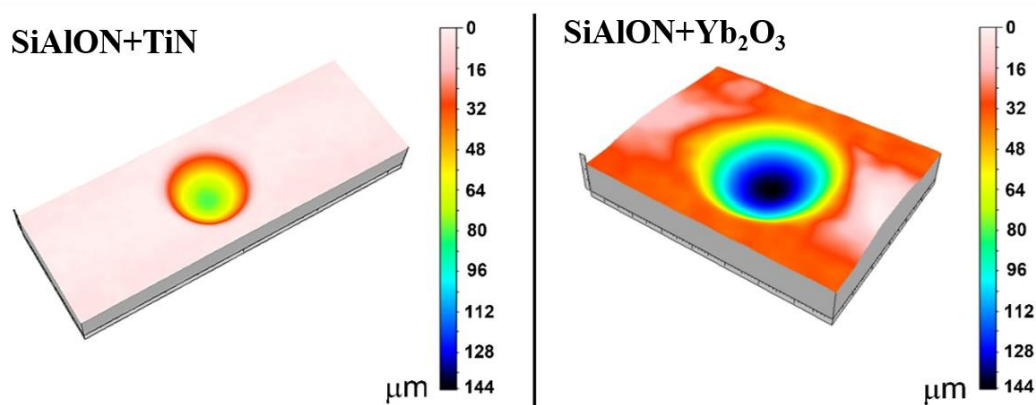
Видно, что в экспериментальной керамике SiAlON+TiN Ti-содержащая фаза достаточно равномерно распределена по объему материала после ИПС (Рисунок 4.13, а). Карты распределения элементов промышленной керамики SiAlON+Yb₂O₃ (Рисунок 4.13, б) демонстрируют, что Yb-содержащая фаза также однородно распределена в структуре материала. Можно предположить, что именно Yb₂O₃-стабилизирующая фаза, формирующаяся по границам зерен керамики, сдерживает их рост в процессе спекания и обеспечивает формирование мелкозернистой структуры в сравнении с экспериментальной керамикой. Дальнейшие работы по совершенствованию экспериментальной керамики SiAlON+TiN должны лежать в области обеспечения минимизации роста зерен в процессе ИПС.

Устойчивость к абразивному истиранию спеченных керамик SiAlON+TiN и SiAlON+Yb₂O₃ определялась на системе Calotest CSM Instruments при воздействии вращающегося с частотой 949 об/мин шарика из закаленной стали диаметром 20 мм с нагрузкой 0,2 Н на керамические образцы при подаче в зону контакта абразивной суспензии. На Рисунке 4.14, а приведены зависимости глубины изношенных лунок от времени воздействия контртела, а на Рисунке 4.14, б – трехмерные изображения лунок износа, сформировавшихся в ПС различных керамик после 900 сек. испытаний. Видно, что ПС экспериментального материала SiAlON+TiN значительно лучше сопротивляется абразивному истиранию в сравнении с SiAlON+Yb₂O₃. Образцы из экспериментальной керамики на всем протяжении испытаний демонстрировали существенно меньшие значения износа (более чем в 2 раза). Отмеченное является следствием более высокой твердости спеченной керамики на основе SiAlON+TiN.

Кроме того, зондовым методом были проведены сравнительные исследования электрических свойств спеченных керамик SiAlON+TiN и SiAlON+Yb₂O₃ на испытательном стенде Keithley Instruments, оснащенный источником тока и нановольтметром.



а)



б)

Рисунок 4.14 – Результаты испытаний на абразивное изнашивание экспериментальной керамики SiAlON+TiN и промышленной керамики зарубежного производства SiAlON+Yb₂O₃:

а) – зависимости глубины изношенных лунок от времени воздействия контртела; б) – трехмерные изображения лунок износа, сформировавшихся в поверхностном слое

Экспериментально установлено, что материал SiAlON+TiN имеет существенно меньшее значение удельного электрического сопротивления ($1,6 \times 10^{-4}$ Ом·м), в то время как для керамики SiAlON+Yb₂O₃ данный показатель составляет 1×10^{11} Ом·м. Значение электрического сопротивления SiAlON+TiN существенно ниже порога обрабатываемости материалов электроэрозионной обработкой и, следовательно, это открывает перспективы в ближайшем будущем применения к керамике на основе SiAlON новых, ранее не использовавшихся процессов формообразования.

4.3. Выбор рациональных конструкторско-геометрических параметров цельных концевых фрез и формообразование спеченных керамических заготовок алмазной многокоординатной заточкой

В дальнейшем керамические заготовки в форме дисков диаметром 80 мм и толщиной 12 мм, полученные ИПС порошковой композиции $80\%(90\alpha 10\beta) + 20\% \text{TiN}$, подвергались раскрою на четырехугольные заготовки-параллелепипеды на автоматическом отрезном станке STRUERS AXITOM-5, после которого на шлифовальном станке STUDER S20 осуществлялось формообразование керамических стержней.

Для изготовления из керамических стержней цельных керамических концевых фрез с требуемыми конструкторско-геометрическими параметрами производилась многоэтапная алмазная заточка на многокоординатном станке Helitronic Micro.

С учетом обсуждавшихся выше особенностей керамических материалов и интенсивных теплосиловых нагрузок, которые испытывают изготовленные из них концевые фрезы, при проектировании и изготовлении такого инструмента исходили из необходимости обеспечения ряда конструктивных особенностей: специальная форма передней поверхности с отрицательным передним углом для обеспечения более высокой прочности зубьев; увеличенный диаметр сердцевины для повышения прочности фрезы и уменьшения ее отжима в процессе резания; оптимизированная величина угла подъема спирали стружечной канавки для снижения составляющих силы резания и предотвращения вытягивания фрезы из патрона в процессе высокоскоростного резания заготовок из жаропрочных сплавов; формирование радиуса при вершине и тороидального участка производящей поверхности для повышения прочности режущей кромки.

Основным направлением при оптимизации конструкторско-геометрических параметров цельных концевых керамических фрез является повышение прочности режущей части. Поэтому для выбора рациональных параметров керамического

инструмента был проведен комплексный анализ и их моделирование (расчеты были выполнены автором диссертационной работы совместно с научной группой В.А. Гречишникова) [185].

Режущая кромка керамической фрезы представляет собой сложную пространственную линию, которую можно представить, как пересечение винтовой поверхности стружечной канавки и тороидальной производящей торцевой поверхности (Рисунок 4.15). Передняя поверхность цельной керамической фрезы формируется в радиальном сечении исходя из рекомендуемых отрицательных значений переднего угла, профиль которой с отрицательным передним углом γ описывается следующими зависимостями.

$$F_{pp1}(X) = b(\gamma) - \sqrt{2 \cdot a(\gamma) \cdot X - X^2 + R_{pp}^2 - a(\gamma)^2}; \quad (4.1)$$

$$F_{pp}(X, v) = \begin{pmatrix} X \cdot \cos(v) - \sin(v) \cdot \left(b(\gamma) - \sqrt{R_{pp}^2 - X^2 + 2 \cdot a(\gamma) \cdot X - a(\gamma)^2} \right) \\ \cos(v) \cdot \left(b - \sqrt{R_{pp}^2 - X^2 + 2 \cdot a(\gamma) \cdot X - a(\gamma)^2} \right) + X \cdot \sin(v) \\ \left(\frac{T}{2\pi} \right) \cdot v \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

где $a(\gamma)$, $b(\gamma)$ – характеристики профиля передней поверхности на плоскости XOY.

Количественная оценка переднего угла в нормальных сечениях γ_N осуществлялась по формуле нахождения косинуса угла между векторами, касательным к передней поверхности τ_1 и нормальным вектором к тороидальной поверхности в контролируемой точке на режущей точке τ_2 [185].

$$\gamma_N = \arccos \left(\frac{\vec{\tau}_1 \cdot \vec{\tau}_2}{|\vec{\tau}_1| \cdot |\vec{\tau}_2|} \right) \quad (4.3)$$

$$\tau_1 = \begin{pmatrix} RK_X(X_N) - V_X(v_r) \\ RK_Y(X_N) - V_Y(v_r) \\ RK_Z(X_N) - V_Z(v_r) \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

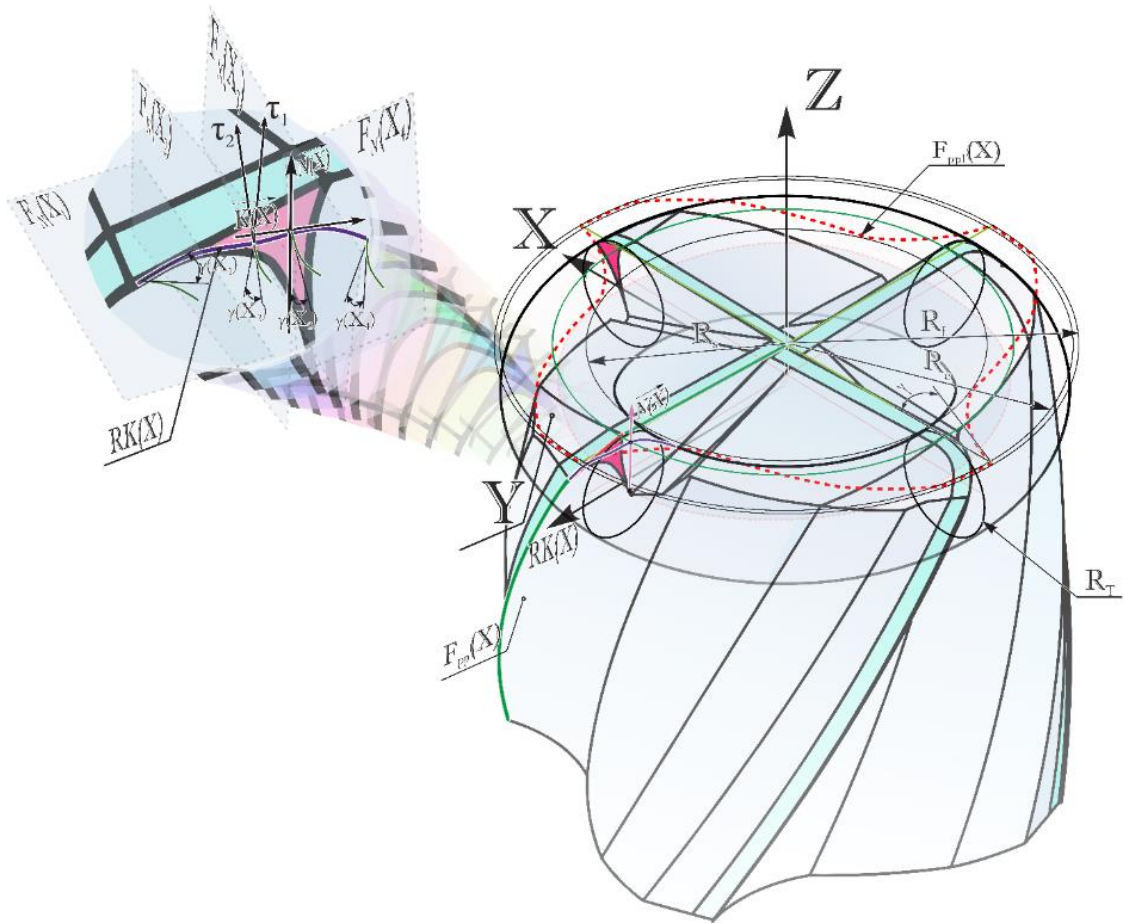


Рисунок 4.15 – Визуальное представление параметров геометрии цельной концевой керамической фрезы

$$\tau_2 = \begin{pmatrix} RK_X(X_N) - Vc_X(v_r) \\ RK_Y(X_N) - Vc_Y(v_r) \\ RK_Z(X_N) \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

где, $Vc_X(v_r), Vc_Y(v_r)$ равны:

$$Vc_X = \frac{R_f \cdot RK_X(X_N)}{\sqrt{(RK_X(X_N))^2 + (RK_Y(X_N))^2}} \quad (4.6)$$

$$Vc_Y = \frac{R_f \cdot RK_Y(X_N)}{\sqrt{(RK_X(X_N))^2 + (RK_Y(X_N))^2}}$$

Определение рациональных значений нормального переднего угла производилось исходя из оценки прочности режущей части при моделировании методом конечных элементов в среде ANSYS Workbench. На Рисунке 4.16 представлена конечно-элементная модель керамической концевой фрезы и

зависимость нормального переднего угла на тороидальном участке режущей части фрезы от расстояния переходного участка (в плоскости XOY).

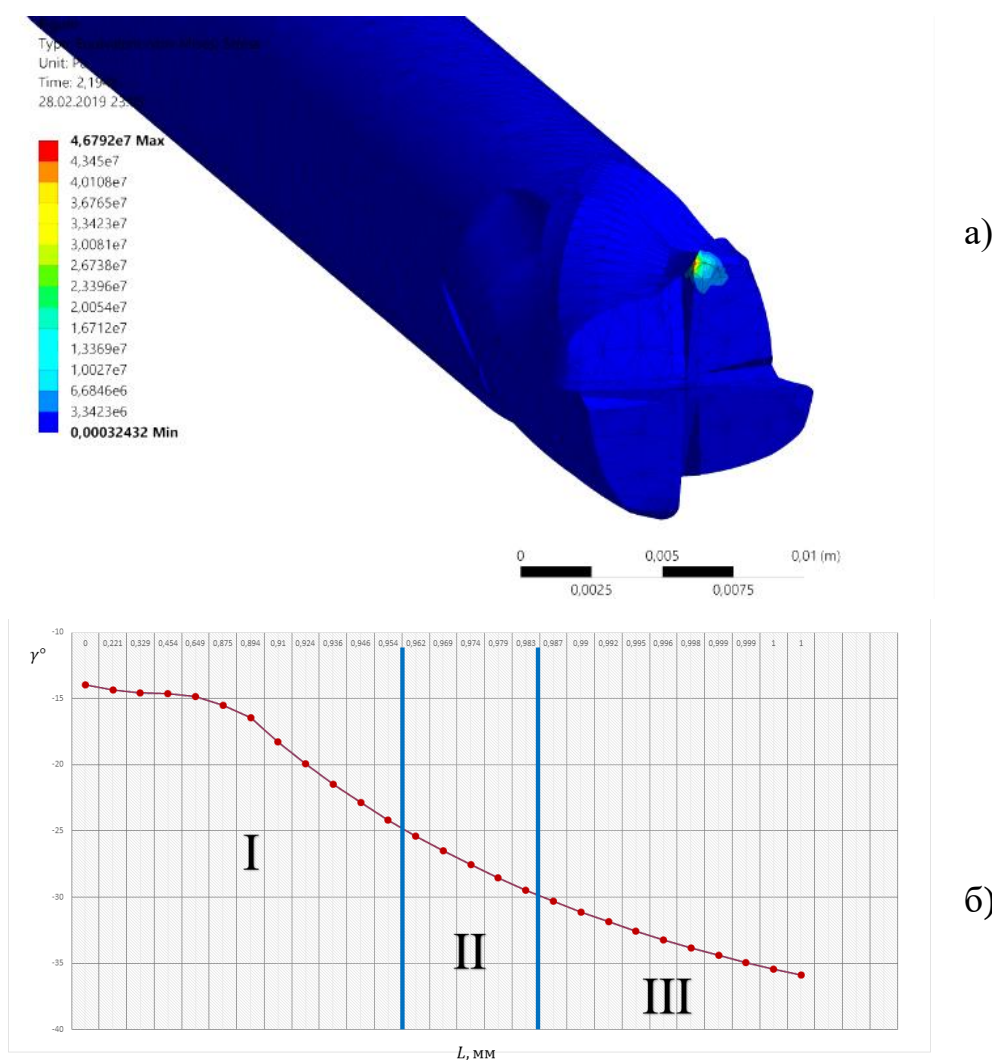


Рисунок 4.16 – Моделирование в среде ANSYS конструкции концевой керамической фрезы для оценки прочности ее режущей части: а) – конечно-элементная модель фрезы; б) – зависимость нормального переднего угла на тороидальном участке режущей части фрезы от расстояния переходного участка в плоскости XOY

Выполненными расчетами выявлено, что при изменении переднего угла значительно изменяются нагрузки на режущую часть, от которых зависит вероятность хрупкого разрушения. В результате проведения моделирования было нагружено 3 конструкции из каждого диапазона передних углов, представленных на Рисунке 4.16. Выявлено, что конструкция фрезы с передним углом в I диапазоне (от -14° до -24°) наименее подвержены хрупкому разрушению при нагружении. Во

II диапазоне передних углов (от -24° до -30°) вероятность разрушения увеличивается, в III диапазоне – фреза имеет повышенную вероятность скалывания в связи со значительным увеличением силы резания.

Результаты конечно-элементного моделирования и анализа геометрических параметров режущей части показали необходимость создания специализированной подточки на тороидальном участке режущей части. На Рисунке 4.17 представлен профиль радиального сечения (Рисунок 4.17, а) и вид торца (Рисунок 4.17, б) цельной концевой керамической фрезы с рациональными геометрическими параметрами, установленными по результатам выполненных расчетов и моделирования.

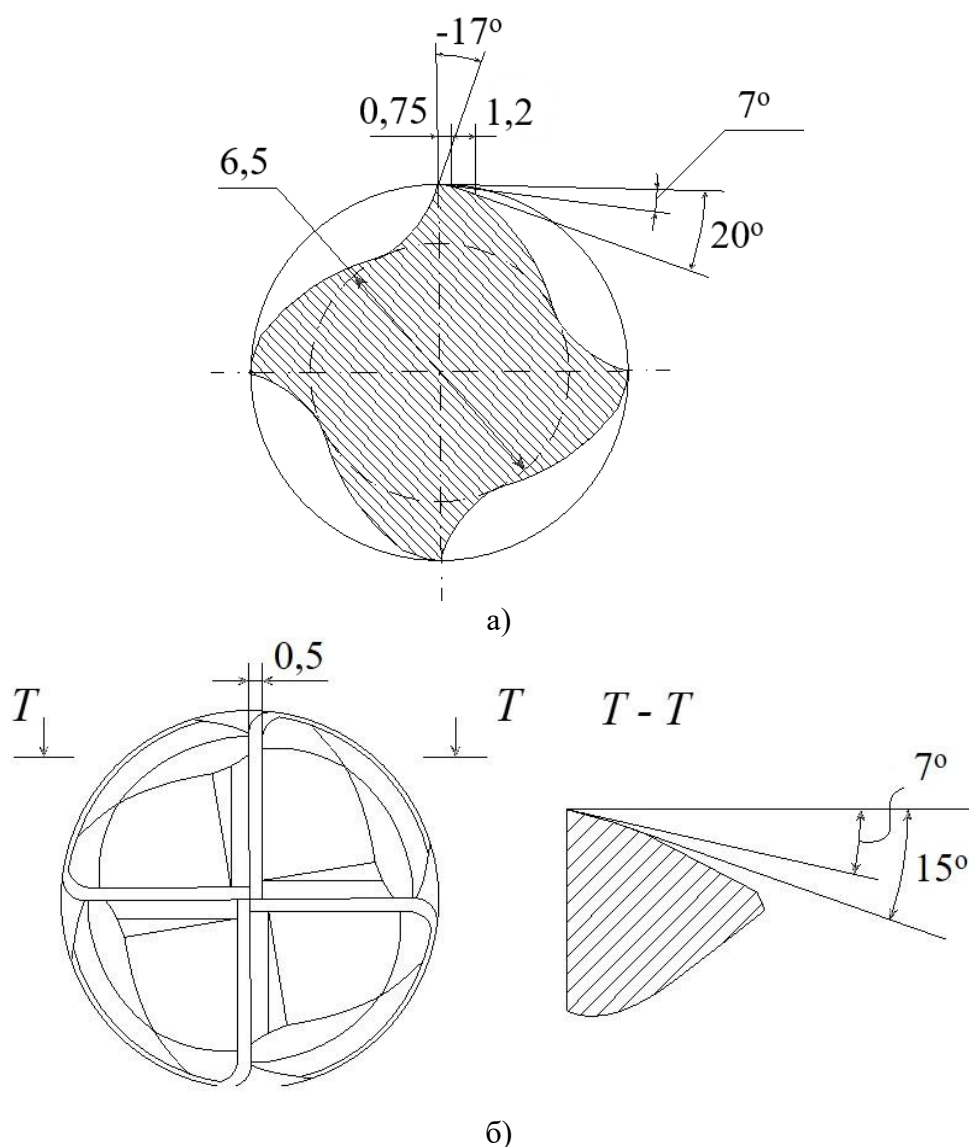


Рисунок 4.17 – Геометрические параметры цельной концевой фрезы: а) – профиль радиального сечения; б) – вид торца фрезы

Передний угол имеет отрицательную геометрию в радиальном сечении, что позволяет конструктивно повысить прочность зуба фрезы. Задняя поверхность инструмента состоит из двух участков с различными задними углами – 7 и 20°. На передней поверхности при вершине зубьев имеется специализированная подточка, обеспечивающая постоянство нормального переднего угла -17°. Форма подточки подобрана таким образом, чтобы равномерно распределять силовую нагрузку вдоль передней поверхности. Торцевые зубья имеют так же двойную заднюю поверхность с различными задними углами – 7 и 15°.

В Таблице 4.1 представлены сведения об основных геометрических параметрах режущей части концевых керамических фрез, которые были выбраны при изготовлении инструмента в рамках настоящей работы.

Таблица 4.1 – Основные конструкторско-геометрические параметры режущей части концевых керамических фрез

№ п/п	Геометрический параметр	Значение параметра
1	Длина рабочей части, мм	9,0
2	Общая длина фрезы	48...65
3	Число зубьев, шт	4
4	Радиус при вершине, мм	0,98
5	Передний угол, град	-17
6	Главный задний угол, град	7
7	Вспомогательный задний угол на торцевом участке, град	15
8	Угол подъема винтовой стружечной канавки, град	30
9	Ширина ленточки, мм	0,6
10	Диаметр фрезы, мм	10,0
11	Диаметр сердцевины, мм	6,5

Для изготовления цельных концевых керамических фрез с выбранными параметрами был разработан технологический процесс многоэтапной алмазной заточки на станке типа Walter Helitronic Micro, маршрутная карта которого приведена в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Маршрутная карта многоэтапной заточки режущей части керамических фрез

№ п/п	Технологический переход	Тип круга	Скорость резания, м/с	Подача, мм/мин
1	Вышлифовка винтовых стружечных канавок	1V1	17	10
2	Шлифование передней поверхности на торце – подточки на переходном радиусном участке		20	7
3	Шлифование передней поверхности на переходном радиусном участке	12V9	22	50
4	Шлифование вспомогательной задней поверхности на торце		25	30
5	Шлифование главной задней поверхности на торце		25	35
6	Шлифование вспомогательной задней поверхности на периферии		25	30
7	Шлифование вспомогательной задней поверхности на переходном радиусном участке		25	30
8	Шлифование главной задней поверхности на переходном радиусном участке		28	40
9	Шлифование главной задней поверхности на периферии		25	20

На Рисунке 4.18 представлено положение рабочих органов многокоординатного станка в процессе алмазной заточки различных участков режущей части, а схемы основных формообразующих операций (этапов) коническими и чашечно-коническими алмазными шлифовальными кругами зернистостью 80/63 на органической связке – на Рисунках 4.19-4.21.

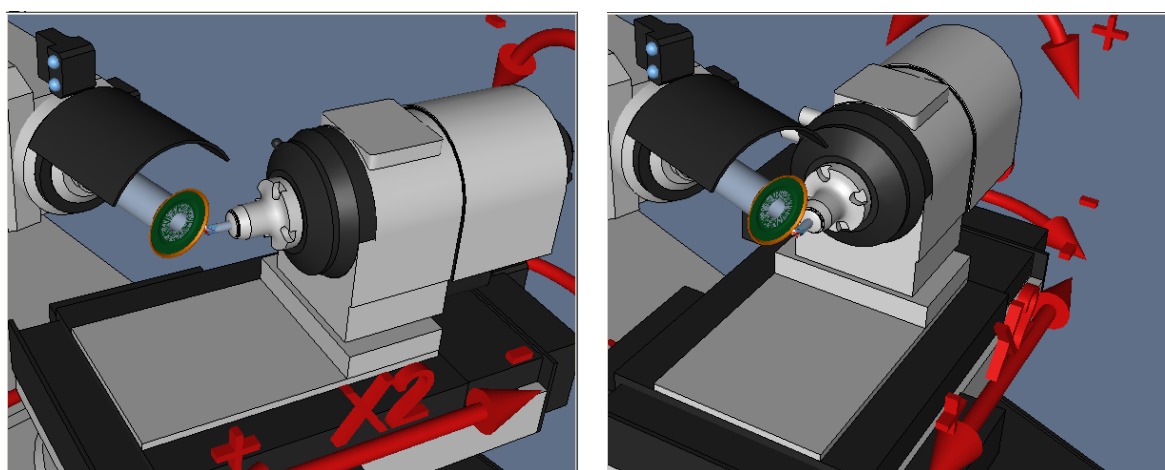


Рисунок 4.18 – Положение рабочих органов многокоординатного станка в процессе алмазной заточки различных участков режущей части керамических фрез

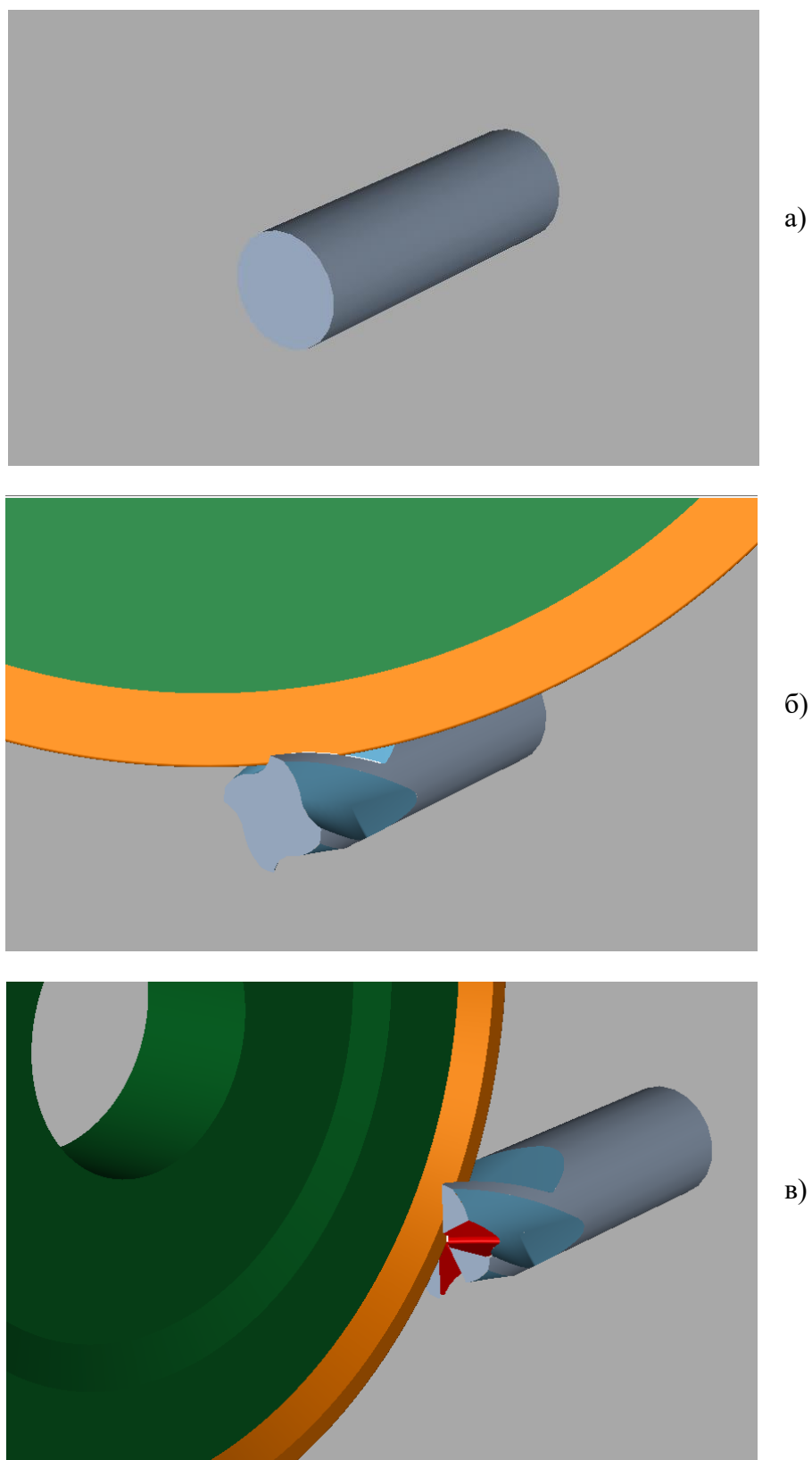


Рисунок 4.19 – Этапы алмазной заточки концевых керамических фрез: а) – спеченная заготовка-
 стержень; б) – вышлифовка винтовых стружечных канавок; в) – шлифование передней
 поверхности

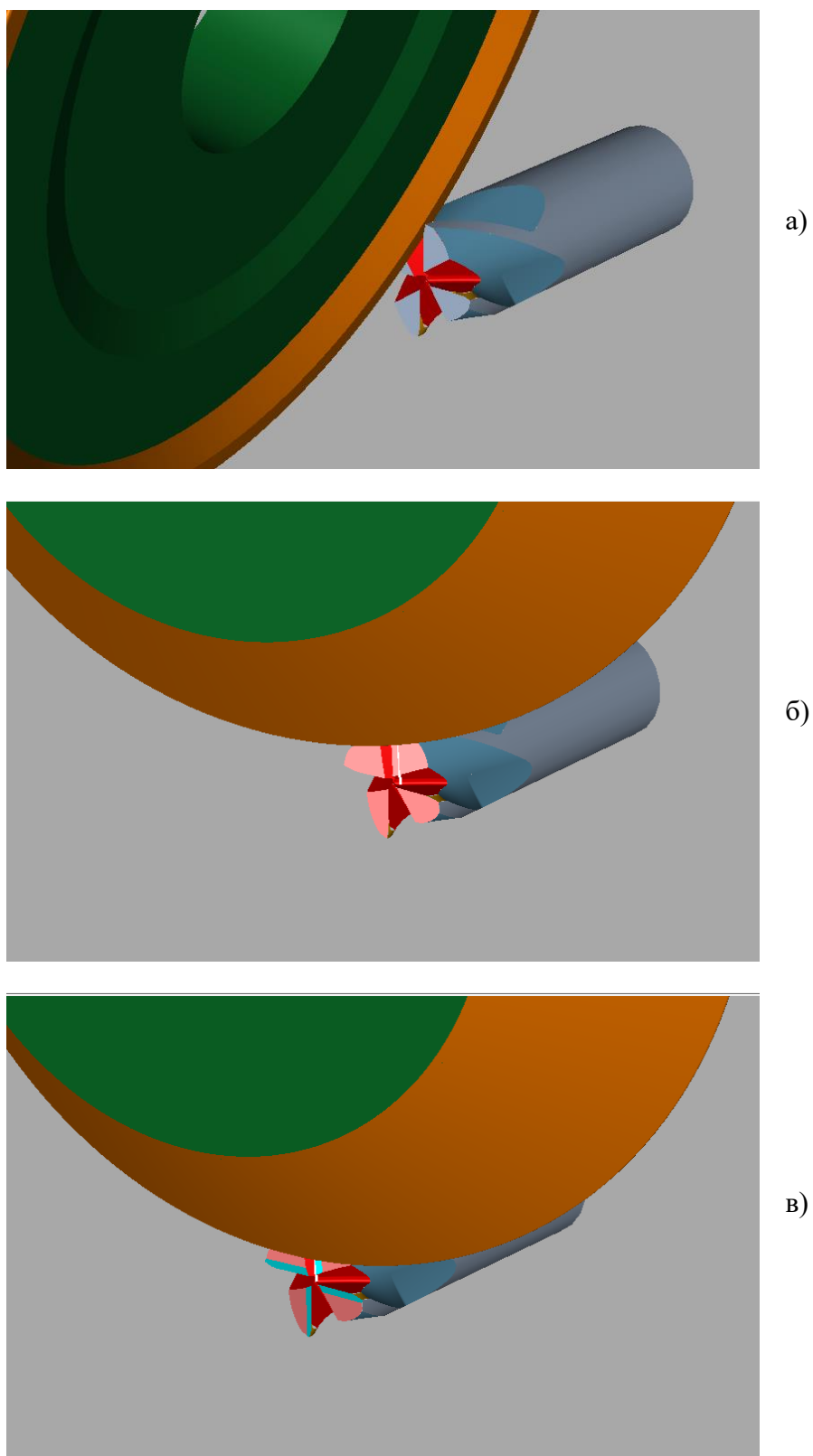


Рисунок 4.20 – Этапы алмазной заточки концевых керамических фрез: а) и б) – шлифование вспомогательной задней поверхности на торце; в) – шлифование главной задней поверхности на торце

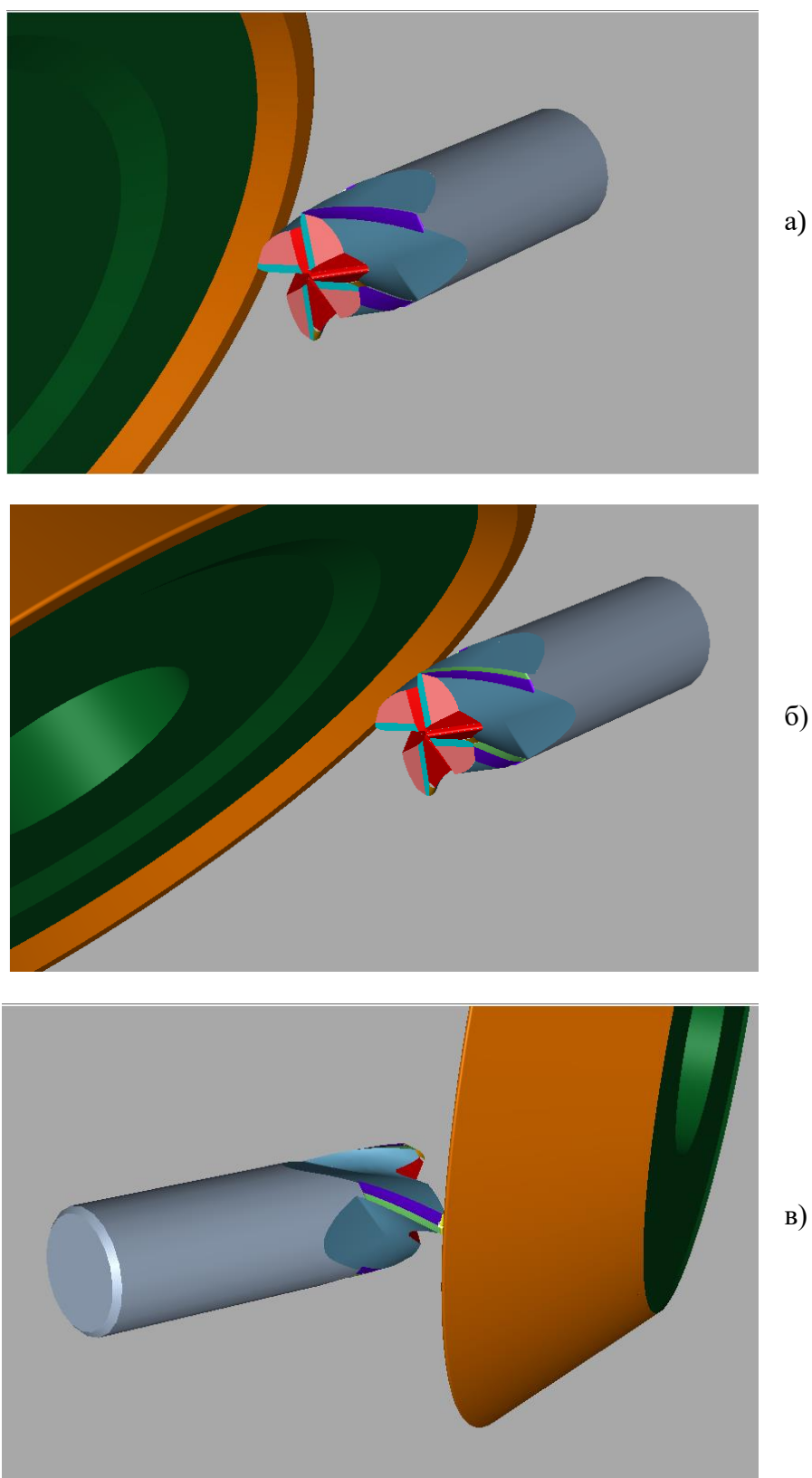
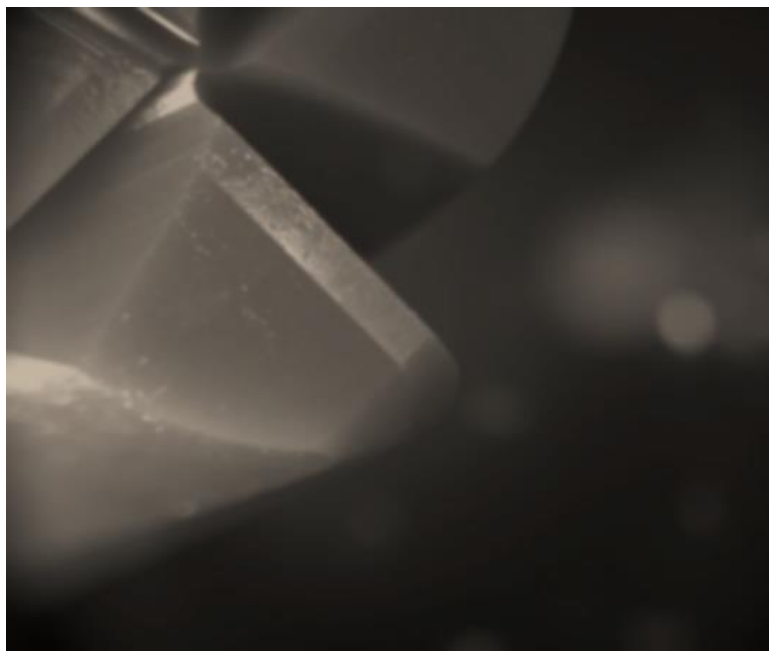


Рисунок 4.21 – Этапы алмазной заточки концевых керамических фрез: а) и б) – шлифование вспомогательной задней поверхности на периферии; в) – шлифование главной задней поверхности на периферии и вспомогательной задней поверхности на переходном радиусном участке

На Рисунке 4.22 представлены общий вид и режущая часть образцов цельных концевых керамических фрез, изготовленных из керамики SiAlON+TiN по разработанной опытно-промышленной технологии с использованием материально-технической базы ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».



а)



б)

Рисунок 4.22 – Образцы цельных концевых керамических фрез, изготовленных по разработанной опытно-промышленной технологии: а) – общий вид; б) – режущая часть

4.4. Выбор износостойких покрытий для цельных концевых керамических фрез и комплексная модификация их поверхностного слоя

Изготовленные образцы цельных концевых керамических фрез из материала SiAlON+TiN были подвергнуты комплексной модификации поверхностного слоя в соответствии с принципами, изложенными в главе 3, а в последствии сопоставлялись в процессе лабораторных испытаний с характеристиками, достигаемыми применением зарубежного аналога из керамики SiAlON+Yb₂O₃.

С целью выбора рациональных составов износостойких покрытий для нанесения на концевые керамические фрезы, предназначенные для обработки жаропрочных никелевых сплавов, на тестовые образцы из керамики SiAlON+TiN наносились различные варианты покрытий – нитридные (TiAl)N, (Cr,Al,Si)N и алмазоподобное (DLC) покрытия общей толщиной ~3,7 мкм. Выбор покрытий осуществлялся на основе оценки комплекса характеристик – нанотвердости и модуля упругости, коэффициента трения и интенсивности налипания никелевого сплава на рабочие поверхности при контактировании в условиях резания.

Как уже было упомянуто, толщина DLC-покрытий ограничена максимальным значением 2,0 мкм, а при ее увеличении значительно повышается уровень напряжений в формируемых пленках и снижается прочность адгезионной связи с подложкой [186]. Поэтому их нанесение на образцы осуществляли на предварительно сформированный подслоя (CrAlSi)N толщиной 1,7-1,8 мкм. Покрытие (CrAlSi)N по данным экспериментальных исследований, проведенных в настоящей диссертационной работе, продемонстрировали высокую эффективность в качестве подслоя для наружного DLC-покрытия [186, 187].

Для трех вариантов износостойких покрытий оценивались нанотвердость по шкале Мартенса посредством наноиндентирования алмазным индентором на нанотвердомере CSEM instruments по методу Оливера и Фарра [188]. Продолжительность периода «нагрузка-разгрузка» составила 50 секунд, а

прикладываемая нагрузка составила 1,0 мН. В Таблице 4.3 приведены результаты выполненной оценки нанотвердости (Н) для 3 вариантов покрытий.

Таблица 4.3 – Характеристики нитридных и алмазоподобного покрытий, сформированных на керамических подложках

№	Керамическая подложка	Состав покрытия	Нанотвердость Н (ГПа)	Модуль упругости Е (ГПа)	Индекс пластичности Н/Е
1	SiAlON+TiN	(TiAl)N	36	376	0,09
2		(CrAlSi)N	27	339	0,08
3		(CrAlSi)N/DLC	29	260	0,11

Как следует из приведенных данных, максимальную нанотвердость (36 ГПа) имеют образцы с покрытием (TiAl)N. Заметно меньшие значения нанотвердости были зафиксированы для образцов с покрытиями (CrAlSi)N/DLC – 29 ГПа и (CrAlSi)N – 27 ГПа. То есть все исследуемые покрытия повышают исходную твердость керамики SiAlON+TiN (твердость спеченных образцов составляет ~16 ГПа). При этом характер теплосиловых нагрузок, действующих на режущую часть концевых фрез в процессе резания, требует от покрытий не только высокой нанотвердости, но и способности сопротивляться возможным деформациям ПС. Анализ кривых наноиндентирования различных покрытий посредством программного обеспечения CSEM дал возможность определить их модули упругости (Е). По соотношению (Н/Е) определялся индекс пластичности, по которому можно приближенно судить о вязкости разрушения покрытия и его способности сопротивляться возможным деформации и разрушению в процессе резания [189]. Как видно из представленных данных (Таблица 4.3), наилучшее сочетание свойств (Н/Е) имеет керамический образец с покрытием (CrAlSi)N/DLC.

На Рисунке 4.23 приведены результаты изменения коэффициента трения (КТ) в зависимости от пути трения керамических образцов с различными покрытиями на трибометре ТНТ Anton Paar TriTec по методике «шар-диск» при вращении

керамического диска относительно неподвижного шарика диаметром 6 мм из Al_2O_3 при нагрузке 1 Н, скорости скольжения 10 см/с и двух температурных режимах – при комнатной температуре (20°C) и нагреве (800°C).

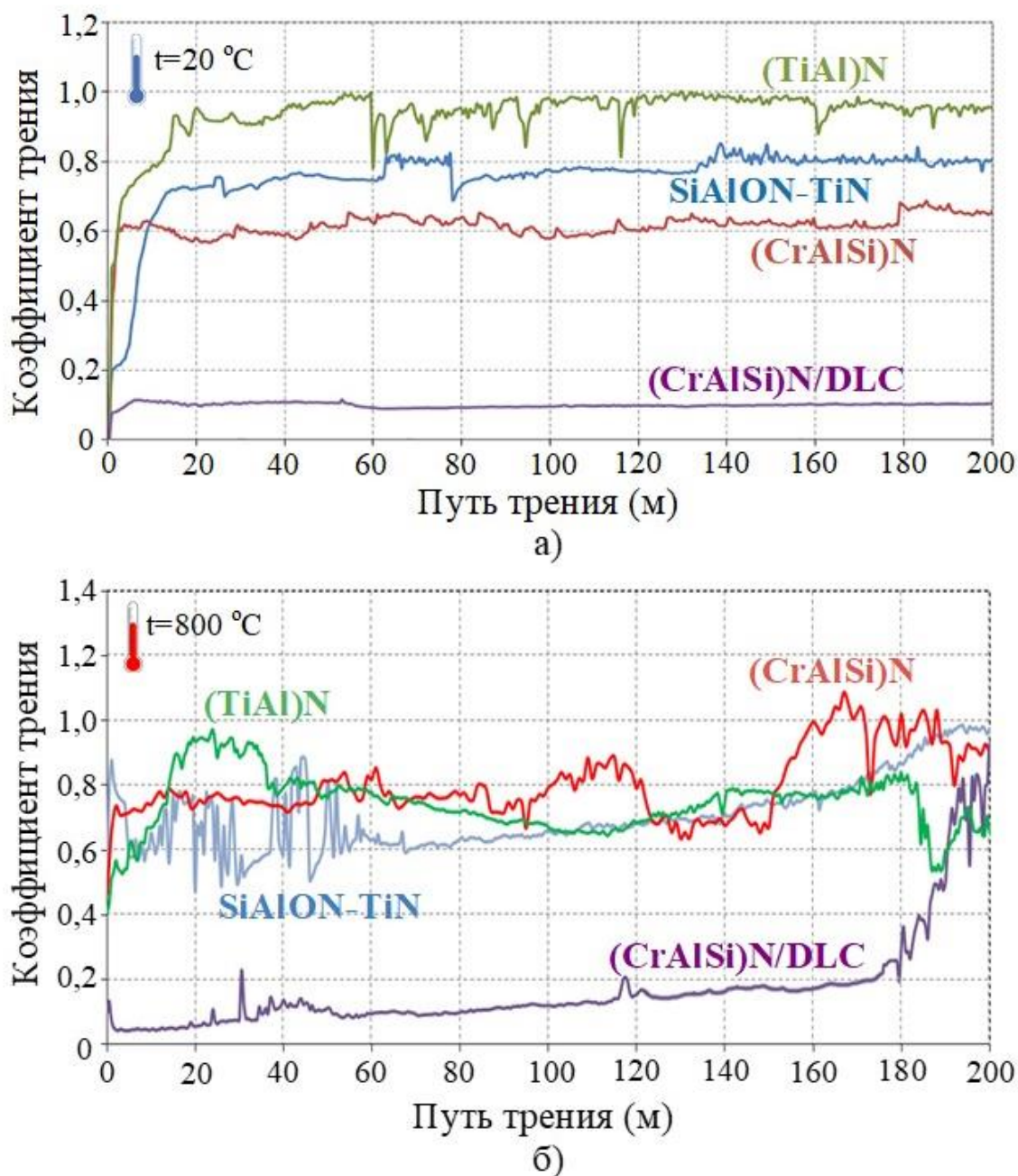


Рисунок 4.23 – Результаты трибологических испытаний керамических образцов из материала SiAlON+TiN с различными покрытиями: а) – в условиях комнатной температуры; б) – при высокотемпературном нагреве

В случае результатов, полученных при комнатной температуре (Рисунок 4.23, а), наблюдается традиционный характер изменения КТ керамических образцов с течением времени: в самом начале испытаний происходит приработка

керамики и контртела, после этого КТ быстро увеличивается и сохраняет свое значение на протяжении всей дистанции испытаний. Обращает на себя внимание тот факт, что покрытие (TiAl)N не только не снижает, но даже заметно увеличивает КТ исходных керамических образцов (с 0,8 до 1,0). Покрытие (CrAlSi)N снижает КТ до 0,6. Для покрытия (CrAlSi)N/DLC на протяжении всей дистанции испытаний наблюдается минимальное значение КТ (на уровне 0,1). Такие низкие значения КТ при комнатной температуре ожидаемы для покрытий алмазоподобного класса.

В связи с тем, что керамический инструмент эксплуатируется при повышенных тепловых нагрузках на режущую часть, особый интерес представляют результаты трибологических испытаний при высокотемпературном нагреве. Как было установлено в настоящей работе, характер поведения тонких покрытий при трибологических испытаниях при нагреве хорошо коррелируют с их поведением при реальной эксплуатации в процессе резания [190, 191]. Представленные на Рисунке 4.23, б кривые развития КТ при нагреве с течением времени существенно отличаются от данных, полученных при комнатной температуре. Образцы из SiAlON+TiN без покрытия показывают нестабильные результаты – на протяжении 60 м дистанции КТ изменяется скачкообразно, далее стабилизируется на уровне 0,7 и постепенно увеличивается до 1,0 к концу испытаний. Покрытие (CrAlSi)N на протяжении всей дистанции трения имеет неустойчивый характер и принимает значения от 0,6 до 1,1. Обращает на себя внимание тот факт, что покрытие (TiAl)N в условиях нагрева имеет меньшие значения КТ в сравнении с испытаниями без нагрева: уровень КТ на начальном этапе увеличивается до 1,0, а затем имеет значения на уровне 0,6-0,8. Отмеченная закономерность может быть связана с тем, что пленки (Ti,Al)N при повышенных температурах образуют оксидные соединения, обладающие термической стабильностью и хорошей смазывающей способностью в зоне трибоконтакта [192, 193]. Многообещающие результаты показали покрытия (CrAlSi)N/DLC – на протяжении большей части дистанции КТ очень медленно возрастает с 0,1 до 0,2 и лишь после 180 м значительно возрастает до уровня других исследуемых покрытий.

Отмеченное выше значительное снижение интенсивности фрикционного взаимодействия, происходящее в результате нанесения покрытия (CrAlSi)N/DLC, влияет на адгезионное схватывание керамического материала и жаропрочного никелевого сплава в процессе резания. Иллюстрацией отмеченного являются представленные на Рисунке 4.24 экспериментальные данные об интенсивности налипания частиц никеля на контактные поверхности керамических фрез с различными вариантами покрытий в процессе резания сплава ХН45МВТЮБР (резание осуществлялось в течение 4 мин. при скорости 376,8 м/мин). На представленных контрастных изображениях, полученных посредством EDX-анализа, видно, что покрытия (CrAlSi)N и (TiAl)N незначительно влияют на количество налипших частиц, в то время как для покрытия (CrAlSi)N/DLC можно наблюдать снижение адгезионного схватывания на контактных поверхностях.

На основе полученных экспериментальных данных выбор был сделан в пользу перспективного покрытия (CrAlSi)N/DLC, которое в последствии использовалось для комплексных лабораторных и производственных испытаний концевых керамических фрез. Для нанесения указанного покрытия была использована технологическая установка, подробно описанная в главе 3. Нанесение покрытия предусматривало вакуумно-дуговое осаждение подслоя (CrAlSi)N и плазмохимическое газофазное осаждение DLC слоя посредством химической реакции и разложения компонентов газовой смеси C_2H_2 , N_2 , Ar и $Si(CH_3)_4$.

На Рисунке 4.25 представлено ТЕМ-изображение покрытия (CrAlSi)N/DLC, полученное на просвечивающей микроскопе JEM-2100F, дающее представление о структуре формируемого покрытия. Видно, что подслоя (CrAlSi)N имеет характерную столбчатую, а слой DLC – аморфную структуру. Общая толщина покрытий составляет ~3,7 мкм, в том числе 1,8 мкм – толщина промежуточного слоя (CrAlSi)N и 1,9 мкм – толщина наружного DLC-слоя.

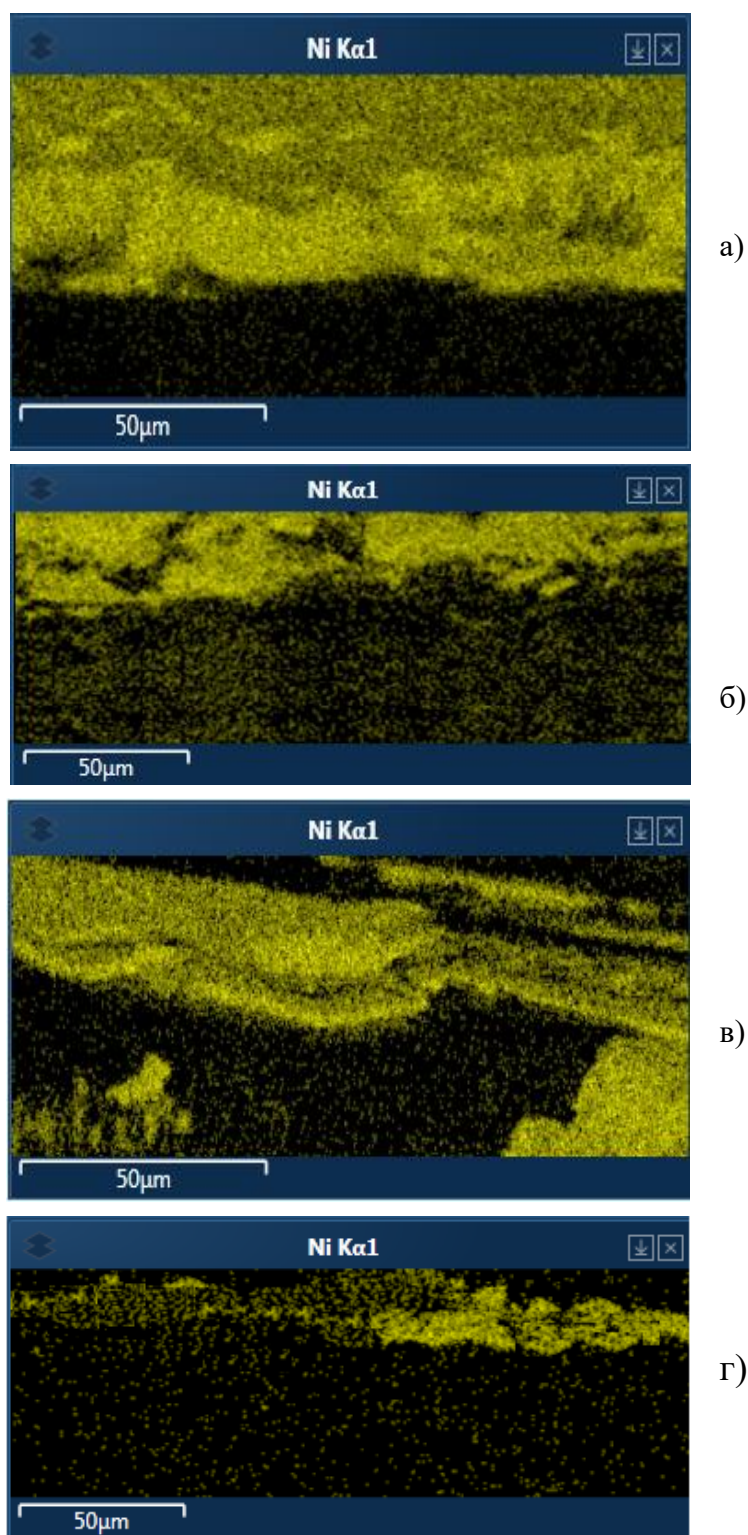


Рисунок 4.24 – Контрастные SEM-изображения распределения никеля (частицы желтого цвета) на контактных поверхностях концевых фрез из керамики на базе SiAlON+TiN с различными покрытиями после 4 мин эксплуатации: а) – без покрытия; б) – с покрытием (TiAl)N; в) – с покрытием (CrAlSi)N; г) – с покрытием (CrAlSi)N/DLC

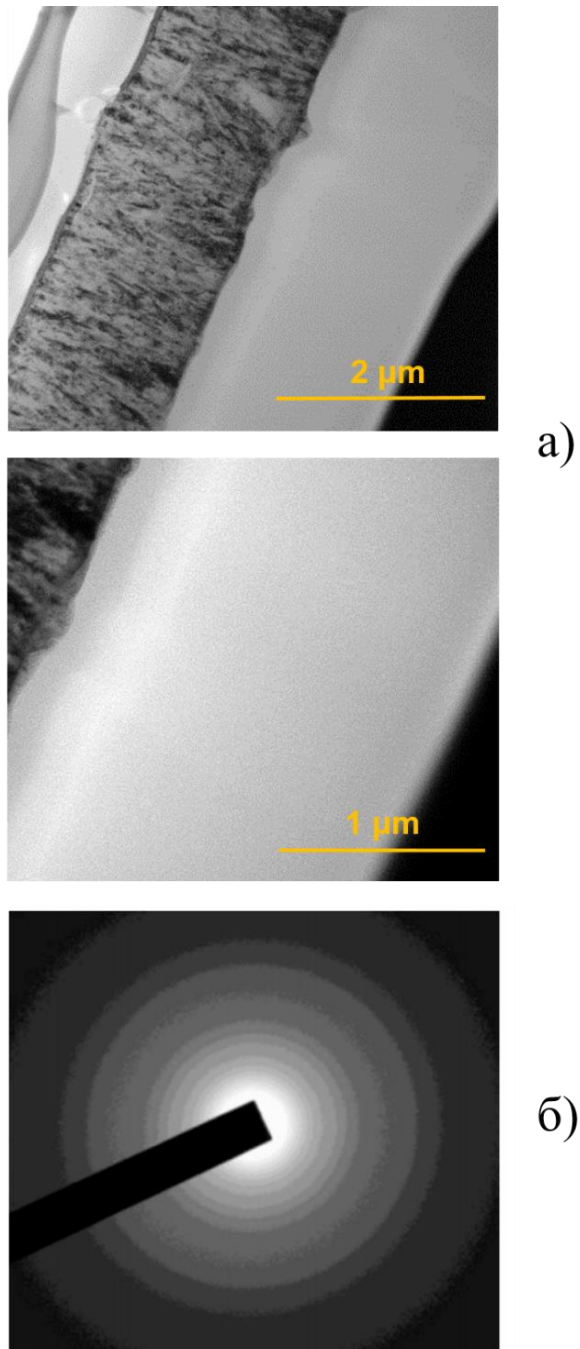


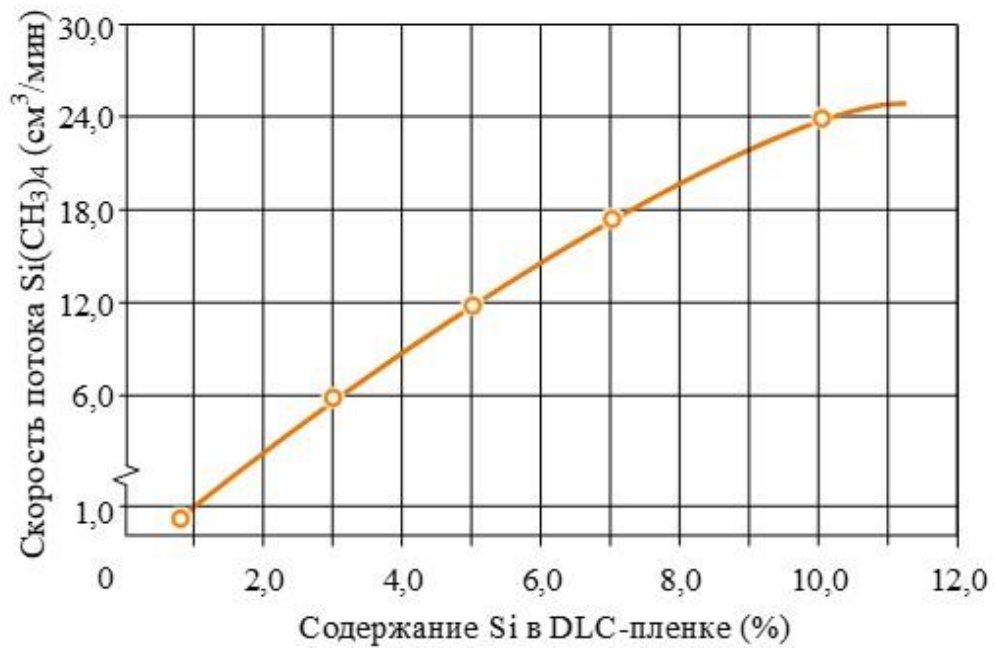
Рисунок 4.25 – ТЕМ-изображение двухслойного покрытия (CrAlSi)N/DLC: а) – структура двухслойного покрытия и DLC-слоя; б) – дифракционная картина покрытия

Как было показано в главе 3, покрытие (CrAlSi)N/DLC значительно снижает интенсивность изнашивания круглых СМКП из материала SiAlON, которыми оснащаются токарные резцы, при обработке жаропрочных сплавов ХН45МВТЮБР. В частности, высокая эффективность покрытия (CrAlSi)N/DLC была экспериментально подтверждена при скорости резания 280 м/мин, но концевые керамические фрезы ориентированы на применение в существенно более

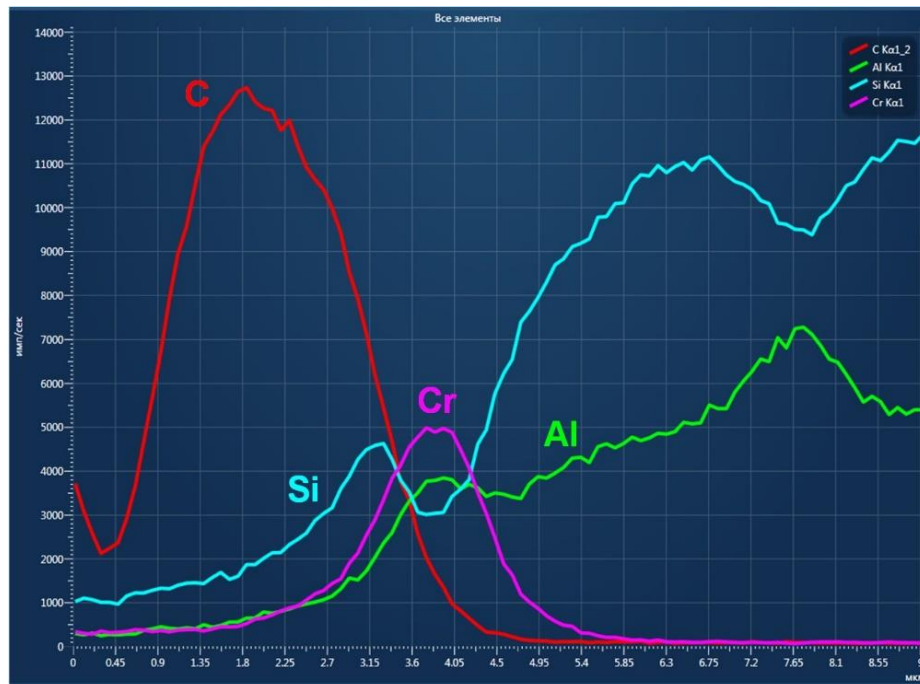
высоком скоростном режиме. Как известно DLC-покрытия имеют сравнительно невысокую термостойкость, а при больших термических нагрузках достаточно быстро теряют свои свойства. В подобных условиях подслоя (CrAlSi)N должен оказать некоторое влияние на замедление протекания трибохимических реакций на контактных поверхностях фрез, но наружный DLC-слой быстро потеряет функциональные свойства. Для стабилизации трибологических свойств DLC в условиях высокотемпературного воздействия авторитетными исследовательскими группами используются различные технологические подходы, связанные с легированием покрытий различными металлами, а также металлоидами, в частности кремнием [187, 194–196].

С учетом того, что резервы дополнительного повышения износостойкости используемых в рамках настоящей работы гидрогенизированных DLC-покрытий (типа a-C:H) при высокоскоростной обработке никелевых сплавов могут быть обеспечены введением Si в их состав, в настоящей работе были выполнены исследования по оценке влияния содержания Si в наружном слое покрытия (CrAlSi)N/DLC. Содержание Si варьировалось посредством изменения скорости потока реакционного газа $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$, который подавался в рабочую вакуумную камеру через многоканальную систему газонапуска при осаждении DLC-слоя.

На Рисунке 4.26, а представлена зависимость содержания Si в DLC-слое от скорости потока $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$; значения скоростей потоков других компонентов газовой смеси C_2H_2 , Ar и N_2 оставались неизменными и составляли 232, 156 и 30 $\text{см}^3/\text{мин}$ соответственно. Видно, что зависимость имеет линейный характер и содержание Si (об.%) монотонно увеличивается с увеличением скорости потока. Данные о количественном элементном составе образцов с покрытиями (CrAlSi)N/DLC-Si, внешний слой которых формировался при различных значениях скорости потока $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$, были получены методом энергодисперсионной спектроскопии (EDX-анализа). На Рисунке 4.26, б приведен пример, иллюстрирующий распределение элементов, в том числе Si, по сечению тонкого ПС одного из вариантов керамических образцов из SiAlON+TiN с покрытиями (CrAlSi)N/DLC-Si.



а)



б)

Рисунок 4.26 – Содержание Si в DLC-пленке, сформированной на нитридном подслое (CrAlSi)N: а) – зависимость содержания Si от скорости потока Si(CH₃)₄; б) – распределение элементов по сечению двухслойного покрытия

В Таблице 4.4 приведены результаты выполненной оценки нанотвердости и модуля упругости для керамических образцов из SiAlON+TiN с покрытиями (CrAlSi)N/DLC с различным содержанием Si в наружном слое.

Таблица 4.4 – Характеристики покрытий (CrAlSi)N/DLC с различным содержанием Si в наружном слое, сформированных на керамических подложках

№	Керамическая подложка	Содержание Si в DLC слое (об.%)	Нанотвердость Н (ГПа)	Модуль упругости Е (ГПа)	Индекс пластичности Н/Е
1	SiAlON+TiN с покрытием (CrAlSi)N/DLC	0,8	29	260	0,11
2		3,0	26	211	0,12
3		5,0	25	198	0,12
4		7,0	22	190	0,11
5		10,0	18	160	0,11

Из представленных экспериментальных видно, что содержание Si в DLC-слое заметно влияет на нанотвердость и модуль упругости (CrAlSi)N/DLC-Si – по мере увеличения Si, уменьшается микротвердость Н и модуль упругости Е. Так, при содержании Si=10 об.% в пленке ее твердость приближается к твердости исходной керамики SiAlON+TiN.

Представляют интерес результаты оценки влияния содержания Si в DLC-Si слое на коэффициент трения (КТ) и его изменение с увеличением пути трения при различном температурном воздействии (Рисунок 4.27). При комнатной температуре (Рисунок 4.27, а) КТ образцов без покрытия с течением времени достаточно быстро увеличивается, в то время как антифрикционные DLC-Si пленки в течении всего цикла испытаний демонстрируют пониженные значения КТ. В частности, для образца с минимальным содержанием Si, КТ неизменно был на уровне 0,1. С увеличением содержания Si в DLC-Si слое, КТ керамических образцов увеличивается, а истирание ПС носит более интенсивный характер. ПС образцов без покрытия в условиях нагрева показывает нестабильный характер (Рисунок 4.27, б) – КТ изменяется скачкообразно и достигает значения более 0,9 к концу испытаний. DLC-Si пленки сильно меняют условия фрикционного взаимодействия при нагреве – на протяжении достаточно длительного времени КТ сохраняется на более низком уровне и варьируется в пределах 0,09...0,3 (в

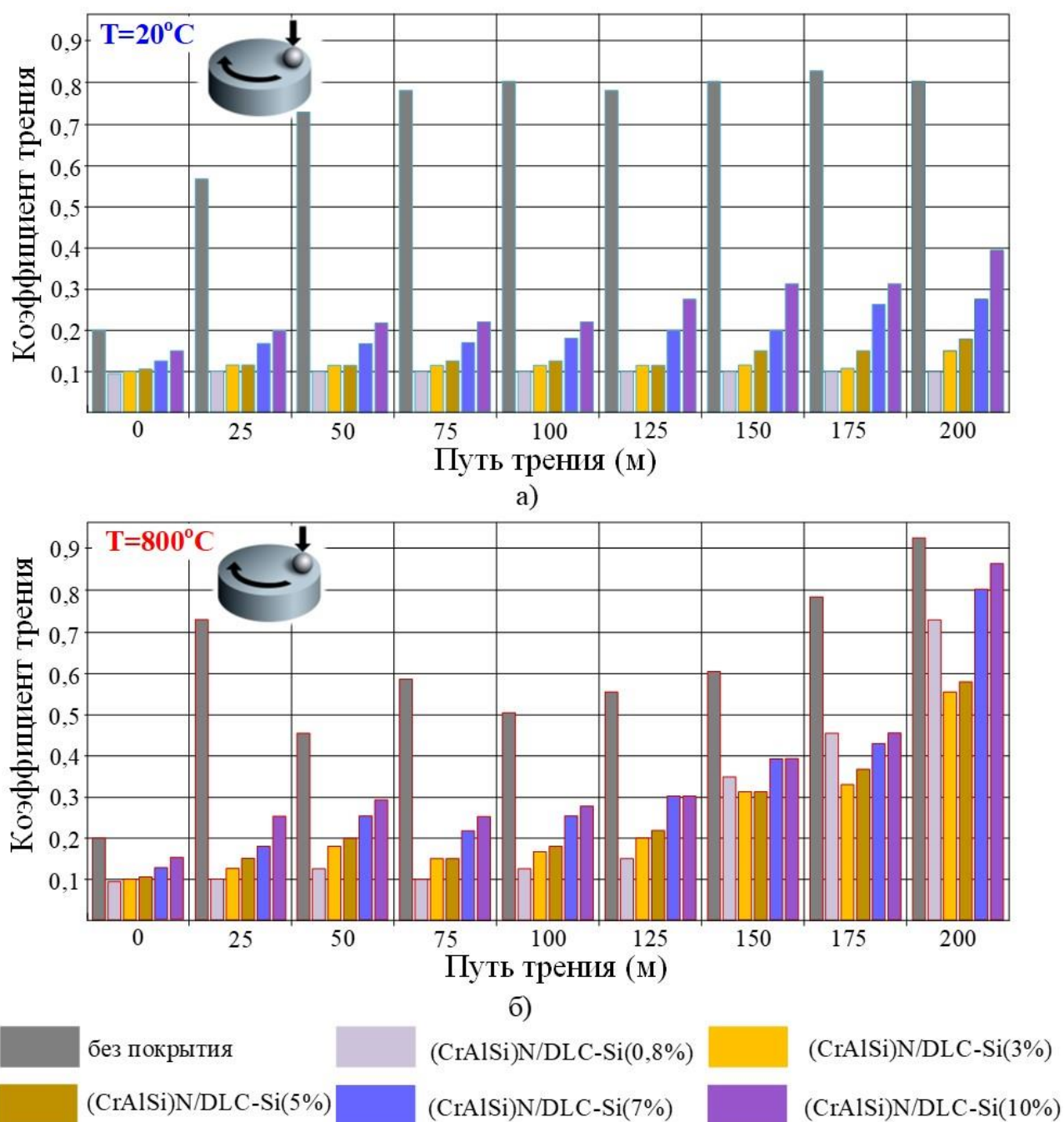


Рисунок 4.27 – Результаты трибологических испытаний керамических образцов из материала SiAlON+TiN с покрытиями (CrAlSi)N/DLC при различном содержании Si в наружном слое: а) – в условиях комнатной температуры; б) – при высокотемпературном нагреве

зависимости от содержания Si) и только после прохождения дистанции 150 м начинает интенсивно возрастать для всех вариантов покрытий. Наименьшее значение КТ имели DLC-Si, в которых Si содержалось в количестве 3 и 5 об.%.

С учетом приведенных выше экспериментальных данных демонстрирующих, что покрытие (CrAlSi)N/DLC при содержании в наружном слое

Si=3-5 об.% обладает наилучшим сочетанием твердости, модуля упругости и антифрикционных свойств при высоких температурах, именно оно было выбрано для нанесения на концевые керамические фрезы, предназначенные для высокоскоростной обработки жаропрочных никелевых сплавов.

Выполненные эксперименты показали, что нанесение покрытия (CrAlSi)N/DLC на концевые керамические фрезы без их предварительной обработки травлением пучком атомов аргона, не обеспечивает формирование бездефектной пленки. Как видно из SEM-изображений, представленных на Рисунке 4.28, а, режущая часть изготовленных из SiAlON+TiN посредством алмазной заточки керамических фрез, имеет дефекты в виде вырывов зерен на режущей кромке (схожие дефекты были уже отмечены при микроструктурном анализе фрез, выпускаемых зарубежными производителями – Рисунки 1.20 и 4.1).

Осаждение покрытий (CrAlSi)N/DLC на дефектную режущую кромку, ведет к формированию пленки с выраженными дефектами – несплошностями и порами (Рисунок 4.28, б), появление которых связано с формированием регулярных дефектов их роста в виде пористости и деформации кристаллитов и других причин, которые уже были проанализированы в 1 главе настоящей работы.

После предварительной обработки (удаления) дефектного слоя толщиной ~8,5 мкм в течении 55 мин частицами аргона 5 кэВ на поверхности керамических фрез формируется однородное покрытие (Рисунок 4.28, в).

Проведенный комплекс экспериментов показал, что воздействие на режущую кромку, происходящее на этапе предварительного травления, не ограничивается модификацией микроструктуры ПС КИ, но и трансформирует микрогеометрию – уменьшает радиус скругления режущей кромки, роль которого значительна для чистовых операций фрезерования с повышенными требованиями к точности и качеству обработанной детали, на которые ориентированы цельные концевые керамические фрезы [197].

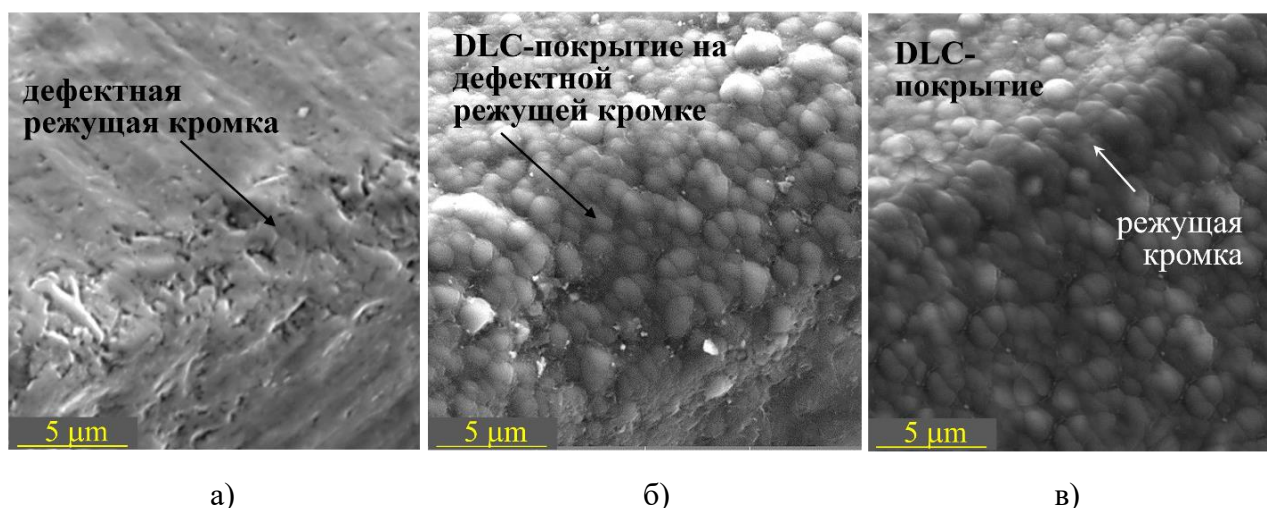
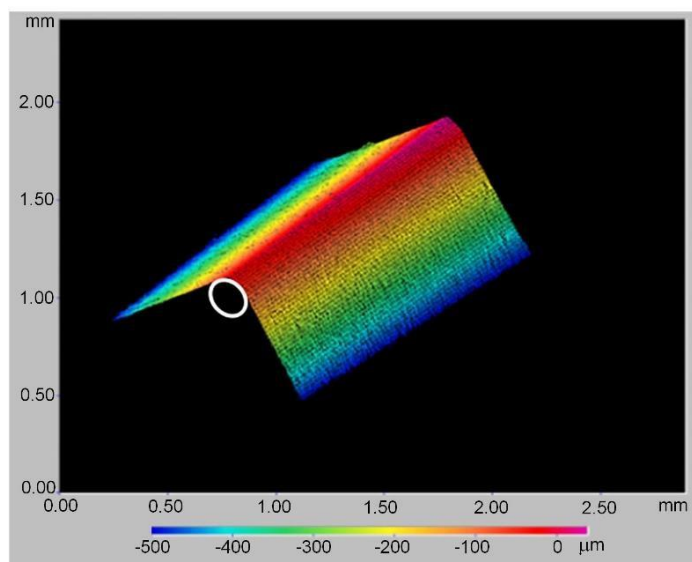


Рисунок 4.28 – SEM-изображения режущей кромки керамической концевой фрезы: а) – после алмазного шлифования; б) – после алмазного шлифования и нанесения покрытия (CrAlSi)N/DLC; в) – после алмазного шлифования, травления пучком аргона и нанесения покрытия (CrAlSi)N/DLC

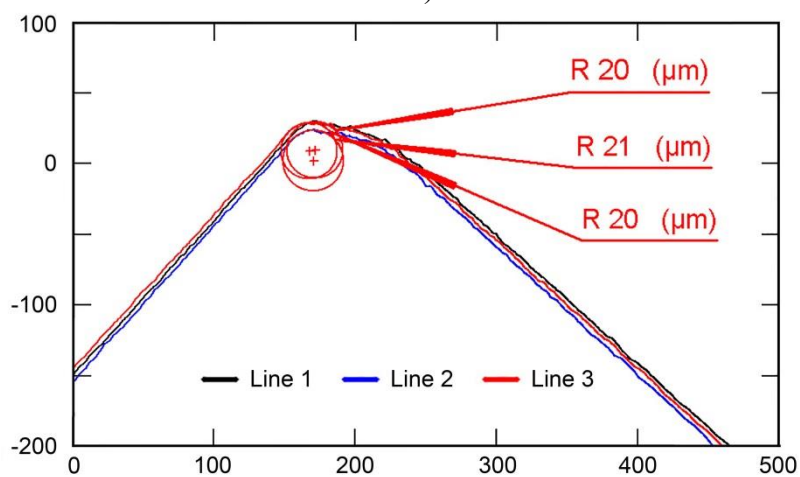
За счет уменьшения радиуса скругления кромок на этапе травления, последующее нанесение покрытий на концевые фрезы сохраняет указанный параметр их микрогеометрии на уровне инструмента без покрытия. Хорошо известно, что традиционное осаждение покрытий приводит к увеличению исходного значения радиуса скругления, которое для чистового фрезерования является нежелательным [198, 199].

На Рисунке 4.29 приведены сравнительные результаты измерения радиусов скругления режущих КИ после алмазной заточки и после травления пучком атомов аргона, выполненные при помощи трехмерной измерительной системы MicroCAD Premium plus. Данные представлены по результатам измерения режущих кромок в трех сечениях, удаленных друг от друга на 0,3 мм.

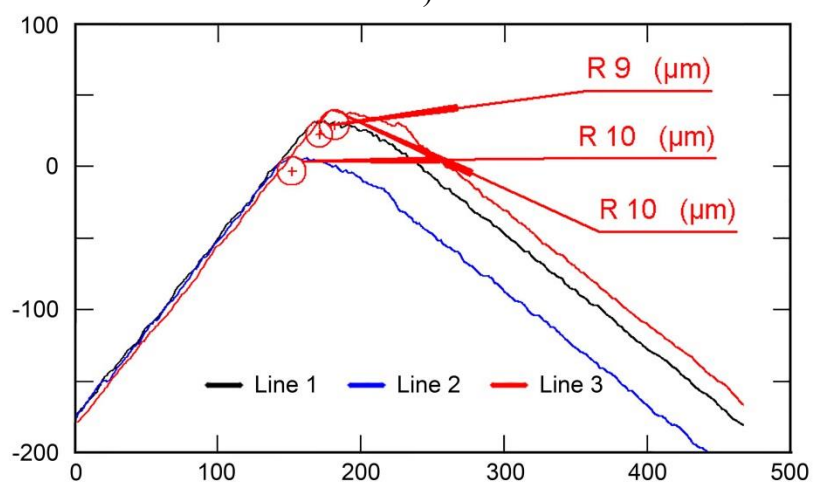
На Рисунке 4.29, а представлено трехмерное изображение поверхности режущего клина и окружности, вписанной в его вершину. Специализированная система позволяет получить профили поверхности в любом сечении и измерить радиус вписанной окружности, который равен радиусу скругления режущей кромки.



а)



б)



в)

Рисунок 4.29 – Измерение радиуса скругления режущих кромок керамического инструмента: а) – трехмерное изображение режущего клина и вписанной в него окружности, формируемое измерительной системой; б) – радиус скругления после алмазного шлифования; в) – радиус скругления после алмазного шлифования и травления пучком аргона

Значение радиуса находят как среднее арифметическое из значений, измеренных для трех сечений. Для КИ после алмазной заточки он составляет $\sim 20,3$ мкм (Рисунок 4.29, б), а после травления в течении 55 мин атомами аргона с энергией 5 кэВ радиус режущей кромки уменьшился примерно в два раза и составил $\sim 9,7$ мкм (Рисунок 4.29, в).

Выполнение комплексной модификация ПС образцов из керамики SiAlON+TiN, включающей предварительное травление пучком частиц аргона, благоприятно влияет на прочность адгезионной связи осаждаемых покрытий (CrAlSi)N/DLC. Результаты оценки прочности адгезионной связи покрытий методом склерометрии, схема которого была приведена на Рисунке 1.28, показали, что начало разрушения покрытий, сформированных на дефектной подложке, соответствует сравнительно небольшой нагрузке – 18 Н, а при нагрузке 28 Н происходит их полное разрушение. Для керамических образцов, прошедших комплексную модификацию, покрытие (CrAlSi)N/DLC начинает разрушаться при существенно больших нагрузках – 32 Н, а при нагрузке 40 Н, являющейся максимальной в процессе испытаний, наблюдались значительные области скалывания покрытия, но его полного разрушения не происходило.

Таким образом, выполненный комплекс экспериментальных исследований показывает, что применение комплексной модификации существенно изменяет состояние ПС керамических фрез, сформированного в процессе алмазного шлифования, что, очевидно, должно оказать значительное влияние на их эксплуатационные показатели.

4.5. Проведение лабораторных эксплуатационных испытаний цельных концевых керамических фрез, прошедших комплексную модификацию поверхностного слоя

В качестве обрабатываемого материала для проведения лабораторных эксплуатационных испытаний цельных керамических концевых фрез использовалась цилиндрическая заготовка диаметром 40 мм из жаропрочного никелевого сплава ХН77ТЮР ($\sigma_B=1070$ МПа), широко используемого в машиностроении и турбостроении для изготовления деталей, работающих при температурах до 750°C – лопаток, колец, дисков и других ответственных изделий.

Сплав ХН77ТЮР является представителем группы материалов с чрезвычайно низкой обрабатываемостью, которая определяется его высокой прочностью, низкой теплопроводностью, высокой склонностью к упрочнению ПС при резании [200]. На практике при решении технологических задач обработки такого материала цельными концевыми твердосплавными фрезами назначаемая скорость резания не превышает 30 м/мин [201, 202].

Эксплуатационные испытания цельных керамических концевых фрез в настоящей работе производились на 5-ти осевом токарно-фрезерном обрабатывающем центре CTX beta 1250TC DMG. Высокая жесткость системы крепления инструмента и детали позволяет минимизировать риски случайного хрупкого разрушения режущей части керамических фрез при проведении стойкостных испытаний. Для закрепления фрез использовалась переходная втулка SCHUNK GZB-S Ø20/Ø10 и гидравлическая оправка SDF-EC bt40 Ø20 HSK-A63, позволяющая надежно закреплять инструмент с высокой точностью позиционирования. Испытания выполнялись по программе, написанной в CAD/CAM системе «Gemma-3D» при реализации стратегии обработки концевой фрезой плоскости торца заготовки при движении фрезы по спирали (Рисунок 4.30).

Эксперименты проводились при следующих режимах фрезерования: скорость резания – 376,8 м/мин (частота вращения 12000 об/мин), минутная подача – 1500 мм/мин, подача на зуб – 0,03 мм/зуб. Использовалась схема «сухой» обработки без смазочно-охлаждающих жидкостей. Следует отметить, что скоростной режим при испытаниях керамических фрез ограничивался максимальной частотой вращения шпинделя имеющегося станочного оборудования.

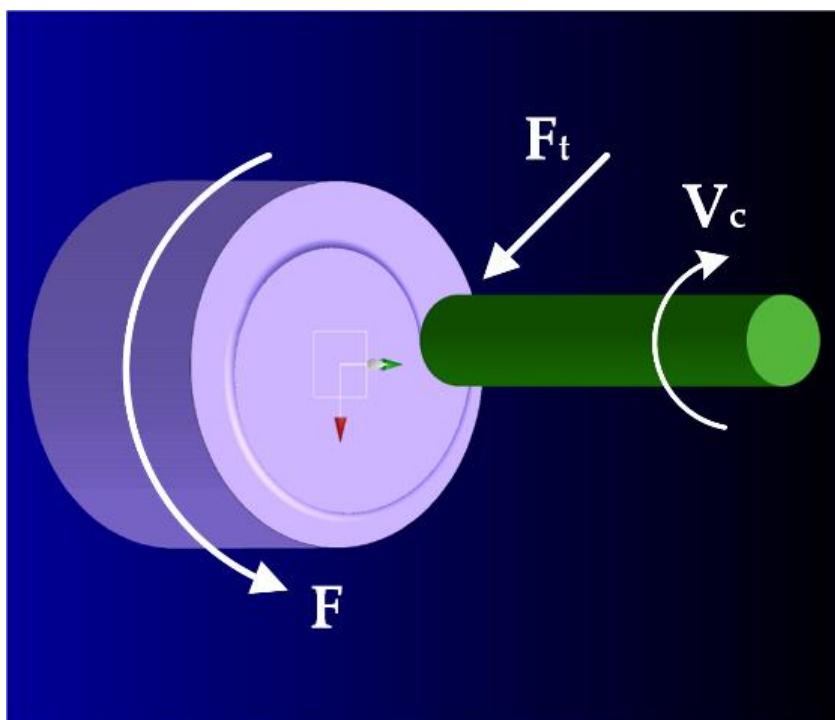
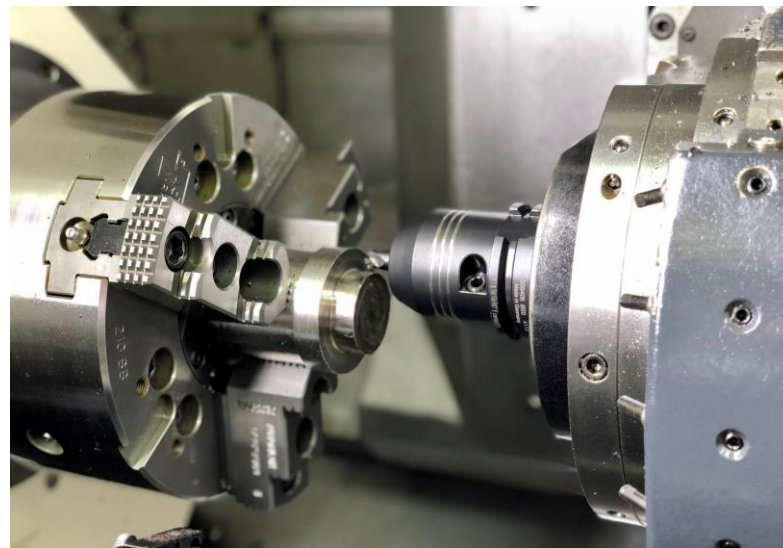


Рисунок 4.30 – Визуализация стратегии обработки цилиндрических заготовок цельными керамическими концевыми фрезами в CAD/CAM системе

Рациональные скорости эксплуатации лежат в более высоком скоростном диапазоне (свыше 500 м/мин). Поэтому главной задачей лабораторных испытаний являлась предварительная оценка работоспособности фрез, изготовленных по разработанной технологии, и перспективах их применения для обработки жаропрочных никелевых сплавов. При получении положительных результатов планировались производственные испытания керамических фрез при скорости резания более 500 м/мин и в таких условиях оценка показателей их надежности при эксплуатации.

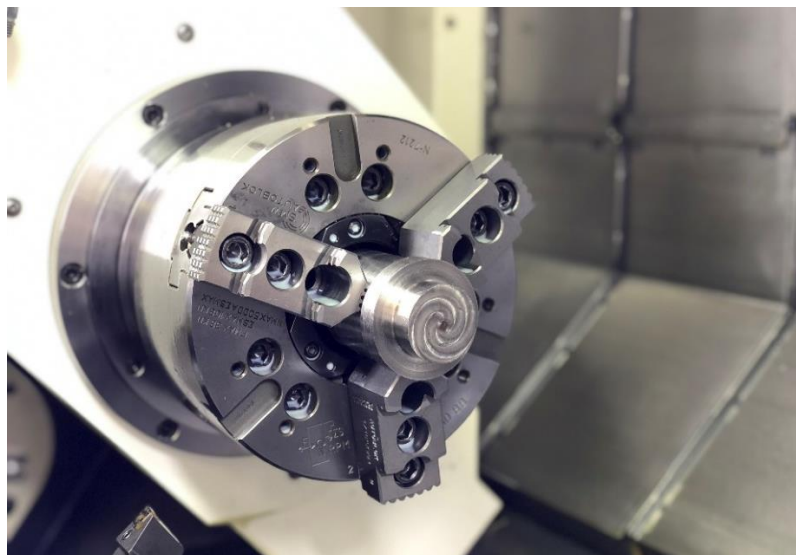
На Рисунке 4.31 приведены иллюстрации процесса лабораторных испытаний цельных концевых керамических фрез на многокоординатном токарно-фрезерном обрабатывающем центре.



а)



б)



в)

Рисунок 4.31 – Испытания концевых керамических фрез на многокоординатном токарно-фрезерном обрабатывающем центре: а) – начальное позиционирование инструмента относительно заготовки; б) – процесс фрезерования; в) – обработанная поверхность заготовки

За критерий отказа керамических концевых фрез был принят критический размер площадки износа h_z по задней поверхности зуба фрезы равный 0,4 мм (Рисунок 4.32). Износостойкость инструмента определялась как время резания до достижения фрезой указанного износа (при его превышении многократно увеличивались случаи выкрашивания и скалывания режущей кромки). Для количественной оценки износа использовался металлографический оптический микроскоп. Площадку износа контролировали на каждом из четырех зубьев керамических фрез, подвергнутых испытаниям. На основании полученных данных рассчитывали среднеарифметические значения, которые использовались для построения кривых «износ – время» изнашивания керамических фрез. Для количественной оценки шероховатости поверхности заготовок из никелевого сплава ХН77ТЮР, обработанных керамическими фрезами, использовался портативный профилометр Surftest SJ-410.

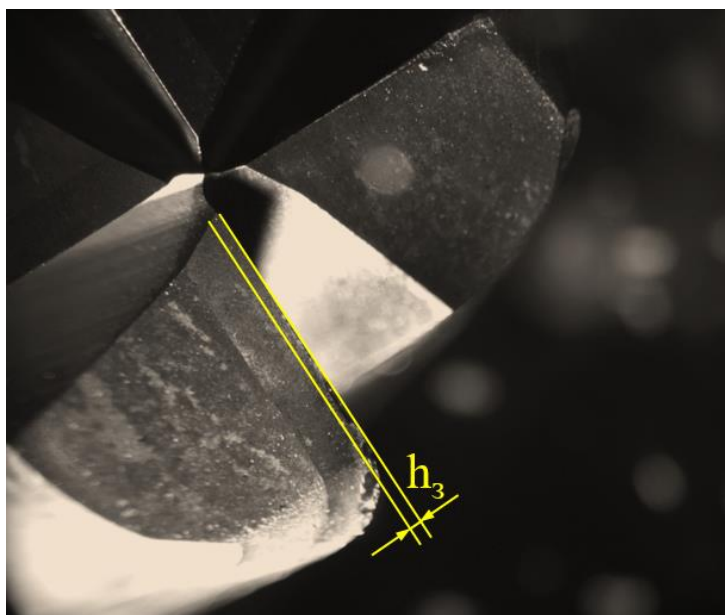


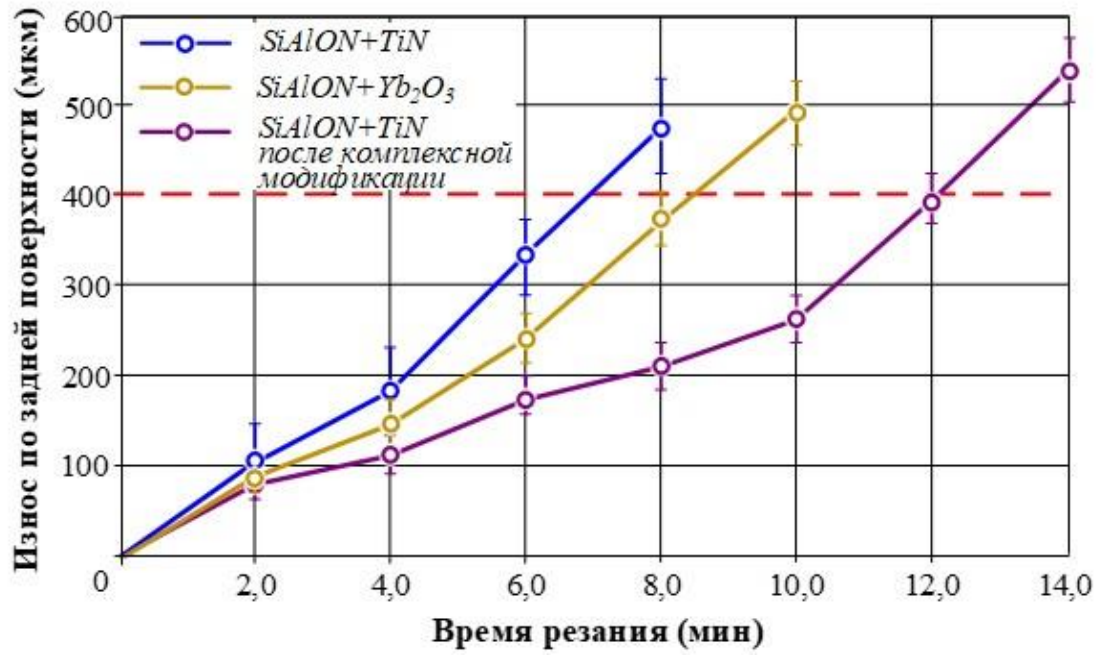
Рисунок 4.32 – Расположение очага износа на задней поверхности режущего зуба концевой керамической фрезы и схема измерения h_z для количественной оценки износа

Поскольку резание жаропрочных никелевых сплавов сопровождается повышенным адгезионным взаимодействием инструментального и обрабатываемого материалов и формированием большого количества налипов на детали в виде плотно приваренных частиц стружки, состояние поверхностного слоя

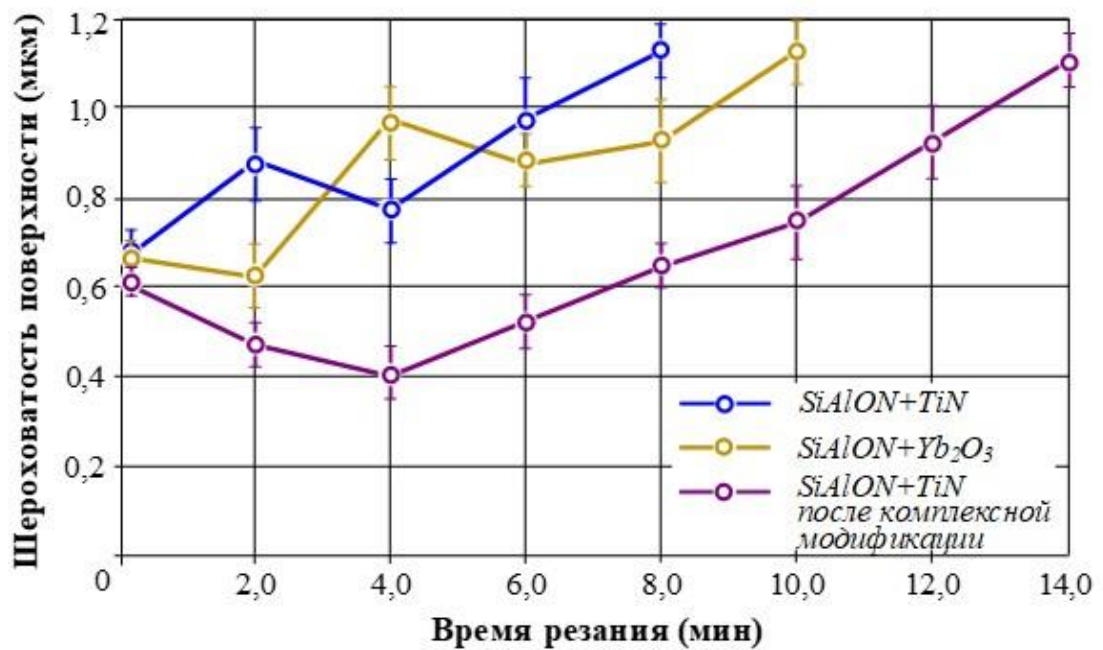
заготовки является объектом пристального внимания технологов на предприятиях [203–205]. Наличие большого количества налипов часто требует перед финишной абразивной обработкой деталей из никелевых сплавов дополнительных операций. Кроме того, их механическое удаление может привести к повреждениям поверхностного слоя ответственных деталей. Поэтому в работе при оценке эксплуатационных показателей концевых керамических фрез кроме размерного износа инструмента изучали состояние обработанной поверхности на профилографе-профилометре Hommel Tester T8000.

Объектами лабораторных эксплуатационных испытаний были три варианта концевых керамических фрез диаметром 10 мм: 1) фрезы, изготовленные по разработанной опытно-промышленной технологии из экспериментальной керамики SiAlON+TiN; 2) фрезы из керамики SiAlON+TiN, прошедшие комплексную модификацию; 3) промышленно выпускаемые фрезы зарубежного производства из керамики SiAlON+Yb₂O₃ (в качестве контрольных образцов).

На Рисунке 4.33, а приведены зависимости износа керамических фрез по задней поверхности от времени резания (данные получены по результатам испытаний 4 фрез каждого вида). Видно, что фрезы, изготовленные в рамках настоящей работы из экспериментальной керамики SiAlON+TiN (без модификации), вполне работоспособны, но все же уступают по времени работы до достижения критического износа (средней стойкости) контрольным образцам фрез зарубежного производства из керамики SiAlON+Yb₂O₃ (7 мин против 8,5 мин соответственно). Такие различия в стойкости двух видов керамических фрез можно объяснить, приняв во внимание ранее установленную (Рисунок 4.12) более мелкозернистую структуру у спеченного керамического материала на базе SiAlON, легированного стабилизирующими добавками Yb₂O₃, а также несколько лучшие прочностные свойства. Хорошо известно, что для инструментальных керамик эти характеристики очень важны и не могут не влиять на эксплуатационные показатели фрез.



а)



б)

Рисунок 4.33 – Зависимости эксплуатационных показателей различных концевых керамических фрез от времени резания заготовок из сплава ХН77ТЮР: а) – износ по задней поверхности зубьев; б) – шероховатость обработанной поверхности

Выполнение комплексной модификации ПС концевых фрез из керамики SiAlON+TiN, включающей предварительную обработку (удаление) дефектного слоя частицами аргона 5 кэВ и последующее формирование покрытия (CrAlSi)N/DLC, позволяет значительно снизить интенсивность изнашивания инструмента (Рисунок 4.33, а) и увеличить среднюю стойкость в 1,7 раза по сравнению с фрезами без обработки (12,1 мин против 7 мин соответственно).

Керамические фрезы из материала SiAlON+TiN с комплексной модификацией ПС по результатам лабораторных испытаний продемонстрировали заметные преимущества по сравнению с контрольными образцами промышленно выпускаемых концевых фрез из керамики SiAlON+Yb₂O₃ (Рисунок 4.33, а). Так, средняя стойкость при использовании изготовленных в рамках настоящей работы керамических фрез, была увеличена в 1,4 раза по сравнению с зарубежным аналогом (12,1 мин против 8,5 мин соответственно). На Рисунке 4.34 приведены сравнительные данные о кинетике изнашивания указанных образцов керамических фрез при обработке заготовок из сплава ХН77ТЮР. Установленное увеличение стойкости керамических фрез из SiAlON+TiN, прошедших комплексную модификацию, очевидно является следствием установленного в диссертационной работе положительного влияния предложенной обработки на исходные характеристики ПС.

На Рисунке 4.33 вместе с зависимостями износа керамических фрез от времени резания приведены зависимости изменения шероховатости обработанной поверхности (по параметру Ra) заготовок из сплава ХН77ТЮР (Рисунок 4.33, б). Анализ представленных кривых показывает, что при резании керамическими фрезами из материалов SiAlON+TiN и SiAlON+Yb₂O₃ высота микронеровностей, формируемых на обработанной поверхности заготовки, в течении 6 мин резания носит немонотонный характер и имеет характерные пики, а затем возрастает по мере увеличения площадки износа на задней поверхности инструмента.

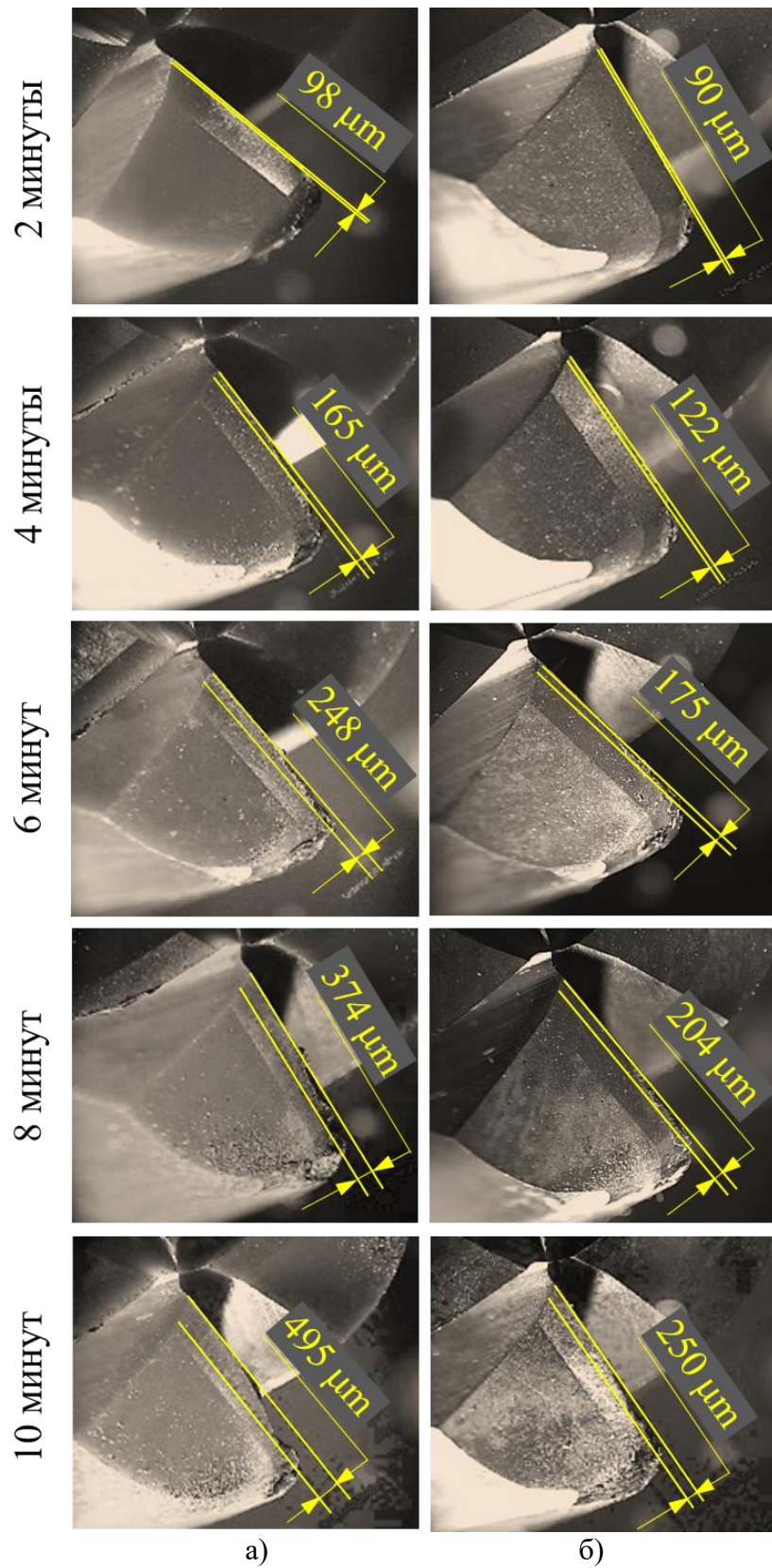


Рисунок 4.34 – Кинетика изнашивания зубьев различных концевых керамических фрез при обработке заготовок из сплава ХН77ТЮР: а) – промышленно выпускаемые фрезы из керамики $\text{SiAlON}+\text{Yb}_2\text{O}_3$; б) – фрезы из керамики $\text{SiAlON}+\text{TiN}$, прошедшие комплексную модификацию

Известно, что на шероховатость поверхности, формируемой при резании, оказывает влияние целый ряд факторов, в том числе условия фрикционного взаимодействия рабочих поверхностей инструмента с материалом заготовки. Несмотря на то, что зависимость между шероховатостью и коэффициентом трения носит чрезвычайно сложный характер, между ними прослеживается явная корреляция. Скачкообразное изменение шероховатости согласуется с данными изменения коэффициента трения керамического материала при высокотемпературном нагреве, который также носит нестабильный характер (Рисунок 4.23).

Из классических работ по теории трения и изнашивания известно, что скачкообразно изменяющийся коэффициент трения свидетельствует об отсутствии прочной граничной пленки и об адгезионном взаимодействии (схватывании) поверхностей в процессе их контактирования [206, 207].

Другая закономерность изменения шероховатости от времени резания наблюдается при эксплуатации керамических фрез с антифрикционным покрытием (CrAlSi)N/DLC (Рисунок 4.33, б). Очевидно, что покрытие вносит выраженный вклад в снижении шероховатости поверхности обрабатываемой заготовки за счет изменения условий адгезионного взаимодействия (схватывания) поверхностей в зоне трибоконтакта. Можно заметить, что в первые минуты эксплуатации шероховатость даже несколько снижается, а потом начинает постепенно возрастать, что объясняется увеличением с течением времени очага износа по задней поверхности и фактической площади ее контактирования с обрабатываемой заготовкой.

Улучшение условий контактного взаимодействия (снижение интенсивности схватывания), достигаемое формированием покрытий (CrAlSi)N/DLC на режущей части концевых керамических фрез, незамедлительно сказывается на состоянии контактируемых поверхностей. На Рисунке 4.35 представлены 3D-профилограммы состояния поверхности обработанных заготовок из сплава ХН77ТЮР после фрезерования в течении 5 мин различными концевыми керамическими фрезами.

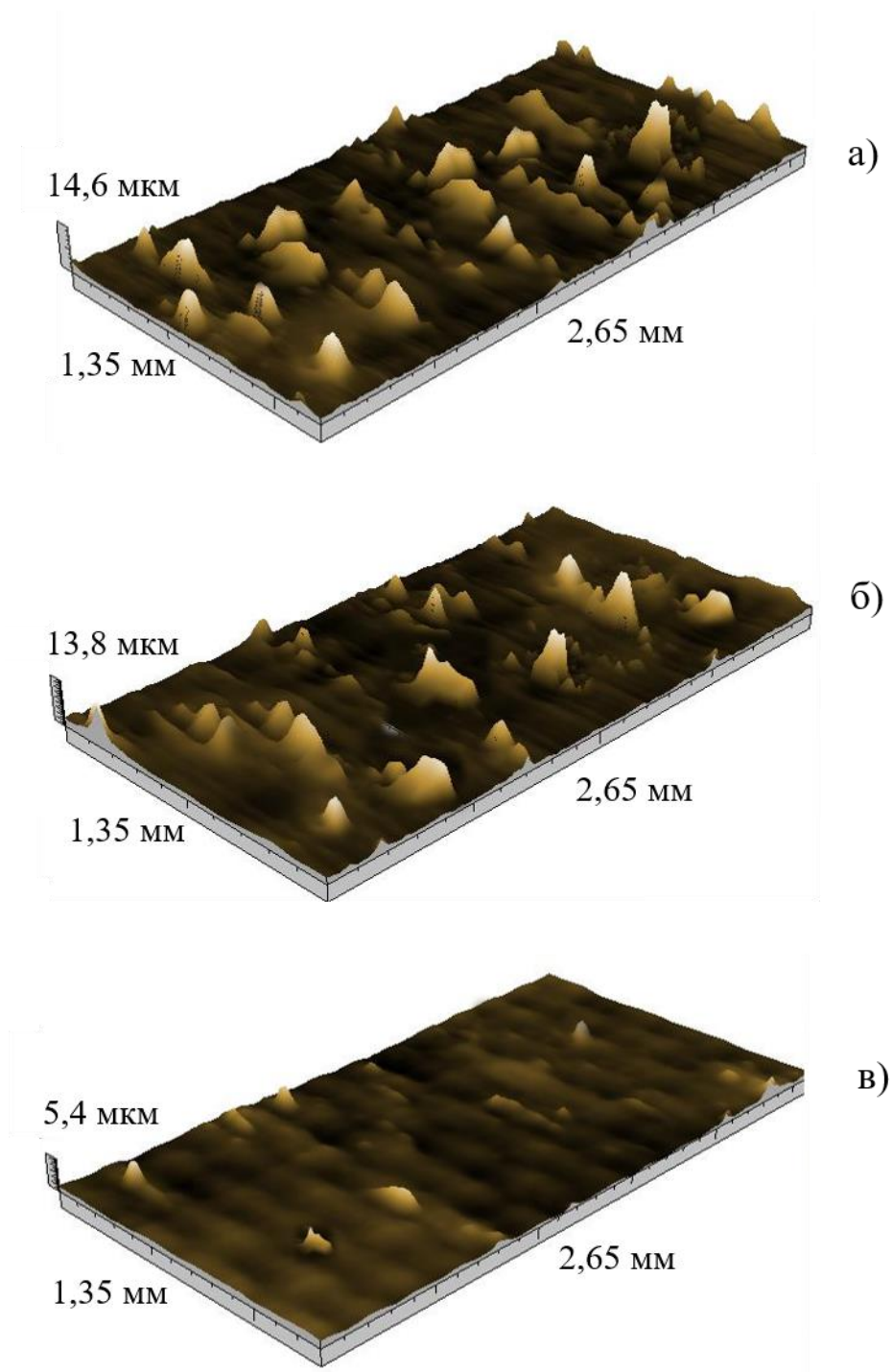


Рисунок 4.35 – 3D-профилограммы состояния поверхности обработанных заготовок из сплава ХН77ТЮР после фрезерования в течении 5 минут различными концевыми керамическими фрезами: а) – промышленно выпускаемые фрезы из керамики SiAlON+Yb₂O₃; б) – фрезы из керамики SiAlON+TiN; в) – фрезы из керамики SiAlON+TiN, прошедшие комплексную модификацию

Приведенные профилограммы показывают, что при обработке керамическими фрезами из материалов SiAlON+TiN и SiAlON+Yb₂O₃ на обработанных поверхностях заготовок наблюдается большое количество налипов (Рисунок 4.35, а и б). Добавим, что, как следует из ранее представленных данных на Рисунке 4.24, на рабочих поверхностях фрез налипы также присутствует в значительном количестве. При эксплуатации керамических фрез из материала SiAlON+TiN с комплексной модификацией, включающей нанесение покрытий (CrAlSi)N/DLC, наблюдается минимальное количество налипов на обработанной поверхности заготовки (Рисунок 4.35, в), а также на рабочих поверхностях концевых керамических фрез.

4.6. Выводы

1. Разработанная опытно-промышленная технология изготовления цельных концевых керамических фрез, включающая полный цикл производства инструмента на серийном оборудовании – искровое плазменное спекание, многокоординатную алмазную заточку и комплексную модификацию поверхностного слоя, может быть использована для изготовления инструмента в экспериментальных или коммерческих целях в условиях единичного или мелкосерийного производства.

2. Установлено, что в качестве перспективного инструментального материала для изготовления цельных концевых керамических фрез может быть использована керамическая композиция на основе α - β SiAlON с добавками наночастиц TiN, для спекания которой рекомендуется использовать процесс искрового плазменного спекания. Наилучшее соотношение физико-механических свойств «твердость – плотность – прочность – трещиностойкость» у спеченных керамических заготовок достигается при использовании следующей порошковой композиции – α - β SiAlON 80 мас.% (α -SiAlON 90 мас.% + β -SiAlON 10 мас.%) + TiN 20 мас.%.

3. Спеченные из отечественных порошков заготовки из экспериментальной керамики SiAlON+TiN по достигнутой твердости и устойчивости к абразивному

истиранию превышают соответствующие показатели для лучших зарубежных керамических материалов на базе $\text{SiAlON}+\text{Yb}_2\text{O}_3$, а по прочностным характеристикам лишь немного уступают дорогостоящим аналогам. Кроме того, в сравнении с инструментальным материалом $\text{SiAlON}+\text{Yb}_2\text{O}_3$ спеченная керамика $\text{SiAlON}+\text{TiN}$ имеет многократно меньшие значения удельного электрического сопротивления – значительно ниже порога обрабатываемости материалов электроэрозионной обработкой. Отмеченное открывает перспективы для применения к керамике $\text{SiAlON}+\text{TiN}$ ранее не использовавшихся технологий формообразования.

4. Проведенным комплексом экспериментальных исследований характеристик нитридных и алмазоподобных соединений установлено, что перспективным износостойким покрытием для цельных концевых керамических фрез, изготовленных из керамики $\text{SiAlON}+\text{TiN}$ и предназначенных для высокоскоростной обработки жаропрочных никелевых сплавов, является $(\text{CrAlSi})\text{N}/\text{DLC}-\text{Si}$ общей толщиной до 3,8-4,0 мкм при содержании в наружном слое $\text{Si}=3-5$ об.%. Указанное покрытие имеет наилучшее сочетание твердости, модуля упругости и антифрикционных свойств при высокотемпературном воздействии.

5. Осаждение покрытий $(\text{CrAlSi})\text{N}/\text{DLC}$ на режущие кромки, имеющие различные дефекты, формирующиеся в процессе алмазной заточки заготовок из керамики $\text{SiAlON}+\text{TiN}$, ведет к формированию пленок с выраженными дефектами в виде несплошностей и пор, имеющих низкую прочность адгезионной связи с керамической подложкой. После предварительного травления поверхностного слоя концевых керамических фрез частицами аргона и осаждения покрытий $(\text{CrAlSi})\text{N}/\text{DLC}$ они имеют однородную структуру с высокой прочностью адгезионной связи с подложкой. Кроме того, в процессе травления значительно уменьшается радиус скругления режущих кромок, формируемый при алмазной заточке, т.е. последующее нанесение покрытий $(\text{CrAlSi})\text{N}/\text{DLC}$ на керамические фрезы позволяет обеспечить указанный параметр микрогеометрии на уровне

инструмента без покрытия, что является важным для инструмента, предназначенного для чистовых операций механообработки.

6. Проведенные лабораторные эксплуатационные испытания различных вариантов цельных концевых керамических фрез при обработке жаропрочного никелевого сплава ХН77ТЮР показали, что использование изготовленного в рамках работы нового инструмента из экспериментальной керамики SiAlON+TiN, прошедшего комплексную модификацию, включающую травление частицами аргона и последующее нанесение покрытия (CrAlSi)N/DLC, увеличивает время работы до отказа (среднюю стойкость) в 1,7 раза по сравнению с фрезами из SiAlON+TiN без дополнительной поверхностной обработки и в 1,4 раза по сравнению фрезами из керамики SiAlON+Yb₂O₃ зарубежного производства.

7. Исследования состояния поверхностного слоя заготовок из сплава ХН77ТЮР после фрезерования позволили установить, что применение концевых керамических фрез из материала SiAlON+TiN, прошедших комплексную модификацию, значительно снижает шероховатость обработанной поверхности и минимизирует количество налипов на обработанном изделии по сравнению с керамическими фрезами из SiAlON+TiN и SiAlON+Yb₂O₃ без дополнительной поверхностной обработки.

Глава 5. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ОПК КЕРАМИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ С КОМПЛЕКСНОЙ МОДИФИКАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

5.1. Предприятия машиностроения и ОПК, где выполнялась промышленная апробация, и алгоритм проведения производственных испытаний керамических инструментов с комплексной модификацией поверхностного слоя

Представленные в главах 3 и 4 настоящей работы результаты лабораторных стойкостных испытаний, свидетельствуют о значительных перспективах практического использования разработанных новых технических и технологических решений в области комплексной модификации поверхностного слоя широкой номенклатуры инструментов из керамики для решения задачи повышения их надежности при эксплуатации. Однако реальные производственные условия эксплуатации СМКП и концевых керамических фрез при изготовлении машиностроительных изделий всегда отличаются от лабораторных условий и не могут быть воспроизведены вне производственных площадок. Имеющийся опыт показывает, что результаты производственных испытаний могут значительно отличаться от лабораторных, как в лучшую, так и в худшую сторону.

Лезвийный инструмент из керамики сегодня чрезвычайно востребован отечественной промышленностью для решения широкого спектра технологических задач, связанных с необходимостью высокопроизводительной механообработки изделий машиностроения, изготавливаемых из сталей повышенной твердости, а также труднообрабатываемых сплавов. Однако, как уже было отмечено, главным фактором сдерживания для более широкого распространения в промышленности является невысокая эффективность

эксплуатации инструмента из керамики, характеризующаяся пониженной надежностью (большим разбросом наработки до отказа). Обработка ответственных изделий машиностроения в промышленных условиях осуществляется на многокоординатном высокотехнологичном станочном оборудовании с ЧПУ, имеющем высокую стоимость станкоминуты, и к стабильности режущих свойств лезвийного инструмента предъявляются жесткие требования. Чем больше диапазон разброса наработки до отказа, тем более непредсказуемым является процесс эксплуатации керамического инструмента и меньше его надежность. Именно поэтому при апробации новых видов режущего инструмента в промышленных условиях в первую очередь наряду со средней стойкостью партии инструмента всегда оценивается стабильность его эксплуатации, характеризующаяся вариацией наработки на отказ. Как правило, максимальная вариация стойкости партии инструментов, используемых в производственных условиях на ответственных операциях, не должна превышать 10%.

Основной целью выполняемой в рамках настоящей работы промышленной апробации на предприятиях машиностроения и ОПК керамических инструментов, прошедших комплексную модификацию поверхностного слоя, являлась оценка их эксплуатационных показателей при производственных испытаниях в условиях механической обработки, соответствующих изготовлению реальных машиностроительных изделий, а на основе полученных результатов – принятия решения о целесообразности внедрения инновационного инструмента на предприятии.

На Рисунке 5.1 приведены сведения о видах керамических инструментов с комплексной модификацией поверхностного слоя, которые были подвергнуты производственным испытаниям, а также данные о предприятиях машиностроения и ОПК, где выполнялась промышленная апробация.

В качестве промышленной базы выступали следующие ведущие российские предприятия:

– АО «Производственное объединение «Стрела» (Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»), г. Оренбург;

Виды керамических инструментов с комплексной модификацией поверхностного слоя, прошедших производственные испытания и промышленную апробацию



Рисунок 5.1 – Виды керамических инструментов с комплексной модификацией поверхностного слоя, которые были подвергнуты производственным испытаниям, и предприятия машиностроения и ОПК, где выполнялась промышленная апробация

- АО «Лыткаринский завод оптического стекла» (Холдинг АО «Швабе», ГК «Ростех»), г. Лыткарино Московской области;
- АО «Машиностроительная компания «Витязь» (АО «НПК «Уралвагонзавод»), г. Ишимбай, Башкортостан;
- АО «ОДК» Филиал «Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей», г. Москва;
- АО «Белебеевский завод «Автономаль» (ГК «Ростех»), г. Белебей, Башкортостан;
- АО «Уфимское агрегатное предприятие «Гидравлика» (Холдинг «Технодинамика», ГК «Ростех»), г. Уфа.

Испытывались сборные токарные резцы, оснащенные присутствующими на рынке круглыми СМКП из SiAlON и Al_2O_3+TiC , а также сборные торцевые насадные фрезы, оснащенные квадратными СМКП из Al_2O_3+TiC . В качестве цельных концевых фрез использовались образцы инструмента, изготовленные в ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» по разработанной опытно-промышленной технологии, подробно описанной в 4 главе настоящей работы. Все образцы инструмента для промышленной апробации проходили комплексную модификацию поверхностного слоя в соответствии с технологическими принципами, изложенными в 3 главе. Финишная обработка для всех видов керамических инструментов включала в себя травление дефектного слоя быстрыми атомами Ar на глубину 7,5-8,0 мкм и последующее нанесение одного из трех вариантов покрытий – (TiAl)N/TiB₂, (CrAlSi)N/DLC и (TiAlSi)N/DLC.

Виды обрабатываемых материалов и изделий, а также условия испытаний устанавливались предприятиями самостоятельно исходя из специфики производства и конкретных технологических задач. В процессе проведения производственных испытаний для двух партий инструментов из керамики (образцов после алмазного шлифования и образцов после комплексной модификации ПС) оценивались следующие показатели:

- диапазон изменения наработки до отказа – стойкости (мин);
- среднее значение наработки до отказа (мин);
- наименьшее значение наработки до отказа (безотказная наработка) и наибольшее значение наработки до отказа (мин);
- показатель вариации наработки до отказа (%), определяемый как отношение значений среднего квадратического отклонения наработки и среднего арифметического значения.

В Приложении Б к тексту диссертационной работы приведены соответствующие акты, содержащие информацию о результатах промышленной апробации и решениях по результатам испытаний о внедрении различных видов инновационных инструментов из керамики, прошедших комплексную модификацию поверхностного слоя.

5.2. Производственные испытания цельных концевых керамических фрез из SiAlON+TiN с комплексной модификацией поверхностного слоя при обработке жаропрочного никелевого сплава

Оценка эксплуатационных показателей концевых керамических фрез из SiAlON+TiN выполнялась при резании жаростойкого жаропрочного сплава ХН50МВКТЮР в условиях механообрабатывающего производства АО «ПО «Стрела». Цельные (монолитные) четырехзубые концевые керамические фрезы диаметром 10 мм были выполнены из материала α/β -SiAlON+TiN и изготовлены в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»,

Образцы режущего инструмента, предоставленные для проведения испытаний, были разделены на две партии: керамические концевые фрезы из материала α/β -SiAlON+TiN (базовый вариант, I партия); керамические концевые фрезы из материала α/β -SiAlON+TiN, прошедшие комплексную модификацию ПС, включающую «сухое» травление пучками атомов аргона и нанесение покрытия (CrAlSi)N/DLC (инновационный вариант, II партия). Испытания выполнялись на вертикальном фрезерном 5-осевом обрабатывающем центре с ЧПУ мод. Kitamura MyTrunnion 5. Механическая обработка жаростойкого жаропрочного сплава ХН50МВКТЮР проводилась при скорости резания $V=568$ м/мин (частота вращения $n=18100$ об/мин) и подаче на зуб $S=0,03$ мм/зуб. Использовалась схема «сухой» обработки без смазочно-охлаждающих жидкостей.

За критерий отказа керамических концевых фрез был принят предельный размер фаски износа по задней поверхности зуба фрезы 0,4 мм. Измерение значений ширины фаски износа проводили с использованием инструментального микроскопа, предназначенного для измерения линейных и угловых размеров в проходящем и отраженном свете в прямоугольной системе координат. Ширина фаски износа на задней поверхности инструментов измерялась с определенным шагом (интервалом) – через каждые 2 минуты резания и контролировалась на каждом из четырех зубьев керамических фрез, подвергнутых испытаниям (для

расчетов использовались средние значения). На основании полученных данных устанавливались соотношения «время резания – ширина фаски износа» и определялся момент отказа каждого образца из партии режущего инструмента. Для подтверждения кривых износа, полученных при прерывании процесса резания, необходимого для измерения износа, выполнялись контрольные испытания при постоянном резании в течении всего периода стойкости концевых фрез.

Результаты проведенных испытаний (экспериментально установленные соотношения «время резания – ширина фаски износа») керамических фрез при резании сплава ХН50МВКТЮР приведены в Таблицах 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 – Результаты производственных испытаний цельных концевых керамических фрез (I партия)

Время резания, мин	№ керамической фрезы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Ширина фаски износа на задней поверхности, мм									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,15	0,2	0,14	0,16	0,21	0,13	0,15	0,14	0,2	0,24
4	0,28	0,35	0,25	0,24	0,37	0,26	0,26	0,27	0,32	0,45
6	0,35	0,45	0,38	0,41	0,58	0,36	0,35	0,37	0,46	0,64
8	0,53	0,55	0,47	0,5	0,73	0,49	0,45	0,46	0,6	0,8

Таблица 5.2 – Результаты производственных испытаний цельных концевых керамических фрез (II партия)

Время резания, мин	№ керамической фрезы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Ширина фаски износа на задней поверхности, мм									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,09	0,07	0,08	0,09	0,07	0,09	0,1	0,08	0,06	0,1
4	0,15	0,14	0,15	0,13	0,13	0,14	0,16	0,14	0,13	0,16
6	0,24	0,25	0,24	0,26	0,22	0,25	0,23	0,23	0,24	0,27
8	0,33	0,3	0,31	0,32	0,29	0,32	0,32	0,3	0,3	0,38
10	0,4	0,43	0,42	0,4	0,4	0,4	0,41	0,42	0,39	0,55
12	0,56	0,55	0,57	0,53	0,51	0,54	0,69	0,65	0,5	0,76

На основании экспериментальных данных, полученных в процессе производственных испытаний двух видов концевых керамических фрез, определялся комплекс интересующих эксплуатационных показателей инструмента. В Таблице 5.3 представлены установленные характеристики при фрезеровании сплава ХН50МВКТЮР.

Таблица 5.3 – Эксплуатационные показатели двух видов цельных концевых керамических фрез из материала α/β -SiAlON+TiN при резании сплава ХН50МВКТЮР, достигнутые при производственных испытаниях

Вид керамических фрез	Среднее значение наработки до отказа (мин)	Min значение наработки до отказа – безотказная наработка (мин)	Max значение наработки (мин)	Коэффициент вариации наработки до отказа (%)
α/β -SiAlON+TiN (I партия)	5,7	3,5	7,1	20,8
α/β -SiAlON+TiN с комплексной модификацией (II партия)	9,7	8,2	10,2	5,4

Установлено, что использование базового варианта цельных керамических концевых фрез из материала α/β -SiAlON при резании жаростойкого жаропрочного сплава ХН50МВКТЮР при принятых условиях фрезерования обеспечивает среднее значение наработки до отказа 5,7 мин; при этом установленное значение безотказной наработки режущего инструмента, в течение которого ни у одной фрезы из испытанной партии не наступил отказ, составило всего лишь 3,5 мин. Значение коэффициента вариации наработки до отказа для базового варианта керамических фрез составило 20,8%.

Сравнительные производственные испытания показали, что применение комплексной модификации ПС керамических фрез из материала α/β -SiAlON+TiN при резании жаростойкого жаропрочного сплава ХН50МВКТЮР при принятых

условиях фрезерования увеличивает среднее значение наработки до отказа в 1,7 раза (до 9,7 мин) по сравнению с базовым вариантом керамических фрез; при этом установленное значение безотказной наработки инновационного варианта режущего инструмента, в течение которого ни у одной фрезы из испытанной партии не наступил отказ, составило 8,2 мин. Установленное значение коэффициента вариации наработки до отказа для керамических фрез, прошедших комплексную модификацию, составило 5,4%, что демонстрирует значительное увеличение эксплуатационной надежности при использовании инновационного инструмента по сравнению с базовым вариантом в условиях высокоскоростной обработки.

5.3. Производственные испытания сборных торцевых насадных фрез, оснащенных СМКП из Al_2O_3+TiC с комплексной модификацией поверхностного слоя, при обработке закаленной инструментальной стали

Оценка эксплуатационных показателей торцевых насадных фрез, оснащенных двумя вариантами сменных керамических пластин с различным состоянием ПС, осуществлялась при плоском фрезеровании заготовок пресс-форм в производственных условиях АО «Лыткаринский завод оптического стекла». Использовались две партии СМКП: I партия – базовый вариант (алмазное шлифование), II партия – инновационный вариант (травление быстрыми атомами Ag и нанесение покрытий $(TiAl)N/TiB_2$).

В качестве режущего инструмента использовалась фреза торцевая насадная 125 A 08 R 084 F 090 S SKG 2x 040 (по ГОСТ ISO 11529-2015) диаметром 125 мм с механическим креплением 8 квадратных керамических пластин SNGN 120404 (по ГОСТ 19042-80, ISO 1832-85) шириной 12,7 мм и толщиной 4,76 мм. Марка инструментальной керамики – сплав CC650 на базе Al_2O_3+TiC . В качестве обрабатываемого материала применялась высоколегированная (высокохромистая)

полутеплостойкая инструментальная сталь X12МФ (по ГОСТ 5950-2000), закаленная до 61-62 HRC, используемая для изготовления формообразующих деталей пресс-форм и других изделий инструментального производства завода.

Обработку плоских поверхностей заготовок пресс-форм из закаленной инструментальной стали X12МФ торцевой фрезой, оснащенной четырехгранными пластинами из керамики Al_2O_3+TiC , обработанными с применением различных технологий, выполняли на фрезерном станке модели DMC 1035 на следующих режимах – частота вращения $n=1000$ об/мин (скорость резания $V=392,5$ м/мин), подача $S=1200$ мм/мин, глубина резания $t=1,0$ мм. Фрезерование выполнялось без применения СОЖ.

В качестве критерия затупления при испытаниях был принят износ по главной задней поверхности керамических пластин (0,4 мм). После затупления фрезы, т.е. достижения предельного износа режущими (рабочими) гранями, керамические пластины переворачивали и рабочими становились следующие грани, ранее не задействованные в процессе резания.

На каждой керамической пластине испытывали по 3 грани. Для измерения линейного размера износа режущих граней пластин использовали инструментальный микроскоп МПБ-2. Измерения значения износа для каждой режущей грани выполняли по истечении 4 минут эксплуатации торцевой фрезы и записывали в таблицу испытаний. Для подтверждения данных по износу граней, полученных при прерывании процесса резания, необходимого для измерения износа, выполнялись контрольные испытания по 1 грани каждой пластины при постоянном резании в течении всего периода стойкости инструмента.

Результаты производственных испытаний торцевых фрез, оснащенных сменными керамическими пластинами, обработанными с применением различных технологий, при резании закаленной инструментальной стали X12МФ приведены в Таблицах 5.4 и 5.5. Количественные значения эксплуатационных показателей инструмента, установленные по результатам обработки данных производственных испытаний, приведены в Таблице 5.6.

Таблица 5.4 – Результаты производственных испытаний торцевых фрез, оснащенных четырехгранными керамическими пластинами (I партия)

	Номер керамической пластины (зуба фрезы)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Время резания (мин)	Значение износа (мм) на главной задней поверхности керамических пластин, обработанных по базовой технологии (грань №1)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,22	0,20	0,21	0,19	0,17	0,16	0,28	0,22
8	0,65	0,35	0,29	0,31	0,32	0,24	0,59	0,39
12	-	0,47	0,48	0,45	0,50	0,45	-	0,57
Время резания (мин)	Значение износа (мм) на главной задней поверхности керамических пластин, обработанных по базовой технологии (грань №2)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,24	0,22	0,18	0,20	0,19	0,20	0,28	0,26
8	0,39	0,37	0,31	0,34	0,40	0,38	0,69	0,58
12	0,71	0,55	0,49	0,50	-	0,50	-	-
Время резания (мин)	Значение износа (мм) на главной задней поверхности керамических пластин, обработанных по базовой технологии (грань №3)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,25	0,21	0,19	0,18	0,18	0,20	0,22	0,18
8	0,56	0,33	0,37	0,34	0,31	0,36	0,38	0,48
12	-	0,43	0,51	0,57	0,52	0,49	0,54	-

Таблица 5.5 – Результаты производственных испытаний торцевых фрез, оснащенных четырехгранными керамическими пластинами (II партия)

	Номер керамической пластины (зуба фрезы)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Время резания (мин)	Значение износа (мм) на главной задней поверхности керамических пластин, обработанных по инновационной технологии (грань №1)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,07	0,08	0,1	0,08	0,12	0,07	0,1	0,13
8	0,13	0,13	0,15	0,14	0,18	0,12	0,14	0,22

Продолжение таблицы 5.5

12	0,22	0,24	0,26	0,26	0,33	0,23	0,25	0,35
16	0,32	0,33	0,33	0,4	0,5	0,32	0,38	0,54
20	0,53	0,55	0,58	-	-	0,57	0,6	-
Время резания (мин)	Значение износа (мм) на главной задней поверхности керамических пластин, обработанных по инновационной технологии (грань №2)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,09	0,1	0,11	0,07	0,1	0,08	0,11	0,12
8	0,15	0,14	0,16	0,12	0,17	0,15	0,15	0,25
12	0,28	0,25	0,27	0,23	0,26	0,26	0,27	0,34
16	0,4	0,38	0,39	0,33	0,39	0,41	0,39	0,52
20	-	0,59	0,57	0,53	0,6	-	0,59	-
Время резания (мин)	Значение износа (мм) на главной задней поверхности керамических пластин, обработанных по инновационной технологии (грань №3)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,08	0,09	0,1	0,08	0,12	0,09	0,09	0,12
8	0,17	0,13	0,13	0,15	0,24	0,12	0,14	0,28
12	0,28	0,27	0,25	0,31	0,34	0,25	0,26	0,38
16	0,4	0,36	0,37	0,46	0,51	0,38	0,37	0,53
20	-	0,56	0,58	-	-	0,61	0,6	-

Таблица 5.6 – Эксплуатационные показатели торцевых фрез, оснащенных двумя видами четырехгранных керамических пластин из материала Al_2O_3+TiC , при резании закаленной инструментальной стали X12МФ, достигнутые при производственных испытаниях

Вид керамических пластин	Средняя стойкость (мин)	Min значение стойкости (мин)	Max значение стойкости (мин)	Коэффициент вариации стойкости (%)
Al_2O_3+TiC (I партия)	8,5	5	11	19 %
Al_2O_3+TiC с комплексной модификацией (II партия)	15,5	13	17	10 %

Проведенными испытаниями установлено, что при резании закаленной инструментальной стали Х12МФ на выбранных режимах фрезерования применение торцевых фрез с четырехгранными пластинами из керамики СС650 после алмазного шлифования (базовая технология, I партия образцов) обеспечивает среднюю стойкость 8,5 мин. против 15,5 мин., обеспечиваемую пластинами из керамики СС650 после травления быстрыми атомами Ar и нанесения покрытий (TiAl)N/TiB₂ (инновационная технология, II партия образцов). Таким образом, инновационная технология по отношению к базовой обеспечила увеличение средней стойкости режущего инструмента в 1,8 раза. Одновременно с этим установлено снижение коэффициента вариации стойкости (10% против 19% соответственно) по сравнению с базовой технологией.

5.4. Производственные испытания сборных токарных резцов, оснащенных СМКП из SiAlON и Al₂O₃+TiC с комплексной модификацией поверхностного слоя, при обработке жаропрочного никелевого сплава и закаленной подшипниковой стали

Оценка эксплуатационных показателей сборных токарных резцов, оснащенных двумя вариантами круглых керамических пластин из материала SiAlON, имеющих различное состояние ПС, осуществлялась при продольном точении жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП на производственной площадке Филиала «НИИД» АО «ОДК». Использовались две партии СМКП: I партия – базовой вариант (алмазное шлифование), II партия – инновационный вариант (травление быстрыми атомами Ar и нанесение покрытий (TiAlSi)N/DLC).

В качестве режущего инструмента использовалась державка токарная CRSNR 3232P 19 для наружной обработки на универсальных токарных станках и станках с ЧПУ, оснащенная круглыми керамическими пластинами RNGN-190800 из материала AS500 (SiAlON), разделенные на две партии.

Для каждой n-ой пластины с режущей кромкой, имеющей форму окружности, выбирались по три режущих участка (n.1, n.2, n.3), которые последовательно подвергались эксплуатационным испытаниям до достижения задней поверхностью критического значения износа (0,4 мм). В качестве обрабатываемого материала применялась кольцевая заготовка из никелевого сплава ЭП741НП, используемого в промышленности для изготовления валов, дисков турбин и компрессоров, работающих при температурах до 750 °С.

Эксплуатационные испытания проводились на операции продольного точения на следующих режимах – скорость резания $V=280$ м/мин, подача $S=0,15$ мм/об, глубина резания $t=1$ мм (резание выполнялось без СОЖ). В качестве станочного оборудования использовался токарный станок Jesco Machinery 1650ENC с ЧПУ. Измерение параметра фаски износа на задней поверхности керамических пластин проводили на оптическом инструментальном микроскопе. Замеры проводили по истечении каждых 3 минут эксплуатации пластин. Полученные данные записывались в таблицы испытаний.

Результаты проведенных эксплуатационных испытаний круглых керамических пластин из материала SiAlON при продольном точении жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП приведены в Таблицах 5.7 и 5.8. Количественные значения эксплуатационных показателей инструмента, установленные по результатам обработки данных производственных испытаний, приведены в Таблице 5.9.

Таблица 5.7 – Результаты производственных испытаний токарных резцов, оснащенных круглыми керамическими пластинами из SiAlON (I партия)

Номер пластины (режущего участка)	Значение фаски износа (мм) при различном времени резания			
	3 мин	6 мин	9 мин	12 мин
1-я пластина				
1.1	0,25	0,6	-	-
1.2	0,21	0,39	0,75	-
1.3	0,18	0,25	0,39	0,69

Продолжение таблицы 5.7

2-я пластина				
2.1	0,14	0,33	0,48	-
2.2	0,15	0,22	0,34	0,66
2.3	0,20	0,32	0,39	0,70
3-я пластина				
3.1	0,13	0,19	0,34	0,73
3.2	0,15	0,22	0,33	0,60
3.3	0,21	0,31	0,41	-
4-я пластина				
4.1	0,17	0,38	0,63	-
4.2	0,15	0,24	0,37	0,66
4.3	0,20	0,38	0,70	-
5-я пластина				
5.1	0,15	0,23	0,34	0,67
5.2	0,18	0,24	0,35	0,79
5.3	0,16	0,25	0,39	0,82
6-я пластина				
6.1	0,21	0,41	-	-
6.2	0,18	0,24	0,37	0,63
6.3	0,16	0,22	0,35	0,86
7-я пластина				
7.1	0,19	0,25	0,39	0,8
7.2	0,20	0,33	0,51	-
7.3	0,18	0,24	0,39	0,77

Таблица 5.8 – Результаты производственных испытаний токарных резцов, оснащенных круглыми керамическими пластинами из SiAlON (II партия)

Номер пластины (режущего участка)	Значение фаски износа (мм) при различном времени резания					
	3 мин	6 мин	9 мин	12 мин	15 мин	18 мин
1-я пластина						
1.1	0,08	0,18	0,26	0,37	0,56	-

Продолжение таблицы 5.8

1.2	0,11	0,19	0,25	0,36	0,58	-
1.3	0,08	0,18	0,27	0,32	0,39	0,61
2-я пластина						
2.1	0,1	0,17	0,26	0,31	0,37	0,5
2.2	0,09	0,22	0,29	0,35	0,4	-
2.3	0,12	0,17	0,23	0,3	0,37	0,48
3-я пластина						
3.1	0,1	0,19	0,24	0,33	0,44	-
3.2	0,08	0,19	0,33	0,39	0,49	-
3.3	0,09	0,21	0,27	0,33	0,46	-
4-я пластина						
4.1	0,1	0,16	0,29	0,34	0,45	-
4.2	0,12	0,2	0,27	0,36	0,5	-
4.3	0,1	0,22	0,29	0,38	0,52	-
5-я пластина						
5.1	0,07	0,18	0,24	0,29	0,33	0,55
5.2	0,1	0,15	0,23	0,4	-	-
5.3	0,09	0,25	0,3	0,35	0,39	0,5
6-я пластина						
6.1	0,08	0,14	0,21	0,26	0,37	0,57
6.2	0,11	0,21	0,31	0,36	0,4	-
6.3	0,12	0,19	0,29	0,39	0,48	-
7-я пластина						
7.1	0,1	0,2	0,28	0,35	0,4	-
7.2	0,13	0,25	0,31	0,38	0,45	-
7.3	0,08	0,24	0,29	0,39	0,45	-

Таблица 5.9 – Эксплуатационные показатели токарных резцов, оснащенных двумя видами круглых керамических пластин из материала SiAlON при резании жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП, достигнутые при производственных испытаниях

Вид керамических пластин	Средняя стойкость (мин)	Min значение стойкости (мин)	Max значение стойкости (мин)	Коэффициент вариации стойкости (%)
SiAlON (I партия)	8,3	4,5	9,9	19%
SiAlON с комплексной модификацией (II партия)	14,1	12,0	16,1	9,5%

Проведенными производственными испытаниями установлено, что при обработке жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП на выбранных режимах резания токарными резцами, оснащенными круглыми керамическими пластинами из материала SiAlON, прошедшими алмазное шлифование (базовая технология) обеспечивает среднюю стойкость инструмента 8,3 мин, что в 1,7 раза меньше соответствующего показателя, обеспечиваемого керамическими пластинами после комплексной модификации, включающей травление пучком ускоренных частиц Ag и формирование покрытий TiAlSiN/DLC (инновационная технология).

Одновременно с отмеченным выше эффектом применение нового технологического подхода относительно традиционной технологии обеспечивает уменьшение коэффициента вариации стойкости в 2 раза (9,5% и 19% соответственно), а также размаха вариации стойкости.

Оценка эксплуатационных показателей сборных токарных резцов, оснащенных двумя вариантами круглых керамических пластин из материала Al_2O_3+TiC , имеющих различное состояние ПС, осуществлялась при продольном точении подшипниковой стали ШХ15СГ на производственной базе АО «Машиностроительная компания «Витязь». Использовались две партии СМКП: I партия – базовой вариант (алмазное шлифование), II партия – инновационный вариант (травление быстрыми атомами Ag и нанесение покрытий (TiAl)N/TiB₂).

В качестве режущего инструмента применялись токарные державки CRSNR 3232P 19 для наружной обработки на универсальных токарных станках и станках с ЧПУ с «гнездом» для размещения режущих пластин круглой формы RNGN-190800 с упрочняющей фаской из керамики типа CC650.

На каждой пластине для испытаний выбирались режущие участки, которые последовательно подвергались эксплуатационным испытаниям до достижения очага износа на задней поверхности пластины предельного значения $h=0,4$ мм. Измерения линейного значения очага износа на задней поверхности круглых пластин проводили с использованием заводского инструментального микроскопа и выполнялись через каждые 3 минуты резания. На основании зависимостей «время резания – размер очага износа» определялся момент отказа (стойкость) режущих участков каждой керамической пластины.

Испытания проводились при наружном точении кольцевых заготовок из конструкционной подшипниковой стали ШХ15СГ (HRC 61-63) на скорости резания $V=300$ м/мин, подаче $S=0,15$ мм/об, глубине $t=1,0$ мм. Использовалась экологически чистая обработка (без СОЖ). В качестве станочного оборудования для проведения испытаний использовался токарный станок 1П726 с ЧПУ.

Количественные значения эксплуатационных показателей токарных резцов, оснащенных керамическими пластинами, при наружном точении кольцевых заготовок из стали ШХ15СГ установленные по результатам обработки данных производственных испытаний, приведены в Таблице 5.10.

Установлено, что использование промышленно выпускаемых режущих пластин круглой формы из Al_2O_3+TiC (без дополнительной обработки) при резании высокотвердой стали ШХ15СГ при принятых условиях резания обеспечивает среднее значение стойкости 11,3 мин.; при этом установленное значение безотказной наработки режущих пластин, в течение которого ни у одной пластины не наступил отказ, составило 8,5 мин. Расчетное значение коэффициента вариации стойкости (определяемого как соотношение значений среднего квадратического отклонения и среднего арифметического) составило 20,5%.

Таблица 5.10 – Эксплуатационные показатели токарных резцов, оснащенных двумя видами круглых керамических пластин из материала Al_2O_3+TiC при резании конструкционной подшипниковой стали ШХ15СГ, достигнутые при производственных испытаниях

Вид керамических пластин	Средняя стойкость, мин	Min значение стойкости (безотказная наработка), мин	Max значение стойкости, мин	Коэффициент вариации стойкости (%)
Al_2O_3+TiC (I партия)	11,3	8,5	15,9	20,5%
Al_2O_3+TiC с комплексной модификацией (II партия)	20,4	17,0	22,5	10%

Применение комплексной модификации при принятых условиях резания увеличивает среднее значение стойкости в 1,8 раза (до 20,4 мин) по сравнению с пластинами без дополнительной обработки, а установленное значение безотказной наработки составило 17,0 минут (относительно 8,5 мин). Значение коэффициента вариации стойкости режущих пластин после проведения комплексной упрочняющей обработки было уменьшено до 10%.

5.5. Выводы

1. Выполненные комплексные производственные испытания и промышленная апробация на базе ведущих отечественных предприятий машиностроения и ОПК керамических инструментов широкой номенклатуры при механической обработке закаленных сталей и труднообрабатываемых сплавов, подтвердили значительное повышение надежности эксплуатации инструмента за счет применения разработанных технологических принципов комплексной

модификации его поверхностного слоя, включающей удаление дефектного слоя и последующее осаждение различных функциональных покрытий.

2. Производственные испытания цельных концевых керамических фрез из материала $\text{SiAlON}+\text{TiN}$, изготовленных с использованием разработанной опытно-промышленной технологии, и подвергнутых комплексной модификации поверхностного слоя, включающей травление и осаждение покрытий $(\text{CrAlSi})\text{N}/\text{DLC}$, при обработке жаропрочного никелевого сплава в сравнении с базовым инструментом показали увеличение средней стойкости керамических фрез в 1,7 раза при одновременном уменьшении вариации стойкости в 4 раза.

3. Производственные испытания сборных торцевых насадных фрез, оснащенных промышленно выпускаемыми СМКП из материала $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, прошедшими комплексную модификацию поверхностного слоя, включающую травление и осаждение покрытий $(\text{TiAl})\text{N}/\text{TiB}_2$, при обработке закаленной инструментальной стали в сравнении с базовым инструментом показали увеличение средней стойкости торцевых фрез в 1,8 раза при одновременном уменьшении вариации стойкости в 2 раза.

4. Производственные испытания сборных токарных резцов, оснащенных промышленно выпускаемыми СМКП из материала SiAlON , прошедшими комплексную модификацию поверхностного слоя, включающую травление и осаждение покрытий $(\text{TiAlSi})\text{N}/\text{DLC}$, при обработке жаропрочного никелевого сплава в сравнении с базовым инструментом показали увеличение средней стойкости токарных резцов в 1,7 раза при одновременном уменьшении вариации стойкости в 2 раза.

5. Производственные испытания сборных токарных резцов, оснащенных промышленно выпускаемыми СМКП из материала $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, прошедшими комплексную модификацию поверхностного слоя, включающую травление и осаждение покрытий $(\text{TiAl})\text{N}/\text{TiB}_2$, при обработке закаленной подшипниковой стали в сравнении с базовым инструментом показали увеличение средней стойкости токарных резцов в 1,8 раза при одновременном уменьшении вариации стойкости в 2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение эксплуатационной надежности керамического инструмента широкой номенклатуры при воздействии интенсивных теплосиловых нагрузок, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие отечественного машиностроения. Указанная проблема решена посредством разработки, исследования и промышленной апробации инновационных подходов к изготовлению керамических инструментов и комплексной модификации их поверхностного слоя, включающей воздействие пучками ускоренных частиц для удаления дефектов, формирующихся при алмазном шлифовании, и последующее осаждение различных функциональных покрытий.

2. Выполненный комплекс исследований позволил выявить значительный вклад дефектного поверхностного слоя керамических инструментов в снижение их надежности при эксплуатации в условиях повышенных скоростей резания и увеличенных сечений срезаемого слоя. На примере наиболее востребованных промышленностью инструментальных керамик $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON классифицированы дефекты, формируемые в процессе алмазного шлифования, а для возможности оценки состояния поверхностного слоя предложен новый обобщенный критерий «индекс дефектности», являющийся произведением плотности дефектов и максимальной глубины дефектного слоя. Эксплуатационные испытания керамических пластин из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON при фрезеровании закаленной стали и точении никелевого сплава показали высокую информативность индекса дефектности и его ключевое влияние на интенсивность истирания контактных поверхностей инструмента в широком диапазоне режимов резания.

3. На основе проведенного математического моделирования разработаны функциональные зависимости интенсивности истирания керамических пластин из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON при фрезеровании закаленной стали и точении никелевого сплава от факторов, связанных с состоянием поверхностного слоя инструмента (индексом дефектности и трещиностойкостью), а также элементами режима механической обработки (скоростью резания и подачей), которые могут использоваться в качестве удобного инструментария для прогнозирования интенсивности истирания инструмента из распространенных инструментальных керамик в процессе резании.

4. Проведенный комплекс аналитических и экспериментальных исследований позволил предложить и практически реализовать новый технологический подход, базирующийся на «сухом» травлении дефектного слоя керамических инструментов пучками ускоренных атомов аргона с энергией ~ 5 кэВ, при котором происходит его физическое распыление на требуемую глубину (скорость травления для $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ составляет $\sim 6,0$ мкм/ч, а для SiAlON $\sim 8,9$ мкм/ч). Предложенный подход обеспечивает удаление дефектного слоя и многократное снижение индекса дефектности промышленно выпускаемых керамических инструментов, заточка которых осуществляется алмазным шлифованием.

5. В целях повышения эксплуатационной надежности керамического инструмента широкой номенклатуры (сборных торцевых фрез и токарных резцов, а также цельных керамических концевых фрез) разработаны метод и технологические решения для комплексной модификации керамического инструмента, включающей воздействие пучками ускоренных частиц для удаления дефектного поверхностного слоя и последующее осаждение на «бездефектный» слой функциональных покрытий. Для возможности реализации комплексной модификации на базе запатентованных технических решений создана опытная многофункциональная технологическая установка, которая в едином цикле позволяет выполнять предварительное удаление дефектного слоя с поверхности

керамических инструментов и последующее осаждение широкой гаммы покрытий на базе нитридов, диборидов и алмазоподобных пленок.

6. Выполненный комплекс аналитических и экспериментальных исследований позволил выявить сильную зависимость характеристик сформированных покрытий от индекса дефектности поверхностного слоя керамической основы, увеличение которого резко повышает количество пор и несплошностей в покрытиях и снижает эффективность их применения в процессе резания. Комплексные трибологические испытания различных функциональных покрытий, сформированных на керамических пластинах, в условиях фреттинг-износа, абразивного воздействия и высокотемпературного трения-скольжения позволили выявить рациональные составы и рекомендовать для керамического инструмента ряд перспективных типов покрытий – $(\text{TiZr})\text{N}$, $(\text{TiAl})\text{N}/\text{TiB}_2$ и $(\text{CrAlSi})\text{N}/\text{DLC}$.

7. Проведенный комплекс лабораторных стойкостных испытаний сборных торцевых фрез и токарных резцов, оснащенных керамическими пластинами из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ и SiAlON , прошедшими комплексную модификацию поверхностного слоя в соответствии с предложенным методом и технологическими решениями, при фрезеровании закаленной стали и точении жаропрочного никелевого сплава позволил выявить значительное изменение характера развития износа инструмента с течением времени, обеспечить повышение наработки до отказа инструментов в 1,7 раза и уменьшение ее вариации, характеризующей надежность, в 2 раза относительно промышленно выпускаемых керамических инструментов.

8. Для обеспечения возможности замены дорогостоящих цельных концевых керамических фрез зарубежного производства разработана и практически реализована опытно-промышленная технология изготовления концевых фрез из перспективного керамического материала $\alpha\text{-}\beta/\text{SiAlON}$ с добавками наночастиц TiN , предусматривающая полный цикл производства инструмента – искровое плазменное спекание, многокоординатную алмазную заточку и комплексную модификацию поверхностного слоя. Выполненные аналитические и экспериментальные исследования позволили выявить рациональные состав

керамической композиции, основные геометрические параметры концевых керамических фрез и состав функционального покрытия $(\text{CrAlSi})\text{N}/\text{DLC-Si}$. Лабораторные стойкостные испытания при обработке жаропрочного никелевого сплава показали, что использование созданных цельных концевых фрез из керамики $\text{SiAlON}+\text{TiN}$, прошедших комплексную модификацию, увеличивает наработку до отказа в 1,4 раза по сравнению с фрезами из керамики $\text{SiAlON}+\text{Yb}_2\text{O}_3$ зарубежного производства.

9. Комплекс производственных испытаний керамического инструмента широкой номенклатуры (сборных торцевых фрез, оснащенных пластинами из $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, токарных резцов, оснащенных пластинами из SiAlON и $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, а также цельных керамических концевых фрез из $\text{SiAlON}+\text{TiN}$) на ведущих отечественных предприятиях машиностроения и ОПК – АО «Производственное объединение «Стрела», АО «Лыткаринский завод оптического стекла», АО «Машиностроительная компания «Витязь», филиал «НИИД» АО «ОДК», АО «Белебеевский завод «Автономаль» и АО «Уфимское агрегатное предприятие «Гидравлика» подтвердил высокую эффективность разработанных технических и технологических решений для повышения надежности инструмента при высокопроизводительной механообработке деталей из сталей повышенной твердости и труднообрабатываемых материалов. Промышленная апробация инновационного керамического инструмента, прошедшего комплексную модификацию, включающую воздействие пучками ускоренных частиц для удаления дефектного слоя и последующее осаждение функциональных покрытий $(\text{TiAl})\text{N}/\text{TiB}_2$, $(\text{CrAlSi})\text{N}/\text{DLC}$ и $(\text{TiAlSi})\text{N}/\text{DLC}$, обеспечила повышение наработки до отказа инструментов в 1,7-1,8 раза и уменьшение ее вариации в 2-4 раза в сравнении с образцами промышленно выпускаемого инструмента из керамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение эффективности обработки за счет использования режущего инструмента, оснащенного упрочненными пластинами из сверхтвердых материалов и режущей керамики / А.И. Пронин, В.В. Мыльников, И.И. Рожков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 10–3. – С. 377–380.
2. Волосова, М.А. Закономерности изнашивания режущих пластин из оксидной и нитридной керамики / М. А. Волосова, В. В. Кузин // Металловедение и термическая обработка. – 2012. – № 1 (679). – С. 40–46.
3. Benga, G. C. Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools / G. C. Benga, A. M. Abrao // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 143–144. – № 1. – P. 237–241.
4. Zhou, J. M. Identification of cutting errors in precision hard turning process / J. M. Zhou, M. Andersson, J. E. Ståhl // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 153–154. – № 1–3. – P. 746–750.
5. Surface finish on hardened bearing steel parts produced by superhard and abrasive tools / W. Grzesik, J. Rech, T. Wanat // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Vol. 47(2). – P. 255–262.
6. Керамика - Эффективная обработка жаропрочных сплавов. Sandvik Coromant. URL: <http://toolsol.ru/manuals/C-2929-61.pdf> (дата обращения: 09.07.2022).
7. AlN-TiB₂ Based Self-Lubricating Ceramic Insert Fabricated by Spark Plasma Sintering for Dry Turning Applications / K. M. Nambiraj, R. Rajeswari, S. Madhavan // Materials Science Forum. – 2015. – Vol. 830–831. – P. 67–70.
8. Correlation of Diamond Grinding Regimes with SiSiC-Ceramic Surface Condition / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // Refractories and Industrial Ceramics. – 2017. – Vol. 58. – P. 214–219.

9. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. – Старый Оскол: Изд-во «ТНТ», 2011. – 380с.

10. Формирование и механические свойства алюмоокислородной керамики на основе микро- и наночастиц оксида алюминия / Е. Г. Земцова, А. В. Монин, В. М. Смирнов [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2014. – Т. 17. – № 6. – С. 53–58.

11. Faber, K.T. Crack deflection processes – I. Theory / K. T. Faber, A. G. Evans // Acta Metallurgica. – 1983. – Vol. 31(4). – P. 565–576.

12. Microstructure and Mechanical Properties of β -SiAlON Ceramics Fabricated Using Self-Propagating High-Temperature Synthesized β -SiAlON Powder / M. Kim, S. Go, J. Kim, Y. Park // Journal of the Korean Ceramic Society. – 2017. – Vol. 54(4). – P. 292–297.

13. Черкасова, Н. Ю. Фазовый состав, структура и свойства композиционных керамических материалов на основе оксида алюминия и диоксида циркония с включениями гексаалюмината стронция, кандидатская диссертация : специальность 05.16.09 : диссертация ... кандидата технических наук / Черкасова Нина Юрьевна. – Новосибирск, 2019. – 181 с.

14. Heat conductivity, physico-mechanical properties and interrelations of them and structures of pressureless sintered composites produced of $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{(-ZrO}_2\text{)}$ nanodispersed system / O. N. Kaidash, I. P. Fesenko, Y. A. Kryl' // Journal of Superhard Materials. – 2014. – Vol. 36(2). – P. 96–104.

15. Novel fabrication route to $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$ nanocomposites via spark plasma sintering / L. Wang, T. Wu, W. Jiang [et al] // Journal of the American Ceramic Society. – 2006. – Vol. 89(5). – P. 1540–1543.

16. Suitability of the full body ceramic end milling tools for high speed machining of nickel based alloy Inconel 718 / D. Grguras, M. Kern, F. Pusavec // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 77. – P. 630–633.

17. Development of DLC-coated solid SiAlON/TiN ceramic end mills for nickel alloy machining: Problems and prospects / S. N. Grigoriev, M. A. Volosova, S. V. Fedorov [et al.] // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11 (5). – Article number 532.

18. Applications Advance for Solid Ceramic End Mills. URL: <https://www.practicalmachinist.com/modern-machine-shop/applications-advance-solid-ceramic-end-mills/> (дата обращения: 09.07.2022).

19. Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials, ed. R. J. Brook, Pergamon Press, Oxford, 1991, 604 p.

20. The critical raw materials in cutting tools for machining applications: A review / A. Rizzo, D. Valerini, S. Goel [et al.] // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. – № 6. – P. 1377.

21. Волосова, М. А. Исследование и систематизация поверхностных и объемных дефектов инструментальной керамики и основных направлений ее совершенствования / М. А. Волосова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 5 (125). – С. 3–8.

22. Гусев, В. В. Влияние хрупкого разрушения материала припуска керамики на формирование микрорельефа поверхности детали при алмазном шлифовании / В.В. Гусев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Машинобудування і машинознавство”. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – Вип. 71. – С. 22–27

23. Рогов, В. А. Исследование твердости и дефектности поверхности износостойкой конструкционной керамики на основе кварца после механической обработки / В. А. Рогов, М. И. Шкарупа // Физика, химия и механика трибосистем. – 2010. – № 9. – С. 27–32.

24. Литовский, Е. Я. Изменение структуры и теплофизических свойств кварцевой керамики в процессе быстрого нагрева / Е. Я. Литовский, Ф. С. Катан, С. Л. Бондаренко // Огнеупоры. – 1986. – № 11. – С. 42–46.

25. Кузин, В. В. Разработка режущих пластин из нитридной керамики для предварительной механической обработки деталей : специальность 05.03.01 :

диссертация ... доктора технических наук / Кузин Валерий Викторович. – Москва, 2007.

26. Kato, K. Tribology of ceramics / K. Kato // *Wear*. – 1990. – Vol. 136. – P. 117–133.

27. Wang, Yu. Wear and wear transition mechanisms of ceramics / Yu. Wang, S. Hsu // *Wear*. – 1996. – Vol. 195. – P. 112–122.

28. Матренин С.В., Слосман А.И. Техническая керамика: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 75 с.

29. Химическая технология керамики / под ред. И. Я. Гузмана. – Москва : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2003. – 493 с.

30. Крупа, А. А. Химическая технология керамических материалов / А. А. Крупа, В. С. Городов. – Киев: Віща школа, 1990. – 398 с.

31. Development Modes of Prior Free Sintering to Form a High-Density Fine Grain Ceramics after HIP / S. Veselov, N. Belousova, R. Timarevskiy, N. Cherkasova // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 698. – P. 457–460.

32. Sathiyakumar, M. Influence of MnO and TiO₂ additives on density, microstructure and mechanical properties of Al₂O₃ / M. Sathiyakumar, F. Gnanam // *Ceramics international*. – 2002. – Vol. 28 (2). – P. 195–200.

33. Collin, M. Analysis and prediction of thermal shock in brittle materials / M. Collin, D. Rowcliffe // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48. – № 8. – P. 1655–1665.

34. A Study of the Mechanism of Formation and Numerical Simulations of Crack Patterns in Ceramics Subjected to Thermal Shock / C. P. Jiang, X. F. Wu [et al] // *Acta Materialia*. – 2012. – Vol. 60. – P. 4540–4550.

35. Simulation of the Thermal Shock Cracking Behaviors of Ceramics Under Water Quenching for 3-Dimension Conditions / D. Li, R. Wang [et al] // *European Journal of Mechanics A-solids*. – 2020. – Vol. 84. – P. 104080.

36. Extension of Hasselman's Thermal Shock Theory for Crack/Microstructure Interactions in Refractories / V. R. Salvini, V. C. Pandolfelli, R. C. Bradt // *Ceramics International*. – 2012. – Vol. 38. – P. 5369–5375.

37. Волосова, М. А. Влияние поверхностной упрочняющей обработки на эксплуатационные показатели оксидно-карбидной керамики при точении закаленных сталей / М. А. Волосова, Г. В. Антоненкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S4–6. – С. 76–85.

38. Оценка надежности керамических инструментов при ограниченном объеме испытаний на основе установленных критериев износа / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. – 2018. – № 7. – С. 66–70.

39. Бекташов, Д.А. Исследования уровня надежности механических систем чистового формообразования деталей энергетических устройств / Д. А. Бекташов, А.А. Кrapостин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – Иваново: ИГЭУ, № 2/2012. – С. 63–65.

40. Климов, А. Б. Прогнозирование стойкости минералокерамического режущего инструмента на основе нейросетевых моделей его изнашивания : специальность 05.03.01 : диссертация ... кандидата технических наук / Климов Алексей Борисович. – Иваново, 2006. – 125 с.

41. 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.

42. Vigneau, J. Reliability of ceramic cutting tools / J. Vigneau, P. Bordel, R. Geslot // CIRP Annals. – 1988. – Vol. 37. – P. 101–104.

43. Improvement in Reliability of Ceramic Cutting Tool using a Damping System and Nano-structured Multi-layered Composite Coatings / A. A. Vereschaka, A. D. Batako, A. A. Krapostin [et al.] // Procedia CIRP : 50th, Taichung, 03–05 may 2017. – Taichung, 2017. – P. 563-568.

44. Wachtman, J.B. Mechanical properties of ceramics / J. B. Wachtman, W. R. Cannon, M. J. Matthewson. – 2nd ed. – Hoboken: Wiley, 2009. – xvi, 479 p.: ill.

45. Experimental Investigations on Sialon Ceramic Inserts Ultra-High-speed Milling Inconel 718 / Guangming Zheng, Jun Zhao [et al] // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 3(5). – P. 633–640.

46. Grigoriev, S. N. Multilayer composite nanoscale coatings as a method to increase reliability and tool life of cutting tools made of mixed ceramic $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ / S. N. Grigoriev, A. A. Krapostin // Mechanics & Industry. – 2016. – Vol. 17. – P. 704.

47. Javier Alejandro Dominguez Caballero. Live Tool Condition Monitoring of SiAlON Inserted Tools whilst Milling Nickel-Based Super Alloys. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. The University of Sheffield Department of Mechanical Engineering, 2017, 221 p.

48. In-process detection of chipping in ceramic cutting tools during turning of difficult-to-cut material using vision-based approach / W. K. Lee, M. M. Ratnam, Z. A. Ahmad // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 85. – P. 1275–1290.

49. Damage mechanics analysis of failure mechanisms for ceramic cutting tools in intermittent turning / X. Cui, J. Zhao, Y. Zhou, G. Zheng // European Journal of Mechanics A-solids. – 2013. – Vol. 37. – P. 139–149.

50. Разработка концепции и инструментария комплексного анализа моно- и многослойных пленок на основе сложных нитридов и алмазоподобных структур для создания адаптивных функциональных покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами : отчет о НИР АААА-А20-120032790043-7 (промежуточ.) / ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» ; рук. М.А. Волосова. – Москва, 2020. – 130 с. – № ГР 221021000362-3.

51. Синопальников, В. А. Надежность и диагностика технологических систем / В. А. Синопальников, С. Н. Григорьев. – Москва : Высшая школа, 2003. – 342 с.

52. Надежность и диагностика автоматизированных станков : Учебное пособие / Б. М. Бржозовский и др. – Саратов, 2004 г. – 153 с.

53. Верещака, А.С. Резание материалов : Учебник / А. С. Верещака, В. С. Кушнер. – Москва: Высш. шк., 2009. – 535 с.

54. Диагностика автоматизированного производства / С.Н. Григорьев, В.Д. Гурин, М.П. Козочкин и др.; под. ред. С.Н. Григорьева. – Москва : Машиностроение, 2011. – 600 с.

55. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения : учебное пособие для вузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – 3-е изд. – Москва : Academia, 2003. – 459 с.

56. Гнеденко, Б.В. Математические методы теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – Москва: Наука, 1985. – 524 с.

57. Анцев, А. В. Повышение эффективности эксплуатации лезвийного инструмента при неопределенности условий обработки: специальность 05.02.07 : диссертация ... доктора технических наук / Анцев Александр Витальевич. – Москва, 2020. – 370 с.

58. Крапостин, А. А. Обеспечение надежности резцов оснащенных керамикой на основе повышения динамических характеристик резания и применения наноструктурированных многослойных покрытий : специальность 05.02.07 : диссертация ... кандидата технических наук / Крапостин Алексей Александрович. – Москва, 2015. – 183 с.

59. Шашок, А. В. Прогнозирование стойкости и надежности токарных резцов : специальность 05.03.01 : диссертация ... кандидата технических наук / Шашок Александр Васильевич. – Барнаул, 2001. – 157 с.

60. Ивченко, Т. Г. Прогнозирование параметров закона распределения стойкости режущего инструмента как случайной величины / Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. – № 3(54). – С. 49–54.

61. Гурин, В. Д. Повышение эффективности фрезерования на станках с ЧПУ путем комплексного диагностирования состояния инструмента в реальном времени : специальность 05.02.07 : диссертация ... доктора технических наук / Гурин Владимир Дмитриевич. – Москва, 2011. – 248 с.

62. ГОСТ Р 50779.21-2004. Национальный стандарт российской федерации. Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических

характеристик по выборочным данным Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004.

63. Анцев, А. В. Расчет надежности многолезвийного режущего инструмента при черновой обработке на основе статистического моделирования / А. В. Анцев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – № 4–2 (336). – С. 182–190.

64. Мироненко, Е. В. Исследование стабильности обработки на регламенты эксплуатации режущего инструмента при многокритериальной оптимизации / Е. В. Мироненко, Л. В. Васильева // Вісник СевНТУ. Сер.: Машиноприладобудування та транспорт : сб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010 – Вип. 107: – С. 151–156.

65. Симагина, Е. В. Повышение работоспособности режущего инструмента с наноструктурными покрытиями / Е. В. Симагина, Ю. В. Агабеков // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2010. – № 2 (81). – С. 98–104.

66. Метод ускоренных сравнительных испытаний монокристаллических твердосплавных сверл / В. Андреев, В. Балков, Г. Боровский, С. Молодык // Станкоинструмент. – 2016. – № 2 (3). – С. 60–65.

67. Подготовка режущего инструмента для гибких автоматизированных производств / А. С. Янюшкин, С. А. Якимов, А. Б. Лосев, Н. П. Петров // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 2 (2). – С. 78–81.

68. Тарасов, С. С. Повышение эффективности токарной обработки криволинейных поверхностей дисков и кольцевых деталей ГТД из жаропрочных сплавов за счет применения инструмента из режущей керамики: специальность 05.02.07 : диссертация ... кандидата технических наук / Тарасов Сергей Сергеевич. – Рыбинск, 2013. – 178 с.

69. Волосова, М. А. Повышение эксплуатационных характеристик керамических режущих инструментов с помощью абразивной обработки и нанесения покрытий / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, Н. Ю. Черкасова // Технология машиностроения. – 2012. – № 1. – С. 36–40.

70. Бекташов, Д. А. Повышение надежности и работоспособности минералокерамического режущего инструмента путем совершенствования износостойких покрытий : специальность 05.03.01 : диссертация ... кандидата технических наук / Бекташов Дмитрий Алиевич. – Иваново, 2002. – 106 с.

71. Кочина, Т. Б. Износ керамических инструментальных материалов при высокоскоростном резании жаропрочных никелевых сплавов // Т. Б. Кочина // Металлообработка. – 2013. – № 2 (74). – С. 7–13.

72. Перетягин, П. Ю. Повышение эксплуатационных характеристик токарных резцов, оснащенных режущими пластинами из керамики, при чистовом точении жаропрочного сплава путем использования графена и технологии искрового плазменного спекания: специальность 05.02.08 : диссертация ... кандидата технических наук / Перетягин Павел Юрьевич. – Москва, 2017. – 184 с.

73. Bitterlich, B. SiAlON based ceramic cutting tools / B. Bitterlich, K. Friederich, S. Bitsch // Journal of the European Ceramic Society. – 2008. – Vol. 28. – № 5. – P. 989–994.

74. Experimental Investigation on Sialon Ceramic Inserts for Ultra-high-speed Milling of Inconel 718 / G. Zheng, J. Zhao [et al] // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 31. – P. 633–640.

75. Shalaby, M. A. Effect of Cutting Speed on Chipping and Wear of the SiAlON Ceramic Tool in Dry Finish Turning of the Precipitation Hardenable IN100 Aerospace Superalloy / M. A. Shalaby, S. C. Veldhuis // Journal of Tribology. – 2019. – Vol. 141. – No 2. – P. 021604.

76. Seleznev, A. Ceramic cutting materials and tools suitable for machining high-temperature nickel-based alloys: A review / A. Seleznev, N. W. S. Pinargote, A. Smirnov // Metals. – 2021. – Vol. 11. – No 9. – P. 1385.

77. Волков, Д. И. Применение высокоскоростной токарной обработки при изготовлении деталей из жаропрочных никелевых сплавов / Д. И. Волков, С. Л. Проскуряков, С. С. Тарасов // Вестник РГАТУ. – 2012. – №21 (23). – С. 134–137.

78. Реслер, И. Механическое поведение конструкционных материалов / И. Реслер, Х. Хардерс, М. Бекер; пер. с нем. под ред. С. Л. Баженова. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 502 с.

79. Rittidech, A. The relationship between microstructure and mechanical properties of Al_2O_3 – MgO ceramics / A. Rittidech, L. Portia, T. Bongkarn // *Materials Science and Engineering: A*. – 2006. – Vol. 438. – P. 395–398.

80. Smuk, B. Alumina ceramics with partially stabilized zirconia for cutting tools / B. Smuk, M. Szutkowska, J. Walter // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 133 (1–2). – P. 195–198.

81. Rahaman, M. N. Ceramic processing and sintering / M. N. Rahaman. – New York CRC press, 2003. – 875 p.

82. Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses, Eds. S. Hampshire and M. Pomeroy, Elsevier, p. 519–539 (2021).

83. Effect of the pressureless post-sintering on the hot isostatic pressed Al_2O_3 prepared from the oxidized AlN powder / K. Balázs, D. Varanasi, Z. E. Horváth, M. Furko // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 8250.

84. Transparent tetragonal-cubic zirconia composite ceramics densified by spark plasma sintering and hot isostatic pressing / A. Dash, B. N. Kim, J. Klimke, J. Vleugels // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2019. – Vol. 39 (4). – P. 1428–1435.

85. Challenges and Opportunites for Spark Plasma Sintering: A Key Technology for a New Generation of Materials / M. Suarez, A. Fernandez [et al] // *INTECH*. – 2013. – Vol. 13. – P. 319 – 342.

86. Microstructure of Spark Plasma-Sintered Silicon Nitride Ceramics / O. A. Lukianova, V. Y. Novikov, A. A. Parkhomenko [et al] // *Nanoscale Research Letters*. – 2017. – Vol. 12. – P. 293.

87. Effect of Sintering Temperature and Yttrium Composition on the Densification, Microstructure and Mechanical Properties of Spark Plasma Sintered Silicon Nitride Ceramics with Al_2O_3 and Y_2O_3 Additives / N. Jojo,

M. B. Shongwe, L. C. Tshabalala [et al]// Silicon. – 2019. – Vol. 11. – P. 2689–2699.

88. The effect of TiC additives on mechanical and electrical properties of Al₂O₃ ceramic / S. N. Grigoriev, M. A. Volosova, P. Y. Peretyagin [et al] // Applied Sciences (Switzerland). – 2018. – Vol. 8 (12). – Article number 2385.

89. Rathel, J. Temperature distribution for electrically conductive and non-conductive materials during field assisted sintering (FAST) / J. Rathel, M. Hermann, W. Beckert // Journal of the European Ceramic Society. – 2009. – Vol. 29(8). – P. 1419 – 1425.

90. Field-assisted sintering technology/spark plasma sintering: mechanisms, materials, and technology developments / O. Guillon, J. Gonzalez-Julian [et al] // Advanced Engineering Materials. – 2014. – Vol. 16 (7). – P. 830–849.

91. Волосова, М. А. Режущие пластины из керамики: влияние абразивной обработки и покрытий на их эксплуатационные показатели / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев // Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. – №2(14). – С. 68–74.

92. Патент № 2491367 С1 Российская Федерация, МПК С23С 14/32, В24В 1/00, С04В 35/00. Способ изготовления режущих керамических пластин из нитридной керамики : № 2012107476/02 : заявл. 29.02.2012 : опубл. 27.08.2013 / С. Н. Григорьев, М. А. Волосова, Н. Ю. Черкасова, И. В. Валуева ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН").

93. Shao, Y. Predictive modeling of residual stress in MQL grinding and surface characteristics in grinding of ceramics : A Dissertation Presented to The Academic Faculty / Yamin Shao. – Georgia Institute of Technology, 2015. – 166 p.

94. Grinding damage assessment on four high-strength ceramics / J. J. Canneto, M. Cattani-Lorente, S. Durual [et al] // Dent Mater. – 2016. – Vol 32(2). – P. 171–82.

95. Ultra-precision grinding of PZT ceramics – surface integrity control and tooling design / S. Arai, S. A. Wilson, J. Corbett [et al] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Vol. 49(12/13). – P. 998–1007.

96. A comparative analysis of ceramic and cemented carbide end mills / Klaus Dröder, Bernhard Karpuschewski, Eckart Uhlmann [et al] // Production Engineering. – 2020. – Vol. 14. – P. 335–364.

97. Mechanisms of ductile mode machining for AlON ceramics / C. Zhang, H. Liu, Q. Zhao [et al] // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46(2). – P. 1844–1853.

98. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский // Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Машиностроение. – 1968. – 480 с.

99. Бакунов, В. С. К вопросу об анализе структуры керамики / В. С. Бакунов, А. В. Беляков // Известия РАН. Неорганические материалы. – 1996. – № 2. – С. 243–248.

100. Kuzin, V. V. Microstructural Model of the Surface Layer of Ceramics After Diamond Grinding Taking into Account Its Real Structure and the Conditions of Contact Interaction with Elastic Body / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refractories and Industrial Ceramics. – 2020. – Vol. 61. – № 3. – P. 303–308.

101. Федоров, М. Ю. Разработка канавочных резцов с режущими пластинами из нитридной керамики для высокопроизводительной обработки деталей из закаленных сталей : специальность 05.02.07 : диссертация ... кандидата технических наук / Федоров Михаил Юрьевич. – Москва, 2011. – 149 с.

102. Федоров, С. Ю. Повышение производительности прерывистого точения отливок из серых чугунов на основе разработки режущих пластин из нитридной керамики : специальность 05.02.07 : диссертация ... кандидата технических наук / Федоров Сергей Юрьевич. – Москва, 2011. – 148 с.

103. Biermann, D. A study of grinding silicon nitride and cemented carbide materials with diamond grinding wheels / D. Biermann, E. Würz // *Production Engineering*. – 2009. – № 411.

104. Grinding and polishing efficiency of a novel self-glazed zirconia versus the conventional dry-pressed and sintered zirconia ceramics / B. Ji, A. A. Alrayes, J. Zhao [et al] // *Advances in Applied Ceramics*. – 2019. – Vol. 118(1–2). – P. 46–55.

105. Effect of grinding and heat treatment on the mechanical behavior of zirconia ceramic / G. F. Ramos, G. K. Pereira, M. Amaral [et al] // *Brazilian Oral Research*. – 2016. – Vol. 30(1).

106. Никитков, Н. В. Решение проблемы изготовления высококачественных плоскостных деталей из конструкционной керамики : специальности 05.02.08, 05.03.01 : диссертация ... доктора технических наук / Никитков Николай Валентинович. – Ленинград, 1990. – 577 с.

107. Лавриненко, В. И. Научные основы шлифования инструментальных материалов с направленным изменением характеристик контактных поверхностей : специальность 05.03.01 : диссертация ... доктора технических наук / Лавриненко Валерий Иванович. – Киев, 2000. – 495 с.

108. Бахарев, В. П. Обеспечение качества поверхности изделий из керамических материалов на операциях прецизионной алмазной обработки : диссертация ... доктора технических наук : специальность 05.02.07 : диссертация ... доктора технических наук / Бахарев Вениамин Павлович. – Москва, 2011. – 318 с.

109. Душко, О. В. Обеспечение эффективности алмазно-абразивной обработки изделий из высокотвердой керамики : специальность 05.02.07 : диссертация ... доктора технических наук / Душко Олег Викторович. – Волгоград, 2019. – 253 с.

110. Сытник, А. А. Повышение эффективности алмазного шлифования многогранных пластин из режущей керамики : специальность 05.03.01 : диссертация ... кандидата технических наук / Сытник Алексей Алексеевич. – Москва, 1991. – 165 с.

111. Колодяжный, А. Ю. Повышение эффективности операций плоского шлифования и доводки заготовок из высокотвердой керамики : специальность 05.02.08 : диссертация ... кандидата технических наук / Колодяжный Алексей Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2004. – 253 с.

112. Handbook of Ceramics Grinding and Polishing / generals editorship I. D. Marinescu, T. K. Doi, E. Uhlmann. – Japan : Elsevier, 2015. – 486 p.

113. Душко, О. В. Пути снижения толщины дефектного слоя на поверхности высокотвердых керамических материалов / О. В. Душко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2011. – № 25(44). – С. 163–170.

114. Гусев, В. В. Назначение режимов резания при алмазном шлифовании конструкционной керамики [Текст] / В. В. Гусев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2006. – с. 6–16.

115. Горелов, В. А. Особенности механической обработки деталей из керамических материалов / В. А. Горелов, С. В. Алексеев // Известия МГТУ МАМИ. – 2012. – Т. 2. – № 2(14). – С. 64–67.

116. ГОСТ 25003-81. Группа В56. Межгосударственный стандарт. Пластины сменные многогранные керамические. Технические условия. Конструкция и размеры: Сб. стандартов. – Москва: Стандартинформ, 2006.

117. ISO 9361-1-2014. Indexable inserts for cutting tools - Ceramic inserts with rounded corners - Part 1: Dimensions of inserts without fixing hole. – Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2014.

118. ISO 9361-2-2011. Indexable inserts for cutting tools - Ceramic inserts with rounded corners - Part 2: Dimensions of inserts with cylindrical fixing hole. – Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2011.

119. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура

поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. Сб. стандартов. – Москва: Стандартинформ, 2019.

120. Упрочнение керамического металлорежущего инструмента путем модифицирующей обработки / Б. Я. Мокрицкий, М. А. Волосова, А. А. Верещака, А. С. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – № 4(148). – С. 147–152.

121. Технологические процессы повышения работоспособности металлорежущего инструмента : учебное пособие / А. С. Верещака, В. В. Высоцкий, Б. Я. Мокрицкий, П. А. Саблин ; Комсомольский-на-Амуре Государственный университет. – Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2013. – 208 с.

122. Исследование влияния керамических материалов на работоспособность режущего инструмента / В. В. Мыльников, А. И. Пронин, Е. А. Чернышов // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2011. – № 1(86). – с. 227–232.

123. Верещака, А. С. Разработка и исследования изготовления инструмента из композиционной режущей керамики с функциональным покрытием / А. С. Верещака, Е. С. Сотова, М. Н. Лазарева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S5. – С. 269–275.

124. Михайлов, М. Д. Современные проблемы материаловедения. Нанокompозитные материалы : Учебное пособие для магистров по направлению "Материаловедение и технологии материалов" / М. Д. Михайлов. – Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, 2010. – 207 с.

125. The role of thin-film vacuum-plasma coatings and their influence on the efficiency of ceramic cutting inserts / M. Volosova, S. Grigoriev, A. Metel, A. Shein // Coatings. – 2018. – Vol. 8. – № 8. – P. 287.

126. Modelling of laser induced surface modification of ceramic substrates / U. Duitsch, S. Schreck, M. Rohde // Journal de Physique Archives. – 2004. – Vol. 120. – P. 389–395.

127. Effect of pulsed laser radiation on the surface of ceramic VOK71 / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. Y. Fedorov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. – 2015. – Vol. 56. – № 4. – P. 390-393.

128. Патент № 2712154 Российская Федерация, МПК C23C 3/00(2006.01). Способ повышения износостойкости режущих пластин из оксидно-карбидной керамики при фрезеровании : № 2019128035 : заявл. 06.09.2019 : опубл. 24.01.2020 / Григорьев С.Н., Волосова М.А. ; заявитель ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН». – 15 с. : ил.

129. Патент № 2020132869 Российская Федерация, МПК B23B 27/00(2006.01), B23P 15/30(2006.01), C23C 14/58(2006.01). Способ модификации поверхностного слоя режущих пластин из инструментальной керамики, предназначенной для точения никелевых сплавов : № 2020132869 : заявл. 06.10.2020 : опубл. 15.07.2021 / Волосова М. А. ; заявитель ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН». – 23 с. : ил.

130. Ablation of aluminum oxide ceramics using femtosecond laser with multiple pulses / Ching-Yen Ho, Yu-Hsiang Tsai, Cheng-Sao Chen [et al] // Current Applied Physics. – 2011. – Vol. 11(3). – P. S301–S305.

131. Microstructure of TiAlN and CrAlN coatings and cutting performance of coated silicon nitride inserts in cast iron turning / Ying Long, Junjie Zeng, Donghai Yu, Shanghua Wu // Ceramics International. – 2014. – Vol. 40(7). – Part A. – P. 9889-9894.

132. PVD-CrAlN and TiAlN coated Si₃N₄ ceramic cutting tools – 1. Microstructure, turning performance and wear mechanism / Wei Liu, Quanquan Chu, Junjie Zeng [et al] // Ceramics International. – 2017. – Vol. 43(12). – P. 8999–9004.

133. Cutting performance and wear mechanism of Ti–Al–N/Al–Cr–O coated silicon nitride ceramic cutting inserts / Ying Long, Junjie Zeng, Wu Shanghua // Ceramics International. – 2014. – Vol. 40(7). – Part A. – P. 9615-9620.

134. Experimental investigation into machinability of hardened AISI 4140 steel using TiN coated ceramic tool / Sudhansu Ranjan Das, Debabrata Dhupal, Amaresh Kumar // Measurement. – 2015. – Vol. 62. – P. 108–126.

135. Tool life and wear mechanism of coated and uncoated $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCN}$ mixed ceramic tools in turning hardened alloy steel / K. Aslantas, İ. Uzun, A. Çicek // *Wear*. – 2012. – V. 274–275. – P. 442–451.

136. Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process / Hamza Bensouilah, Hamdi Aouici, Ikhlas Meddour [et al] // *Measurement*. – 2016. – Vol. 82. – P. 1–18.

137. Dobranski, L. A. The Structure and Properties of PVD and CVD Coated Al_2O_3 -TiC Mixed Oxide Tool Ceramic for Dry on High Speed Cutting Processes/ L. A. Dobranski, J. Mikula // *Journal of Material Processing Technology*. – 2005. – Vol. 164–165. – P. 822–831.

138. Kumar, C. S. Experimental and numerical investigations on the effect of varying AlTiN coating thickness on hard machining performance of Al_2O_3 -TiCN mixed ceramic inserts / C. S. Kumar, S. K. Patel // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 309. – P. 266–281.

139. Si_3N_4 ceramic cutting tool sintered with CeO_2 and Al_2O_3 additives with AlCrN coating / J. V. C. Souza, O. M. Macedo, M. C. A. Nono [et al] // *Materials Research*. – 2011. – Vol. 14(4). – P. 514–518.

140. Investigation of the structure and properties of PVD coatings and ALD+PVD hybrid coatings deposited on sialon tool ceramics / M. Staszuk, D. Pakuła, G. Chladek [et al] // *Vacuum*. – 2018. – Vol. 154. – P. 272–284.

141. Тополянский, П.А. Исследование адгезионных свойств и механизма образования покрытия, наносимого методом финишного плазменного упрочнения // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 7-й Международной практической конференции-выставки 12–15 апреля 2005, г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2005. С. 316–333.

142. Morphology and genealogy of structural defects in vacuum ion-plasma coatings / O. V. Kudryakov, V. N. Varavka, I. Yu. Zabiya [et al] // *Advanced Engineering Research*. – 2020. – Vol. 20(3). – P. 269–279.

143. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization / K. D. Bouzakis, N. Michailidis, S. Georgios [et al] // CIRP Annals. – 2012. – Vol. 61(2). – P. 703–723.

144. Nanostructured coatings for tooling applications / A. Koepf, J. Keckes, J. Todt [et al] // International journal of refractory metals and hard materials. – 2017. – Vol. – 62. – Part B. – P. 219–224.

145. High-strength Ceramic Cutting Tools with Multipurpose Coatings for Highly Effective Processing of Tempered Steel / S. Grigoriev, M. Volosova, A. Vereshchaka, A. Seleznev // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1064. – P. 148–153.

146. Волосова, М. А. Систематизация методов нанесения покрытий и модификации рабочих поверхностей режущего инструмента и алгоритм их выбора / М. А. Волосова, А. А. Туманов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. – № 3 (15). – С. 78–83.

147. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nanostructured coatings and their influence on cutting tool life / A. A. Vereschaka, S. N. Grigoriev, N. N. Sitnikov [et al] // Wear. – 2017. – Vol. 390–391. – P. 209–219.

148. Development of wear-resistant complex for high-speed steel tool when using process of combined cathodic vacuum arc deposition / A. A. Vereschaka, M. A. Volosova, S. N. Grigoriev, A. S. Vereschaka // Procedia CIRP, Patras, 11–12 june 2013. – Patras, 2013. – P. 8–12.

149. Кузин, В.В. Микроструктурная модель поверхностного слоя керамики после алмазного шлифования, учитывающая его реальную структуру и условия контактного взаимодействия с упругим телом / В.В. Кузин, С.Н. Григорьев, М.А. Волосова // Новые огнеупоры. – 2020. – № 5. – С. 59–64.

150. Gogotsi, G.A. Edge chipping resistance of ceramics: Problems of test method / G.A. Gogotsi // Journal of Advanced Ceramics. – 2013. – 2(4). – P. 370–377.

151. Розенберг, А. М. К вопросу об интенсивности износа резцов при точении серого чугуна / А. М. Розенберг, А. К. Байкалов // Известия Томского политехнического института. [Известия ТПИ]. – 1957. – Т. 85. – С. 230 – 239.

152. Structure and Microporosity of Ion-Plasma Condensed Coatings Deposited from a Two-Phase Vacuum-Arc Discharge Plasma Flow Containing Evaporated Material Microdroplets. / S. A. Muboyadzhyan, S. A. Budinovskii, D. S. Gorlov, [et al] // Russian Metallurgy. – 2019. – P. 52 – 62.

153. Physical mechanisms of macroparticles number density decreasing on a substrate immersed in vacuum arc plasma at negative high frequency short-pulsed biasing / A. I. Ryabchikov, D. O. Sivin, A. I. Bumagina // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 305. – P. 487 – 491.

154. Properties of (Cr,Al,Si)N-(DLC-Si) composite coatings deposited on a cutting ceramic substrate / S. N. Grigoriev, M. A. Volosova, A. A. Vereschaka, N. N. Sitnikov, F. Milovich, J. I. Bublikov, S. V. Fyodorov, A. E. Seleznev // Ceramics international. - 2020. - Vol. 46. - issue 11. - Part A. – P. 18241-18255.

155. Генератор плазмы на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом большого объема / И. В. Лопатин, Ю. Х. Ахмадеев, Н. Н. Коваль, П. М. Щанин // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 1. – С. 151 – 156.

156. Коваль, Н. Н. Источники электронов с сеточным плазменным эмиттером: прогресс и перспективы / Н. Н. Коваль, В. Н. Девятков, М. С. Воробьев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. – Т. 63. – № 10. – С. 7 – 16.

157. Метель, А.С. Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов для генерации плазмы и пучков ускоренных частиц, докторская диссертация : специальность 01.04.08 : диссертация ... доктора физико-математических наук / Метель Александр Сергеевич. – Москва, 2005. – 267 с.

158. Патент № 2702623 Российская Федерация, МПК H01J27/04. Источник быстрых нейтральных молекул: № 2018145829: заявл. 24.12.2018: опубл. 09.10.2019 / Метель А.С., Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мельник Ю.А.; заявитель ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН». – 9 с. : ил.

159. Патент № 2716133 Российская Федерация, МПК H01J27/04. Источник быстрых нейтральных молекул: № 2018145829: заявл. 24.12.2018: опубл. 09.10.2019 / Метель А.С., Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мельник Ю.А.; заявитель ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». – 9 с. : ил.

160. Берлин, Е.В. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е.В. Берлин, С.А. Двинин, Л.А. Сейдман // М.: Техносфера. – 2007. – С. 56.

161. Plasma etching properties of various transparent ceramics / Ji-Hoon Min, Jaehyung Lee, Muhammad Tsabit Ayman, Ha-Neul Kim, Young-Jo Park, Dang-Hyok Yoon // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46. – issue 3. – P. 2895-2900.

162. Семенов А.А. Распыление керамик и керамических композитов потоками ионов низких энергий : специальность 05.07.05 : диссертация ... кандидата технических наук / Семенов Александр Анатольевич. – Москва, 2015. – 103 с.

163. Патент № 2726187 Российская Федерация, МПК H01J 27/04(2006.01), H01J 37/34 (2006.01), C23C 14/35 (2006.01). Устройство для обработки изделий быстрыми атомами : № 2019138589 : заявл. 28.11.2018 : опубл. 09.07.2020 / Метель А.С., Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мельник Ю.А., Мустафаев Э.С., Нэй Х.А. ; заявитель ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН». – 9 с. : ил.

164. Патент № 2752877 Российская Федерация, МПК H01J 37/34(2006.01), H01J 27/04(2006.01), H05H 3/00(2006.01), C23C 14/35(2006.01). Устройство для обработки диэлектрических изделий быстрыми атомами : № 2020140917 : заявл. 11.12.2020 : опубл. 11.08.2021 / Григорьев С.Н., Метель А.С., Волосова М.А., Мельник Ю.А., Мустафаев Э.С. ; заявитель ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». – 10 с. : ил.

165. Патент №2778246 Российская Федерация, МПК H01J 27/04 (2006.01) Устройство для обработки изделий быстрыми атомами: № 2021135435 : заявл. 02.12.2021 : опубл. 16.08.2022 / Метель А.С., Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мельник Ю.А., Мустафаев Э.С. ; заявитель ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». - 6 с. : ил.

166. Патент № 2657896 Российская Федерация, МПК C23C 14/24(2006.01). Устройство для синтеза покрытий : № 2017131582 : заявл. 11.09.2017 : опубл. 18.06.2018 / Григорьев С.Н., Метель А.С., Волосова М.А., Мельник Ю.А. ; заявитель ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН». – 10 с. : ил.

167. Патент № 2656480 Российская Федерация, МПК H01J 27/04(2006.01), C23C 14/56(2006.01), C23C 14/35(2006.01), C23C 14/06(2006.01). Устройство для осаждения покрытий : № 2017131580 : заявл. 11.09.2017 : опубл. 05.06.2018 / Григорьев С.Н., Метель А.С., Волосова М.А., Мельник Ю.А. ; заявитель ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». – 9 с. : ил.

168. Plasma-Beam Processing of Tools Made of SiAlON Dielectric Ceramics to Increase Wear Resistance When Cutting Nickel–Chromium Alloys / A. Metel, M. Volosova, E. Mustafaev, Y. Melnik, A. Seleznev, S. Grigoriev // Coatings. – 2022. - Vol. 12(4). – P. 469.

169. Трибология многослойных композиционных твердых смазочных покрытий на Силоне для использования их в узлах трения ГТД / Л.Н. Лесневский, М.А. Ляховецкий, И.А. Николаев, М.А. Волосова // Вестник УГАТУ. – 2022. – Т. 26. – №2 (96). – С. 13-22.

170. Кузин, В. В. Проектирование концевых керамических фрез для инновационных технологических процессов с учетом их напряженно-деформированного состояния. Выбор керамики. Часть 1 / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. – 2018. – № 10. – С. 68–73.

171. Патент US 8,647,025 B2 Monolithic Ceramic End Mill B23C5/10 Kennametal Inc., Latrobe, PA (US). Feb. 11, 2014

172. Патент US 2016/0228955 A1 End milling cutter for Heat-resistant alloys. B23C 5/10. Walter AG, Tübingen (DE). Aug. 11, 2016

173. Патент US 2017/0304910 A1 Ceramic End Mill And Method For Cutting Difficult-To-Cut Material Using The Same B23C 5/10. Mitsubishi Hitachi Tool Engineering, LTD., Tokyo (JP). Oct . 26 , 2017

174. Патент US 9,884,379 B1 Ceramic Face Mill With Circular Arc Profile for machining Inconel. B23C 5/10. ISCAR LTD, Tefen (IL). Feb . 6 , 2018

175. Патент № 2725533 C1 Российская Федерация, МПК B23C 5/10. Цельная концевая керамическая фреза : № 2019145011 : заявл. 30.12.2019 : опубл. 02.07.2020 / В. А. Гречишников, С. Н. Григорьев, П. М. Пивкин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический институт "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН").

176. Stability and oxidation properties of RE- α -sialon ceramics (RE = Y, Nd, Sm, Yb) / L. O. Nordberg, M. Nygren, P. O. Käll, Z. Shen // Journal of the American Ceramic Society. – 2005. – Vol. 81(6). – P. 1461–1470.

177. Nekouee, K. A. Synthesis and properties evaluation of β -SiAlON prepared by mechanical alloying followed by different sintering technique / K. A. Nekouee, R. A. Khosroshahi // International Journal of Materials Research. – 2016. – Vol. 107. – P. 1129–1135.

178. Lu, H. H. Effect of Y_2O_3 and Yb_2O_3 on the microstructure and mechanical properties of silicon nitride / H. H. Lu, J. L. Huang // Ceramics International. – 2001. – Vol. 27 (6). – P. 621–628.

179. Microstructure and mechanical properties of TiN/Si₃N₄ nanocomposites by spark plasma sintering (SPS) / C. H. Lee, H. H. Lu, C. A. Wang [et al] // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – 508 (2). – P. 540–545.

180. Ayas, E. A novel approach for preparing electrically conductive α/β SiAlON-TiN composites by spark plasma sintering / E. Ayas, A. Kara, F. Kara // Journal of the Ceramic Society of Japan. – 2008. – Vol. 116 (1355). – P. 812–814.

181. First-principles investigation of titanium doping into β -SiAlON crystal in TiN–SiAlON composites for EDM applications / A. Kandemir, C. Sevik, H. Yurdakul, S. Turana // Materials Chemistry and Physics. – 2015. – 162 (15). – P. 781–786.

182. Oxidation resistance of β -Sialon/TiN composites: an ion beam analysis (IBA) study / P. Calloch, W. J. Trompetter, I. W. M. Brown, K. J. D. MacKenzie // *Journal of Materials Science*. – 2018. – Vol. 53. – P. 15348–15361.

183. Microwave Sintering of SiAlON Ceramics with TiN Addition / Ö. S. Canarslan, R. Rosa, L. Köroğlu [et al.] // *Materials (Basel)*. – 2019. – Vol. 12(8). – PMC6515423.

184. Wire electrical discharge machining, mechanical and tribological performance of TiN reinforced multiscale sialon ceramic composites fabricated by spark plasma sintering / S. Grigoriev, M. Volosova, S. Fedorov [et al.] // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2021. – Vol. 11. – No 2. – P. 1–12.

185. Разработка конструкции цельной концевой керамической фрезы с тороидальной формой режущей части / В. А. Гречишников, С. Н. Григорьев, П. М. Пивкин [и др.] // *Стин*. — 2019. — № 7. — с. 31–35.

186. DLC-coating Application to Improve the Durability of Ceramic Tools / S. Grigoriev, M. Volosova, S. Fyodorov [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2019. – Vol. 28. – P. 4415–4426.

187. Influence of dlc coatings deposited by pecvd technology on the wear resistance of carbide end mills and surface roughness of AlCuMg₂ and 41Cr4 workpieces / S. N. Grigoriev, M. A. Volosova, S. V. Fedorov, M. Mosyanov // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10. – № 11. – P. 1-25.

188. A study of the mechanical properties of nanowires using nanoindentation / G. Feng, W. D. Nix, Y. Yoon, C. J. Lee // *Journal of Applied Physics*. – 2006. – Vol. 99. – № 7.

189. Sobol, O. V. Effect of the preparation conditions on the phase composition, structure, and mechanical characteristics of vacuum-Arc Zr-Ti-Si-N coatings / O. V. Sobol, A. D. Pogrebnyak, V. M. Beresnev // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2011. – Vol. 112. – No 2. – P. 188-195.

190. Effect of PACVD deposition of nitride and Si-containing amorphous hydrogenated carbon films on the tribological characteristics of SiAlON ceramics / M. A. Volosova, S. V. Fedorov, E. S. Mustafaev [et al.] // *Proceedings of SPIE - The*

International Society for Optical Engineering : 18, San Diego, CA, 01–05 августа 2021 года. – San Diego, CA, 2021. – P. 118020.

191. The Effectiveness of Diamond-like Carbon a-C:H:Si Coatings in Increasing the Cutting Capability of Radius End Mills When Machining Heat-Resistant Nickel Alloys / S. N. Grigoriev, M. A. Volosova, S. V. Fedorov [et al] // Coatings. – 2022. – Vol. 12. – № 2.

192. Microstructure evolution in multilayer c-TiAlN/ TiN coatings during spinodal decomposition – A phase-field study / J. Zhou, L. Zhang, L. Chen [et al]// Journal of Micromechanics and Molecular Physics. – 2016. – Vol. 1, no. 1. – P. 1–16.

193. A new approach to improve the surface properties of H13 steel for metal forming applications by applying the TiAlN multi-layer coating / H. Elmkhah, F. Mahboubi, A. Abdollah-zadeh, A.R. Sabour // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 32. – P. 873–877.

194. Mechanical properties of hydrogen free diamond-like carbon thin films deposited by high power impulse magnetron sputtering with Ne / A. Aijaz, T. Kubart, F. Ferreira, J. Oliveira // Coatings. – 2018. – Vol. 8. – No 11. – P. 385.

195. Flexibility and frictional behaviour of DLC and Si-DLC films deposited on nitrile rubber / M. Lubwama, B. Corcoran, K. A. McDonnell [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 239. – P. 84–94.

196. High-Temperature Tribological Performance of Al₂O₃/a-C:H:Si Coating in Ambient Air / V. Podgursky, A. Alamgir, M. Yashin [et al]// Coatings. – 2021. – Vol. 11(5). – P. 495.

197. Попов, М. А. Влияние радиуса округления режущей кромки на повышение качества поверхностного слоя детали / М. А. Попов, В. В. Максаров, И. А. Бригаднов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 637–644.

198. Effect of the Cutting Edge Radius and its Manufacturing Procedure, on the Milling Performance of PVD Coated Cemented Carbide Inserts / K.-D. Bouzakis, N. Michailidis, G. Skordaris [et al]// CIRP Annals. – 2002. – Vol. 51 (1). – P. 61–64.

199. Approach for Polishing Diamond Coated Complicated Cutting Tool: Abrasive Flow Machining (AFM) / X.-C. Wang, C.-C. Wang, C.-Y. Wang [et al] // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 31. – P. 97.

200. Аникеев А.И. Ультрадисперсные твердые сплавы как инструментальный материал для фрезерования труднообрабатываемых материалов / А. И. Аникеев, А. А. Верещака, А. С. Верещака, Ю. И. Бубликов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 3 (35). – С. 152–162.

201. Верещака, А.А. Многослойно-композиционные покрытия для концевых фрез: методология создания и особенности применения \ А. А. Верещака, Ю. И. Бубликов, М. Г. Оганян // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – № 3(43). – С. 14–19.

202. Ulutan, D. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review / D. Ulutan, T. Ozel // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2011. – Vol. 51. – № 3. – P. 250–280.

203. Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. и др. ; под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.

204. Microstructure Evolution of Inconel 718 Superalloy During Hot Working and Its Recent Development Tendency / Y. Liu, H. Zhang, Q. Guo [et al]// Jinshu Xuebao. – 2018. – Vol. 54. – № 11. – P. 1653–1664.

205. Zhu, D. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys / D. Zhu, X. Zhang, H. Ding // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2013. – Vol. 64. – P. 60–77.

206. Ivkovic, B. The Influence of the contact surface roughness on the static friction coefficient / B. Ivkovic, M. Durdjanovic, D. Stamenkovic // Tribol. Ind. – 2000. – Vol. 22. – № 3–4. – p. 41–44.

207. А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше и др.; Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. / Основы трибологии (трение, износ, смазка). 2-е изд. переработ, и доп. - Москва: Машиностроение, 2001.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2491367

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ КЕРАМИЧЕСКИХ
ПЛАСТИН ИЗ НИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012107476

Приоритет изобретения 29 февраля 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 августа 2013 г.

Срок действия патента истекает 29 февраля 2032 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



Автор(ы): **Григорьев Сергей Николаевич (RU), Волосова Марина Александровна (RU), Черкасова Наталья Юрьевна (RU), Валуева Ираида Владимировна (RU)**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2712154

Способ повышения износостойкости режущих пластин из оксидно-карбидной керамики при фрезеровании

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Григорьев Сергей Николаевич (RU),
Волосова Марина Александровна (RU)*

Заявка № 2019128035

Приоритет изобретения 06 сентября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 24 января 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 06 сентября 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2751608

**Способ модификации поверхностного слоя режущих
пластин из инструментальной керамики,
предназначенной для точения никелевых сплавов**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Московский государственный технологический
университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ
"СТАНКИН") (RU)*

Автор(ы): *Волосова Марина Александровна (RU)*

Заявка № 2020132869

Приоритет изобретения 06 октября 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 15 июля 2021 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 06 октября 2040 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2751606

**Способ микротекстурирования поверхностного слоя
керамических пластин электроэрозионной обработкой**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Волосова Марина Александровна (RU), Григорьев Сергей Николаевич (RU), Окунькова Анна Андреевна (RU), Федоров Сергей Вольдемарович (RU), Ибрагим Халед Хамди Мохмед (RU)*

Заявка № 2020136709

Приоритет изобретения 09 ноября 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 15 июля 2021 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 ноября 2040 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2726187

Устройство для обработки изделий быстрыми атомами

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Метель Александр Сергеевич (RU), Григорьев Сергей Николаевич (RU), Волосова Марина Александровна (RU), Мельник Юрий Андреевич (RU), Мустафаев Энвер Серверович (RU), Нэй Хтет Аунг (MM)*

Заявка № 2019138589

Приоритет изобретения 28 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 09 июля 2020 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 28 ноября 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иблиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2752877

**Устройство для обработки диэлектрических изделий
быстрыми атомами**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Григорьев Сергей Николаевич (RU), Метель Александр Сергеевич (RU), Волосова Марина Александровна (RU), Мельник Юрий Андреевич (RU), Мустафеев Энвер Серверович (RU)*

Заявка № 2020140917

Приоритет изобретения 11 декабря 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 августа 2021 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 11 декабря 2040 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г. П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2658623

Устройство для синтеза покрытий на диэлектрических изделиях

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Метель Александр Сергеевич (RU), Григорьев Сергей Николаевич (RU), Волосова Марина Александровна (RU), Мельник Юрий Андреевич (RU)*

Заявка № 2017131581

Приоритет изобретения 11 сентября 2017 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 22 июня 2018 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 11 сентября 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2708024

Способ комбинированного упрочнения режущего
инструмента

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Метель Александр Сергеевич (RU), Григорьев Сергей Николаевич (RU), Волосова Марина Александровна (RU), Мельник Юрий Андреевич (RU)*

Заявка № 2018145828

Приоритет изобретения 24 декабря 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 03 декабря 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 24 декабря 2038 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2657896

Устройство для синтеза покрытий

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Григорьев Сергей Николаевич (RU), Метель Александр Сергеевич (RU), Волосова Марина Александровна (RU), Мельник Юрий Андреевич (RU)*

Заявка № 2017131582

Приоритет изобретения 11 сентября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 18 июня 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 11 сентября 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2702752

Устройство для синтеза покрытий

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Метель Александр Сергеевич (RU), Григорьев Сергей Николаевич (RU), Волосова Марина Александровна (RU), Мельник Юрий Андреевич (RU)*

Заявка № 2018141928

Приоритет изобретения 28 ноября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 октября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 28 ноября 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2656480

Устройство для осаждения покрытий

Патентообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)**

Авторы: **Григорьев Сергей Николаевич (RU), Метель Александр Сергеевич (RU), Волосова Марина Александровна (RU), Мельник Юрий Андреевич (RU)**

Заявка № 2017131580

Приоритет изобретения 11 сентября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 05 июня 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 11 сентября 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015662028

**Расчет составляющих силы резания при торцевом
фрезеровании закаленных сталей с учетом скорости резания
и изнашивания инструмента**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Московский
государственный технологический университет «СТАНКИН»
(RU)*

Авторы: *Волосова Марина Александровна (RU), Гурин Владимир
Дмитриевич (RU), Селезнёв Антон Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2015618966

Дата поступления 29 сентября 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 ноября 2015 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014617635

**Расчет составляющих силы резания при торцевом
фрезеровании закаленных сталей с учетом изнашивания
инструмента**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН» (RU)*

Авторы: *Волосова Марина Александровна (RU), Гурин Владимир
Дмитриевич (RU), Будейкин Артём Вадимович (RU)*

Заявка № 2014615208

Дата поступления 02 июня 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 29 июля 2014 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2712328

Способ определения предельно допустимого износа режущей пластины из недиэлектрического материала по главной задней поверхности.

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2018145826

Приоритет изобретения 24 декабря 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 28 января 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 24 декабря 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Авторы: **Григорьев Сергей Николаевич (RU), Волосова Марина Александровна (RU), Федоров Сергей Вольдемарович (RU), Гурин Владимир Дмитриевич (RU)**

по

RU 2712328 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2725533

Цельная концевая керамическая фреза

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический институт "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Гречишников Владимир Андреевич (RU), Григорьев Сергей Николаевич (RU), Пивкин Петр Михайлович (RU), Волосова Марина Александровна (RU), Минин Илья Васильевич (RU), Ершов Артем Александрович (RU), Исаев Александр Вячеславович (RU)*

Заявка № 2019145011

Приоритет изобретения 30 декабря 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 02 июля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 30 декабря 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
"СТРЕЛА"

ул.Шевченко, д.26, г.Оренбург, Россия, 460005
телефон +7(3532) 75-71-00, факс +7(3532) 75-54-60, mail@pa-strela.com
ОКПО 07525438, ОГРН 1065658011638, ИНН 5609061432, КПП 560901001



«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. главного инженера
АО «ПО «Стрела»


Ю.А. Черкасов
М.П.

«__» сентября 2021 г.



АКТ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ АПРОБАЦИИ И ВНЕДРЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ

Комиссия в составе:

Представители АО «ПО «Стрела» –

Главный технолог Сальников В.А.;

Зам. главного инженера Исаев Е.В.;

Зам. начальника инструментального цеха Мосенз И.И.

Представители ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» –

д.т.н., профессор Мигранов М.Ш.

к.т.н., доцент Федоров С.В.

к.т.н., доцент Волосова М.А. (разработчик керамических концевых фрез),

составила настоящий акт по результатам производственной апробации в период с 01.04.2021 г. по 15.09.2021 г. керамических концевых фрез при обработке заготовок из жаростойкого жаропрочного сплава ХН50МВКТЮР.

1. Цель проведения производственной апробации.

Оценка показателей надежности при производственных испытаниях двух видов керамических концевых фрез из оксинитрида алюминия-кремния при резании жаростойкого жаропрочного сплава ХН50МВКТЮР для оценки эффективности инновационной разработки и принятия решения о целесообразности внедрения керамических фрез в механообрабатывающее производство АО «ПО «Стрела».

2. Условия проведения производственной апробации.

2.1. Режущий инструмент:

Цельные (монокристаллические) концевые керамические фрезы из материала α/β SiAlON, изготовленные и предоставленные ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», соответствовали указанным в таблице 1 конструкторско-геометрическим параметрам.

Таблица 1. Конструкторско-геометрические параметры концевых керамических фрез

Параметр	Значение
Диаметр фрезы, мм	10
Количество зубьев	4
Габаритная длина фрезы, мм	48
Длина крепежной части (хвостовика), мм	40
Длина режущей части, мм	8
Радиус при вершине, мм	1,2
Угол наклона стружечной канавки, град	30

Количество образцов режущего инструмента, предоставленных для проведения испытаний – 2 партии с общим количеством 20 штук, в том числе: 10 штук керамических концевых фрез из материала α/β SiAlON (базовый вариант); 10 штук керамических концевых фрез из материала α/β SiAlON, прошедших специальную поверхностную обработку, включающую плазменное травление (ПТ) и нанесение покрытия (CrAlSi)N/DLC толщиной 4 мкм (инновационный вариант).

2.2. Станочное оборудование:

Фрезерный обрабатывающий центр мод. Kitamura MyTrunnion 5.

2.3. Режимы резания:

Испытания проводились при скорости резания $V = 568$ м/мин (частота вращения $n = 18\ 100$ об/мин), подача на зуб $S = 0,03$ мм/зуб при стратегии обработки торцевым участком керамических фрез плоских заготовок. Использовалась схема «сухой» обработки без смазочно-охлаждающих жидкостей.

2.4. Обрабатываемый материал:

Жаростойкий жаропрочный сплав ХН50МВКТЮР. Вид обрабатываемой заготовки – призматическая заготовка с исходным размером 60х130 мм.

2.5. Методика испытаний для количественной оценки показателей надежности:

За критерий отказа керамических концевых фрез был принят предельный размер фаски износа по задней поверхности зуба фрезы 0,4 мм. Измерение значений ширины фаски износа проводили с использованием инструментального микроскопа, предназначенного для измерения линейных и угловых размеров в проходящем и отраженном свете в прямоугольной системе координат. Ширина фаски износа на задней поверхности инструментов измерялась с определенным шагом (интервалом) – через каждые 2 минуты резания и контролировалась на каждом из четырех зубьев керамических фрез, подвергнутых испытаниям (для расчетов использовались средние значения). На основании полученных данных устанавливались соотношения «время резания - ширина фаски износа» и определялся момент отказа каждого образца из партии режущего инструмента.

3. Результаты проведения производственной апробации.

Результаты проведенных испытаний (экспериментально установленные соотношения «время резания - ширина фаски износа») керамических фрез при резании сплава ХН50МВКТЮР приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Соотношения «время резания - ширина фаски износа» для керамических концевых фрез из материала α/β SiAlON

Время (интервал) резания, мин	№ керамической фрезы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Ширина фаски износа на задней поверхности, мм									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,15	0,2	0,14	0,16	0,21	0,13	0,15	0,14	0,2	0,24
4	0,28	0,35	0,25	0,24	0,37	0,26	0,26	0,27	0,32	0,45
6	0,35	0,45	0,38	0,41	0,58	0,36	0,35	0,37	0,46	0,64
8	0,53	0,55	0,47	0,5	0,73	0,49	0,45	0,46	0,6	0,8

Таблица 3. Соотношения «время резания - ширина фаски износа» для керамических концевых фрез из материала α/β SiAlON, прошедших ПТ и нанесение покрытия (CrAlSi)N/DLC

Время (интервал) резания, мин	№ керамической фрезы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Ширина фаски износа на задней поверхности, мм									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,09	0,07	0,08	0,09	0,07	0,09	0,1	0,08	0,06	0,1
4	0,15	0,14	0,15	0,13	0,13	0,14	0,16	0,14	0,13	0,16
6	0,24	0,25	0,24	0,26	0,22	0,25	0,23	0,23	0,24	0,27
8	0,33	0,3	0,31	0,32	0,29	0,32	0,32	0,3	0,3	0,38
10	0,4	0,43	0,42	0,4	0,4	0,4	0,41	0,42	0,39	0,55
12	0,56	0,55	0,57	0,53	0,51	0,54	0,69	0,65	0,5	0,76

Приведенные выше экспериментальные данные использовались для расчета следующих показателей надежности керамических фрез:

- диапазон изменения наработки до отказа (ΔT);
- среднее значение наработки до отказа (T_{cp});
- наименьшее значение наработки до отказа или безотказная наработка (T_{min});
- наибольшее значение наработки до отказа (T_{max});
- среднеквадратичное отклонение (СКО) наработки до отказа при принятом критерии отказа 0,4 мм (σ);
- коэффициент вариации наработки до отказа (v).

Результаты оценки показателей надежности двух видов керамических фрез при фрезеровании сплава ХН50МВКТЮР приведены в таблице 4.

Таблица 4. Показатели надежности базового варианта керамических фрез из материала α/β SiAlON и керамических фрез, прошедших ПТ и нанесение покрытия (CrAlSi)N/DLC при резании сплава ХН50МВКТЮР

Вид керамических фрез	Диапазон изменения наработки до отказа ΔT , мин	Среднее значение наработки до отказа T_{cp} , мин	Наименьшее значение наработки до отказа (безотказная наработка) $T_{мин}$, мин	Наибольшее значение наработки до отказа $T_{макс}$, мин	СКО наработки до отказа σ , мин	Коэффициент вариации наработки до отказа v , %
α/β SiAlON	3,6	5,7	3,5	7,1	1,19	20,8
α/β SiAlON + ПТ/ (CrAlSi)N/ DLC	2,0	9,7	8,2	10,2	0,53	5,4

4. Заключение по результатам проведения производственной апробации.

4.1. Установлено, что использование базового варианта цельных керамических концевых фрез из материала α/β SiAlON при резании жаростойкого жаропрочного сплава ХН50МВКТЮР при принятых условиях фрезерования обеспечивает среднее значение наработки до отказа 5,7 мин.; при этом установленное значение безотказной наработки режущего инструмента, в течение которого ни у одной фрезы из испытанной партии не наступил отказ, составило 3,5 мин. Расчетные значения СКО и коэффициента вариации наработки

до отказа для базового варианта керамических фрез составили 1,19 мин. и 20,8% соответственно.

4.2. Сравнительные производственные испытания показали, что применение специальной поверхностной обработки керамических фрез из материала α/β SiAlON, включающей плазменное травление и нанесение покрытия (CrAlSi)N/DLC, при резании жаростойкого жаропрочного сплава ХН50МВК-ТЮР при принятых условиях фрезерования увеличивает среднее значение наработки до отказа в 1,7 раза (до 9,7 мин.) по сравнению с базовым вариантом керамических фрез; при этом установленное значение безотказной наработки инновационного варианта режущего инструмента, в течение которого ни у одной фрезы из испытанной партии не наступил отказ, составило 8,2 мин. Расчетные значения СКО и коэффициента вариации наработки до отказа для керамических фрез, прошедших специальную поверхностную обработку, составили 0,53 мин. и 5,4% соответственно, что демонстрирует значительное увеличение эксплуатационной надежности при использовании инновационной разработки ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» по сравнению с базовым вариантом цельных керамических концевых фрез в условиях высокоскоростной обработки.

4.3. Результаты производственной апробации являются основанием для принятия решения о целесообразности внедрения в механообрабатывающее производство АО «ПО «Стрела» цельных концевых керамических фрез, прошедших специальную поверхностную обработку, и использования взамен твердосплавного инструмента на отдельных операциях высокоскоростного фрезерования выпускаемых изделий специального назначения из жаростойких жаропрочных сплавов на никелевой основе типа ХН50МВК-ТЮР.

От АО «ПО «Стрела»

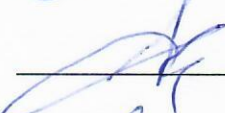
 Сальников В.А.

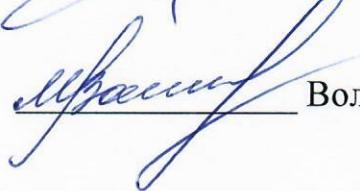
 Исаев Е.В.

 Мосенз И.И.

От ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

 Мигранов М.Ш.

 Федоров С.В.

 Волосова М.А.



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ОБЪЕДИНЕННАЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ»
ФИЛИАЛ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕХНОЛОГИИ
И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ»**

ПРОСПЕКТ БУДЕННОГО 16,
КОРП. 182, МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ, 105118

Т.: +7 499 785-81-74
Ф: +7 499 785-84-00

КПП 771943001
ОГРН 1107746081717
ИНН 7731644035

UECRUS.COM
NIID@UECRUS.COM

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора
Филиала «НИИД» АО «ОДК»



М.Г. Яковлев

«___» _____ 2022 г.

АКТ

производственного внедрения токарных резцов, оснащенных пластинами из керамики, для точения жаропрочного никелевого сплава

Рабочая группа в составе специалистов Филиала «НИИД» АО «ОДК» –
зам. начальника отдела “Механической обработки” Ковалева С.А.,

ведущего инженера-технолога Назарова И.А.,

инженера технолога 1 к. Газиной П.А.

и специалистов ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» –

д.т.н., профессора Мигранова М.Ш.

к.т.н., доцента Федорова С.В.

к.т.н., доцента Волосовой М.А. (разработчика технологии поверхностной обработки керамических пластин),

по результатам производственной апробации и эксплуатационных испытаний
в период с 01.10.2021 г. по 28.02.2022 г. токарных резцов, оснащенными круг-

лыми керамическими пластинами, при продольном точении жаропрочного никелевого сплава, составила настоящий акт.

1. Цель проведения производственной апробации.

Оценка показателей надежности при апробации на производственной площадке Филиала «НИИД» АО «ОДК» токарных резцов, оснащенных керамическими пластинами из материала SiAlON, подвергнутых двум вариантам поверхностной обработки (традиционной и прогрессивной), при продольном точении жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП. По результатам производственной апробации и эксплуатационных испытаний принятие решения о целесообразности внедрения в Филиале «НИИД» АО «ОДК» на операциях токарной обработки жаропрочных никелевых сплавов типа ЭП741НП режущих инструментов, оснащенных пластинами из керамики, прошедшими прогрессивную поверхностную обработку.

2. Условия проведения производственной апробации.

Режущий инструмент и обрабатываемый материал

Державка токарная CRSNR 3232P 19 для наружной обработки на универсальных токарных станках и станках с ЧПУ. Круглые керамические пластины RNGN-190800 из материала AS500 (SiAlON), разделенные на две партии: 1) пластины, подвергнутые традиционной поверхностной обработке (алмазное шлифование); 2) пластины, подвергнутые прогрессивной поверхностной обработке, разработанной в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (алмазное шлифование, травление пучком ускоренных частиц аргона и формирование покрытия TiAlSiN/DLC). Общее количество пластин, предоставленных ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», – 14 штук (по 7 единиц в каждой партии). Для каждой n-ой пластины с режущей кромкой, имеющей форму окружности, выбирались по три режущих участка (n.1, n.2, n.3), которые последовательно подвергались эксплуатационным испытаниям до достижения задней поверхностью критического значения износа (0,4 мм).

Обрабатываемый материал – кольцевая заготовка из жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП, использующегося в промышленности для изготовления валов, дисков турбин и компрессоров, работающих при температурах до 750°C.

Режим резания и станочное оборудование

Эксплуатационные испытания проводились на операции продольного точения на следующих режимах – скорость резания $V = 280$ м/мин, подача $S = 0,15$ мм/об, глубина резания $t = 1$ мм, обработка без СОЖ. В качестве станочного оборудования использовался токарный станок Jesco Machinery 1650ENC с ЧПУ. Измерение параметра фаски износа на задней поверхности керамических пластин проводили на оптическом инструментальном микроскопе. Замеры проводили по истечении каждых 3 минут эксплуатации пластин. Полученные данные записывались в таблицы испытаний.

3. Результаты проведения производственной апробации.

Результаты проведенных эксплуатационных испытаний круглых керамических пластин из материала SiAlON при продольном точении жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП приведены в таблицах 1 и 2. Установленные показатели надежности инструмента приведены в таблице 3.

Таблица 1. Результаты испытаний пластин, подвергнутых традиционной поверхностной обработке (алмазное шлифование)

Номер пластины (режущего участка)	Значение фаски износа (мм) при различном времени резания			
	3 мин	6 мин	9 мин	12 мин
1-я пластина				
1.1	0,25	0,6	-	-
1.2	0,21	0,39	0,75	-
1.3	0,18	0,25	0,39	0,69
2-я пластина				
2.1	0,14	0,33	0,48	-
2.2	0,15	0,22	0,34	0,66
2.3	0,20	0,32	0,39	0,70
3-я пластина				
3.1	0,13	0,19	0,34	0,73
3.2	0,15	0,22	0,33	0,60
3.3	0,21	0,31	0,41	-
4-я пластина				
4.1	0,17	0,38	0,63	-
4.2	0,15	0,24	0,37	0,66
4.3	0,20	0,38	0,70	-
5-я пластина				
5.1	0,15	0,23	0,34	0,67
5.2	0,18	0,24	0,35	0,79
5.3	0,16	0,25	0,39	0,82
6-я пластина				
6.1	0,21	0,41	-	-
6.2	0,18	0,24	0,37	0,63
6.3	0,16	0,22	0,35	0,86
7-я пластина				
7.1	0,19	0,25	0,39	0,8

7.2	0,20	0,33	0,51	-
7.3	0,18	0,24	0,39	0,77

Таблица 2. Результаты испытаний пластин, подвергнутых прогрессивной поверхностной обработке (алмазное шлифование, травление пучком ускоренных частиц аргона и формирование покрытия TiAlSiN/DLC)

Номер пластины (режущего участка)	Значение фаски износа (мм) при различном времени резания					
	3 мин	6 мин	9 мин	12 мин	15 мин	18 мин
1-я пластина						
1.1	0,08	0,18	0,26	0,37	0,56	-
1.2	0,11	0,19	0,25	0,36	0,58	-
1.3	0,08	0,18	0,27	0,32	0,39	0,61
2-я пластина						
2.1	0,1	0,17	0,26	0,31	0,37	0,5
2.2	0,09	0,22	0,29	0,35	0,4	-
2.3	0,12	0,17	0,23	0,3	0,37	0,48
3-я пластина						
3.1	0,1	0,19	0,24	0,33	0,44	-
3.2	0,08	0,19	0,33	0,39	0,49	-
3.3	0,09	0,21	0,27	0,33	0,46	-
4-я пластина						
4.1	0,1	0,16	0,29	0,34	0,45	-
4.2	0,12	0,2	0,27	0,36	0,5	-
4.3	0,1	0,22	0,29	0,38	0,52	-
5-я пластина						
5.1	0,07	0,18	0,24	0,29	0,33	0,55
5.2	0,1	0,15	0,23	0,4	-	-
5.3	0,09	0,25	0,3	0,35	0,39	0,5
6-я пластина						
6.1	0,08	0,14	0,21	0,26	0,37	0,57
6.2	0,11	0,21	0,31	0,36	0,4	-
6.3	0,12	0,19	0,29	0,39	0,48	-

7-я пластина						
7.1	0,1	0,2	0,28	0,35	0,4	-
7.2	0,13	0,25	0,31	0,38	0,45	-
7.3	0,08	0,24	0,29	0,39	0,45	-

Таблица 3. Показатели надежности токарных резцов, оснащенных пластинами из керамики, достигнутые при эксплуатационных испытаниях

Вид керамических пластин и поверхностной обработки	Средняя стойкость (мин)	Минимальное значение стойкости (мин)	Максимальное значение стойкости (мин)	Размах вариации стойкости (мин)	Коэффициент вариации стойкости (%)
Алмазное шлифование (1 партия)	8,3	4,5	9,9	5,4	19%
Алмазное шлифование, травление пучком ускоренных частиц аргона и формирование покрытий TiAlSiN/DLC (2 партия)	14,1	12,0	16,1	4,1	9,5%

4. Заключение.

Проведенными производственными испытаниями установлено, что при обработке жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП на выбранных режимах резания токарными резцами, оснащенными круглыми керамическими пластинами из материала SiAlON, прошедшими алмазное шлифование (традиционная технология) обеспечивает среднюю стойкость инструмента 8,3 мин., что в 1,7 раза меньше соответствующего показателя, обеспечиваемого керамическими пластинами после комбинированного воздействия - алмазного шлифования, травления пучком ускоренных частиц аргона и формирования покрытий TiAlSiN/DLC (прогрессивная технология).

Одновременно с отмеченным выше эффектом применение прогрессивной технологии относительно традиционной технологии обеспечивает уменьшение коэффициента вариации стойкости в 2 раза (9,5% и 19% соответственно), а также размаха вариации стойкости в 1,3 раза.

Экспериментально установленные данные позволяют сделать заключение о значительном повышении надежности инструмента при токарной обработке жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП керамическими пластинами из

материала SiAlON в результате их поверхностной обработки по прогрессивной технологии, разработанной ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

Результаты успешной производственной апробации являются основанием для внедрения на участке механообработки Филиала «НИИД» АО «ОДК» токарных резцов, оснащенных керамическими пластинами, прошедшими обработку по прогрессивной технологии, разработанной ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», на операциях токарной обработки заготовок изделий из жаропрочных никелевых сплавов типа ЭП741НП.

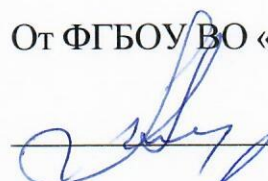
От Филиала «НИИД» АО «ОДК»

 Ковалев С.А.

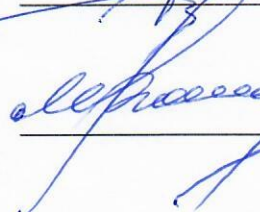
 Назаров И.А.

 Газина П.А.

От ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

 Мигранов М.Ш.

 Федоров С.В.

 Волосова М.А.



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"ЛЫТКАРИНСКИЙ ЗАВОД
ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА" (АО ЛЗЭС)

140080, Московская область, г. Лыткарино,
ул. Парковая, д. 1
Тел: +7 (495) 552-15-20; факс +7(495) 552-12-66;
E-mail: info@lzos.ru; referent@lzos.ru; www.lzos.ru
ОКПО 07527443; ОГРН 1025003178397;
ИНН 5026000300; КПП 502701001

Приложение к исх.

от 30.06.2022 № 3694/58

№ _____

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель генерального
директора – главный инженер
АО «Лыткаринский завод
оптического стекла»
А.П. Тарасов
М.П.



_____ 2022 г.

АКТ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ И ВНЕДРЕНИЯ ТОРЦЕВЫХ ФРЕЗ, ОСНАЩЕННЫХ КЕРАМИЧЕСКИМИ ПЛАСТИНАМИ

Сформированная для проведения испытаний, оценки результатов и выработки рекомендаций, комиссия в составе:

Представителей АО «ЛЗЭС» –

Главный технолог

– Вавилов А.В.

Начальник конструкторско-технологического
бюро механической обработки

– Малькина В.А.

Начальник инструментально-технологического
производства

– Соколов С.А.

Представителей ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» –

Ведущий научный сотрудник, к.т.н. Оганян Г.В.

Ведущий научный сотрудник, к.т.н. Федоров С.В.

Ведущий научный сотрудник, к.т.н. Волосова М.А. (разработчик
керамического режущего инструмента),

составила настоящий акт по результатам производственных испытаний в период с 01.02.2022 г. по 30.04.2022 г. торцевых насадных фрез, оснащенных сменными керамическими пластинами, обработанными с применением различных технологий, при плоском фрезеровании заготовок пресс-форм из закаленной инструментальной стали.

1. Цель проведения производственных испытаний – оценка показателей надежности (средней стойкости, разброса и коэффициента вариации стойкости) торцевых насадных фрез, оснащенных сменными керамическими пластинами, обработанными с применением различных (базовой и инновационной) технологий, при плоском фрезеровании заготовок пресс-форм из закаленной инструментальной стали и выработка рекомендаций о целесообразности внедрения в производственный процесс торцевых фрез, оснащенных керамическими пластинами.

2. Участок проведения испытаний – инструментальное производство.

3. Условия проведения испытаний

3.1. Режущий инструмент:

Фреза торцевая насадная 125 А 08 R 084 F 090 S SKG 2x 040 (по ГОСТ ISO 11529-2015) диаметром 125 мм с механическим креплением 8 квадратных керамических пластин SNGN 120404 (по ГОСТ 19042-80, ISO 1832-85) шириной 12,7 мм, толщиной 4,76 мм. Марка инструментальной керамики – сплав CC650, содержащий Al_2O_3 (70 об.%) + TiC (30 об.%).

Общее количество квадратных (четырёхгранных) керамических пластин, предоставленных ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» для проведения испытаний, – 16 штук (2 партии по 8 штук в каждой).

I партия – пластины из керамики CC650, прошедшие алмазную заточку (базовая технология). II партия – пластины из керамики CC650, прошедшие алмазную заточку, травление пучком быстрых атомов аргона и нанесение покрытий из диборида титана TiB_2 (инновационная технология, предлагаемая ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»).

3.2. Материал обрабатываемой заготовки:

Высоколегированная (высокохромистая) полутеплостойкая инструментальная сталь X12MФ (по ГОСТ 5950-2000), закаленная до твердости 61÷62 HRC, используемая для изготовления формообразующих деталей пресс-форм и других изделий инструментального производства.

3.3. Станочное оборудование, режимы резания и последовательность испытаний:

Обработку плоских поверхностей заготовок пресс-форм из закаленной инструментальной стали X12MФ торцевой фрезой, оснащенной четырёхгранными пластинами из керамики CC650, обработанными с применением различных технологий, выполняли на фрезерном станке модели DMC 1035 на следующих режимах – частота вращения $n=1000$ об/мин (скорость резания $V=392,5$ м/мин), подача $S=1200$ мм/мин, глубина резания $t=1,0$ мм. Фрезерование выполнялось без применения СОЖ.

В качестве критерия затупления при испытаниях был принят износ по главной задней поверхности керамических пластин (0,4 мм). После затупления фрезы, т.е. достижения предельного износа режущими (рабочими) гранями, керамические пластины переворачивали и рабочими становились следующие грани, ранее не задействован-

ные в процессе резания. На каждой керамической пластине испытывали по 3 грани. Для измерения линейного размера износа режущих граней пластин использовали инструментальный микроскоп МПБ-2. Измерения значения износа для каждой режущей грани выполняли по истечении 4 минут эксплуатации торцевой фрезы и записывали в таблицу испытаний.

4. Результаты проведения производственных испытаний.

Результаты производственных испытаний торцевых фрез, оснащенных сменными керамическими пластинами, обработанными с применением различных технологий, при резании закаленной инструментальной стали X12МФ приведены в таблицах 1а и 1б. Количественные показатели надежности, рассчитанные по результатам обработки экспериментальных данных, приведены в таблице 2.

Таблица 1а. Результаты производственных испытаний торцевых фрез, оснащенных четырехгранными керамическими пластинами (I партия)

	Номер керамической пластины (зуба фрезы)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Время резания (мин)	Значение износа (мм) на главной задней поверхности керамических пластин, обработанных по базовой технологии (грань №1)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,22	0,20	0,21	0,19	0,17	0,16	0,28	0,22
8	0,65	0,35	0,29	0,31	0,32	0,24	0,59	0,39
12	–	0,47	0,48	0,45	0,50	0,45	–	0,57
Время резания (мин)	Значение износа (мм) на главной задней поверхности керамических пластин, обработанных по базовой технологии (грань №2)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,24	0,22	0,18	0,20	0,19	0,20	0,28	0,26
8	0,39	0,37	0,31	0,34	0,40	0,38	0,69	0,58
12	0,71	0,55	0,49	0,50	–	0,50	–	–
Время резания (мин)	Значение износа (мм) на главной задней поверхности керамических пластин, обработанных по базовой технологии (грань №3)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,25	0,21	0,19	0,18	0,18	0,20	0,22	0,18
8	0,56	0,33	0,37	0,34	0,31	0,36	0,38	0,48
12	–	0,43	0,51	0,57	0,52	0,49	0,54	–

Таблица 1б. Результаты производственных испытаний торцевых фрез, оснащенных четырехгранными керамическими пластинами (II партия)

	Номер керамической пластины (зуба фрезы)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Время резания (мин)	Значение износа (мм) на главной задней поверхности керамических пластин, обработанных по инновационной технологии (грань №1)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,07	0,08	0,1	0,08	0,12	0,07	0,1	0,13
8	0,13	0,13	0,15	0,14	0,18	0,12	0,14	0,22

12	0,22	0,24	0,26	0,26	0,33	0,23	0,25	0,35
16	0,32	0,33	0,33	0,4	0,5	0,32	0,38	0,54
20	0,53	0,55	0,58	–	–	0,57	0,6	–
Время резания (мин)	Значение износа (мм) на главной задней поверхности керамических пластин, обработанных по инновационной технологии (грань №2)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,09	0,1	0,11	0,07	0,1	0,08	0,11	0,12
8	0,15	0,14	0,16	0,12	0,17	0,15	0,15	0,25
12	0,28	0,25	0,27	0,23	0,26	0,26	0,27	0,34
16	0,4	0,38	0,39	0,33	0,39	0,41	0,39	0,52
20	–	0,59	0,57	0,53	0,6	–	0,59	–
Время резания (мин)	Значение износа (мм) на главной задней поверхности керамических пластин, обработанных по инновационной технологии (грань №3)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,08	0,09	0,1	0,08	0,12	0,09	0,09	0,12
8	0,17	0,13	0,13	0,15	0,24	0,12	0,14	0,28
12	0,28	0,27	0,25	0,31	0,34	0,25	0,26	0,38
16	0,4	0,36	0,37	0,46	0,51	0,38	0,37	0,53
20	–	0,56	0,58	–	–	0,61	0,6	–

Таблица 2. Показатели надежности торцевых фрез, оснащенных четырехгранными керамическими пластинами, рассчитанные по результатам производственных испытаний

Вид керамических пластин	Разброс (диапа- зон из- менения) стойко- сти (мин)	Средняя стой- кость (мин)	Мини- мальное значение стойко- сти (мин)	Макси- мальное значение стойко- сти (мин)	Кoeffици- ент вари- ации стойкости (%)
1 партия	6	8,5	5	11	19%
2 партия	4	15,5	13	17	10%

5. Заключение по результатам проведения производственных испытаний.

5.1. Проведенными испытаниями установлено, что при резании закаленной инструментальной стали X12MФ на выбранных режимах фрезерования применение торцевых фрез с четырехгранными пластинами из керамики CC650 после алмазной заточки (базовая технология, I партия образцов) обеспечивает среднюю стойкость 8,5 мин. против 15,5 мин., обеспечиваемую пластинами из керамики CC650 после алмазной заточки, травления пучком быстрых атомов аргона и нанесения покрытий из диборида титана TiB₂ (инновационная технология, II партия образцов). Таким образом, инновационная технология по отношению к базовой обеспечила увеличение средней стойкости режущего инструмента в 1,8 раза. Одновременно с этим инновационная технология обеспечила снижение разброса стойкости керамических пластин (4 мин. против 6 мин. соответственно) и коэффициента вариации стойкости (10% против 19% соответственно) по сравнению с базовой технологией.

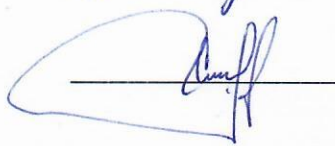
Приведенные количественные показатели позволяют заключить о значительном увеличении надежности при резании закаленной инструментальной стали X12MФ торцевых фрез, оснащенных керамическими пластинами, прошедшими обработку по инновационной технологии, разработанной ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» по сравнению с базовым вариантом керамических пластин.

5.2. Результаты успешных производственных испытаний являются основанием для принятия решения о целесообразности внедрения в механообрабатывающее производство АО «Лыткаринский завод оптического стекла» торцевых фрез, оснащенных керамическими пластинами, прошедшими обработку по инновационной технологии, разработанной ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», на операциях механической обработки на повышенных скоростях резания заготовок изделий из закаленных высоколегированных сталей типа X12MФ, используемых в инструментальном производстве.

От АО ЛЗОС

 Вавилов А.В.

 Малькина В.А.

 Соколов С.А.

От ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

 Оганян Г.В.

 Федоров С.В.

 Волосова М.А.

	ВИТЯЗЬ	 ВИТЯЗЬ
	АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ КОМПАНИЯ «ВИТЯЗЬ» (АО «МК «ВИТЯЗЬ»»)	

Шоссе Индустриальное, 2, г. Ишимбай, Республика Башкортостан, 453203, Телефон (34794) 2-47-87, Факс (34794) 2-68-38,
 E-mail: vityazh@uvz.ru, www.bolotohod.ru ОКПО 77849349, ОГРН 1050202782277, ИНН/КПП 0261013879/026101001

№ _____
 На _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Технический директор
 АО «Машиностроительная компания
 «Витязь»

Забелин С.Н.

«14» июля 2022 г.



**Акт производственной апробации и внедрения
 токарных резцов, оснащенных керамическими пластинами с
 комплексной упрочняющей обработкой**

Рабочая группа, сформированная для производственной апробации токарных резцов, оснащенных керамическими пластинами с комплексной упрочняющей обработкой, и принятия решения о целесообразности производственного внедрения инструмента, в следующем составе:

Представители АО «Машиностроительная компания «Витязь» –

Главный технолог Артемьев А.А.

Начальник бюро станков с ЧПУ_Фахриев С.И.

начальник цеха 122_Нигматуллина Р.Ш.

Представители ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» –

д.т.н., профессор Мигранов М.Ш.

д.т.н., профессор Шехтман С.Р.

к.т.н., доцент Волосова М.А. (разработчик технологии комплексной упрочняющей обработки керамических пластин),

составила настоящий акт по результатам производственной апробации в период с 01.02.2022 г. по 31.05.2022 г. токарных резцов, оснащенных керамическими пластинами круглой формы при обработке кольцевых заготовок из

конструкционной подшипниковой стали ШХ15СГ (HRC 61-63).

1. Цель проведения производственной апробации:

Оценка показателей надежности при апробации на производственной базе АО «Машиностроительная компания «Витязь» (входит в состав АО «НПК «Уралвагонзавод») токарных резцов, оснащенных керамическими пластинами из оксидно-карбидной керамики (без дополнительной обработки и после комплексной упрочняющей обработки) при наружном точении кольцевых заготовок из конструкционной подшипниковой стали ШХ15СГ; по результатам производственной апробации принятие решения о целесообразности внедрения в механообрабатывающем производстве АО «Машиностроительная компания «Витязь» режущих инструментов, оснащенных пластинами из керамики, прошедшими комплексную упрочняющую обработку.

2. Методика и режимы производственной апробации:

В качестве режущего инструмента применялись токарные державки CRSNR 3232Р 19 для наружной обработки на универсальных токарных станках и станках с ЧПУ с «гнездом» для размещения режущих пластин круглой формы типа RNGN. Характеристики режущих пластин – RNGN-190800 круглой формы с упрочняющей фаской из оксидно-карбидной керамики типа CC650.

Количество образцов режущих пластин, подготовленных и переданных для проведения производственной апробации – 24 штук (12 пластин – без дополнительной обработки и 12 пластин – с комплексной упрочняющей обработкой). Комплексная упрочняющая обработка пластин предусматривала «сухое» травление атомами аргона в течении 1 час 40 минут и нанесение износостойкого двухслойного покрытия (TiAl)N/TiB₂ толщиной 4,0 мкм.

На каждой пластине для испытаний выбирались по три режущих участка, которые последовательно подвергались эксплуатационным испытаниям до достижения очага износа на задней поверхности пластины предельного значения $h_{\text{пред}}=0,4$ мм (рисунок 1).

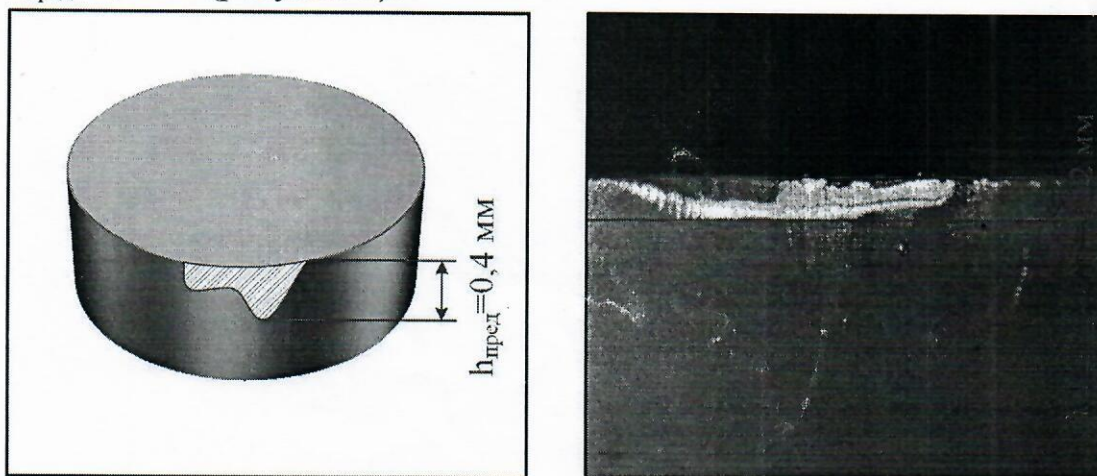


Рисунок 1. Расположение очага износа на задней поверхности керамической пластины и схема его измерения при проведении испытаний

Измерения линейного значения очага износа h на задней поверхности круглых пластин (рисунок 1) проводили с использованием заводского инструментального микроскопа и выполнялись через каждые 3 минуты резания. На основании зависимостей «время резания – размер очага износа» определялся момент отказа (стойкость) режущих участков каждой керамической пластины. Определялись следующие показатели надежности – средняя стойкость, минимальное значение стойкости (безотказная наработка), максимальное значение стойкости, размах значений стойкости и коэффициент вариации стойкости.

Испытания проводились при наружном точении кольцевых заготовок из конструкционной подшипниковой стали ШХ15СГ (HRC 61-63) на скорости резания $V = 300$ м/мин, подаче $S = 0,15$ мм/об, глубине $t = 1,0$ мм. Использовалась экологически чистая обработка (без СОЖ).

В качестве станочного оборудования для проведения испытаний использовался токарный станок 1П726_с ЧПУ.

3. Результаты проведения производственной апробации:

Установленные показатели надежности в процессе производственной апробации токарных резцов, оснащенных керамическими пластинами, при наружном точении кольцевых заготовок из стали ШХ15СГ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Показатели надежности токарных резцов, оснащенных керамическими пластинами, установленные при производственной апробации

Режущий инструмент	Средняя стойкость, мин	Минимальное значение стойкости (безотказная наработка), мин	Максимальное значение стойкости, мин	Размах значений стойкости, мин	Коэффициент вариации стойкости (%)
Режущая пластина круглой формы из оксидно-карбидной керамики без дополнительной обработки	11,3	8,5	15,9	7,4	20,5%
Режущая пластина круглой формы из оксидно-карбидной ке-	20,4	17,0	22,5	5,5	10%

рамики с комплексной упрочняющей обработкой					
---	--	--	--	--	--

4. Заключение по результатам проведения производственной апробации:

Установлено, что использование режущих пластин круглой формы из оксидно-карбидной керамики без дополнительной обработки при резании стали ШХ15СГ при принятых условиях резания обеспечивает среднее значение стойкости 11,3 мин.; при этом установленное значение безотказной наработки режущих пластин, в течение которого ни у одной пластины не наступил отказ, составило 8,5 мин. Расчетное значение коэффициента вариации стойкости (определяемого как соотношение значений среднего квадратического отклонения и среднего арифметического) составило 20,5%.

Эксплуатационные испытания при производственной апробации режущих пластин круглой формы из оксидно-карбидной керамики с комплексной упрочняющей обработкой показали, что применение предложенной обработки при принятых условиях резания увеличивает среднее значение стойкости в 1,8 раза (до 20,4 мин.) по сравнению с пластинами без дополнительной обработки, а установленное значение безотказной наработки составило 17,0 минут (относительно 8,5 мин.). Значение коэффициента вариации стойкости режущих пластин после проведения комплексной упрочняющей обработки было уменьшено до 10%. Полученные в производственных условиях экспериментальные данные показывают значительное увеличение эксплуатационной надежности при использовании разработанной в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» технологии комплексной упрочняющей обработки режущих пластин круглой формы из оксидно-карбидной керамики, предусматривающей «сухое» травление атомами аргона в течении 1 час 40 минут и нанесение износостойкого двухслойного покрытия $(\text{TiAl})\text{N}/\text{TiB}_2$ толщиной 4,0 мкм.

Результаты успешной производственной апробации являются основанием для внедрения на участке механообработки АО «Машиностроительная компания «Витязь» токарных резцов, оснащенных режущими пластинами из оксидно-карбидной керамики, прошедшими комплексную упрочняющую обработку, предложенную ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», на операциях токарной обработки заготовок изделий из высокотвердых конструкционных

сталей типа ШХ15СГ (твердостью до 63 HRC).

От АО «Машиностроительная
компания «Витязь»


_____ Артемьев А.Р.

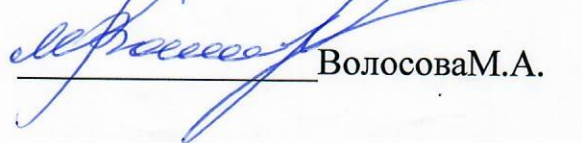

_____ Фахриев С.И.


_____ Нигматуллина Р.Ш.

От ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАН-
КИН»


_____ Мигранов М.Ш.


_____ Шехтман С.Р.


_____ Волосова М.А.

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Уфимское агрегатное предприятие
«ГИДРАВЛИКА»

ТЕХНОДИНАМИКА 
Гидравлика

450001, Россия, Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. Володарского, 2
Тел.: +7 (347) 246-70-01
Факс: +7 (347) 282-04-19
e-mail: gidravlika@tdhc.ru
http: technodinamika.ru

Исх. № _____ от _____
На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Технический директор
АО «УАП «Гидравлика»

В.Е. Токарев
М.П.

«19» июля 2022 г.

АКТ

производственной апробации и внедрения керамического инструмента для лезвийной обработки резанием жаропрочных сталей

Комиссия в составе: от АО «УАП «Гидравлика» – заместитель технического директора Арсланов М.Р.; главный технолог Хабибрахманов М.М.; начальник цеха Стародуб С.И. и от ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» – к.т.н., доцент Волосова М.А. (разработчик керамического инструмента); д.т.н., профессор Мигранов М.Ш.; к.т.н., доцент Сухова Н.А., составила настоящий акт по результатам производственной апробации в период с 14.05.2022г. по 16.06.2022г. режущего инструмента (керамические концевые фрезы и пластины для токарных резцов) для высокоскоростной обработки деталей из коррозионностойких и жаропрочных сталей 15X18H12C4ТЮ и ХН70МВТЮБ-ВД.

Цель проведенной производственной апробации. Оценка износостойкости при высокоскоростной обработке на операциях точения керамическими пластинами жаропрочной стали ХН70МВТЮБ-ВД и керамическими концевыми фрезами (оксинитрид алюминия-кремния) при фрезеровании коррозионностойкой стали 15X18H12C4ТЮ для оценки эффективности разработанного металлорежущего инструмента в условиях машиностроительного производства в цехах АО «УАП «Гидравлика» и принятия решения о целесообразности внедрения керамического инструмента в механообрабатывающее производство.

Оборудование и методика проведения производственной апробации.

Экспериментальные цельные (монокристаллические) концевые керамические

четырёхзубые фрезы с диаметром 10 мм, общей длиной 48 мм, длиной режущей части 8 и углом наклона стружечной канавки 30^0 ; токарные резцы, оснащенные пластинами круглой формы RNGN-190800 с упрочняющей фаской из оксидно-карбидной керамики типа CC650, изготовленные и предоставленные ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» испытывались как на универсальном металлорежущем оборудовании, так с ЧПУ «MAZATROL» и обрабатывающих центрах «Mazak Variaxis 630 - 5x» в широком диапазоне изменения элементов режима резания. В частности, фрезерование стали 15X18H12C4ТЮ проводилось при частоте вращения $n = 14\ 000 - 16\ 000$ об/мин, подаче на зуб $S = 0,015 - 0,03$ мм/зуб и точение жаропрочной стали ХН70МВТЮБ-ВД при скоростях резания $V = 200 - 300$ м/мин, подаче $S = 0,075 - 0,15$ мм/об, глубине $t = 0,5 - 1,0$ мм без применения СОЖ. При этом контролировалась фаска износа по задней грани режущего клина инструментов с использованием инструментального отсчетного микроскопа МИР-2М с насадкой МОВ-15 точностью отсчета до 0,002 мм, в качестве критерия отказа керамических режущих инструментов был принят критический размер фаски износа по задней поверхности 0,4 мм. На основании полученных данных устанавливались зависимости «длина пути резания (l , м) от фаски износа (h_z , мм)» и «период стойкости инструмента (T , мин) от испытываемых инструментов» по результатам которых определялся момент отказа каждого образца из партии режущего инструмента.

Результаты проведения производственной апробации.

1. Результаты проведенных испытаний (экспериментально установленные соотношения «длина пути резания – фаска износа – период стойкости инструмента») керамических фрез при резании коррозионностойкой стали 15X18H12C4ТЮ позволили установить, что:

- использование базового варианта цельных керамических концевых фрез из материала α/β SiAlON при принятых условиях фрезерования обеспечивает повышение периода стойкости инструмента в среднем на 25 – 34%;
- применение специальной поверхностной обработки керамических фрез из оксинитрида алюминия-кремния (материала α/β SiAlON), включающей плазменное травление и нанесение покрытия (CrAlSi)N/DLC по сравнению с базовым вариантом керамических фрез обеспечивает дополнительное увеличение эксплуатационной надежности на 10 – 14 %.

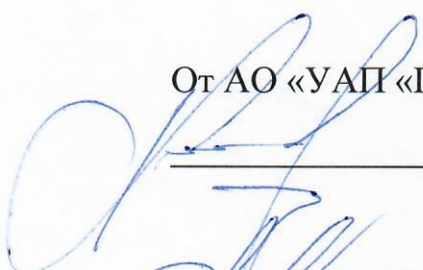
2. По результатам экспериментальных исследований в производственных условиях режущих пластин круглой формы из оксидно-карбидной керамики без дополнительной обработки при точении жаропрочной стали ХН70МВТЮБ-ВД при принятых условиях резания установлено, что:

- обеспечивается повышение среднего значения периода стойкости режущего инструмента на 18 – 24%;

- при испытаниях режущих пластин круглой формы из оксидно-карбидной керамики с последующей дополнительной комплексной упрочняющей обработкой рабочей поверхности позволило увеличить эксплуатационную надежность на 8 – 10 %.

3. Результаты производственной апробации являются основанием для принятия решения о целесообразности внедрения в механообрабатывающее производство АО «УАП «Гидравлика» инновационной разработки ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» – цельных концевых керамических фрез и керамических пластин для точения, прошедших специальную поверхностную обработку, и использования взамен твердосплавного инструмента на отдельных операциях высокоскоростной обработки выпускаемых изделий специального назначения из жаростойких жаропрочных сталей на никелевой основе типа 15X18H12C4ТЮ и ХН70МВТЮБ-ВД.

От АО «УАП «Гидравлика»

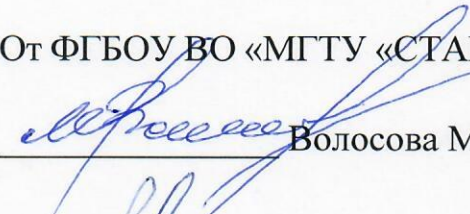

_____ Арсланов М.Р.


_____ Хабибрахманов М.М.

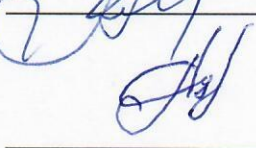

_____ Стародуб С.И.

Гарифуллин Р.С.

От ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»


_____ Волосова М.А.


_____ Мигранов М.Ш.


_____ Сухова Н.А.

«УТВЕРЖДАЮ»
 Генеральный директор
 АО «БелЗАН»
 Т.Ш. Галиахметов
 «27» июня 2022 г.

АКТ

производственных испытаний и внедрения лезвийного инструмента
 из керамического материала

Комиссия в составе: от АО «БелЗАН» – Главный технолог Назмиев М.М.; Заместитель главного инженера - директор ремонтно-эксплуатационной службы Дюльдин О.Е.; Начальник инструментального производства Федоров А.А. и от ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» – к.т.н., доцент Волосова М.А. (разработчик керамического инструмента); д.т.н., профессор Мигранов М.Ш.; д.т.н., профессор Шехтман С.Р., составила настоящий акт по результатам производственной апробации в период с 22.06.2022г. по 25.07.2022г. керамического режущего инструмента (пластины для токарных резцов и концевые фрезы) для высокоскоростной обработки деталей из закаленных и высокопрочных сталей 4X5МФС; 6X6В3МФС; 40X13 и 20X23Н18.

Износостойкость металлорежущего инструмента, изготовленные и предоставленные ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», оценивалась при высокоскоростной обработке на операциях точения керамическими пластинами: закаленных сталей – 4X5МФС; 6X6В3МФС; 40X13 и керамическими концевыми фрезами (оксинитрид алюминия-кремния) при фрезеровании высокопрочных сталей 20X23Н18. Экспериментальные цельные (монолитные) концевые керамические четырехзубые фрезы с диаметром 10 мм и токарные резцы, оснащенные пластинами круглой формы RNGN-190800 с упрочняющей фаской из оксидно-карбидной керамики типа CC650 испытывались на универсальном металлорежущем оборудовании и на станках с ЧПУ «СТХ 310 ecoline» и «НААС VF-2» в широком диапазоне изменения элементов режима резания.

Точение керамическими пластинами закаленных сталей – 4X5МФС; 6X6В3МФС; 40X13 производилось при скоростях резания $V = 280 - 370$ м/мин, подаче $S = 0,05 - 0,2$ мм/об, глубине $t = 0,5 - 1,0$ мм и фрезерование высокопрочной стали 20X23Н18 проводилось при частоте вращения $n = 14\,000 - 16\,000$ об/мин, подаче на зуб $S = 0,015 - 0,03$ мм/зуб, $a_e = 0,25 - 1$ мм и $a_p = 1,5 - 5$ мм. Точение и фрезерование осуществлялось без применения СОТС. В процессе лезвийной обработки деталей осуществлялся контроль износостойкости инструмента путем измерения фаски износа по задней грани режущего клина с использованием инструментального отсчетного микроскопа. При этом в качестве критерия отказа керамических режущих инструментов

был принят критический размер фаски износа по задней поверхности 0,35 мм. Полученные экспериментальные данные обрабатывались и строились зависимости «длина пути резания (l , м) от фаски износа (h_z , мм)» и «период стойкости инструмента (T , мин) от испытываемых инструментов». По результатам анализа полученных зависимостей делалось заключение об эффективности применения каждого образца из партии режущего инструмента.

По результатам производственных испытаний установлено, что:

- использование базового варианта цельных керамических концевых фрез из материала α/β SiAlON при принятых условиях фрезерования обеспечивает повышение периода стойкости инструмента в среднем на 32 – 44%;
- применение специальной поверхностной обработки керамических фрез из оксинитрида алюминия-кремния (материала α/β SiAlON), включающей плазменное травление и нанесение покрытия (CrAlSi)N/DLC по сравнению с базовым вариантом керамических фрез обеспечивает дополнительное увеличение эксплуатационной надежности на 12 – 15 %;
- применение режущих пластин круглой формы из оксидно-карбидной керамики без дополнительной обработки при точении обеспечивает повышение среднего значения периода стойкости режущего инструмента на 22 – 29%;
- при испытаниях режущих пластин круглой формы из оксидно-карбидной керамики с последующей дополнительной комплексной упрочняющей обработкой рабочей поверхности позволило увеличить эксплуатационную надежность на 12 – 17 %.

Анализ полученных результатов производственных испытаний дает основание для принятия решения о целесообразности и необходимости внедрения в механообрабатывающее производство АО «БелЗАН» современного высокопроизводительного металлорежущего инструмента - цельных концевых керамических фрез и керамических пластин для точения, прошедших специальную поверхностную обработку, и использования взамен твердосплавного инструмента на отдельных операциях высокоскоростной обработки выпускаемых изделий из закаленных и высокопрочных сталей 4X5МФС; 6X6B3МФС; 40X13 и 20X23H18.

От АО «БелЗАН»

 Назмиев М.М.

 Дюльдин О.Е.

 Федоров А.А.

От ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

 Волосова М.А.

 Мигранов М.Ш.

 Шехтман С.Р.