На правах рукописи

Мелешкин Ярослав Романович

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ ЗАКАЛЕННЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН НА ОСНОВЕ ДИБОРИДА ТИТАНА

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2026

Работа выполнена на кафедре высокоэффективных технологий обработки федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва.

Научный руководитель	**Григорьев Сергей Николаевич** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высокоэффективных технологий обработки федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва
Официальные оппоненты	**Овчинников Виктор Васильевич** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва
	Штин Антон Сергеевич кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры станков и инструментов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа

Защита состоится «29» декабря 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.332.01, созданного на базе при ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» и на сайте https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/meleshkin-yaroslav-romanovich/index.php.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «___»_____2026 г.

Ученый секретарь,
диссертационного совета
24.2.332.01, к.т.н. Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследовательской работы. В настоящее время закаленные теплостойкие штамповые стали являются основным материалом формообразующей оснастки для горячего деформирования металлов. Из них изготавливают иглы и камеры прессования, вставки матриц, оправки, ролики и пресс-формы, без которых невозможно производство поковок, профилей и отливок из алюминиевых, магниевых и медных сплавов в автомобилестроении, авиационной, энергетической и других отраслях промышленности. Рабочие поверхности такой оснастки подвергаются циклическому нагреву до 550…600 °С, воздействию высоких контактных давлений и термической усталости, вследствие чего детали эксплуатируются в закаленном состоянии при твёрдости 50…55 HRC.

Окончательные размеры рабочих поверхностей оснастки получают после термической обработки, традиционно – шлифованием. Замена шлифования чистовым точением позволяет сократить цикл изготовления, обработать поверхности за один установ и отказаться от применения смазочно-охлаждающих жидкостей. Вместе с тем теплостойкие стали относятся к наиболее трудным для лезвийной обработки материалам. Сохранение твёрдости при нагреве, наличие карбидов хрома, молибдена и ванадия, а также низкая теплопроводность обусловливают высокие силы и температуры резания, а также интенсивное изнашивание инструмента.

Применяемые в настоящее время инструментальные материалы не в полной мере отвечают этим условиям. Твёрдые сплавы при твёрдости заготовки выше 50 HRC быстро теряют работоспособность, инструмент из кубического нитрида бора (КНБ) отличается высокой стоимостью, а применение оксидно-карбидной керамики ограничивается её невысокой трещиностойкостью, вследствие чего основным видом отказа становится выкрашивание режущей кромки.

В этих условиях актуальной является задача повышения износостойкости инструмента при точении закаленных теплостойких сталей путём создания керамического инструмента, сочетающего высокую твёрдость и теплостойкость с повышенной трещиностойкостью. Перспективной основой такого материала является диборид титана (TiB_2), обладающий высокой твёрдостью, теплопроводностью, химической стойкостью и низким коэффициентом трения.

Степень разработанности темы. Вопросам применения режущей керамики и инструмента из сверхтвёрдых материалов для обработки закаленных и труднообрабатываемых сталей посвящены работы отечественных учёных: Григорьева С.Н., Новикова Н.В., Фадеева В.С., Волосовой М.А., Федорова С.Ю., Боровского В.Г., Пронина А.И., Дятловой Я.Г., Бекташова Д.А., Сотовой Е.С. и др.

В работах российских исследователей показано, что при точении закаленных сталей инструмент из оксидно-карбидной керамики не уступает по стойкости, а в ряде случаев превосходит твёрдые сплавы, что обосновывает возможность замены шлифования чистовым точением. Установлено, что износостойкость керамического инструмента при обработке закалённых сталей определяется в том числе физико-механическими свойствами материала пластины.

Обработке закаленных штамповых сталей посвящён ряд зарубежных работ. Для стали AISI H13 исследовано влияние подготовки режущей кромки, твёрдости заготовки и режимов резания на шероховатость поверхности и силы резания при точении инструментом из КНБ. Для стали X38CrMoV5-1 выполнены сравнительные испытания твёрдых сплавов, смешанной керамики и КНБ. Показано, что смешанная

керамика обеспечивает наибольший ресурс среди сопоставимых по стоимости инструментальных материалов. Основными видами отказа являются износ по задней поверхности и выкрашивание режущей кромки. Однако вопрос создания инструмента, адаптированного к условиям точения закаленных теплостойких сталей, не рассматривался.

Микроструктура и механические свойства керамических материалов на основе TiB_2 наиболее системно изучены в зарубежной литературе. Отмечается, что TiB_2 как базовая фаза режущей керамики обладает высокой твёрдостью, высоким модулем упругости, износостойкостью и термостойкостью, однако однофазная керамика TiB_2 характеризуется ограниченной прочностью при изгибе и трещиностойкостью, что требует введения упрочняющих и связующих фаз. Введение в композицию карбидов и нитридов титана повышает прочность, вязкость разрушения и стабильность структуры при высоких температурах. Для композиций TiB_2–TiC установлено, что при рациональном содержании металлической связки (Ni, Mo) достигается сочетание высокой твёрдости и достаточной трещиностойкости, тогда как избыточное содержание металлической фазы ограничивает применение материала при высокоскоростной обработке вследствие разупрочнения связки в зоне резания.

Работы по применению режущей керамики на основе TiB_2 для точения закаленных сталей немногочисленны и выполнены преимущественно на конструкционных и инструментальных сталях. Данные о работоспособности такого инструмента при точении закаленных теплостойких сталей в доступных источниках отсутствуют.

Цель научно-исследовательской работы состоит в повышении износостойкости режущего инструмента и производительности токарной обработки закаленных теплостойких сталей путем разработки и применения сменных многогранных пластин (СМП) с улучшенными физико-механическими и трибологическими свойствами.

Для реализации цели исследования предполагается решить **следующие задачи:**

1) разработать керамический материал на основе диборида титана с адаптированным по критериям физико-механических и трибологических свойств фазовым составом для условий токарной обработки закаленных теплостойких сталей;

2) экспериментальным путем установить рациональные параметры процесса электроэрозионной обработки при изготовлении СМП, обеспечивающие высокую производительность обработки при обеспечении заданного качества обработанной поверхности;

3) провести экспериментальную апробацию СМП, изготовленных из разработанного керамического материала с целью определения рациональных параметров токарной обработки закаленных теплостойких сталей;

4) исследовать износостойкость разработанных СМП путем проведения стойкостных испытаний при токарной обработке закаленных теплостойких сталей с целью определения рациональных режимов обработки для достижения наилучшего качества обработанной поверхности и снижения сил резания при обеспечении высокой производительности обработки;

5) установить зависимости шероховатости обработанной поверхности, периода стойкости инструмента и сил резания с режимами токарной обработки закаленной теплостойкой стали при использовании разработанных СМП.

Объектом исследования работы являются разработанные СМП из керамики на

основе диборида титана, адаптированные под токарную обработку закаленных теплостойких сталей.

Предметом исследования является влияние режимов токарной обработки закаленных теплостойких сталей на стойкость разработанных СМП, качество обработанной поверхности и силы резания.

Научная новизна состоит в:

1) создании СМП на основе диборида титана, полученных искровым плазменным спеканием с последующей электроэрозионной обработкой, позволяющих повысить стойкость инструмента при точении закаленных теплостойких сталей (на примере стали 4Х5МФС) на 44 %, а также производительность обработки на 22 %, в сравнении с коммерческим аналогом ВОК-60 [п.4];

2) установлении расчетно-экспериментальных зависимостей шероховатости обработанной поверхности от режимов токарной обработки закаленной теплостойкой стали 4Х5МФС разработанными СМП на основе диборида титана [п. 3];

3) установлении расчетно-экспериментальных зависимостей стойкости разработанных СМП на основе диборида титана и сил резания от режимов токарной обработки закаленной теплостойкой стали 4Х5МФС [п. 6].

Методы исследования. Диссертационное исследование опирается на фундаментальные положения теории резания и физического материаловедения. Результаты экспериментов обработаны с применением методов математической статистики и теории планирования эксперимента. В работе использованы экспериментальные подходы, включающие обработку заготовок из штамповой стали, регистрацию сил резания при точении и оценку параметров шероховатости полученных поверхностей. Все измерения выполнены в лабораторных условиях на сертифицированном оборудовании и поверенных измерительных средствах. Достоверность полученных данных обеспечивается корректностью применённых методик, воспроизводимостью экспериментальных результатов, согласованием теоретических и экспериментальных зависимостей, а также их соответствием данным других исследователей.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии научных представлений о закономерностях качества обработанной поверхности, стойкости режущего инструмента, а также сил резания, возникающих при точении закаленных теплостойких сталей в исследуемом диапазоне скоростей обработки, подачи и глубины резания.

Практическая значимость исследования заключается в:

1) рекомендациях по выбору режимов искрового плазменного спекания керамического композита TiB_2–TiC–Al_2O_3–Ni–Mo для получения заготовок режущих пластин;

2) рекомендациях по выбору режимов электроэрозионной обработки для изготовления сменных многогранных пластин из разработанного керамического материала;

3) рекомендациях по выбору режимов токарной обработки заготовок из закаленных теплостойких сталей разработанным керамическим инструментом.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) создание СМП на основе диборида титана, полученных искровым плазменным спеканием с последующей электроэрозионной обработкой, позволяющих

повысить стойкость инструмента, снизить шероховатость обработанной поверхности и силы резания при точении закаленных теплостойких сталей;

2) зависимости шероховатости обработанной поверхности от режимов токарной обработки закаленной теплостойкой стали разработанным керамическим инструментом;

3) зависимости стойкости разработанного керамического инструмента и сил резания при токарной обработке закаленной теплостойкой стали.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается согласованностью теоретических и экспериментальных данных, а также успешной апробацией основных положений в рецензируемых научных изданиях и на международных научных конференциях.

Апробация. Основные положения диссертационной работы были доложены на конференциях: 1) XXXVI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения, 4-6 декабря 2024 года, г. Москва; 2) XXI Международная научно-техническая конференция «БЫСТРОЗАКАЛЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ», 22-23 октября 2024 года, г. Москва; 3) Международная научно-практическая конференция «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2024» (ICMSSTE 2024), 28-31 мая 2024 года, г. Ялта.

Отдельные результаты диссертационной работы получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (проект № FSFS-2025-0006).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе 5 статей в журналах из списка изданий, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в журналах, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science, 4 печатных работ в сборниках международных научно-технических конференций, получено 4 патента на изобретение Российской Федерации.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части пунктов 3, 4 и 6 её паспорта.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы: основной текст содержит 180 страниц, включая 93 рисунка и 51 таблицу; список литературы включает 133 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и степень разработанности темы исследования, формулируются цель и задачи работы, уточняются объект и предмет исследования. Излагаются научная новизна, теоретическая и практическая значимость, формулируются положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения об апробации полученных результатов в научных изданиях и на конференциях, подтверждающие их достоверность.

В первой главе выполнен литературный обзор состояния проблемы токарной обработки закалённых теплостойких сталей. Разграничены понятия теплостойкости, жаропрочности и жаростойкости: в отличие от жаропрочных и жаростойких сталей,

работающих в условиях ползучести и коррозии, теплостойкость является характеристикой инструментальной стали и определяет её способность сохранять твёрдость и прочность, полученные при закалке и отпуске, при нагреве в процессе эксплуатации. Приведена классификация штамповых сталей для горячего деформирования по уровню теплостойкости: стали умеренной теплостойкости, повышенной теплостойкости и высокой теплостойкости. В качестве объекта обработки выбрана сталь повышенной теплостойкости 4Х5МФС, применяемая в закалённом состоянии при твёрдости 50…55 HRC.

Закалённые теплостойкие штамповые стали являются основным материалом оснастки для горячего деформирования и литья под давлением: из них изготавливают пресс-формы для литья под давлением алюминиевых и магниевых сплавов, вставки матриц и штампы горячей объёмной штамповки, иглы, камеры прессования, пресс-шайбы, втулки контейнеров и матрицы прессов, оправки для горячей раскатки колец и ролики прокатных станов (рисунок 1). Рабочие поверхности таких деталей, имеющих, как правило, форму тел вращения, должны обладать высокой точностью и низкой шероховатостью и окончательно обрабатываются после закалки. Свойства, обеспечивающие работоспособность этих сталей в оснастке, одновременно делают их труднообрабатываемыми резанием: сохранение твёрдости при нагреве до 550…600 °С ослабляет разупрочнение материала в зоне резания, дисперсные специальные карбиды хрома, молибдена и ванадия оказывают абразивное воздействие на режущую кромку, а низкая теплопроводность концентрирует тепло в зоне контакта. В результате при точении наблюдаются высокие силы и температуры резания, интенсивный абразивно-адгезионный износ инструмента, выкрашивание и терморастрескивание режущей кромки.

В настоящее время точение закалённых теплостойких сталей преимущественно выполняется токарным инструментом с режущими пластинами из кубического нитрида бора и твёрдого сплава, однако оба указанных вида инструмента имеют существенные ограничения. Инструмент из кубического нитрида бора отличается высокой стоимостью, чувствительностью к ударным нагрузкам и вибрациям, пониженной стойкостью при прерывистом резании и строгими требованиями к жёсткости технологической системы и точности режимов резания, что существенно удорожает и усложняет процесс обработки. Твёрдосплавный инструмент при обработке закалённых теплостойких сталей демонстрирует ограниченную стойкость при высоких скоростях резания, склонность к интенсивному износу на участках с упрочнённым поверхностным слоем и, как следствие, требует частой переналадки и замены. На этом фоне керамический режущий инструмент обладает рядом преимуществ: он позволяет реализовывать более высокие скорости резания, отличается термостойкостью, меньшей чувствительностью к высокой температуре в зоне резания и способен обеспечивать высокое качество обработанной поверхности при снижении затрат на инструментальную оснастку, что делает его перспективным для высокоэффективного точения закалённых теплостойких сталей. Твёрдое точение керамикой замещает шлифование и даёт обработку в один установ вместо смены оборудования, возможность получить сложный профиль одним инструментом, отказ от СОЖ и, как следствие, снятие вопроса утилизации шлифовального шлама и эмульсии.

Проанализированы методы и подходы, обеспечивающие высокую эффективность токарной обработки рассматриваемых сталей. В качестве основного из них выбран подход создания инструмента из нового керамического композиционного материала.

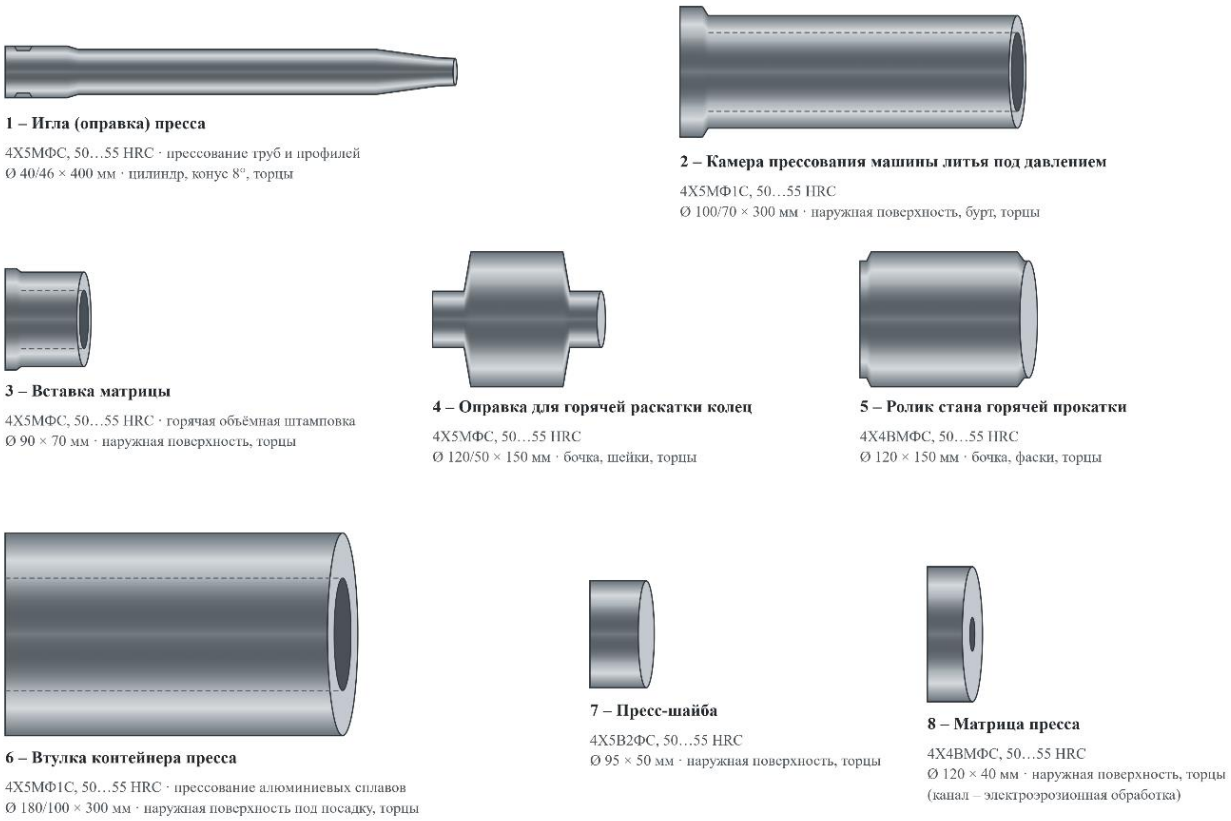

Рисунок 1 – Примеры деталей, изготавливаемых из закалённых теплостойких штамповых сталей

Рассмотрены современные тренды разработки и создания инструмента из режущей керамики. Анализ работ, публикуемых ведущими мировыми периодическими изданиями в области разработки и применения керамики, показывает, что в мировой науке направление развития и совершенствования режущих керамик связано с улучшением их прочностных и трибологических свойств. Один из подходов для достижения улучшенных характеристик режущих керамик – совершенствование свойств керамики путем правильного подбора состава керамической композиции, добавление в нее различных функциональных и упрочняющих фаз и применение инновационных технологий спекания, например искрового плазменного спекания.

При точении закалённых теплостойких штамповых сталей в качестве режущего инструмента преимущественно применяют керамики на основе оксида алюминия (Al_2O_3), в том числе чисто оксидную и оксидно-карбидную керамику с добавками карбида титана (TiC), а также смешанные составы, сочетающие оксидную и нитридную фазы для повышения трещиностойкости и работоспособности при прерывистом резании. Такие материалы обеспечивают высокую термостойкость и возможность работы на повышенных скоростях резания, однако их стойкость и надёжность в условиях сложного напряжённого состояния, характерного для обработки штамповых сталей, остаются ограничивающим фактором. В этой связи представляет особый интерес режущий инструмент на основе диборида титана и композиционных керамик с его участием, поскольку высокая твёрдость и химическая инертность TiB_2, его выраженная износостойкость при абразивном и адгезионном износе, а также способность сохранять прочностные характеристики при повышенных температурах создают предпосылки для обеспечения более высокой стойкости инструмента,

стабильности режущих свойств и качества поверхности при точении закалённых теплостойких штамповых сталей. Благодаря сочетанию этих свойств керамика на основе диборида титана может быть потенциально более эффективной по сравнению с традиционными оксидными и оксидно-карбидными составами и рассматривается как перспективный объект для дальнейших исследований и внедрения в практику высокоэффективной обработки.

Частицы TiC могут эффективно повышать износостойкость композитных материалов на основе TiB_2 за счет повышения твердости на границе раздела фаз. Частицы Al_2O_3 увеличивают плотность и предел прочности при изгибе керамики TiB_2 при высоких температурах за счет подавления их теплопередачи.

Добавка Al_2O_3 в систему TiB_2–TiC повышает термохимическую стабильность и стойкость к окислению, а также способствует снижению пористости, что приводит к росту прочности, твердости и трещиностойкости в условиях резания. Кроме того, Al_2O_3 улучшает теплостойкость и снижает коэффициент трения в зоне резания, что благоприятно сказывается на стойкости инструмента при обработке труднообрабатываемых сплавов.

Никель (Ni) в составе системы TiB_2–TiC служит металлической связкой, улучшает спекание за счет хорошей смачиваемости обеих керамических фаз и переводит процесс в режим жидкофазного спекания, обеспечивая высокую плотность и вязкость разрушения получаемого композита. Наличие пластичной Ni-фазы снижает хрупкость материала, повышает ударную вязкость и позволяет инструменту выдерживать переменные нагрузки и вибрации без катастрофического скола режущей кромки.

Добавка молибдена (Mo) улучшает смачиваемость и согласование коэффициентов теплового расширения между керамикой и металлической связкой, способствуя снижению пористости и измельчению зерен TiB_2/TiC. Молибден формирует обогащённые оболочки вокруг карбидных частиц, стабилизирует микроструктуру при спекании, повышает прочность и износостойкость, что критично для долговечной работы режущего инструмента.

Во второй главе представлен комплексный обзор материалов, оборудования и экспериментальных методик, применённых при проведении исследований в рамках диссертационной работы. Детально рассмотрены лабораторные технологии подбора и подготовки порошковых компонентов, а также процесс их консолидации с использованием технологии искрового плазменного спекания (ИПС). Раскрыты процедуры и параметры подготовки полученных спечённых образцов к исследованию физико-механических характеристик.

Обоснован выбор метода консолидации. Диборид титана относится к трудноспекаемым соединениям. Из-за сильной ковалентной связи, низкого коэффициента самодиффузии и оксидных плёнок на поверхности частиц для уплотнения TiB_2 без приложения давления требуются температуры свыше 2000 °C, а длительная выдержка вызывает аномальный рост зёрен и образование микротрещин. При горячем прессовании укрупняются зёрна тугоплавких фаз и металлическая связка Ni–Mo интенсивно взаимодействует с боридной и карбидной фазами, а горячее изостатическое прессование требует предварительного получения заготовки с закрытой пористостью или её капсулирования. При ИПС нагрев импульсным током непосредственно через графитовую матрицу и порошковую шихту с высокой

скоростью при одновременном приложении давления позволяет завершить спекание за несколько минут выдержки при температуре на 200-300 °С ниже, чем при горячем прессовании. Благодаря этому удаётся получить относительную плотность более 99 %, сохранить мелкозернистую структуру и сформировать связующую фазу на основе Ni–Mo без нежелательных продуктов взаимодействия. Требуемое для режущей пластины сочетание твёрдости и трещиностойкости для композиции TiB_2–TiC–Al_2O_3–Ni–Mo другими методами консолидации не достигается.

Особое внимание уделено методике изготовления экспериментальных образцов сменных многогранных пластин из спечённых керамических заготовок с применением электроэрозионной и финишной абразивной обработок.

Вместе с тем методом ИПС можно получить только осесимметричные заготовки простой формы. При попытке спекать сразу пластину заданной формы неравномерное распределение теплового потока приводит к перегреву углов и тонких участков заготовки, выплавлению связки Ni–Mo, росту зёрен и изменению фазового состава. Поэтому разработанная технология изготовления СМП является комбинированной и включает искровое плазменное спекание дисковых заготовок, обеспечивающее требуемые структуру и свойства материала, и электроэрозионную обработку (ЭЭО), с помощью которой из спечённого диска вырезают заготовки пластин заданного контура. Применение ЭЭО обусловлено тем, что разработанная керамика благодаря высокой твёрдости практически не поддаётся лезвийной обработке, а наличие электропроводных фаз и металлической связки Ni–Mo делает её пригодной для электроэрозионной резки. Окончательные размеры и качество поверхностей СМП обеспечивают алмазным шлифованием.

В главе представлен технологический процесс (ТП) изготовления СМП. Первый этап ТП содержит процессы изготовления дисковых заготовок керамики диаметром 40 ± 0,5 мм и толщиной 6 ± 0,25 мм с использованием технологии ИПС. Второй этап представляет процессы изготовления СМП со шлифованными поверхностями, имеющими диаметр вписанной окружности диаметром 12,7 ± 0,025 и толщину 4,76 ± 0,025 мм с использованием технологий ЭЭО и алмазного шлифования. Для изготовления СМП из режущей керамики была выбрана следующая конфигурация: SNGN120408.

В третьей главе представлено обоснование выбора состава разрабатываемой инструментальной керамики. На основе проведенного в первой главе литературного обзора были определены компоненты керамического композита для режущего инструмента – матрица (TiB_2) и упрочняющие фазы (TiC, Al_2O_3, Ni, Mo).

В работе был использован метод экспериментов для смесей, позволивший на основе 10 составов керамического композита, выявить область рационального состава – соотношения матрицы и основных фаз (TiC, Al_2O_3). Материалы были синтезированы методом искрового плазменного спекания при следующих параметрах: температура 1700°С, давление 80 МПа, время выдержки 5 мин. В качестве критериев разрабатываемой керамики оценивали физико-механические и трибологических свойства: относительную плотность, твердость, трещиностойкость, предел прочности при изгибе и коэффициент трения. Далее, были получены регрессионные модели, описывающие зависимость каждого свойства от состава смеси. На основе выбранных моделей, имеющих наибольшие коэффициенты детерминации, были построены контурные графики характеристик спеченных образцов, визуализирующие

прогнозируемые значения. Наложение графиков позволило определить область составов разрабатываемой керамической композиции для инструментального материала, отличающаяся повышенными физико-механическими и трибологическими свойствами (рисунок 2).

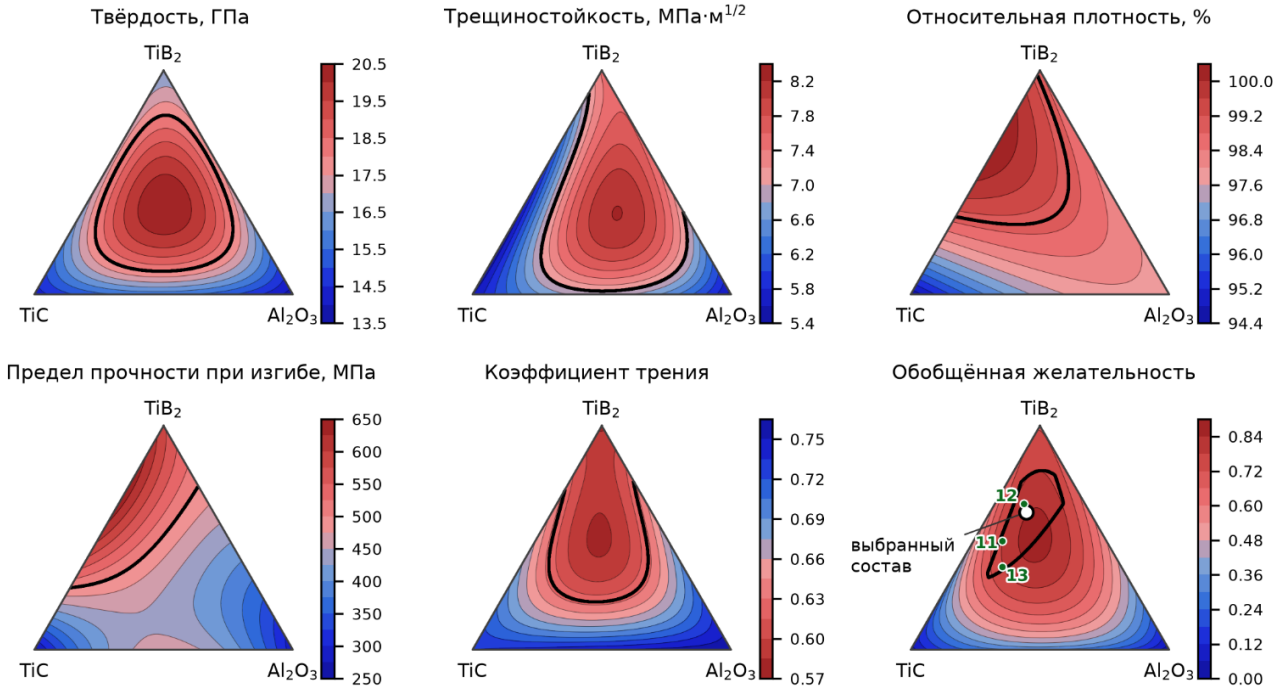

Рисунок 2 – Выбор рационального состава инструментальной керамики

В таблице 1 представлен разработанный состав режущей керамики.

Таблица 1 – Состав разработанной режущей керамики

Материал	Содержание каждого компонента (мас.%)				
TiB_2-TiC-Al_2O_3- Ni-Mo	TiB_2	TiC	Al_2O_3	Ni	Mo
	56,34	18,25	15,41	6	4

Поскольку разработанная керамика для режущего инструмента представляет собой новый материал, и отсутствуют рекомендации по электроэрозионной обработке данной керамики, следующим этапом исследования стал выбор ее рациональных режимов.

Для этого применяли планирование экспериментов по методике Тагути и серый реляционный анализ. Серый реляционный анализ позволяет свести несколько выходных параметров с разными единицами измерения к одному обобщённому показателю, серой реляционной оценке, по значению которой можно однозначно ранжировать режимы. В качестве задающих факторов были выбраны параметры обработки: напряжение тока разряда (U), длительность импульса (T_{on}), частота импульса (f), скорость перемотки проволоки (q), натяжение проволоки (n), давление промывки (P)). В качестве параметров отклика рассматривались шероховатость обработанной поверхности, скорость удаления материала, величина ширины реза и толщина белого слоя.

В ходе исследования было определено, что основное влияние на толщину белого слоя оказывают напряжение разрядов и длительность импульсов – с увеличением обоих

факторов возрастает толщина белого слоя. Определяющее влияние на шероховатость оказывает длительность импульсов: с увеличением продолжительности импульса наблюдается устойчивый рост шероховатости поверхности. В отличие от прочих выходных параметров, ширина реза является многофакторным откликом: в её формировании принимает участие большинство исследуемых технологических переменных. Увеличение напряжения разряда, длительности импульса и давления промывающей жидкости приводит к возрастанию ширины реза, тогда как рост частоты импульсов, скорости перемотки и натяжения проволоки оказывает противоположное, снижающее воздействие на данный параметр. Установлено, что производительность процесса, выраженная в скорости удаления материала, определяется преимущественно двумя факторами: напряжением разряда и скоростью перемотки проволоки – оба оказывают прямое положительное воздействие, то есть с повышением каждого из них скорость удаления материала монотонно возрастает.

На рисунке 3 представлены графики влияния параметров ЭЭО на серую реляционную оценку.

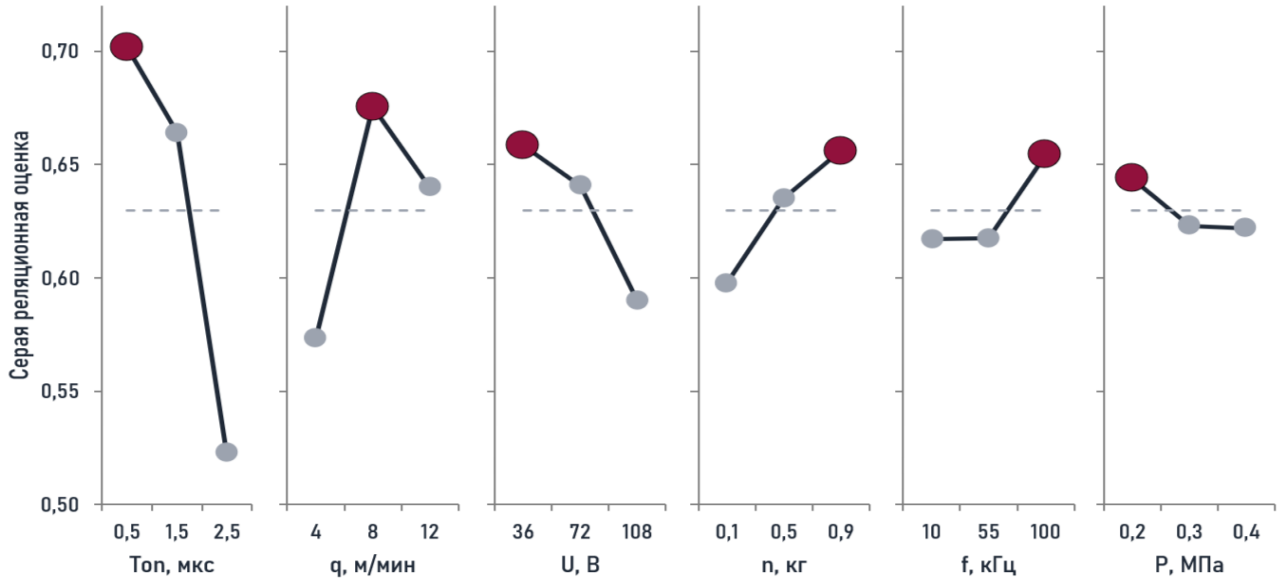

Рисунок 3 – Графики влияния факторов ЭЭО на серую реляционную оценку

На основе проведенных опытов и обработки полученных результатов определили влияние главенствующих факторов на каждый из рассматриваемых откликов. Выявлено, что следующие режимы электроэрозионной обработки: U = 36 В; T_{on} = 0,5 мкс; f = 100 кГц; q = 8 м/мин, n = 0,9 кг, P = 0,2 МПа являются рациональными для достижения требуемых выходных характеристик. Оптимизация позволила обеспечить снижение толщины белого слоя на 28,9 %, шероховатости поверхности реза на 17,5 % и ширины реза на 4,8 %.

В данной работе адекватность и рациональность применения разработанной режущей керамики оценивается путём сравнения с доступными в настоящее время инструментами-аналогами. Для сравнения были взяты сменные многогранные пластины из оксидно-карбидной керамики марки ВОК-60 (Al_2O_3–TiC) и оксидно-карбонитридной керамики Al_2O_3–Ti(C,N).

В таблице 2 представлены сравнительные свойства рассматриваемых керамик. Разработанный материал по трещиностойкости превосходит ВОК-60 и Al_2O_3–Ti(C,N) в 1,7 и 1,6 раза соответственно при сопоставимой относительной плотности (от 99,4 до 99,6 %). По твёрдости он уступает оксидно-карбонитридной керамике примерно на

10 %, а по пределу прочности при изгибе – обоим аналогам на 3 и 18 %. Коэффициент трения разработанной керамики меньше ВОК-60 на 17 % и на 22 % ниже, чем у Al_2O_3–Ti(C,N). Существенным преимуществом разработанного инструмента является повышенная теплопроводность. Она обеспечивает более интенсивный отвод теплоты от режущей кромки и снижает уровень термических напряжений, поэтому разработанный материал менее чувствителен к термоудару и термоциклированию, чем оксидная и оксидно-карбонитридная керамики. Сочетание вышеперечисленных свойств позволяет ожидать снижения интенсивности изнашивания и сил резания по сравнению с серийными аналогами.

Таблица 2 – Характеристики рассматриваемых инструментальных керамик

Свойство	TiB_2-TiC-Al_2O_3-Ni-Mo	ВОК-60	Al_2O_3-Ti(C,N)
Твёрдость, ГПа	18,3	19,1	20,4
Трещиностойкость K_{1C}, МПа·м$^{1/2}$	7,2	4,1	4,5
Предел прочности при изгибе, МПа	620	637	760
Относительная плотность, %	99,6	99,4	99,5
Коэффициент трения	0,52	0,63	0,67
Теплопроводность, Вт/м·К	47	22	24

В четвертой главе подробно описана технология проведения стойкостных испытаний разработанных СМП и сравниваемых коммерческих аналогов, которая включала в себя измерение сил резания, износа инструмента и шероховатости обработанной поверхности.

В качестве объекта обработки использовалась цилиндрическая заготовка из закаленной штамповой стали 4Х5МФС (55 HRC) диаметром 120 мм. Химический состав стали представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Химический состав стали 4Х5МФС

C	Cr	Mo	V	Si	Mn	Cu	Ni	S	P
0,32-0,4	4,5-5,5	1,2-1,5	0,3-0,5	0,0-1,2	0,2-0,5	до 0,3	до 0,4	до 0,03	до 0,03

Обработка проводилась на токарном станке модели ZMM Sliven CU 500-M RD без использования смазочно-охлаждающих жидкостей. Для закрепления режущей пластины формы SNGN120408 T02020N использовали державку токарного резца CSRNR2525M12, позволяющую надежно закреплять инструмент с высокой точностью позиционирования и обеспечивающую следующую геометрию закрепления: $\gamma = -6°$, $\alpha = 6°$, $\varphi = 75°$, $f_\phi \times \gamma_\phi = 0{,}2$ мм $\times 20°$.

Определение оптимальных режимов резания при точении критически важно для баланса между производительностью, качеством поверхности и стойкостью инструмента, особенно при обработке закалённых теплостойких сталей. Выбор режимов точения закаленной стали 4Х5МФС был проведен с помощью робастного планирования экспериментов по методу Тагути с применением серого реляционного анализа.

На основе проведенного литературного обзора и экспериментальных проходов выбирали следующие управляемые факторы, которые варьировали в пределах трех уровней: скорость резания, подача и глубина резания. В качестве параметров отклика использовали шероховатость обработанной поверхности, удельный съем материала и стойкость инструмента. Перечень факторов и их уровни представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Значения факторов и уровней эксперимента

Фактор (единицы измерения)	Обозначение	Уровень		
		1	2	3
Скорость резания (м/мин)	*V*	100	175	250
Подача (мм/об)	*s*	0,05	0,10	0,15
Глубина резания (мм)	*t*	0,4	0,5	0,6

В ходе исследования было определено, что шероховатость обработанной поверхности определяется подачей: с увеличением подачи шероховатость возрастает. Влияние двух остальных факторов на порядок слабее. Период стойкости инструмента определяется скоростью резания, причём с подавляющим преобладанием. Повышение скорости снижает период стойкости в 5,2 раза. Удельный съем материала возрастает с увеличением любого из факторов, что следует из самого её определения как произведения скорости, подачи и глубины. Наибольший вклад дают подача и скорость резания, наименьший – глубина резания.

Сопоставление влияния факторов на три отклика показывает, что их требования к режиму обработки противоречивы. Повышение скорости резания одновременно улучшает два отклика из трёх (снижает шероховатость и повышает производительность) и резко ухудшает третий, снижая стойкость в пять раз. Повышение подачи увеличивает производительность, но втрое ухудшает шероховатость. Именно это обстоятельство потребовало свёртки трёх откликов в единый критерий – серую реляционную оценку, по которому рациональным оказалось сочетание $V = 100$ м/мин, $s = 0{,}15$ мм/об, $t = 0{,}4$ мм. На рисунке 4 представлены графики влияния параметров обработки на серую реляционную оценку.

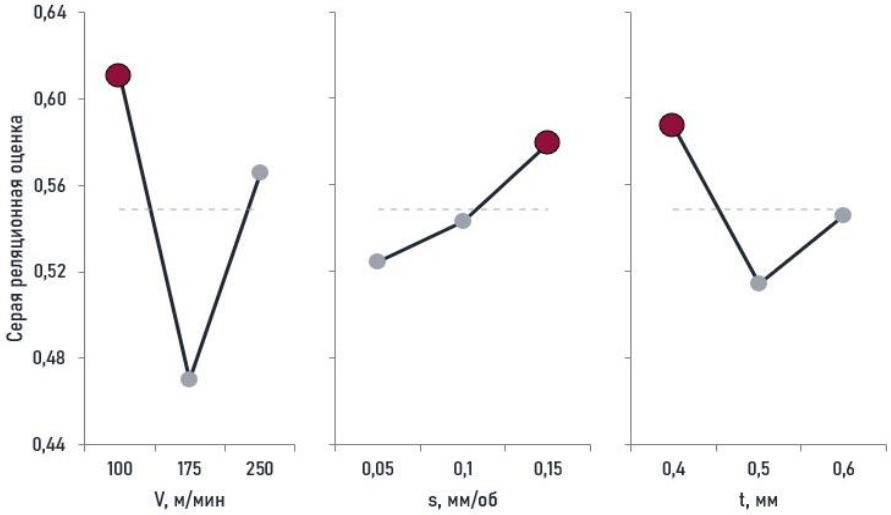

Рисунок 4 – Графики влияния факторов токарной обработки на серую реляционную оценку

Далее, были проведены однофакторный и полный факторный эксперименты. В качестве откликов оценивали шероховатость обработанной поверхности, силы резания и период стойкости инструмента. На основе регрессионного анализа были построены математические модели зависимости целевой функции от режимов обработки. Применение полного факторного эксперимента позволило оценить не только главные эффекты факторов, но и их парные и тройное взаимодействия. Коэффициенты при взаимодействиях оказались незначимыми по критерию Стьюдента, поэтому модели представлены в степенной форме.

Измерение сил резания позволяет оценить нагрузку на режущую кромку, характер стружкообразования, устойчивость процесса резания, а также косвенно судить об энергоёмкости процесса и эффективности применяемых режимов резания.

После обработки экспериментальных результатов получили зависимости главной составляющей силы резания при токарной обработке закаленной стали 4Х5МФС от режимов обработки, представленные на рисунках 5-7. На рисунке 8 представлены поверхности отклика равнодействующей силы резания.

Разработанный инструмент обеспечивает снижение всех составляющих силы резания во всём исследованном диапазоне режимов: на 15-18 % относительно ВОК-60 и на 26-28 % относительно Al_2O_3–Ti(C,N).

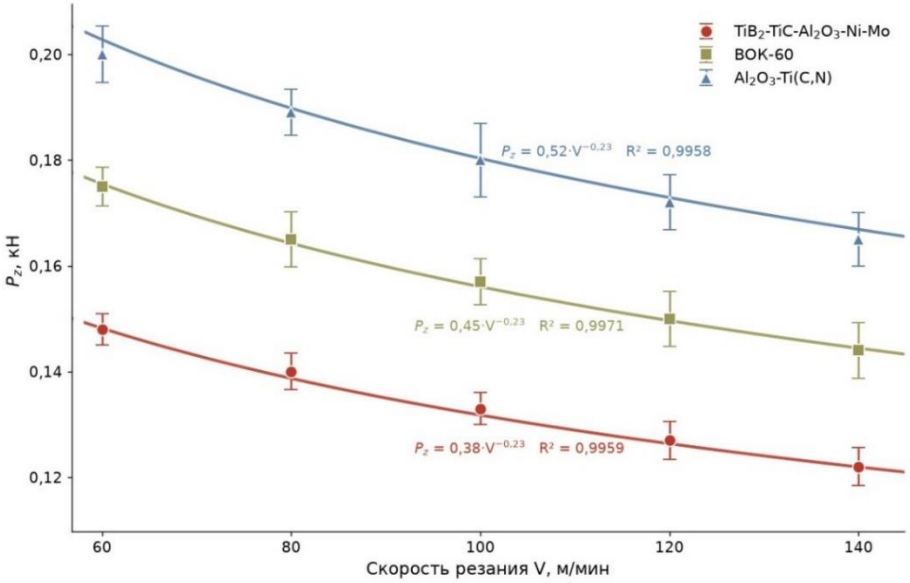

Рисунок 5 – Графики зависимостей главной составляющей силы резания от скорости резания (t = 0,4 мм; s = 0,15 мм/об)

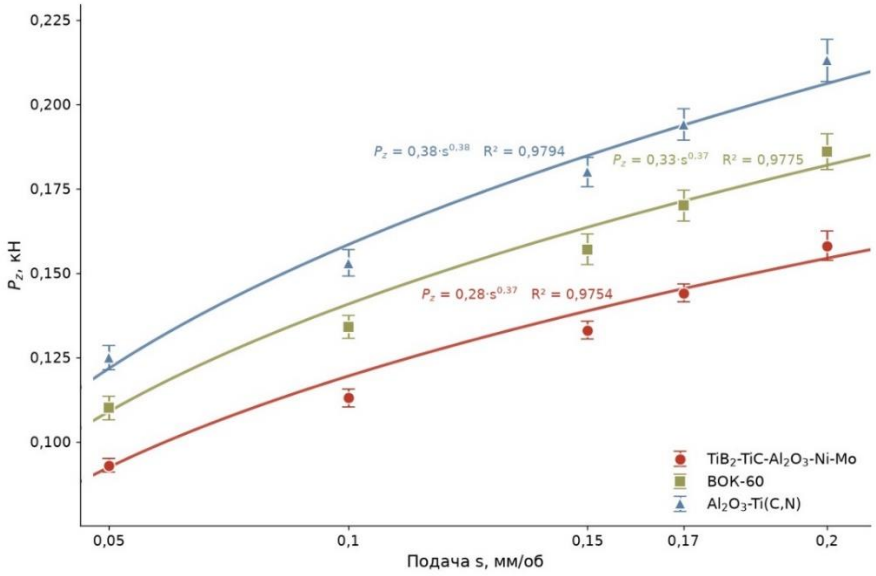

Рисунок 6 – Графики зависимостей главной составляющей силы резания от подачи (V = 100 м/мин; t = 0,4 мм)

По результатам полного факторного эксперимента получены модели составляющих и равнодействующей сил резания (1-4):

$$P_z = 1{,}6 \times V^{-0{,}25} \times s^{0{,}38} \times t^{0{,}67} \quad (1)$$

$$P_y = 2{,}7 \times V^{-0{,}23} \times s^{0{,}37} \times t^{0{,}69} \quad (2)$$

$$P_x = 2{,}5 \times V^{-0{,}24} \times s^{0{,}7} \times t^{1{,}32} \quad (3)$$

$$P = 3{,}4 \times V^{-0{,}23} \times s^{0{,}39} \times t^{0{,}71} \quad (4)$$

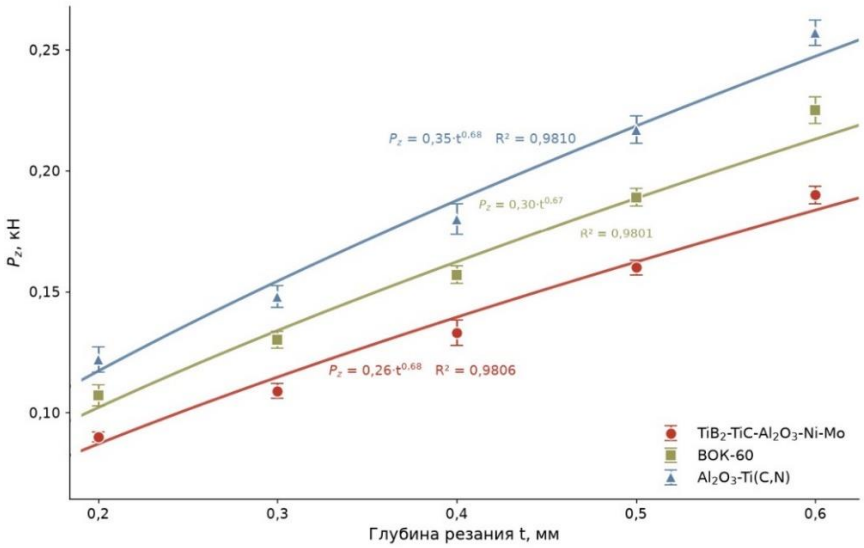

Рисунок 7 – Графики зависимостей главной составляющей силы резания от глубины резания (V = 100 м/мин; s = 0,15 мм/об)

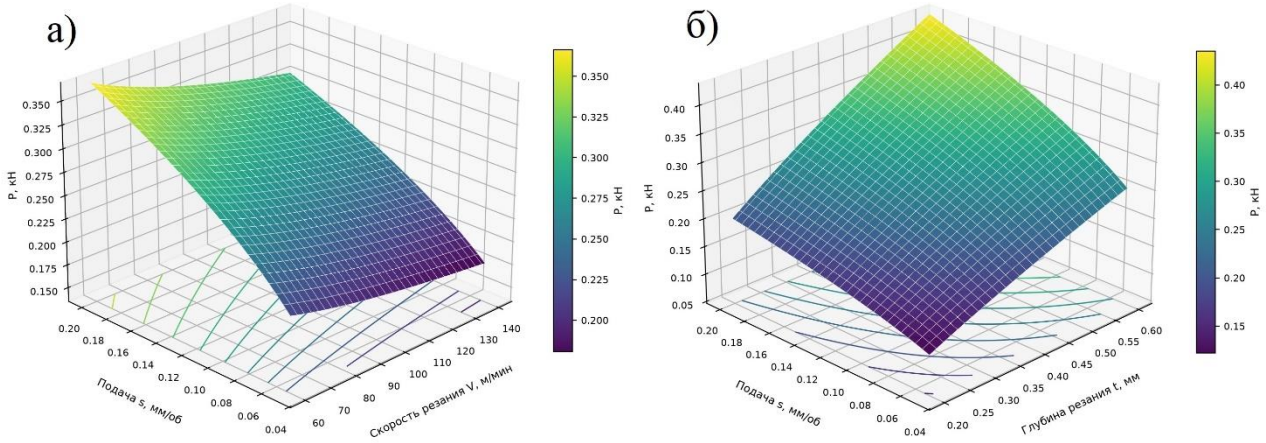

Рисунок 8 – Поверхности отклика равнодействующей силы резания:
а) от скорости резания и подачи при t = 0,4 мм; б) от глубины резания и подачи при V = 100 м/мин

На рисунках 9-11 представлены графики зависимостей шероховатости обработанной поверхности от режимов токарной обработки закаленной стали 4Х5МФС рассматриваемыми инструментами, а на рисунке 12 показаны поверхности отклика для данного показателя.

Шероховатость обработанной поверхности снижается с ростом скорости резания – на 38 % при повышении с 60 до 140 м/мин – и возрастает с увеличением подачи (на 90 % при изменении с 0,05 до 0,20 мм/об) и глубины резания (на 56 % при изменении с 0,2 до 0,6 мм). Разработанный инструмент обеспечивает шероховатость на 21 % ниже, чем ВОК-60, и на 36 % ниже, чем Al_2O_3-Ti(C,N).

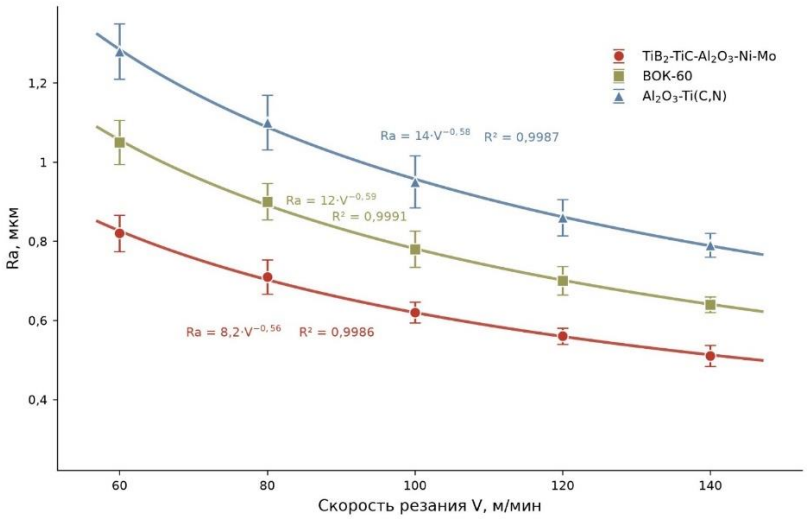

Рисунок 9 – Графики зависимостей шероховатости обработанной поверхности от скорости резания (t = 0,4 мм; s = 0,15 мм/об)

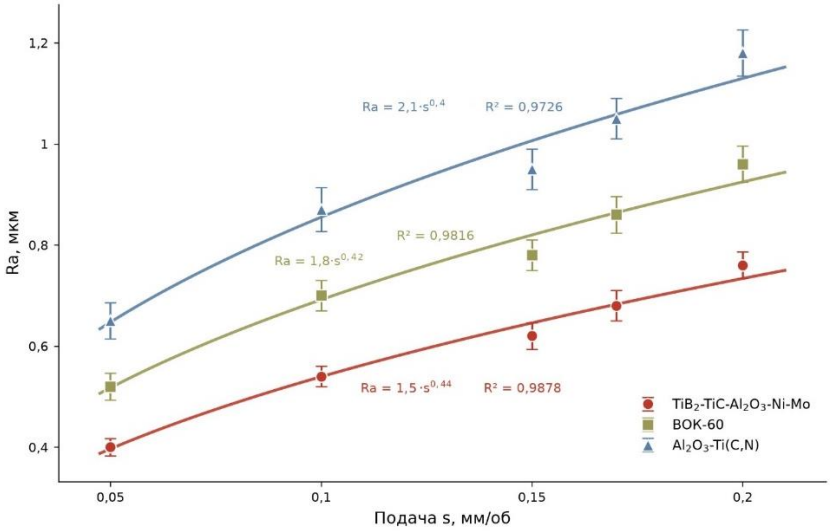

Рисунок 10 – Графики зависимостей шероховатости обработанной поверхности от подачи (V = 100 м/мин; t = 0,4 мм)

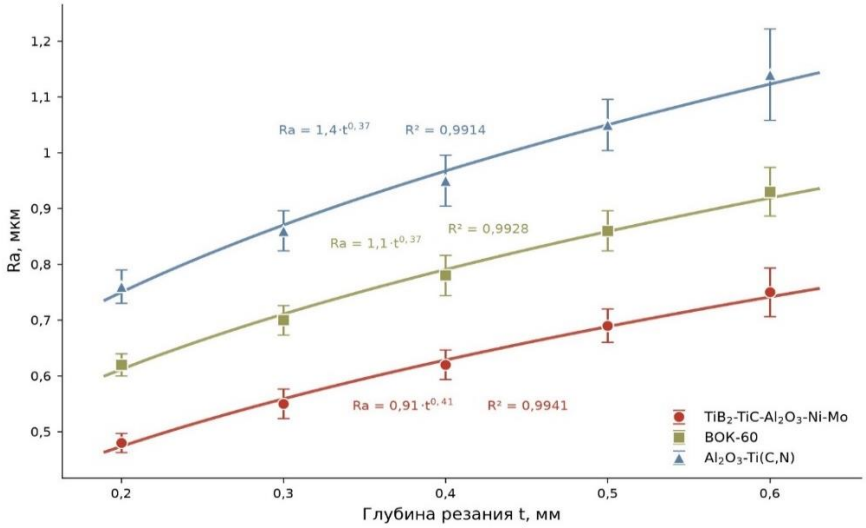

Рисунок 11 – Графики зависимостей шероховатости обработанной поверхности от глубины резания (V = 100 м/мин; s = 0,15 мм/об)

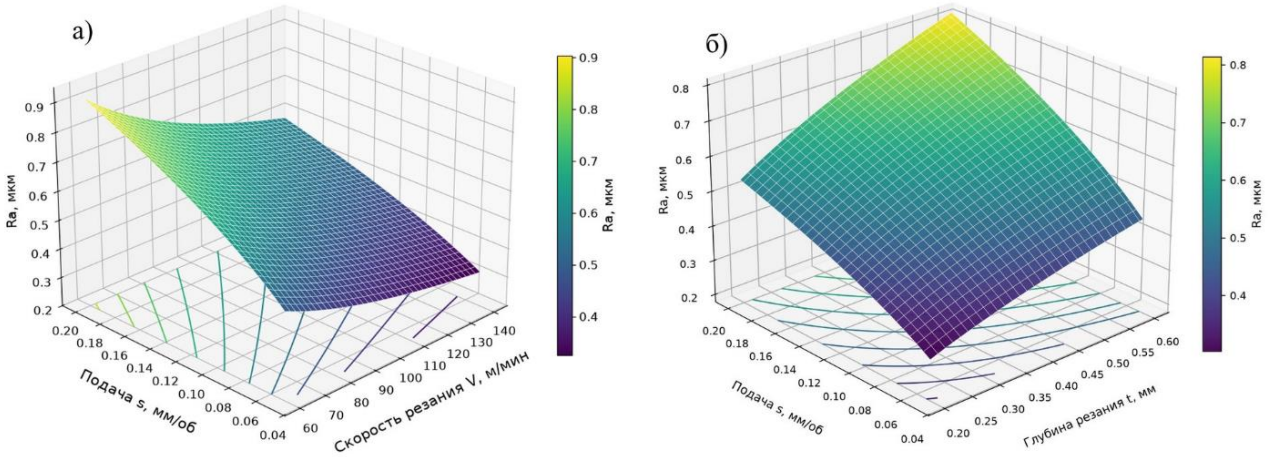

Рисунок 12 – Поверхности отклика шероховатости обработанной поверхности закаленной штамповой стали: а) от скорости резания и подачи при t = 0,4 мм; б) от глубины резания и подачи при V = 100 м/мин

Модель шероховатости имеет вид (5):

$$Ra = 23 \times V^{-0,53} \times s^{0,44} \times t^{0,39} \quad (5)$$

Затем проводились стойкостные испытания рассматриваемых инструментов на рациональных режимах обработки. Износ контролировали на оптическом микроскопе через фиксированные промежутки времени – от 1 до 32 мин. Каждый опыт выполнялся с трёхкратной повторностью. Стойкостные испытания прекращались, когда значение $h_з$ превышало 0,3 мм или при появлении сколов размером более 0,15 мм на рабочих поверхностях режущей пластины.

В результате проведенных испытаний была установлена стойкость разработанной СМП и коммерческих аналогов. На рисунке 13 представлены экспериментально построенные кривые «износ – время» для керамических пластин из различных материалов при точении закаленной штамповой стали 4Х5МФС.

Из рисунка следует, что при принятом критерии отказа разработанный инструмент обеспечивает период стойкости 29,5 мин против 20,5 мин у ВОК-60 и 13,7 мин у Al_2O_3-Ti(C,N), то есть повышает стойкость инструмента в 1,44 и 2,15 раза соответственно. Преимущество сохраняется на всём протяжении испытания, а не только в момент отказа: при любом фиксированном времени работы износ разработанного инструмента меньше, чем у обоих коммерческих материалов, причём разрыв нарастает с наработкой.

На рисунках 14-16 представлены зависимости стойкости рассматриваемых инструментов от режимов токарной обработки, а на рисунке 17 показаны поверхности отклика периода стойкости.

Характер полученных зависимостей одинаков для всех трёх материалов и соответствует известным закономерностям изнашивания керамического инструмента. Определяющим фактором является скорость резания: при её повышении с 60 до 140 м/мин период стойкости снижается на 78 %. Влияние подачи существенно слабее: уменьшение подачи с 0,15 до 0,05 мм/об повышает стойкость на 25, 26 и 29 % для разработанной керамики, ВОК-60 и Al_2O_3-Ti(C,N) соответственно, причём наиболее чувствительной к подаче оказывается наименее трещиностойкая керамика Al_2O_3–Ti(C,N). Во всём исследованном диапазоне режимов кривые не пересекаются – разработанный материал сохраняет наибольшую стойкость, а его относительное

преимущество увеличивается по мере ужесточения режима: относительно ВОК-60 оно возрастает с 1,3 до 1,5 раза, относительно Al_2O_3-Ti(C,N) – с 1,8 до 2,3 раза при повышении скорости резания с 60 до 140 м/мин. Такое поведение объясняется повышенной трещиностойкостью и практически беспористой структурой разработанного материала: с ростом скорости и температуры в зоне резания возрастает роль термоусталостного и хрупкого разрушения контактных площадок, к которому более трещиностойкая керамика менее склонна.

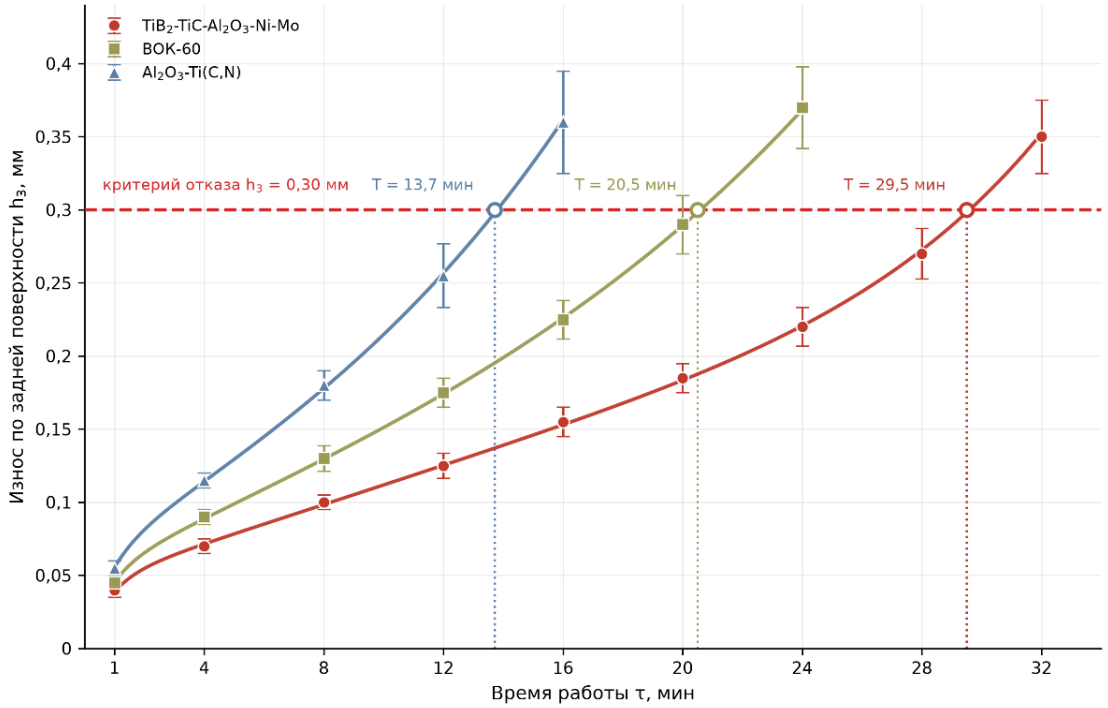

Рисунок 13 – График кривых «износ-время» рассматриваемых инструментов при точении закаленной штамповой стали 4Х5МФС

Модель периода стойкости имеет вид (6):

$$T = 7{,}5\times10^{4}\times V^{-1{,}83}\times s^{-0{,}22}\times t^{-0{,}17} \qquad (6)$$

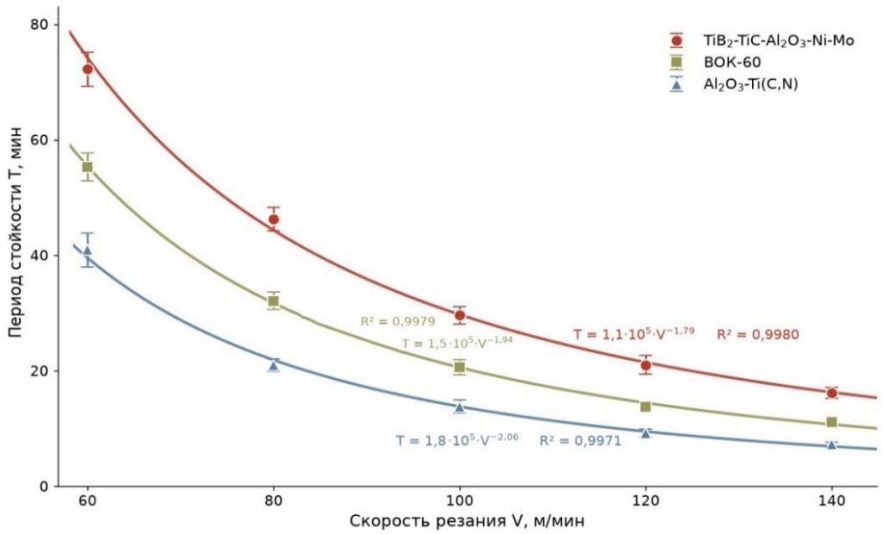

Рисунок 14 – Графики зависимостей стойкости инструмента от скорости резания (t = 0,4 мм; s = 0,15 мм/об)

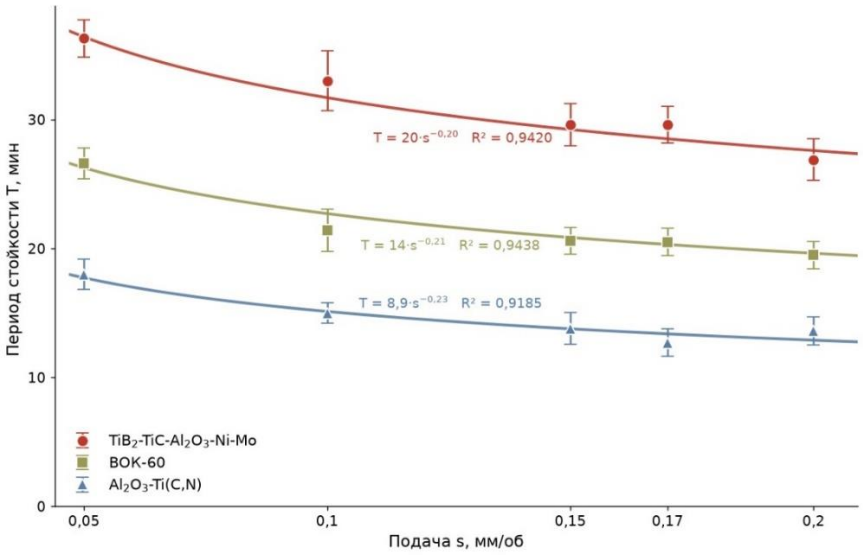

Рисунок 15 – Графики зависимостей стойкости инструмента от подачи (V = 100 м/мин; t = 0,4 мм)

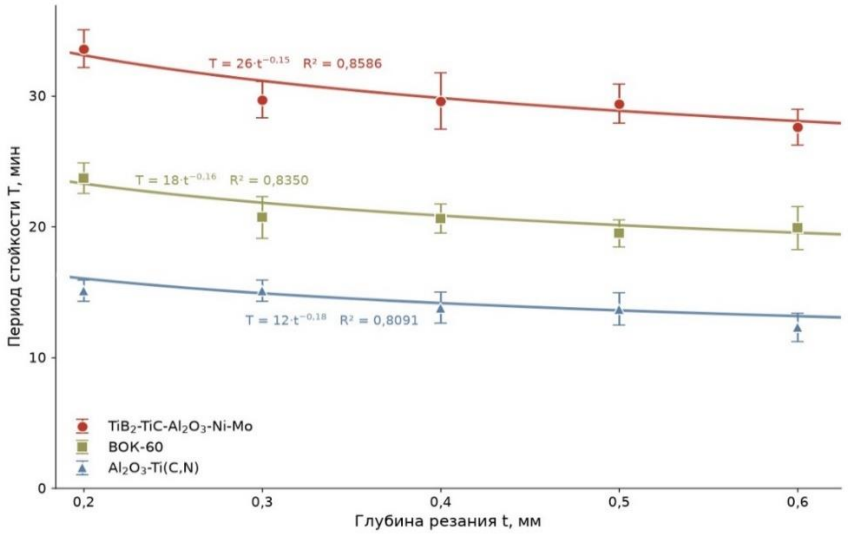

Рисунок 16 – Графики зависимостей стойкости инструмента от глубины резания (V = 100 м/мин; s = 0,15 мм/об)

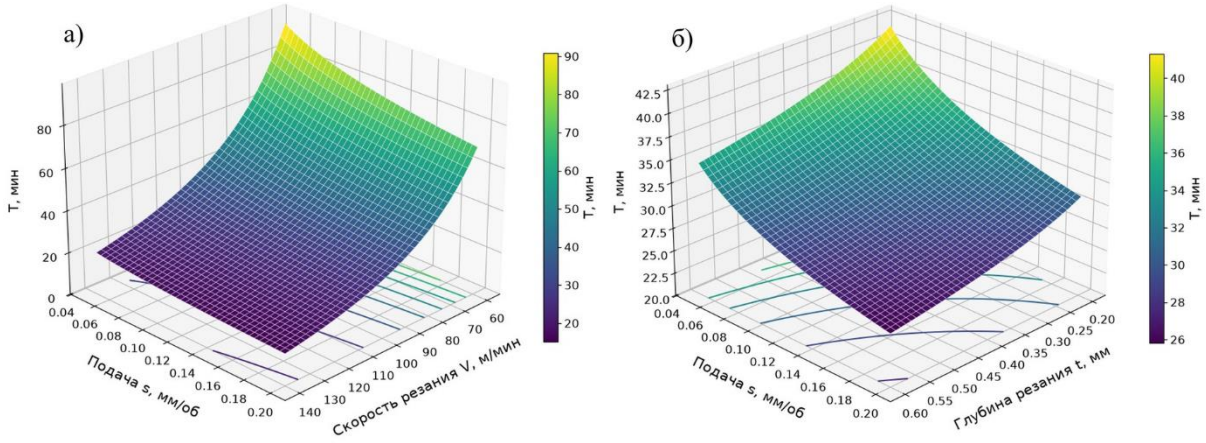

Рисунок 17 – Поверхности отклика стойкости режущего инструмента: а) от скорости резания и подачи при t = 0,4 мм; б) от глубины резания и подачи при V = 100 м/мин

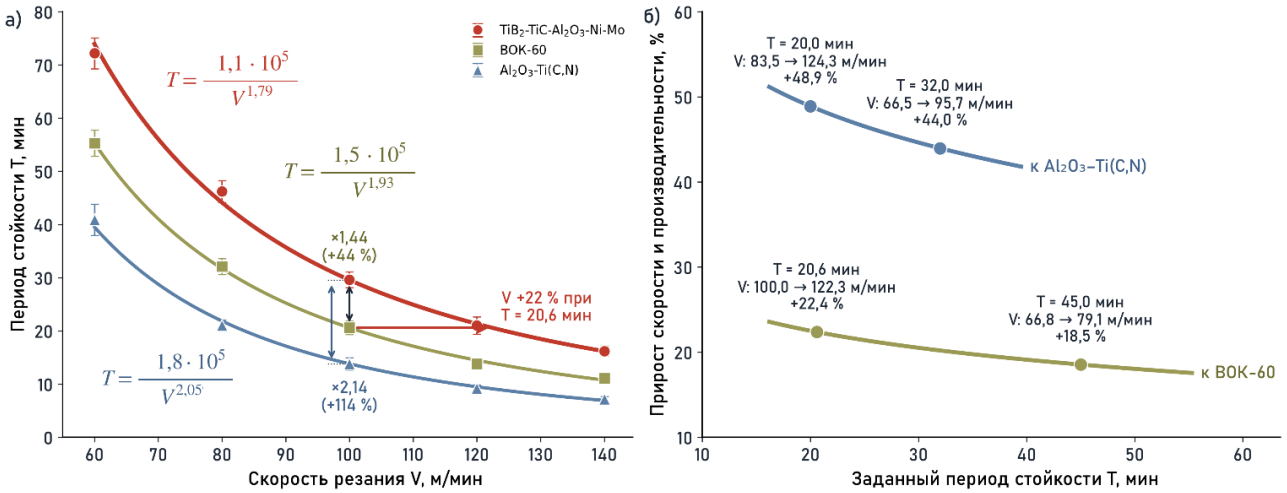

Рисунок 18 – Сравнение эффективности резания: а) график зависимости стойкости инструментов от скорости резания; б) график зависимости прироста в скорости и производительности от заданной стойкости

Сравнение моделей стойкости трёх режущих керамик (рисунок 18) при точении стали 4Х5МФС показывает, что во всём исследованном диапазоне скоростей разработанный инструмент обеспечивает наибольший период стойкости. Показатель степени при скорости у разработанной керамики наименьший по абсолютной величине, поэтому с ростом скорости её стойкость снижается медленнее, и преимущество имеет тенденцию увеличиваться с повышением скорости. При одинаковом заданном периоде стойкости разработанный инструмент допускает скорость резания, а значит и производительность обработки, выше на 22 % по сравнению с ВОК-60 и на 46,5 % по сравнению с Al_2O_3–Ti(C,N).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, имеющие существенное значение для развития машиностроительной отрасли и обеспечивающие высокоэффективную обработку закаленных сталей, которая выражается в повышении периода стойкости режущего инструмента, снижении шероховатости обработанной поверхности и сил резания посредством применения разработанной режущей керамики на основе диборида титана.

Полученные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработан керамический инструментальный материал, адаптированный под условия токарной обработки закаленных теплостойких сталей за счет повышения физико-механических и трибологических характеристик, следующего состава: 56,34 мас.% TiB_2 – 18,25 мас.% TiC – 15,41 мас.% Al_2O_3 – 6 мас.% Ni – 4 мас.% Mo.

2. Установлено рациональное сочетание параметров электроэрозионной обработки, обеспечивающее требуемое качество обработанной поверхности при изготовлении СМП: U = 36 В; T_{on} = 0,5 мкс; f = 100 кГц; v = 8 м/мин, N = 0,9 кг, P = 0,2 МПа. Толщина белого слоя снижена на 28,9 %, шероховатость поверхности – на 17,5 %, ширина реза – на 4,8 % по сравнению с начальными режимами обработки.

3. Определено рациональное сочетание параметров резания при токарной обработке закаленных теплостойких сталей (на примере 4Х5МФС) разработанным

керамическим инструментом: скорость резания 100 м/мин, подача 0,15 мм/об, глубина 0,4 мм.

4. Разработанный керамический инструмент превосходит серийные аналоги по всем исследованным показателям. Период стойкости выше на 44 % относительно ВОК-60 и на 115% относительно Al_2O_3-Ti(C,N). Производительность токарной обработки повышена на 22 % и 46,5%, соответственно. Радиальная составляющая силы резания снижена на 15 % и 26 %, соответственно. Шероховатость обработанной поверхности ниже на 21 % и 36 %, соответственно.

5. Установлены регрессионные модели шероховатости обработанной поверхности, сил резания и периода стойкости в зависимости от режимов точения закалённой теплостойкой стали 4Х5МФС. Адекватность моделей доказана по критериям Кохрена, Стьюдента, Фишера.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК

1. **Мелешкин, Я. Р.** Исследование физико-механических свойств керамических композитов TiB_2–TiC–Al_2O_3 / Я. Р. Мелешкин, Н. В. Солис Пинарготе // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 1 (76). – С. 20–33.

2. **Мелешкин, Я. Р.** Изучение трибологических и физико-механических свойств керамических композитов / Я. Р. Мелешкин, Н. В. Солис Пинарготе // Вестник МГТУ «Станкин». – 2027. – № 1 (в печати).

3. **Мелешкин, Я. Р.** Определение режимов обработки закаленной штамповой стали 4Х5МФС при точении керамическим инструментом / Я. Р. Мелешкин, Н. В. Солис Пинарготе, С. Н. Григорьев // Вестник машиностроения. – 2027. – Т. 106, № 1 (в печати).

4. **Мелешкин, Я. Р.** Оптимизация процесса электроэрозионной обработки керамики на основе диборида титана / Я. Р. Мелешкин, Н. В. Солис Пинарготе // Вестник машиностроения. – 2026. – Т. 105, № 12 (в печати).

5. **Мелешкин, Я. Р.** Исследование влияния режимов резания на шероховатость обработанной поверхности, силы резания и стойкость керамического инструмента при точении закаленной стали 4Х5МФС / Я. Р. Мелешкин, Н. В. Солис Пинарготе // Вестник МГТУ «Станкин». – 2027. – № 1 (в печати).

Публикации в журналах, цитируемых Scopus и Web of Science

6. Solís Pinargote, N. W. Prediction of physical and mechanical properties of Al_2O_3–TiB_2–TiC composites using design of mixture experiments / N. W. Solís Pinargote, Yu. Pristinskiy, **Ya. Meleshkin**, A. Yu. Kurmysheva, A. Mozhaev, N. Lavreshin, A. Smirnov // Ceramics. – 2024. – Vol. 7, no. 4. – P. 1639–1657.

7. Solis Pinargote, N. W. Design of mixture experiments of Al_2O_3–TiB_2–TiC composites. Part 1. Prediction of relative density and flexural strength / N. W. Solis Pinargote, R. S. Khmyrov, N. O. Khmelevsky, Yu. Pristinskiy, **Ya. Meleshkin**, A. Smirnov // High Temperature Material Processes. – 2025. – Vol. 29, no. 2. – P. 67–79.

8. Solis Pinargote, N. W. Design of mixture experiments of Al_2O_3–TiB_2–TiC composites. Part 2. Prediction of Vickers hardness and fracture toughness / N. W. Solis Pinargote, Yu. Pristinskiy, **Ya. Meleshkin**, A. Smirnov // High Temperature Material Processes. – 2025. – Vol. 29, no. 2. – P. 81–89.

Прочие публикации

9. Солис Пинарготе, Н. В. Планирование эксперимента для смесей композиционных материалов на основе Al_2O_3–TiB_2–TiC с целью прогнозирования их физико-механических свойств / Н. В. Солис Пинарготе, Е. Кузнецова, А. Ю. Курмышева, А. Смирнов, **Я. Р. Мелешкин** // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2024. – № 13. – С. 670–682.

10. Solís Pinargote, N. W. Design of mixture experiments for the prediction of physical and mechanical properties of composites based on Al_2O_3–TiB_2–TiC / N. W. Solís Pinargote, E. Kuznetsova, A. Yu. Kurmysheva, A. Smirnov, **Ya. R. Meleshkin** // Advances in Mechanical Engineering: selected contributions from the conference (Saint Petersburg, June 20, 2024). – Cham: Springer, 2025. – P. 301–308.

11. **Мелешкин, Я. Р.** Планирование эксперимента для смесей системы Al_2O_3–TiB_2–TiC с целью прогнозирования твердости и трещиностойкости / Я. Р. Мелешкин, А. Смирнов, Ю. О. Пристинский, А. Ю. Курмышева, Н. В. Солис Пинарготе // XXXVI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС-2024) : сборник трудов конференции (Москва, 4–6 декабря 2024 г.). – Москва: Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, 2024. – С. 23–28.

12. **Мелешкин, Я. Р.** Планирование эксперимента для смесей системы Al_2O_3–TiB_2–TiC с целью прогнозирования относительной плотности и предела прочности на изгиб / Я. Р. Мелешкин, А. Смирнов, Ю. О. Пристинский, А. Ю. Курмышева, Н. В. Солис Пинарготе // Быстрозакаленные материалы и покрытия : материалы XXI Международной научно-технической конференции (Москва, 22–23 октября 2024 г.). – Москва: Пробел-2000, 2024. – С. 271–276.

13. Солис Пинарготе, Н. В. Прогнозирование механических свойств композиционных материалов на основе Al_2O_3–TiB_2–TiC / Н. В. Солис Пинарготе, Е. Кузнецова, А. Ю. Курмышева, А. Смирнов, **Я. Р. Мелешкин** // Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2024 (ICMSSTE 2024) : материалы Международной научно-практической конференции (Ялта, 28–31 мая 2024 г.). – Симферополь: Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, 2024. – С. 99–104.

Патенты

14. Патент № 2827754 C1 Российская Федерация, МПК C04B 35/58, C04B 35/56, C04B 35/117. Композиционный керамический материал для режущих инструментов: № 2024108210: заявл. 28.03.2024; опубл. 01.10.2024 / Григорьев С.Н., Солис П.Н.В., Волосова М.А., Пристинский Ю.О., Смирнов А., Курмышева А.Ю., **Мелешкин Я.Р.**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

15. Патент № 2827207 C1 Российская Федерация, МПК C04B 35/58, C04B 35/117. Композиционный керамический материал для режущих инструментов: № 2024108193: заявл. 28.03.2024; опубл. 23.09.2024 / Григорьев С.Н., Солис П.Н.В., Волосова М.А., Пристинский Ю.О., Смирнов А., Кузнецова Е.В., **Мелешкин Я.Р.**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

16. Патент № 2827204 C1 Российская Федерация, МПК C04B 35/56, C04B 35/58, C04B 35/117. Композиционный керамический материал для режущих инструментов: № 2024108189: заявл. 28.03.2024; опубл. 23.09.2024 / Солис П.Н.В., Смирнов А., Кузнецова Е.В., Курмышева А.Ю., **Мелешкин Я.Р.**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

17. Патент № 2824553 C1 Российская Федерация, МПК C22C 29/14, C04B 35/58, B23P 15/28. Композиционный керамический материал для режущих инструментов: № 2024108191: заявл. 28.03.2024; опубл. 12.08.2024 / Солис П.Н.В., Смирнов А., Кузнецова Е.В., Курмышева А.Ю., **Мелешкин Я.Р.**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Научное издание

Мелешкин Ярослав Романович

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ ЗАКАЛЕННЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН НА ОСНОВЕ ДИБОРИДА ТИТАНА

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук