

На правах рукописи



Тет Наинг Со

**СОЗДАНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ КЕРАМИКИ SiC-TiB₂-TiC ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН») на кафедре высокоэффективных технологий обработки.

Научный руководитель	Солис Пинарготе Нестор Вашингтон кандидат технических наук, доцент кафедры «Высокоэффективных технологий обработки» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва
Официальные оппоненты	Мокрицкий Борис Яковлевич доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (г. Комсомольск-на-Амуре)
Ведущая организация	Назаров Алмаз Юнирович кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» (г. Уфа)
Ведущая организация	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», г. Москва

Защита состоится «__» _____ 2025 г. в __ ч. __ мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 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 «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте: <https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/tet-naing-so/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 «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь, диссертационного совета 24.2.332.01, к.т.н.



Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность данной исследовательской работы. В настоящее время решение вопроса производительной обработки труднообрабатываемых материалов, таких как чугун, закаленные стали, никелевые и титановые сплавы все еще остается актуальной задачей. В связи с растущим производством разнообразных механизмов и машин в мире, в промышленно развитых странах массово используют закаленную шарикоподшипниковую сталь ШХ15 (или ее аналоги) для производства многообразных деталей, таких как детали подшипников, валики топливных насосов, оси различных рычагов и др. Для обеспечения высокого качества обработанной поверхности изделий из закаленной стали ШХ15, которая характеризуется высокой твердостью и хорошим сопротивлением износу, используется шлифование с помощью абразивных материалов, однако этот процесс дорогостоящий и сложный. С целью сокращения времени изготовления деталей из закаленной стали ШХ15 было предложено использовать инструмент из режущей керамики для замены операции черного шлифования на точение. Режущая керамика – это материал, способный обеспечивать высокопроизводительную и качественную обработку при его минимальном износе. Преимуществами режущей керамики являются высокая твердость и устойчивость к высоким температурам и химическому воздействию, а к ее недостаткам относятся: низкая пластичность и трещиностойкость, а также ее высокая хрупкость при обработке в условиях ударных нагрузок.

Для обеспечения широкого применения режущих керамик в промышленности необходимо устранить ее недостатки. Поэтому задача создания новых керамических композиционных материалов (КМ) для применения в качестве режущей керамики и исследования их эксплуатационных свойств при резании труднообрабатываемых материалов является на сегодняшний день актуальной. Это подтверждается тем, что на протяжении последних десятилетий непрерывно проводятся многочисленные научно-исследовательские работы, направленные на создание новых составов материалов для режущих керамических инструментов, которые обладают повышенными эксплуатационными характеристиками, такими как стойкость и долговечность. Повышение эксплуатационных характеристик режущих керамик можно достичь не только за счет поиска и создания новых составов, но и путем применения новых методов спекания керамических материалов, например, технологии искрового плазменного спекания, которая является перспективной для спекания сложных керамических систем с повышенными механическими свойствами.

Степень разработанности темы. Развитием новых технологий для изготовления инструментальных керамических материалов занимались многие ученые, среди которых хочется отметить Геллера Ю.А., Моисеева В.М., Кремнева Л.С., Григорьева С.Н., Кузина В.В., Перетягина П.Ю., Пожидаева С.С. и др. Популярными материалами, применяемыми для изготовления режущих керамик, являются оксид алюминия (Al_2O_3), карбонитрид титана ($TiCN$), нитрид кремния (Si_3N_4), карбид кремния (SiC) и карбид титана (TiC). Эти материалы по отдельности имеют высокую прочность и температурную стабильность, однако они обычно обладают низкой пластичностью и трещиностойкостью, что затрудняет их обработку и формирование сложных форм. Карбид кремния – самый известный керамический материал с выдающимися свойствами, такими как низкая плотность и высокая твердость, прочность и стойкость к коррозии и окислению, а также высокая теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения. Однако монолитные SiC -материалы

имеют низкую трещиностойкость. Различными учеными было доказано, что эффективным способом повышения износостойкости и трещиностойкости КМ на основе SiC является внедрением в них различных упрочняющих фаз, таких как TiC. Введение частиц TiC полностью препятствует росту удлиненных зерен SiC и обеспечивает формирование более разноосной микроструктуры, что приводит к увеличению прочности КМ SiC-TiC. Помимо этого, механические свойства КМ на основе SiC можно улучшить внедрением частиц из диборида титана (TiB₂). Благодаря своим свойствам, таким как высокая твердость и износостойкость, а также высокая теплопроводность и электропроводность TiB₂ является привлекательным армирующим материалом для режущих инструментов и износостойких деталей на основе SiC-керамики. Таким образом, можно ожидать, что включение TiB₂ в композиты SiC-TiC сделает его электропроводящим, а также упрочнит и повысит износостойкость керамического режущего инструмента и, таким образом, расширит его применение для передовых инженерных сфер. Дополнительное улучшение свойств при разработке композиционных материалов можно осуществлять за счет введения графена (G) в керамическую матрицу, так как он обладает рядом уникальных свойств, включая высокую прочность, превосходную электропроводность, теплопроводность и низкий коэффициент трения. Ввиду низкой спекаемости компонентов SiC, TiC, TiB₂ в традиционных методах спекания и без использования спекающих добавок систему SiC-TiB₂-TiC-G необходимо консолидировать при помощи новой технологии, такой как технология искрового плазменного спекания (ИПС). Эта технология позволяет спекать подобные керамические системы без использования спекающих добавок и при этом сохранять исходный размер частиц. Сохранение ультрадисперсной структуры в режущей керамике является ключевым моментом для достижения превосходных свойств материала. На сегодняшний день в России практически отсутствуют разработки в данном направлении и результаты данной работы будут иметь большую значимость для науки и промышленности.

Цель научно-исследовательской работы состоит в создании режущего инструмента из керамики системы SiC-TiB₂-TiC для повышения его стойкости при механической обработке деталей из закаленных сталей и улучшения качества обработанной поверхности.

Задачи исследования, которые предполагается решить для достижения поставленной цели:

- 1) определить состав и выявить рациональные режимы спекания для керамики системы SiC-TiB₂-TiC путем исследования физико-механических свойств полученных образцов;
- 2) изготовить сменные многогранные режущие пластины (СМРП) из разработанной керамики для проведения исследования механизма улучшения ее физико-механических характеристик, повышающих стойкость режущего инструмента;
- 3) провести сравнительные стойкостные испытания режущих пластин из новой керамики относительно инструмента с режущей частью из модифицированной графеном керамики при точении закаленной стали ШХ15 и оценить качество обработанных поверхностей.

Объектом исследования в данной работе являются процессы взаимодействия созданного режущего инструмента из керамики системы SiC-TiB₂-TiC и закаленной стали ШХ15, проявляющиеся как изменение качества обработанной поверхности детали и периода стойкости токарного инструмента.

Предметом исследования является влияние комбинации составов предложенной режущей керамики SiC-TiB₂-TiC, в том числе с добавкой графена, на режущую способность инструмента при точении закаленной стали ШХ15.

Научная новизна состоит в:

- 1) установленной взаимосвязи режимов электроэрозионной обработки режущей керамики системы SiC-TiB₂-TiC с параметрами качества обработанной поверхности режущих пластин;
- 2) установленной взаимосвязи шероховатости обработанной поверхности детали из закаленной стали ШХ15 с режимами резания при точении инструментом из режущей керамики системы SiC-TiB₂-TiC;
- 3) выявленном эффекте самовосстановления повреждений разработанной режущей керамики системы SiC-TiB₂-TiC, возникающих в поверхностном слое.

Методы исследования. Диссертационные исследования выполнены на основе основных положений теории резания и физического материаловедения. Полученные в ходе экспериментов результаты были обработаны с использованием методов математической статистики и теории экспериментального проектирования.

Теоретическая значимость работы заключается в прогнозировании качества обработанной поверхности закаленной стали ШХ15 и линейного износа по задней поверхности режущего инструмента из режущей керамики системы SiC-TiB₂-TiC при точении в пределах исследуемых скоростей обработки, подачи и глубины резания.

Практическая значимость исследования заключается в:

- 1) разработанной лабораторной технологии изготовления пластин из режущей керамики SiC-TiB₂-TiC, включающую выбор и подготовку порошковых компонентов, консолидацию смесей по технологии искрового плазменного спекания, электроэрозионную обработку спеченных дисков, и шлифование опорных и рабочих поверхностей режущих пластинок;
- 2) рекомендации по выбору режимов резания инструментом из режущей керамики SiC-TiB₂-TiC, обеспечивающих требуемую шероховатость обработанной поверхности;
- 3) рекомендации по выбору режимов резания инструментом из режущей керамики SiC-TiB₂-TiC, обеспечивающих повышение стойкости при обработке закаленной стали.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) взаимосвязи режимов электроэрозионной обработки режущей керамики системы SiC-TiB₂-TiC с параметрами качества поверхности режущих пластин [п. 4];
- 2) взаимосвязи шероховатости обработанной поверхности детали из закаленной стали ШХ15 с режимами резания при точении инструментом из новой режущей керамики системы SiC-TiB₂-TiC, модифицированной графеном и без [п. 3];
- 3) зависимость величины износа по задней поверхности режущего инструмента из предложенной режущей керамики системы SiC-TiB₂-TiC, модифицированной графеном, от режимов резания при точении закаленной стали ШХ15 [п. 6].

Степень достоверности полученных результатов подтверждается согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также результатами успешной апробации основных положений в рецензируемых научных изданиях и на международных и российских научных конференциях.

Апробация. 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-2023-0003).

Основные положения диссертационной работы были доложены на конференциях: 1) 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022) October 2–8, 2022, Tomsk, Russia; 2) 15th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" GDP 2021 (Ekaterinburg, September 5–10, 2021); 3) Материалы научно-практической конференции с международным участием «Перспективные технологии и материалы», г. Севастополь, 14-16 октября 2020 г, стр. 124-128; 4) XXIII Международная научно-практическая конференция «ИННОВАЦИОННЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: ТЕОРИЯ, МЕТОДОЛОГИЯ, ПРАКТИКА», г. Пенза, 10 октября 2020 г, стр. 19- 24; 5) IV Международная научно-практическая конференция «SCIENCE AND TECHNOLOGY INNOVATIONS», г. Петрозаводск, 22 октября 2020 г, стр. 29-34.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 2 статьи в журналах из списка изданий, рекомендованных ВАК РФ, 5 статей в журналах, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science, 5 печатных работ в сборниках международных научно-технических конференций.

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, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем работы: основной текст содержит 130 страниц, включая 79 рисунков и 17 таблиц; список литературы включает 126 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, оценена степень разработанности, сформулированы основные цель и задачи, а также научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы и положения, выносимые на защиту. Описана методология и методы исследования, перечислены полученные автором результаты, представлена структура диссертации.

В первой главе проведен литературный обзор, посвященный особенностям и проблемам, с которыми сталкиваются при механической обработке закаленных сталей типа ШХ15, которая широко применяется при изготовлении различных деталей, от которых требуется высокая твердость, износостойкость и контактная прочность. Рассматривается подход к обеспечению высокоэффективной механической обработки закаленных сталей, в соответствии с которым операции черного шлифования заменяются на точение инструментом из режущей керамики. Также анализируются тренды в развитии современных режущих керамик, направленных на получение новых составов с улучшенными характеристиками. Было выявлено, что благодаря своим свойствам материалы SiC, TiB₂, и TiC являются наиболее перспективными компонентами для создания нового керамического композиционного материала для изготовления режущих инструментов, предназначенных для обработки закаленных сталей. Однако консолидация системы SiC-TiB₂-TiC традиционными способами спекания является невозможной из-за высоких температур плавления и низких коэффициентов самодиффузии ее компонентов. Поэтому технология искрового

плазменного спекания была определена как наиболее перспективная для консолидации трудноспекаемых композиций, подобных системе SiC-TiB₂-TiC. Предложенная система SiC-TiB₂-TiC благодаря присутствию компонентов TiB₂ и TiC является электропроводящей, что, в свою очередь, делает возможным ее формообразование с применением проволочной электроэрозионной обработки (ЭЭО). Помимо упрочнения и повышения износостойкости, присутствие компонента TiB₂ способно реализовать в керамическом композиционном материале эффект самовосстановления повреждений, возникающих в поверхностном слое при внешнем воздействии.

Представлен обзор современного подхода к дальнейшему улучшению механических свойств инструментальных керамических материалов – снижения трения и износа и / или повышения твердости и трещиностойкости за счет добавления графена (G) в матрицу предложенной керамики системы SiC-TiB₂-TiC. Таким образом, совокупность улучшенных физико-механических свойств предложенного керамического КМ с добавлением графена может обеспечить увеличение периода стойкости режущего инструмента относительно существующих коммерческих оксидно-карбидных режущих керамик, которые применяются в машиностроении при обработке закаленных сталей.

Во второй главе представлено описание материалов, оборудования и методик экспериментальных исследований, используемых при проведении экспериментов в диссертационной работе. Подробно описаны лабораторные технологии выбора и подготовки порошковых компонентов, подготовки суспензии оксида графена, консолидации смесей по технологии ИПС. Приведены методики подготовки спеченных образцов для экспериментальных исследований физико-механических свойств и микроструктуры. Также описываются методики исследования превращения оксида графена в восстановленный графен с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния и электроэрозионной обработки для получения режущих пластин из предложенного нового керамического композиционного материала.

В третьей главе на основании анализа литературных источников были выбраны три различных состава для исследования влияния технологических режимов консолидации ИПС на физико-механические свойства спеченных образцов системы SiC-TiB₂-TiC. В таблице 1 приведены данные о составах и соотношениях компонентов, выбранных для спекания керамических КМ при проведении исследований.

Таблица 1 – Данные о керамических материалах и их компонентах

Обозначение КМ	Содержание компонентов (об. %)			Теоретическая плотность (г/см ³)
	SiC	TiB ₂	TiC	
80 SiC	80	12,5	7,5	3,50
60 SiC	60	25,0	15,0	3,79
40 SiC	40	37,5	22,5	4,09

Представленные в таблице 1 композиции были подвергнуты спеканию при трех разных температурах (1800 °С, 1900 °С, и 2000 °С) и давлении 80 МПа, приложенном в течение 3 мин. на максимальной температуре. Анализ относительной плотности, трещиностойкости, предела прочности и твердости спеченных образцов КМ показал, что лучшее сочетание свойств наблюдается у образцов, полученных при температуре 2000 °С (рисунок 1). При этом, спеченный КМ 60 SiC (60 SiC-25 TiB₂-15 TiC об.%) обладает наилучшими значениями среди исследованных материалов по относительной плотности, твердости по Виккерсу и пределу прочности на изгиб (таблица 2). Только его трещиностойкость (6,2 МПа·м^{1/2}) незначительно уступает по этому показателю КМ 40 SiC (6,4 МПа·м^{1/2}).

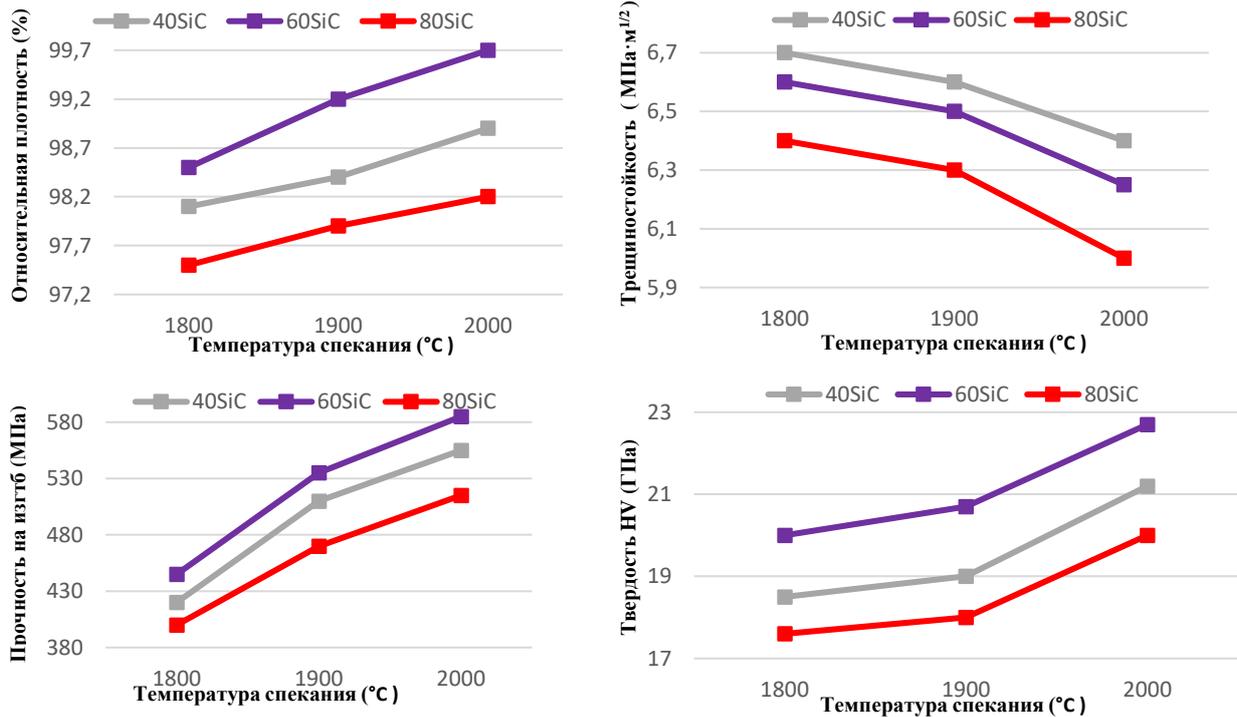


Рисунок 1 – Физико-механические свойства образцов из керамики SiC-TiB₂-TiC, достигаемые при различных температурах спекания

Таблица 2 – Физико-механические свойства образцов, спеченных при 2000 °С

КМ	Относительная плотность (%)	Трещиностойкость (МПа м ^{1/2})	Прочность на изгиб (МПа)	Твердость (ГПа)
80 SiC	98,2	6,4	555	20,41
60 SiC	99,7	6,6	588	22,95
40 SiC	98,9	6,71	515	21,29

Исследования микроструктуры образцов, спеченных при 2000 °С, показали, что КМ 60 SiC имеет более однородную микроструктуру и наименьший размер зерна из всех исследованных материалов (рисунок 2), что способствует высоким значениям плотности, твердости и предела прочности, а также обеспечивает достаточно высокую трещиностойкость.

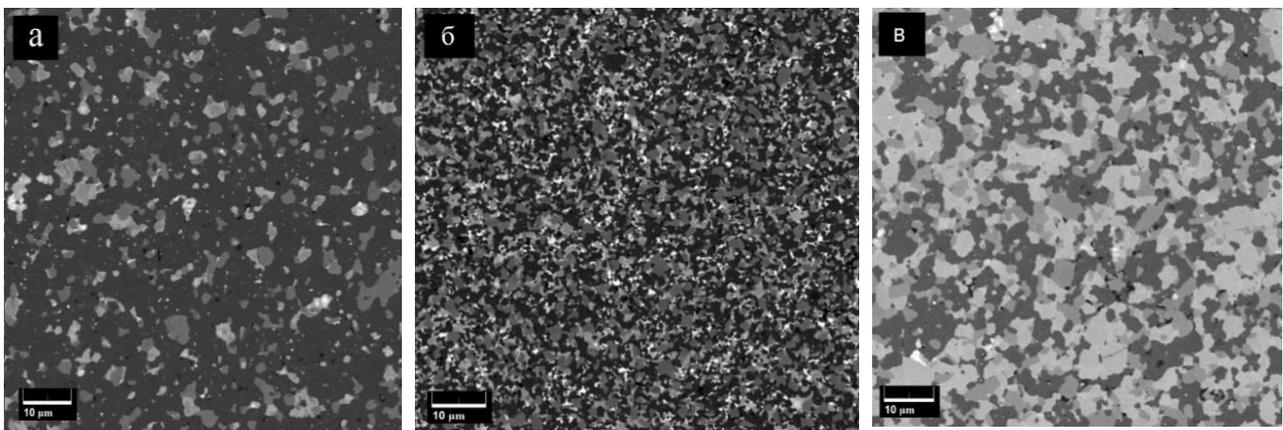


Рисунок 2 – СЭМ-изображения микроструктуры полированных образцов из различных КМ, спеченных при 2000 °С: а – 80 SiC, б – 60 SiC, в – 40 SiC

Кроме того, благодаря присутствию электропроводящих фаз TiB_2 и TiC , электропроводность спеченных КМ 40 SiC, 60 SiC и 80 SiC была выше (6 См/см, 5,6 См/см, и 1,3 См/см, соответственно) минимального необходимого значения (0,01 См/см) для проведения электроэрозионной обработки. На рисунке 3 представлены изображения процесса проволоочной ЭЭО образца 60 SiC.



Рисунок 3 – Проволоочная электроэрозионная обработка спеченного при 2000 °С образца 60 SiC: а – процесс обработки; б – вырезанный образец; в – образец для исследования параметров ЭЭО

Таким образом, на основании полученных предварительных результатов исследований системы SiC-TiB₂-TiC, в качестве объекта для дальнейшего изучения влияния оксида графена на физико-механические свойства был выбран КМ 60 SiC.

Далее рассматривается влияние параметров ЭЭО на качество обработанных поверхностей изделий из электропроводящего КМ 60 SiC. Для этого использовалось робастное планирование экспериментов по методу Тагути (ортогональная матрица L9) и серый реляционный анализ, которые позволяют проводить поиск рациональных режимов (управляемых факторов) ЭЭО для достижения минимальной толщины белого слоя (зоны поверхностного слоя, содержащей дефекты) и шероховатости поверхности вырезанных образцов из исследуемого КМ. В данном эксперименте матрица L9 была выбрана для четырех факторов ЭЭО (напряжение разряда, длительность импульса, частота импульса и скорость перемотки проволоки) с тремя уровнями: напряжение разряда $U = 48, 60, 72$ В, длительность импульса $T_{on} = 1, 5, 2$ мкс, частота импульса $f = 10, 15, 20$ кГц и скорость перемотки проволоки $q = 4, 6, 8$ м/мин. Каждое сочетание режимов ЭЭО было исследовано 3 раза на спеченных дисках из КМ 60 SiC (рисунок 3в).

Обработка экспериментальных данных влияния управляемых (регулируемых) факторов ЭЭО на белый слой показала, что длительность импульса T_{on} и напряжение U занимают первое и второе места по значимости в регрессионной модели (1), описывающей толщину белого слоя (H), в то время как частота импульса и скорость перемотки проволоки не являются значимы для описания этого параметра.

$$H = -2,32 + 0,0578 \cdot U + 2,393 \cdot T_{on} \quad (1)$$

Коэффициент детерминации для уравнения (1) – 92,64 %, а вклад параметров процесса T_{on} и U в уравнении составил 67,82 % и 22,90 % соответственно.

На рисунке 4 показаны графики, описывающие влияние уровней факторов ЭЭО на средние значения толщины белого слоя. Из представленных данных хорошо видна тенденция к увеличению толщины белого слоя при увеличении напряжения и длительности импульса с 48 до 72 В и с 1 до 2 мкс соответственно. Увеличение толщины белого слоя происходит из-за возникновения высокой энергии разряда, приводящей к значительному увеличению локального тепловыделения при заданных U и T_{on} . При таких условиях образуется большое количество расплавленного материала, который и образует белый слой с большей толщиной.

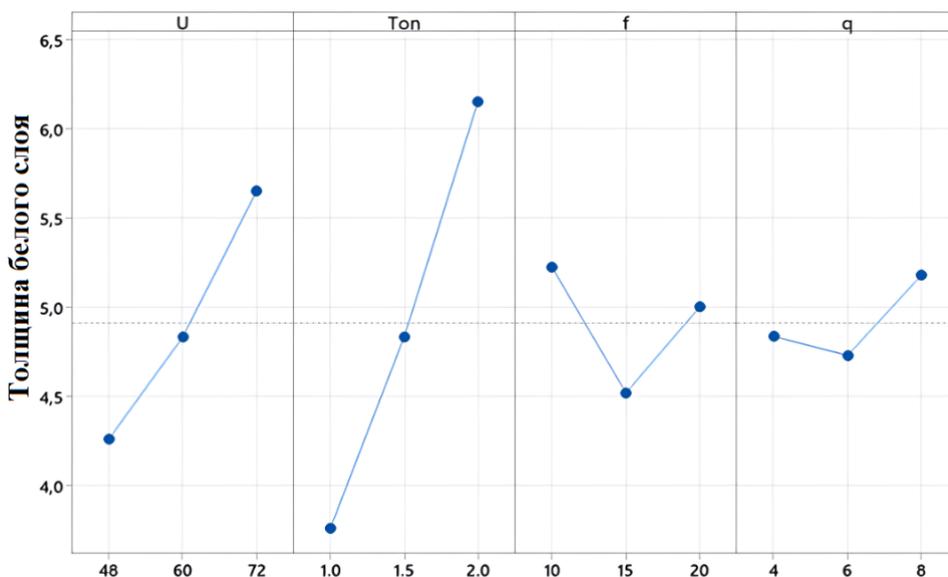


Рисунок 4 – Влияние режимов на толщину белого слоя при ЭЭО образцов из КМ 60 SiC

Из данных рисунка 4 видно, что частота импульса и скорость перемотки проволоки не оказывает существенного влияния на изменение толщины белого слоя.

В матрице L9, минимальная толщина белого слоя (3,35 мкм) была получена при сочетании режимов $U = 48$ В; $T_{on} = 1,0$ мкс; $f = 10$ кГц и $q = 4$ м/мин.

Исследования влияния управляемых факторов ЭЭО на шероховатость обработанной поверхности показали, что частота импульса f , длительность импульса T_{on} и напряжение U являются наиболее значимыми в регрессионной модели (2), а их вклад составил 56,24 %, 19,42 % и 16,52 % соответственно. При этом коэффициент детерминации для установленного уравнения (2) – 94,54 %.

$$Ra = 0,815 - 0,00487 \cdot U + 0,126 \cdot T_{on} + 0,02163 \cdot f \quad (2)$$

На рисунке 5 показаны графики, описывающие влияние уровней факторов ЭЭО на средние значения шероховатости обработанной поверхности.

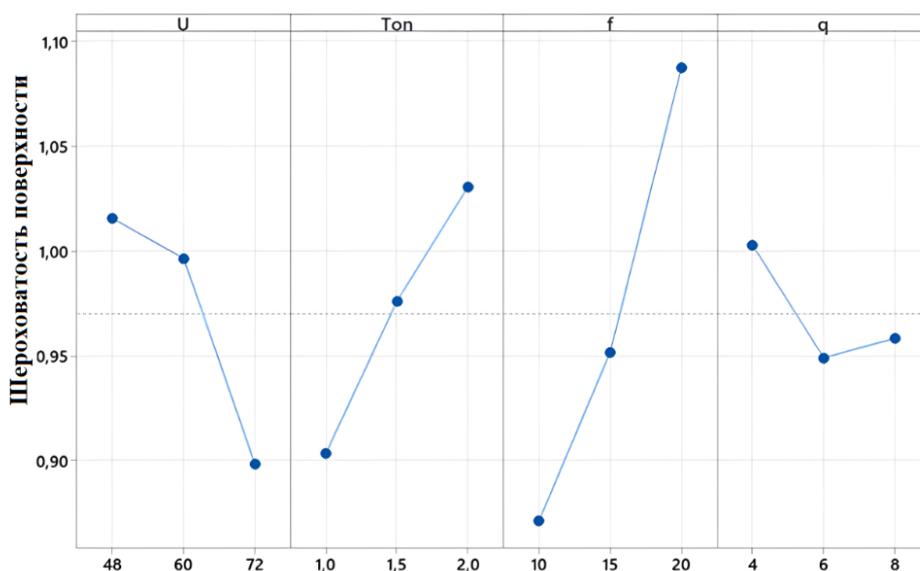


Рисунок 5 – Влияние режимов ЭЭО на шероховатость обработанной поверхности образцов из КМ 60 SiC

Из приведенных данных видно, что при увеличении напряжения разряда шероховатость поверхности уменьшается. Это связано с тем, что при меньшем напряжении разряда уменьшается искровой промежуток между обрабатываемой поверхностью и электродом, что приводит к значительному увеличению плотности ионизации и интенсивности искры в искровом промежутке. Это, в свою очередь, вызывает значительное увеличение локального тепловыделения, приводящего к дальнейшему плавлению обрабатываемого материала и ухудшению шероховатости.

Из данных рисунка 5 также следует, что при увеличении T_{on} и частоты импульса шероховатость поверхности увеличивается. При увеличении T_{on} происходит увеличение энергии разряда, что влечет за собой образование крупных газовых пузырей, которые при схлопывании образуют на обработанной поверхности крупные кратеры в процессе рекристаллизации. А при увеличении частоты импульсов f процесс вымывания шлама и охлаждения в межэлектродном промежутке ухудшается, что приводит к значительному ухудшению шероховатости обработанной поверхности. В матрице L9, наиболее низкая шероховатость ($Ra = 0,794$ мкм) была получена при $U = 72$ В; $T_{on} = 1,5$ мкс; $f = 10$ кГц и $q = 8$ м/мин, а наибольшая шероховатость ($Ra = 1,181$ мкм) при $U = 48$ В; $T_{on} = 2,0$ мкс; $f = 20$ кГц и $q = 8$ м/мин.

Полученные результаты показывают, что, применяя метода Тагути, можно найти такие режимы ЭЭО, при которых достигается минимальная толщина белого слоя и шероховатости по отдельности. Однако, такой подход не отличается максимальной информативностью. В связи с этим, в диссертационной работе применялся серый реляционный анализ в сочетании с робастным планированием экспериментов по методу Тагути для многоцелевой оптимизации режимов ЭЭО с целью одновременного достижения минимальной толщины белого слоя и шероховатости обработанной поверхности.

После обработки данных при реляционном анализе были построены зависимости влияния уровней факторов на серую реляционную оценку (рисунок 6). Режимы ЭЭО с самой высокой реляционной оценкой являются рациональными для одновременного достижения минимальной толщины белого слоя и шероховатости при обработке КМ 60 SiC.

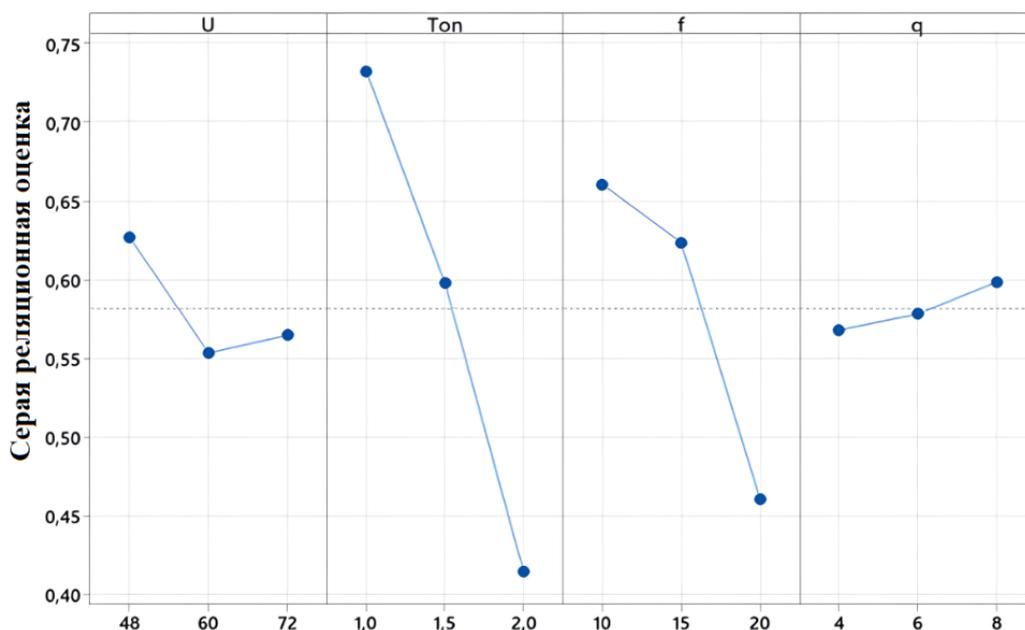


Рисунок 6 – Графики влияния уровней факторов на серую реляционную оценку

Выявлено, что режимы ЭЭО ($U = 48$ В; $T_{on} = 1,0$ мкс; $f = 10$ кГц; $q = 8$ м/мин) являются рациональными для достижения минимальных толщины белого слоя (3,16 мкм) и шероховатости (0,874 мкм) при обработке КМ 60 SiC (рисунок 7).

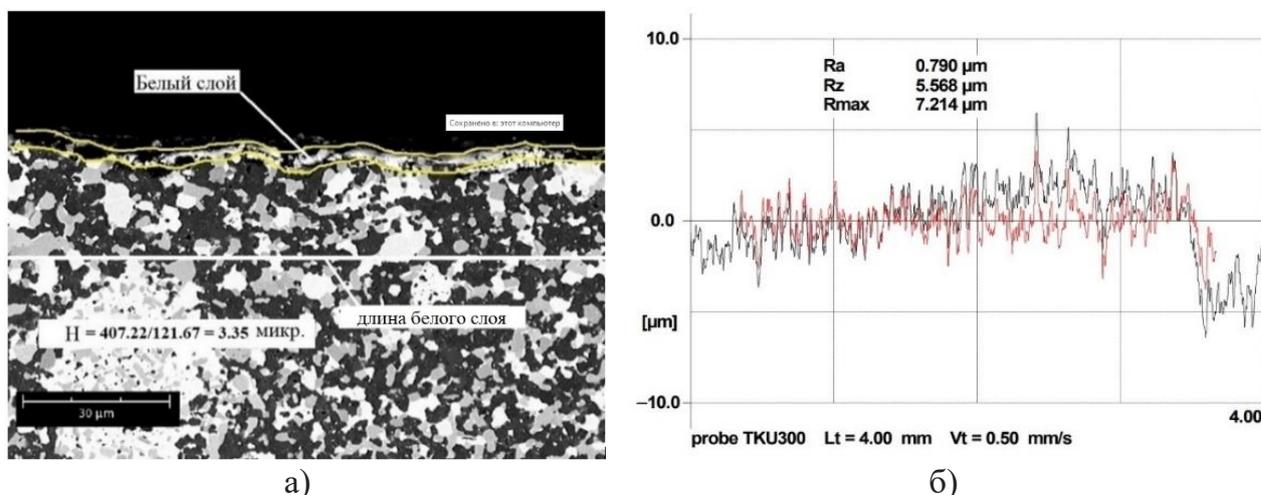


Рисунок 7 – Характеристики поверхностного слоя, формируемого при выявленных рациональных режимах ЭЭО:

а – толщина белого слоя; б – шероховатость обработанной поверхности

В четвертой главе представлены результаты исследований по дальнейшему совершенствованию предложенного КМ 60 SiC посредством его модификации графеном, изучено влияние режимов спекания на физико-механические свойства. В качестве источника графена был выбран оксид графена (GO), который легко вводится в матрицу КМ на этапе подготовки порошковой шихты. Выбор GO обоснован его технологичностью при производстве и хранении, обеспечением равномерного распределения по объему матрицы без образования агломератов, а при спекании в вакууме он термически восстанавливается до графена при температурах выше 1500 °С. При проведении исследований содержание введенного сухого GO в порошковой шихте составляло 0, 0,15, 0,25 и 0,5 об.% от сухой массы порошковой смеси (таблица 3).

Таблица 3 – Данные о керамических материалах и содержании компонентов, в т.ч. графена

Обозначение КМ	Содержание каждого компонента (об. %)				Теоретическая плотность (г/см ³)
	SiC	TiB ₂	TiC	G	
60 SiC	60	25,0	15,0	0	3,79
60 SiC-0,15G	60	25,0	15,0	0,15	3,769
60 SiC-0,25G	60	25,0	15,0	0,25	3,767
60 SiC-0,5G	60	25,0	15,0	0,5	3,763

Приведенные выше варианты КМ были спечены при различных температурах (от 1820 °С до 1970 °С с шагом 50 °С), давлении 80 МПа, приложенном в течении 5 мин. на максимальной температуре и скорости нагрева 100 °С/мин. Данные оценки относительной плотности, предела прочности и твердости показали, что лучшее сочетание характеристик наблюдается у КМ спеченных при 1870 °С (рисунок 8).

В то же время трещиностойкость образцов, спеченных при 1870 °С, была ниже относительно образцов, полученными при других температурах.

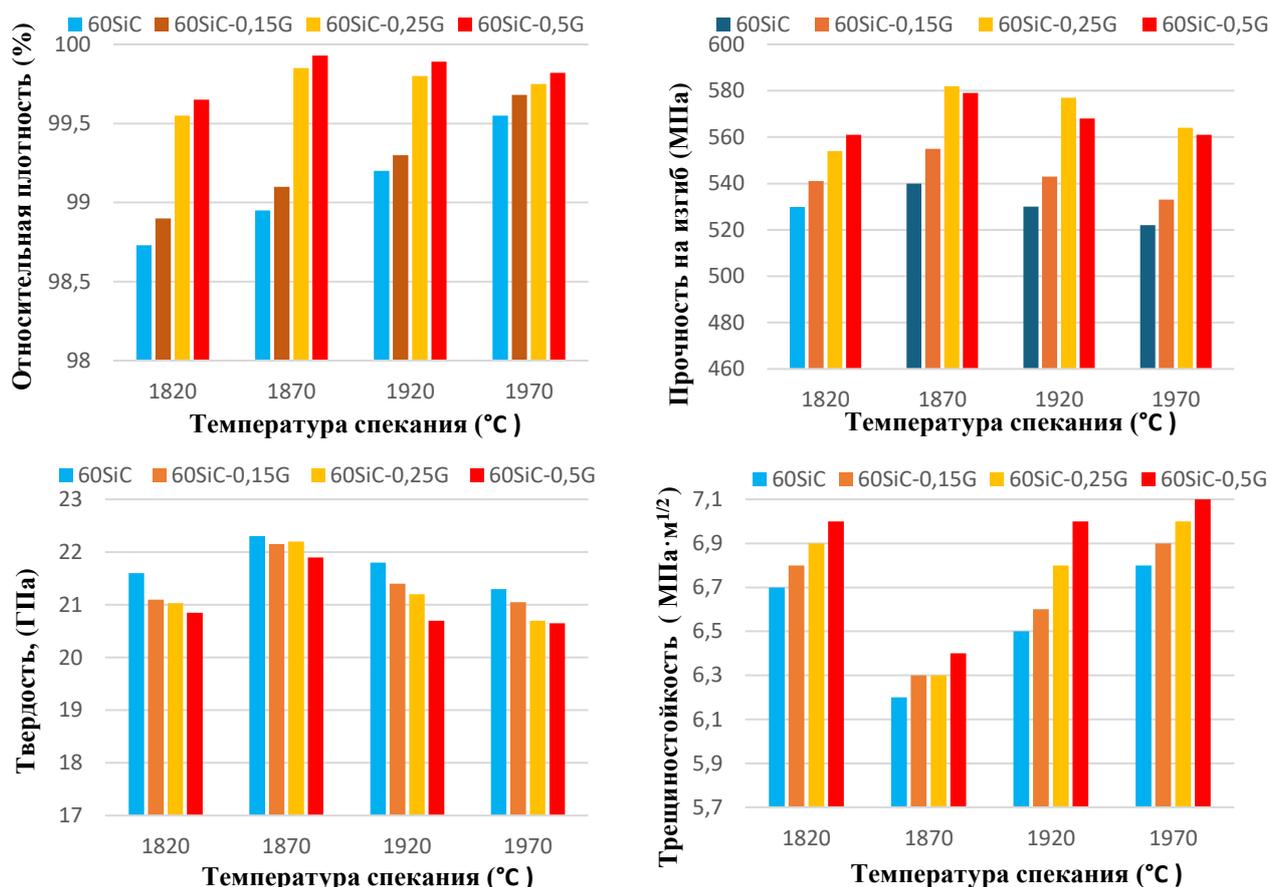
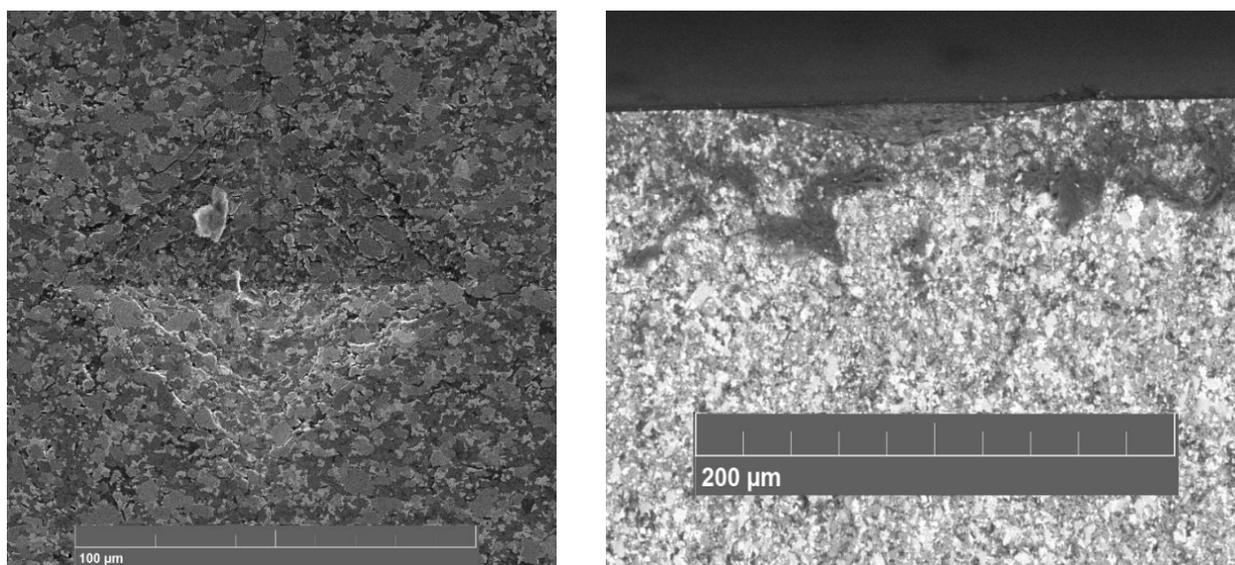


Рисунок 8 – Физико-механические свойства модифицированных графеном образцов КМ 60 SiC-G, достигаемые при различных температурах спекания

Анализ физико-механических свойств различных вариантов КМ, спеченных при 1870 °C, показал, что КМ 60 SiC-0,25G обладает наилучшим сочетанием исследуемых свойств. Кроме того, посредством проведения дифракционного анализа было выявлено, что при спекании указанной композиции не образуются новые кристаллические фазы, ухудшающие физико-механические свойства КМ, а спектроскопией комбинационного рассеяния было подтверждено полное восстановление оксида графена в графен в процессе спекания.

В дальнейшем были проведены исследования, направленные на выявление эффекта самовосстановления повреждений в поверхностном слое разработанного композиционного материала 60 SiC-0,25G (указанный эффект, согласно литературным данным, можно наблюдать в материалах, матрица которых содержит TiB₂). Для выявления данного эффекта определялись и сравнивались пределы прочности изготовленных образцов без дефектов в поверхностном слое и образцов с дефектами до и после термической обработки. В качестве образцов были использованы стандартные прямоугольные образцы для испытания по схеме трехточечного изгиба (сечением 2 × 2 мм и длиной 25...40 мм), при этом одна из сторон образцов (шириной 2 мм и длиной 25...40 мм) была отполирована до зеркального блеска. Затем на полированных поверхностях ряда образцов искусственно формировались дефекты посредством вдавливания алмазного индентора. Отпечатки формировались при трех различных нагрузках – 49 Н, 98 Н, 294 Н в течение 15 сек. с целью образования дефектов различной длины – в среднем 150, 300 и 600 мкм (рисунок 9).



а) б)

Рис. 9 – Образованные дефекты после индентирования отпечатка на образце:
а – вид сверху; б – вид сбоку (поверхность излома)

Для определения влияния температуры и времени на изменение прочности (степень самовосстановления), термообработка (ТО) образцов с дефектом длиной 300 мкм проводилась на воздухе при 600, 700, 800 и 900 °С с выдержкой в течение 0, 30, 60 и 90 мин. Для сравнения значений прочности образцов после ТО в качестве референсных значений использовались данные, полученные при 25 °С для образцов без дефекта и с дефектом полученные (рисунок 10).

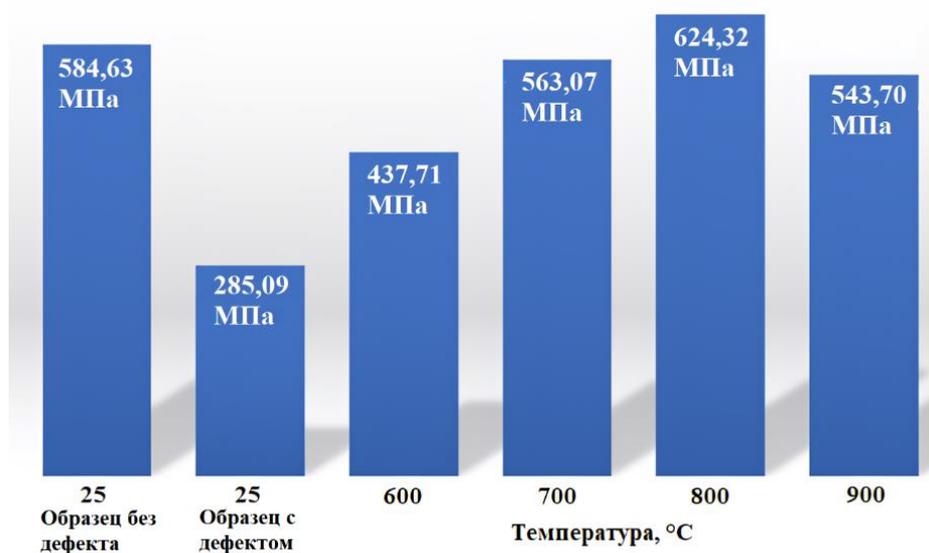


Рисунок 10 – Прочность образцов до и после ТО при различных температурах в течение 60 минут

При 25 °С предел прочности образцов без дефектов был $584,63 \pm 45,02$ МПа, а с дефектом – $285,09 \pm 2,85$ МПа. После ТО при температурах от 600 °С до 800 °С в течение 60 мин. наблюдалось постепенное увеличение прочности до $624,32 \pm 48,70$ МПа, а уже при температуре 900 °С имело место ее снижение. Таким образом, рациональным температурным параметром для восстановления прочности является 800 °С.

Далее исследование проводилось при 800 °С для различного времени выдержки ТО (0, 30, 60 и 90 мин) для установления его рационального значения (рисунок 11). Без выдержки прочность материала восстанавливается до ≈ 529 МПа, а при 30 мин. прочность достигала значения 602 МПа, т.е. на 3 % выше относительно образца без дефекта.

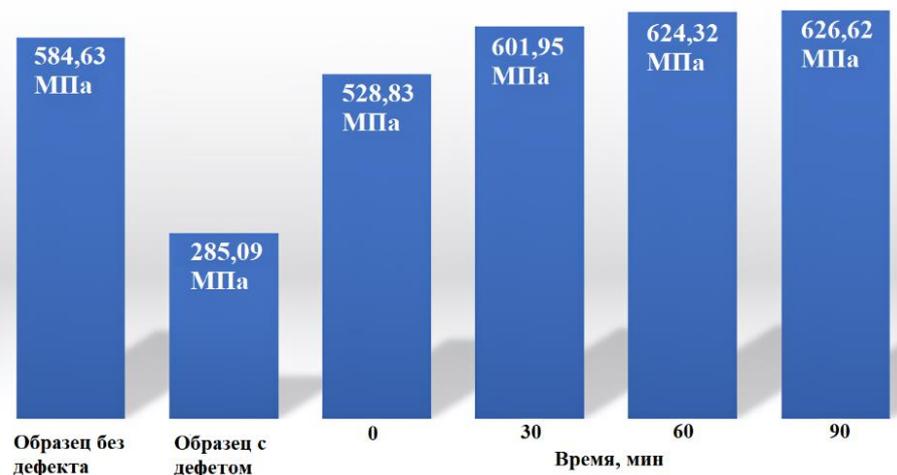


Рисунок 11 – Прочность образцов до и после ТО при температуре 800 °С при различном времени

При выдержке в 60 мин. прочность достигла 624 МПа, а при 90 мин. ее значение изменялось незначительно и составляло 627 МПа. Таким образом, рациональное время выдержки при ТО для восстановления прочности КМ 60 SiC-0.25G при температуре 800 °С составляет 60 мин.

Следующий этап исследования заключался в установлении влияния установленных рациональных температуры и времени выдержки на степень восстановления прочности образцов с трещинами различной длины. Результаты исследований приведены на рисунке 12. Видно, что прочность образцов с трещинами длиной 150 мкм и 300 мкм полностью восстанавливается при установленных режимах ТО. Однако трещины длиной ≥ 600 мкм полностью не восстанавливаются.

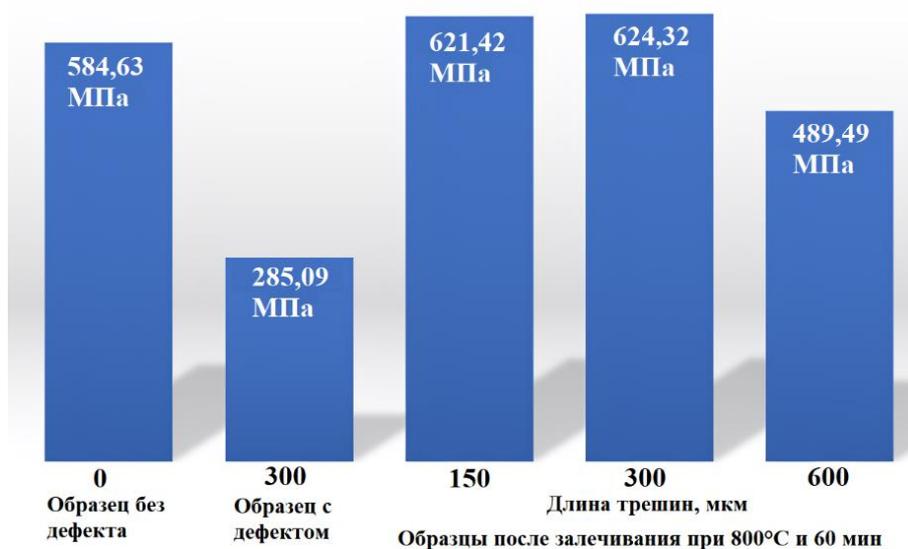


Рисунок 12 – Прочность образцов с различной длиной трещин до и после ТО при 800 °С в течение 60 мин

На основе вышеизложенного можно сделать вывод о том, что полное восстановление прочности при изгибе при наличии трещины длиной < 300 мкм в керамике 60 SiC-0,25G можно достичь посредством ТО при температуре 800 °С и изотермической выдержке 60 мин.

На рисунке 13 представлено SEM-изображение излома образца с трещиной длиной 300 мкм после ТО при 800 °С в течение 60 мин., на поверхности которого хорошо заметен окисленный слой. Толщина этого слоя составляет 3,28 мкм, а под ним наблюдается структура глубиной примерно 10 мкм, отличающаяся от микроструктуры объемного керамического материала.

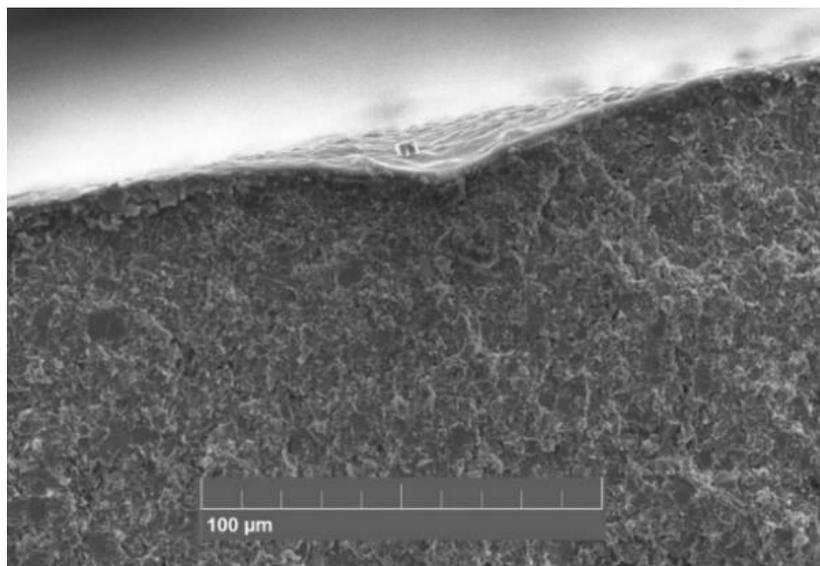


Рисунок 13 – SEM-изображение излома образца с трещинами длиной 300 мкм после самовосстановления в процессе ТО при 800 °С и 60 мин

В пятой главе подробно описана технология формообразования сменных многогранных режущих пластин (СМРП) из разработанных керамических инструментальных материалов 60 SiC и 60 SiC-0,25G. Изготовленные СМРП имели форму SNGN120408 T02020 (ГОСТ 25003–81) и были испытаны в процессе резания из закалённой стали ШХ15.

Технология включает в себя 3 основных этапа: 1) шлифование опорных поверхностей спеченных заготовок–дисков на плоскошлифовальном станке модели ОШ-550; 2) электроэрозионная обработка СМРП на станке АРТА-123; 3) периферийная обработка боковых поверхностей, радиусов закругления и фаски СМРП на высокоточном четырехкоординатном станке Agathon COMBI plus.

На рисунке 14 представлен общий вид изготовленных СМРП формы SNGN120408 из керамических композиционных материалов 60 SiC и 60 SiC-0,25G.



Рисунок 14 – Образцы СМРП, изготовленные из разработанных керамических материалов 60 SiC (а) и 60 SiC-0,25G (б)

В дальнейшем были проведены испытания разработанных КМ 60 SiC и 60 SiC-0,25G и исследовалось влияние режимов резания на шероховатость поверхности при точении керамическими пластинами заготовки (пруток \varnothing 110 мм) из закалённой стали ШХ15. Для сравнительной оценки результатов при экспериментах также использовались пластины из коммерческой оксидно-карбидной режущей керамики (Al_2O_3+TiC). Режущие пластины были закреплены в державке токарного резца CSB NR2525M12, которая обеспечивала следующую геометрию: передний угол $\gamma = -6^\circ$, главный задний угол $\alpha = 6^\circ$, вспомогательный задний угол $\alpha_1 = 6^\circ$, главный угол в плане $\varphi = 75^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 15^\circ$. Обработка проводилась на токарном станке модели ZMM Sliven CU 500-M RD без использования смазочно-охлаждающих жидкостей (рисунок 15).



(а)



(б)

Рисунок 15 – Общий вид станочного оборудования (а) и зоны резания (б) при проведении испытаний в процессе точения заготовки из закалённой стали ШХ15

Исследования шероховатости обработанной поверхности (по параметру Ra) образцов из закалённой стали ШХ15 проводились после прохождения инструментом пути резания 11 м. При испытаниях переменными факторами являлись скорость резания (V), глубина (t) и подача (s), которые варьировались в следующих диапазонах (таблица 4): $V = 50 \dots 250$ м/мин; $t = 0,1 \dots 0,6$ мм; $s = 0,1 \dots 0,3$ мм/об.

Таблица 4 – Сочетание режимов резания при однофакторных экспериментах

	Опыт №		
	1	2	3
Постоянные факторы	$t = 0,35$ мм; $s = 0,2$ мм/об	$V = 250$ м/мин; $t = 0,35$ мм	$V = 250$ м/мин; $s = 0,2$ мм/об
Переменные факторы	$V_1 = 50$ м/мин	$s_1 = 0,1$ мм/об.	$t_1 = 0,1$ мм
	$V_2 = 100$ м/мин	$s_2 = 0,15$ мм/об.	$t_2 = 0,2$ мм
	$V_3 = 150$ м/мин	$s_3 = 0,20$ мм/об.	$t_3 = 0,3$ мм
	$V_4 = 200$ м/мин	$s_4 = 0,25$ мм/об.	$t_4 = 0,4$ мм
	$V_5 = 250$ м/мин	$s_5 = 0,3$ мм/об.	$t_5 = 0,5$ мм
	-	-	$t_6 = 0,6$ мм

Полученные результаты однофакторных экспериментов, демонстрирующие установленные зависимости шероховатости обработанной поверхности от режимов резания, представлены на рисунках 16–18.

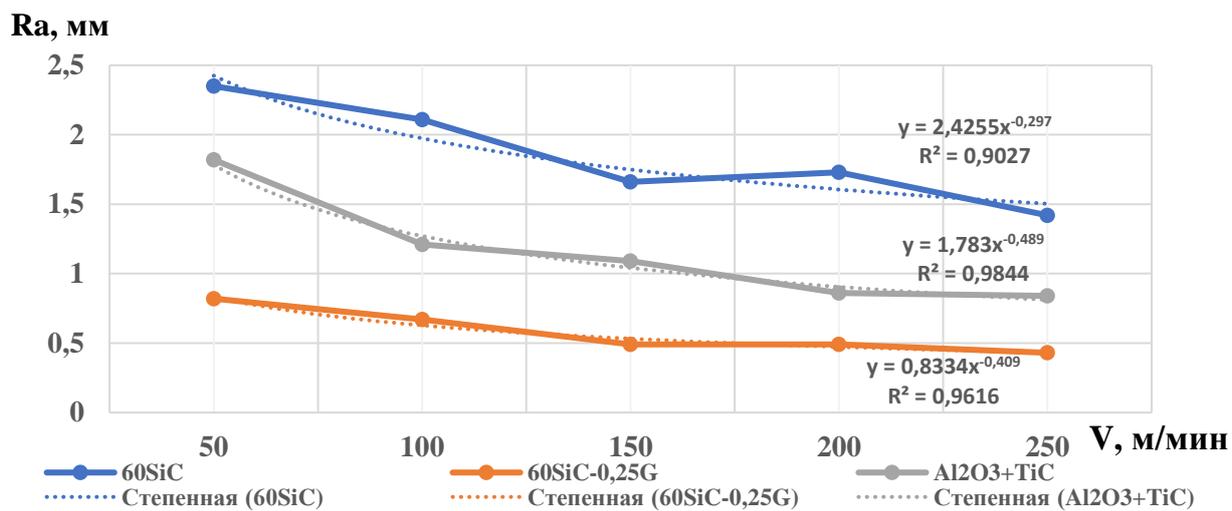


Рисунок 16 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности образцов из закаленной стали ШХ15 от скорости резания

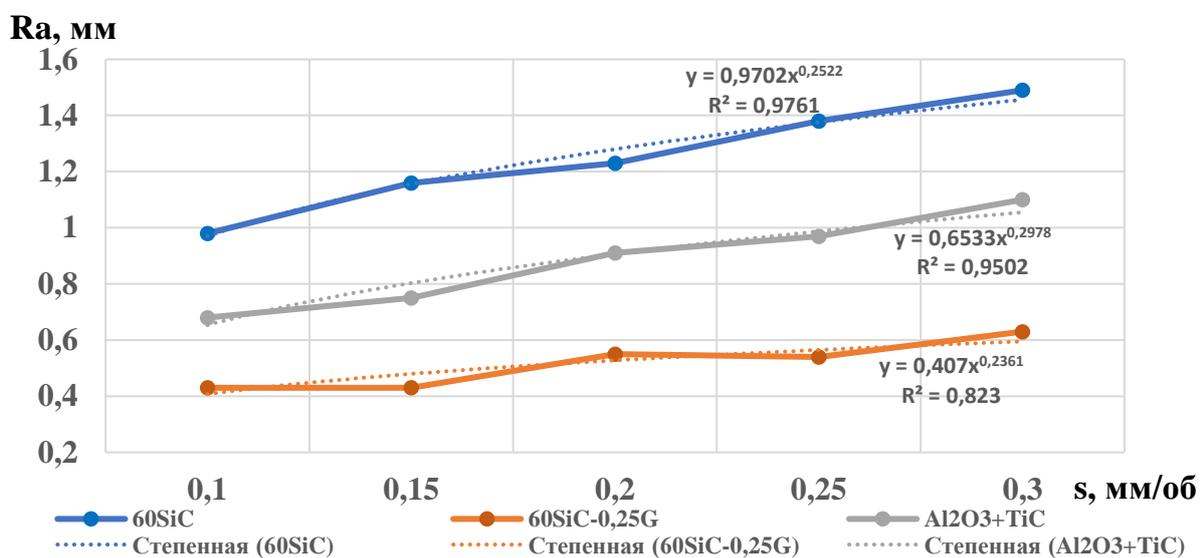


Рисунок 17 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности образцов из закаленной стали ШХ15 от подачи

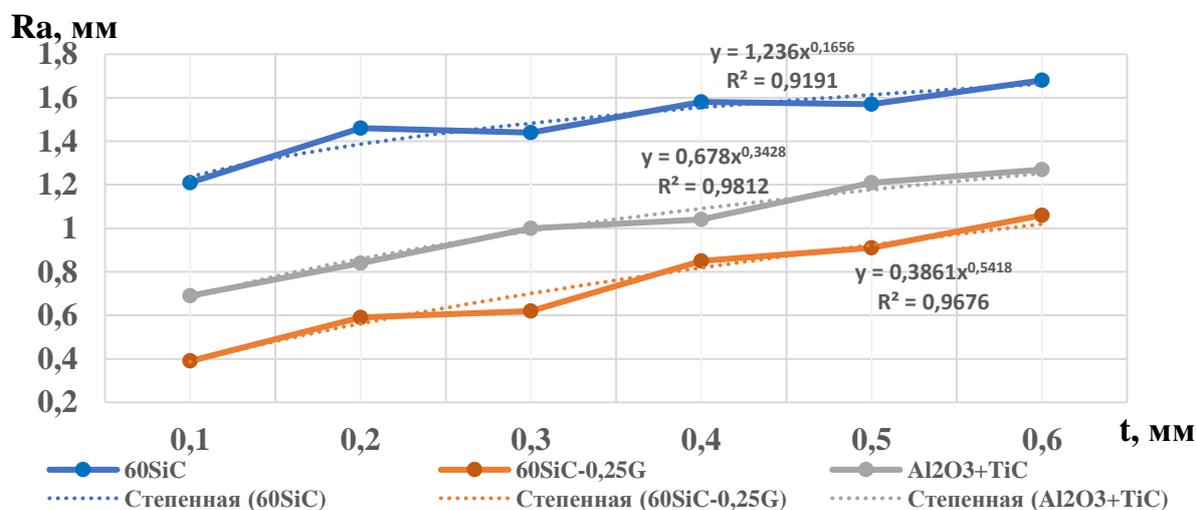


Рисунок 18 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности образцов из закаленной стали ШХ15 от глубины резания

На представленных выше рисунках 16–18 приведены регрессионные уравнения и коэффициенты детерминации кривых, описывающие зависимости шероховатости обработанной поверхности от исследуемых режимов (скорости резания, подачи, глубины резания) при точении с использованием разработанных и коммерческих керамических режущих пластин.

Установлено, что при точении закаленной стали ШХ15 инструментом из керамического материала 60 SiC-0,25G достигается более низкое значение шероховатости по сравнению с показателем, достигаемым использованием режущих пластин из керамического материала 60 SiC и оксидно-карбидной керамики (Al_2O_3+TiC).

В дальнейшем с учетом данных однофакторных экспериментов были проведены полнофакторные эксперименты (ПФЭ) типа 2^3 для разработанных КМ 60 SiC и 60 SiC-0,25G, в которых нижними и верхними уровнями факторов являлись минимальные и максимальные значения режимов, указанных в таблице 4.

На основе данных, полученных при ПФЭ, были разработаны математические модели и построены поверхности отклика изменения шероховатости обработанной поверхности от режимов резания при точении режущими пластинами из разработанной керамики SiC-TiB₂-TiC.

Регрессионные модели для режущего инструмента из 60 SiC представлены в (3), а для режущего инструмента из 60 SiC-0,25G в (4).

$$R_{a\ 60SiC} = 24,19 \cdot V^{-0,4777-0,1660 \ln(s)-0,2126 \ln(t)-0,1483 \ln(s) \ln(t)} \cdot s^{0,9138+0,6000 \ln(t)} \cdot t^{0,9339} \quad (3)$$

$$R_{a\ 60SiC-0,25G} = 23,22 \cdot V^{-0,6990-0,06139 \ln(s)-0,09842 \ln(t)+0,05678 \ln(s) \ln(t)} \cdot s^{0,5156-0,3947 \ln(t)} \cdot t^{0,2782} \quad (4)$$

Анализ результатов ПФЭ был выполнен с помощью программы Minitab и показал, что построенные регрессионные модели (3) и (4) являются адекватными в исследованной области. Для расчета значений шероховатости R_a по регрессионным моделям (3) и (4), а также для построения поверхностей отклика изменения шероховатости от скорости резания, подачи и глубины резания, была использована программа Microsoft Excel.

На рисунках 19 и 20 представлены поверхности отклика, относящиеся к режущему инструменту из 60 SiC и 60 SiC-0,25G соответственно.

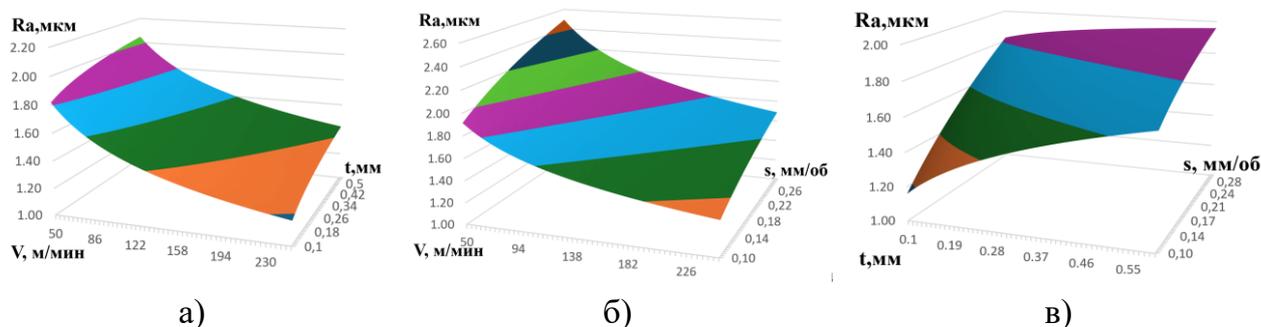


Рисунок 19 – Поверхности отклика изменения шероховатости образцов, обработанных режущим инструментом из 60 SiC, при варьировании режимов резания: а) скорости резания и глубины резания при постоянной подаче $s = 0,3$ мм/об; б) скорости резания и подачи при постоянной глубине $t = 0,35$ мм; в) глубины резания и подачи при постоянной скорости резания 150 м/мин

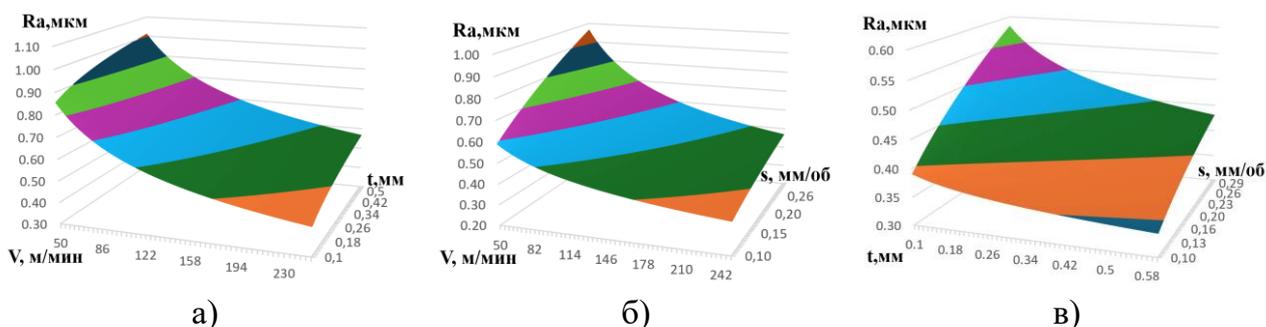


Рисунок 20 – Поверхности отклика изменения шероховатости образцов, обработанных режущим инструментом из 60 SiC-0,25G, при варьировании режимов резания: а) скорости резания и глубины резания при постоянной подаче $s = 0,3$ мм/об; б) скорости резания и подачи при постоянной глубине $t = 0,35$ мм; в) глубины резания и подачи при постоянной скорости резания 150 м/мин

После проведения однофакторных и многофакторных экспериментов для определения влияния режимов резания на качество обработанной поверхности были выбраны значения режимов резания для проведения стойкостных испытаний (скорость резания – 250 м/мин, подача – 0,10 мм/об и глубина резания – 0,4 мм).

Затем проводились стойкостные испытания, при которых оценивался размер площадки износа h_3 по задней поверхности керамических СМРП при точении закалённой стали ШХ15 (HRC 58). Измерение h_3 проводилось во временном интервале 5...35 мин с помощью оптического микроскопа. Стойкостные испытания прекращались, когда значение h_3 превышало 0,4 мм, или при появлении сколов размером более 0,15 мм на рабочих поверхностях режущей пластины.

В результате проведенных испытаний была установлена стойкость режущих инструментов из разработанных керамических материалов. На рисунке 21 представлены экспериментально построенные кривые «износ – время» для керамических пластин из различных материалов при точении закаленной стали ШХ15.

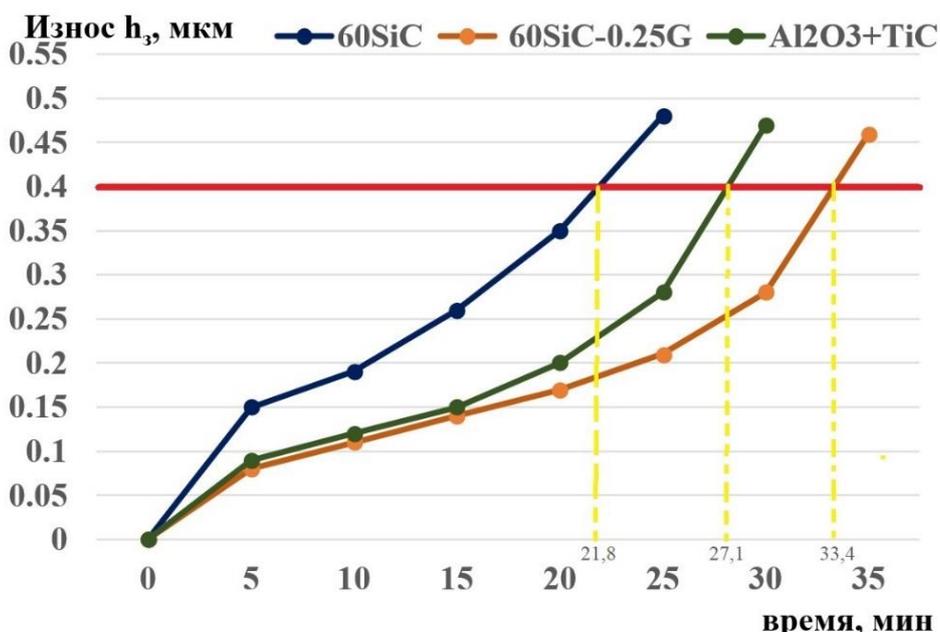


Рисунок 21 – Кривые «износ – время» для керамических пластин из различных материалов при точении закаленной стали ШХ15 (режим резания: $V = 250$ м/мин, $s = 0,1$ мм/об, $t = 0,4$ мм)

Результаты однофакторных стойкостных испытаний показали, что разработанный материал 60 SiC-0,25G обеспечивает увеличение стойкости на 52 % и 16 % по сравнению с режущими пластинами из 60 SiC и керамики $Al_2O_3 + TiC$ соответственно. Повышение стойкости инструмента из керамики 60 SiC-0,25G объясняется присутствием графена в ее структуре и улучшением трибологических свойств. Кроме того, образование оксида бора и оксида титана в результате окисления TiB_2 при взаимодействии с воздухом на высоких температурах также может способствовать установленному увеличению стойкости.

Далее на основании однофакторных экспериментов были проведены полнофакторные стойкостные эксперименты (2^3) для разработанного керамического материала 60 SiC-0,25G, в котором нижними и верхними уровнями факторов, являлись минимальные и максимальные значения режимов, представленных в таблице 4.

На основании полученных данных была построена математическая модель, с использованием которой были построены поверхности отклика износа по задней поверхности (h_3) от режимов резания резания инструментом, оснащенным керамическими пластинами из разработанного материала 60 SiC-0,25G (рисунок 22).

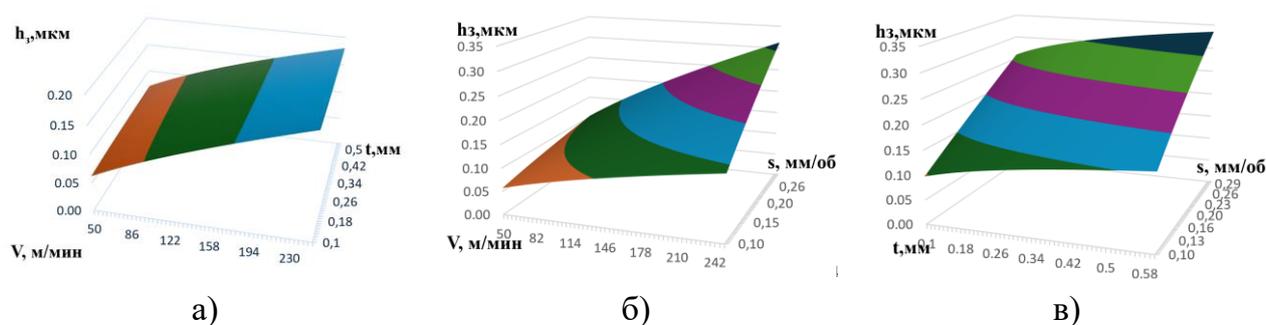


Рисунок 22 – Поверхность отклика изменения износа по задней поверхности режущей пластины от режимов резания: а – скорости и глубины резания при постоянной подаче $s = 0,1$ мм/об; б – скорости резания и подачи при постоянной глубине $t = 0,4$ мм; в – глубины резания и подачи при постоянной скорости резания 250 м/мин

Полученная модель зависимости износа имеет вид (5):

$$h_3 = 0,01 \cdot V^{0,7906+0,1057 \ln(s)-0,06845 \ln(t)-0,02524 \ln(s) \ln(t)} \cdot s^{0,06211+0,03265 \ln(t)} \cdot t^{0,3951} \quad (5)$$

Анализ результатов ПФЭ был выполнен с использованием программы Minitab, который показал, что предложенная регрессионная модель (5) адекватна в исследованной области. Для расчёта прогнозируемых значений h_3 и построения поверхностей отклика, отражающих зависимость шероховатости от скорости резания (V), подачи (s) и глубины резания (t), использовались данные, полученные по регрессионной модели. Визуализация результатов выполнялась в программе Microsoft Excel.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований был создан режущий инструмент из керамики системы SiC- TiB_2 -TiC, обеспечивающей повышение стойкости при механической обработке деталей из закаленных сталей и улучшение качества обработанной поверхности.

Полученные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлено, что композиционный материал с составом 60 SiC–25 TiB₂–15 TiC (об.%) (далее 60 SiC), полученный методом искрового плазменного спекания (ИПС) при температуре спекания 1800 °С, скорости нагрева 100 °С/мин, давлении 80 МПа и изотермической выдержке 3 мин., обладает необходимыми физико-механическими свойствами (относительной плотностью – 98,5 %, прочностью на изгиб – 445 МПа, твердостью – 20 ГПа и трещиностойкостью – 6,6 МПа·м^{1/2}) для его применения в качестве режущей керамики. Кроме того, этот композиционный материал характеризуется достаточной электропроводностью для обеспечения электроэрозионной обработки.

2. Впервые предложены схемы консолидации системы SiC-TiB₂-TiC с помощью технологии ИПС в зависимости от ее состава, на основании наблюдения и полученных результатов.

3. Выявлено, что введение 0,25 об.% оксида графена в порошковую шихту системы 60 SiC обеспечивает повышение физико-механических свойств спеченных КМ (относительная плотность – 99,85 %, прочность на изгиб – 582,81 МПа и твердость – 22,2 ГПа) при незначительном снижении трещиностойкости до 6,3 МПа м^{1/2}.

4. Рациональными режимами ИПС порошковой системы 60 SiC, содержащей 0,25 об.% оксида графена, являются: температура спекания 1870 °С, скорость нагрева 100 °С/мин, время выдержки 5 мин. и давление 80 МПа.

5. КМ 60 SiC-0,25G обладает способностью к восстановлению предела прочности на 107 % (до 624 МПа, т.е. на 7 % выше относительно образца без дефекта) за счет самовосстановления возникающих в поверхностном слое повреждений при температуре 800 °С в течение 60 минут на воздухе. При этом ТО при 800 °С и без выдержки позволяет восстановить предел прочности на 103 %.

6. Были изготовлены сменные многогранные режущие пластины методом электроэрозионной обработки (ЭЭО) разработанных электропроводящих композиционных материалов 60 SiC и 60 SiC-0,25G.

7. Рациональными режимами ЭЭО, при которых достигаются толщина белого слоя – 3,16 мкм и шероховатость обработанной поверхности Ra = 0,874 мкм, КМ 60 SiC и 60 SiC-0,25G, являются: напряжение разряда – 48 В; длительность импульса – 1,0 мкс; частота импульсов – 10 кГц; скорость перемотки проволоки – 8 м/мин.

8. Выявлено, что при точении закаленной стали ШХ15 твердостью HRC 58 стойкость инструмента из материала 60 SiC-0,25G повышается на 52 % и 16 % по сравнению с КМ 60 SiC и коммерческой режущей керамикой Al₂O₃+TiC, соответственно.

9. Установлено, что повышение стойкости инструмента из 60 SiC-0,25G связано с присутствием графена, повышением прочности материала за счет самовосстановления повреждений, возникающих в поверхностном слое, и образования новых соединений с низким коэффициентом трения (V₂O₃, TiO₂ и TiC).

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. **Тет Наинг Со**, Мелешкин Я.Р., Смирнов А., Солис Пинарготе Н.В. Физико-механические свойства спеченных композитов SiC-TiB₂-TiC методом искрового плазменного спекания // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2024. – № 1(68). – С. 56–67.

2. **Тет Наинг Со**, Солис Пинарготе Н.В. Исследование шероховатости обработанной поверхности и стойкости режущего инструмента на основе композитов

системы SiC-TiB₂-TiC методом планирования экспериментов // Вестник МГТУ «СТАНКИИ». – 2025. – № 3(74). – В печати.

3. Grigoriev S.N., Pristinitskiy Y., **Thet Naing Soe**, Malakhinsky A., Mosyanov M., Podrabinnik P., Smirnov A., Solís Pinargote N.W. Processing and Characterization of Spark Plasma Sintered SiC-TiB₂-TiC Powder // Materials. – 2022. – V. 15(5). – Art. No 1946.

4. Grigoriev S.N., **Thet Naing Soe**, Malakhinsky A., Makhadilov I., Romanov V., Kuznetsova E., Smirnov A., Podrabinnik P., Khmyrov R., Solís Pinargote N.W., Kurmysheva A. Granulation of Silicon Nitride Powders by Spray Drying: A Review // Materials. – 2022. – V. 15(5). – Art. No 4999.

5. Grigoriev S.N., **Thet Naing Soe**, Khaled Hamdy, Pristinitskiy Y., Malakhinsky A., Makhadilov I., Romanov V., Kuznetsova E., Podrabinnik P., Kurmysheva A., Smirnov A., Solís Pinargote N.W. The Influence of Surface Texturing of Ceramic and Superhard Cutting Tools on the Machining Process – A Review // Materials. – 2022. – V. 15(19). – Art. No 6945.

6. Grigoriev S.N., **Thet Naing Soe**, Trusova E.A., Afzal A.M., Kurmysheva A., Kuznetsova E., Smirnov A., Solís Pinargote N.W. Peculiarities of γ -Al₂O₃ crystallization on the surface of h-BN particles // Materials. – 2022. – V. 15(22). – Art. No 8054.

7. Solís Pinargote N.W., Malakhinsky A., **Thet Naing Soe**, Pristinitskiy Y., Smirnov A., Meleshkin Y., Apelfeld A., Peretyagin N., Peretyagin P., Grigoriev S.N. Investigation of the WEDM Parameters' Influence on the Recast Layer Thickness of Spark Plasma Sintered SiC-TiB₂-TiC Ceramic // Coatings. – 2023. – V. 13. – Art. No 1728.

8. **Тет Наинг Со**, Пристинский Ю.О., Солис Пинарготе Н.В. Effect of the DC pulse current pattern on the different materials properties of samples obtained by spark plasma sintering // XXIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные научные исследования: теория, методология, практика», г. Пенза, 10 октября 2020 г. – 2020. – С. 19–24.

9. **Тет Наинг Со**, Солис Пинарготе Н.В., Пристинский Ю.О., Тет У. Влияние импульсов постоянного тока на процесс искрового плазменного спекания // Материалы научно-практической конференции с международным участием «Перспективные технологии и материалы», г. Севастополь, 14–16 октября 2020 г. – 2020. – С. 124–128.

10. **Тет Наинг Со**, Тет У. Spark plasma sintering of various materials on their properties. Effect of DC pulse current patterns // IV Международная научно-практическая конференция «Science and technology innovations», г. Петрозаводск, 22 октября 2020 г. – 2020. – С. 29–34.

11. **Thet Naing Soe**, Mikhailov I.M., Solís Pinargote N.W. The DC pulse current pattern influence during spark plasma sintering // 15th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP 2021); Ekaterinburg, September 5–10, 2021.

12. **Thet Naing Soe**, Mikhailov I.M., Malakhinsky A., Solís Pinargote N.W. The influence of DC pulse current pattern on the different materials properties of samples obtained by spark plasma sintering // 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022); Tomsk, October 2–8, 2022.

Научное издание

Тет Наинг Со

**СОЗДАНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ КЕРАМИКИ SiC-TiB₂-TiC ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ**

*Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук*