

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)»
Общество с ограниченной ответственностью «Вириал» (Санкт-Петербург)

На правах рукописи



Хорев Василий Андреевич

Антифрикционные композиционные материалы для эксплуатации в
экстремальных условиях трения

2.6.17. Материаловедение

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент Фищев Валентин Николаевич

Санкт-Петербург – 2025

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Аналитический обзор	11
1.1 Методические проблемы трибологических испытаний.....	12
1.1.1 Общие аспекты трибологических испытаний	12
1.1.2 Особенности процессов трения в высокоскоростных агрегатах	13
1.2 Углеродистые композиционные материалы	15
1.2.1 Антифрикционные углеродистые композиционные материалы, на основе углеродных порошковых систем	16
1.2.2 Изотропный пиролитический углерод	19
1.2.3 Антифрикционные материалы с углеродной компонентой.....	22
1.3 Триболого-технологические аспекты процесса формования заготовок длинномерного осевого режущего инструмента методом экструзии	23
Выводы из аналитического обзора.....	24
Глава 2. Методы исследования.....	26
2.1 Определение кажущейся плотности	26
2.2 Определение твердости образцов.....	26
2.3 Наноиндентирование	26
2.4 Определение предела прочности при поперечном изгибе.....	28
2.5 Оптическая микроскопия.....	28
2.5.1 Подготовка образцов.....	28
2.5.2 Оптическая микроскопия углеродных материалов	28
2.5.3 Оптическая микроскопия твердого сплава	29
2.6 Электронная микроскопия	29
2.7 Рентгеноструктурный анализ	30
2.8 Спектроскопия комбинационного рассеяния света (рамановская спектроскопия).....	31
2.9 Определение зольности графитов	31
2.10 Обработка результатов эксперимента	31
Глава 3. Объекты исследования	33
3.1 Изотропный пиролитический углерод.....	33
3.2 Антифрикционный графит АТГ-С	34

3.3 Твердый сплав WC-Ni с углеродными добавками	35
3.4 Пластифицированные массы на основе твердого сплава WC-Co	35
для формования длинномерных заготовок	35
Глава 4. Модернизация испытательного оборудования и разработка методики трибологических испытаний в экстремальных условиях трения	36
4.1 Усовершенствование методики трибологических испытаний на универсальной машине трения УМТ2168	36
4.2 Модернизация узла трения трибостенда УМТ2168	39
4.3 Методика проведения высокоскоростных трибологических испытаний	42
4.3.1 Модернизация стенда ВТ1М для высокоскоростных трибологических испытаний.....	42
4.3.2 Проведение высокоскоростных трибологических испытаний на модернизированном стенде	48
4.4. Разработка конструкции устройства для формования твердосплавных стержневых заготовок с внутренними винтовыми каналами	50
4.5 Метрологическая оценка результатов измерения трибологических характеристик.....	59
Выводы по главе 4.....	60
Глава 5. Трибологические свойства углеграфитовых композиционных материалов	62
5.1 Изотропный пиролитический углерод.....	62
5.2 Антифрикционный графит АТГ-С	73
Выводы по главе 5.....	75
Глава 6. Антифрикционные композиционные твердосплавные материалы для эксплуатации в условиях трения при высоких нагрузках.....	76
6.1 Влияние добавки графита на трибологические показатели твердого сплава ВН20.....	76
Выводы по 6 главе.....	82
Заключение	84
Список литературы	86
Приложение А. Краткие сведения о трибологии	98
Приложение Б. Свидетельство о выдаче патента на полезную модель	115
Приложение В. Пример расчета погрешности величины коэффициента трения.	116

Приложение Г. Акт внедрения методики в технологический процесс производства изделий из изотропного пиролитического углерода.....	117
Приложение Д. Полученные дифрактограммы изотропного пиролитического углерода	118

Введение

Актуальность темы исследования

Дальнейшее развитие современных силовых установок и агрегатов предполагает увеличение эксплуатационных скоростей, механических и термических нагрузок и других параметров, что влечет за собой повышение требований надежности и эффективности их узлов трения. Особо тяжелым условиям эксплуатации подвержены узлы трения, работающие в присутствии абразива, например, в установках нефтедобычи, а также в условиях сухого и граничного трения.

Для различных условий трения используются разные материалы пар трения. При высоких скоростях вращения, сухом и/или граничном трении наиболее часто применяются углеграфитовые композиционные материалы (графит АТГ-С, графит ПУМА-С и т.д.). В условиях воздействия высоких механических нагрузок и абразивосодержащих сред – это керамики на основе карбида кремния, твердые сплавы и др. материалы. Значительный интерес представляют твердосплавные композиции с антифрикционными добавками для эксплуатации в условиях граничного трения и изотропный пиролитический углерод (ИПУ) для применения в условиях высокоскоростного сухого трения.

Важной проблемой является абразивный износ формующего оборудования при изготовлении длинномерного твердосплавного осевого режущего инструмента методом экструзии, приводящий в конечном итоге к потере точности геометрических размеров изделия. При работе длинномерного твердосплавного осевого режущего инструмента происходит повышенное тепловыделение в зоне резания. Для обеспечения необходимого режима работы инструмента требуется подвод смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) непосредственно в зону резания.

Для обеспечения надежности механизмов при работе в подобных экстремальных условиях требуется научно обоснованный выбор материалов пар трения на основе достоверных данных о трибологических характеристиках узлов

трения в условиях, приближенных к условиям эксплуатации, что определяет актуальность темы настоящего диссертационного исследования.

Работа выполнена в рамках плановых НИР и ОКР предприятия ООО «Вириал».

Степень разработанности темы

В качестве механических уплотнений высокоскоростных силовых агрегатов в настоящее время используются антифрикционные графиты. Известно, что перспективным материалом для применения в указанных условиях является изотропный пиролитический углерод, однако данные о его трибологических характеристиках в условиях трения при скоростях свыше 70 м/с в открытых источниках отсутствуют.

Для снижения негативных последствий работы в условиях сухого или полусухого трения твердосплавных подшипников насосного оборудования используют добавки, играющие роль твердых смазок. Имеющиеся сведения об эффективности указанных добавок противоречивы, поэтому данный вопрос требует более детального рассмотрения.

Современная промышленность широко использует длинномерный осевой режущий инструмент. В этой связи важной является проблема формирования длинномерных заготовок твердосплавных стержней. Наиболее технологичным методом получения подобных стержней является экструзия пластичных масс. Решение данной проблемы требует комплексного подхода и заключается как в оптимальном подборе материалов технологической оснастки, так и в конструктивных решениях формующих узлов оборудования, что, как правило, является предметом «ноу хау» фирм-производителей или защищено патентами.

Цели и задачи

Цель работы: на основе исследования трибологических свойств перспективных антифрикционных углеграфитовых и твердосплавных материалов в экстремальных условиях трения сформулировать требования к их основным характеристикам применительно к условиям эксплуатации

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- 1) Модернизировать имеющийся на предприятии ООО «Вириал» комплекс испытательного оборудования для исследования трибологических характеристик антифрикционных углеграфитовых и твердосплавных материалов в экстремальных условиях трения;
- 2) Разработать методику трибологических испытаний при скоростях до 125 м/с и нагрузках до 60Н;
- 3) Определить значения коэффициента трения и скорости изнашивания перспективных антифрикционных углеграфитовых материалов;
- 4) Исследовать влияние графитовой добавки на трибологические свойства твердосплавной композиции WC-Ni;
- 5) Определить оптимальные параметры процесса экструзии из термопластичных масс на основе твердого сплава WC-Co длинномерных заготовок с внутренними винтовыми каналами. Разработать конструкцию формующего узла экструдера.

Научная новизна исследования

Впервые определены коэффициенты трения и скорость изнашивания изотропного пиролитического углерода (ИПУ) в условиях высокоскоростного (свыше 70 м/с) сухого трения.

С использованием метода рамановской спектроскопии выявлена природа дефектов кристаллической структуры изотропного пиролитического углерода и определено влияние степени ее совершенства на физико-механические и трибологические свойства ИПУ.

Показано, что введение добавки графита в твердосплавную систему WC-Ni увеличивает несущую способность пары трения более чем в два раза при смазке водой и до восьми раз увеличивает продолжительность сохранения работоспособности в режиме сухого трения. Выявлена тенденция к повышению вышеуказанного показателя при снижении зольности графита.

Теоретическая и практическая значимость работы

Установлена взаимосвязь строения и физико-механических характеристик антифрикционных углеграфитовых и твердосплавных материалов с показателями их трибологических свойств.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что изотропный пиролитический углерод имеет в 1,5 раза более низкий коэффициент трения и до 6,5 раз более высокую сопротивляемость износу, чем антифрикционный графит АТГ-С.

Показано, что для получения изделий с повышенной износостойкостью в условиях высокоскоростного сухого трения необходимо, чтобы заготовка изотропного пиролитического углерода имела плотность не менее 2,1 г/см³. Предложен экспресс-метод оценки трибологических характеристик ИПУ на основе измерения плотности образцов.

Разработана методика трибологических испытаний при скоростях до 125 м/с и нагрузках до 60Н.

На основе результатов технологических исследований разработана конструкция устройства для формования методом экструзии длинномерных заготовок твердосплавного осевого режущего инструмента с внутренними винтовыми каналами, на которую получен патент на полезную модель RU 221444 U «Устройство для формования методом экструзии стержневых заготовок с внутренними винтовыми каналами».

Методология и методы исследования

Определение кажущейся плотности материалов проводили в соответствии с ГОСТ 2409-95 с помощью лабораторных аналитических электронных весов «CE224-С». Твердость по Виккерсу определяли в соответствии со стандартом ISO 14705 на твердомере Виккерса Falcon 508. Наноиндентирование проводили на нанотвердомере CSM Instruments TTX-NHT2 в соответствии с ISO 14577-1. Предел прочности при поперечном изгибе определяли согласно ГОСТ 20019. Микроструктуры материалов изучали методом оптической микроскопии с

использованием прямых материаловедческих микроскопов Altami и «LeicaDM 2500 M» и программного пакета компьютерного анализа изображений «ВидеоТест – Структура 5.2». Анализ микроструктуры и следов износа образцов проводился с использованием сканирующего растрового электронного микроскопа MIRA 3 TESCAN. Рентгеноструктурный анализ выполняли на дифрактометре Rigaku SmartLab 3 Powder. Спектры комбинационного рассеяния получали на многофункциональной автоматизированной установке для атомно-силовой микроскопии и рамановской спектроскопии NTEGRA Spectra II. Зольность графитов определяли по ГОСТ 17818.4-90.

Обработку результатов экспериментов осуществляли в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011.

Положения, выносимые на защиту:

- разработка, апробация и внедрение в производственный цикл методики проведения высокоскоростных испытаний на модернизированном трибостенде;
- оценка степени совершенства кристаллической структуры изотропного пиролитического углерода и её влияния на свойства ИПУ на основе данных спектроскопии комбинационного рассеяния света (рамановской спектроскопии)
- результаты исследования влияния добавки графита на трибологические свойства изделий из твердых сплавов системы WC-Ni;
- конструкция устройства для формования методом экструзии стержневых заготовок осевого режущего инструмента с внутренними винтовыми каналами.

Степень достоверности и апробация работы

Достоверность результатов исследования основана на комплексном применении современных методов исследования, использовании стандартизованных методик, подтверждена их воспроизводимостью и соответствием современному уровню знаний в исследуемой области науки.

Материалы диссертации доложены и обсуждены на международных конференциях Огнеупорщиков и металлургов (Москва 2022, 2023, 2024 г. г.), на молодежной научной конференции ИХС РАН (Санкт-Петербург, 2019), а также на

ежегодных конференциях в СПбГТИ(ТУ) «Традиции и инновации» (Санкт-Петербург, 2021, 2022, 2023 гг.) и ежегодных конференциях в СПбГТИ(ТУ) «Неделя науки» (Санкт-Петербург, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 гг.).

Глава 1. Аналитический обзор

Человек постоянно сталкивается с трением в своей жизнедеятельности. С наличием трения связаны нахождение любого предмета в состоянии покоя на одном и том же месте и упорядоченность движения. Положительная роль трения заключается в обеспечении работы тормозных систем, различных сцепных механизмов (редукторы, резьбовые соединения и т.д.), обеспечение сцепления с опорной поверхностью при передвижении транспорта и человека.

С другой стороны, с трением связаны износ и повреждения деталей машин и механизмов. Трение приводит к потерям энергии, перегреву механизмов, снижению передаваемых усилий, повышенному расходу горючего и других материалов [1–3].

Изучением явления трения и процессов, связанных с ним, занимается трибология. Это название образовано от греческих слов «трибос» - трение и «логос» - наука.

Трибология, как комплексная научная дисциплина, охватывает экспериментальные и теоретические исследования физических, химических, биологических и других явлений, связанных с трением. Трибология изучает внешнее и внутреннее трение твердых и жидких тел. Она рассматривает протекание многообразных механических и физико-химических процессов при взаимодействии контактирующих поверхностей, поверхностные волны, возбуждаемые ударными воздействиями, автоколебания и многие другие явления. Трибология рассматривает научные аспекты трения, износа и смазки в машинах и механизмах [1–6].

Основные понятия трибологии: термины и определения, схемы контактирования элементов пары трения при испытаниях, модели изнашивания материалов рассмотрены в Приложении А.

1.1 Методические проблемы трибологических испытаний

1.1.1 Общие аспекты трибологических испытаний

Особенностью трибологических характеристик материалов является сильная зависимость от различных факторов. При различных условиях трения (наличие или отсутствие смазки, тип смазки, температура узла трения и т.д.) один и тот же материал может иметь разные величины коэффициента трения, износа и предельной нагрузки.

Различают лабораторные, стендовые и натурные (эксплуатационные) испытания.

Лабораторные испытания проводятся при исследовании общих закономерностей процессов трения и изнашивания.

Эксплуатационные испытания производятся на реальной машине или механизме, и при их проведении оценивается взаимное влияние различных узлов трения машины или механизма на их работоспособность, производится оценка надежности и долговечности его работы в реальных условиях работы [7, 8].

При стендовых испытаниях узлов трения оценивается влияние их конструктивных особенностей на триботехнические характеристики узла. Лабораторные и стендовые испытания проводятся на трибологических стендах (трибостендах), состоящих из исследуемого узла трения или его физической модели и устройств, позволяющих варьировать факторы, влияющие на работоспособность узла, и регистрировать его триботехнические характеристики.

Основной проблемой стендовых испытаний является несоответствие характеристик, выпускаемых промышленностью трибостендов [9–14], и реальных условий эксплуатации узлов трения. Данную проблему можно решить либо доработкой существующих стендов [7, 15], либо разработкой собственных уникальных трибостендов. Поскольку разработка собственного трибостенда

тяжелая и экономически затратная задача, то исследователи стараются дорабатывать выпускаемые промышленностью стенды.

При модернизации трибостендов важно помнить, что процесс трения крайне сложен, зависит от множества трудно учитываемых факторов, связанных как с материалом, так и со схемой испытаний, соблюдения требований к условиям испытаний и работой испытательного оборудования. Поэтому необходимо, насколько это возможно, максимально приблизиться не только к условиям эксплуатации (скорость, нагрузка, температура и т.д.), но и к способу закрепления элементов пары трения в механизме.

1.1.2 Особенности процессов трения в высокоскоростных агрегатах

Эффективность узлов трения определяется их ресурсными характеристиками, экономичностью, технологичностью и функциональными возможностями. В подшипниках и уплотнениях роторов турбомашин требования к постоянству геометрии являются очень жёсткими, так как любое нежелательное изменение формы или размера рабочего зазора ведёт к снижению КПД узла и двигателя в целом. Основной тенденцией совершенствования узлов трения в первую очередь является увеличение их износостойкости и снижение коэффициента трения. Обеспечение высоких показателей эффективности в условиях выхода двигателестроения на более высокие скорости вращения роторов подразумевает решение задач надёжности при повышенных динамических нагрузках [15–17].

Особенностями эксплуатации высокоскоростных агрегатов является наличие граничного режима трения до выхода ротора на рабочую скорость и переходу к гидродинамическому (жидкостному) режиму трения. Режим граничного трения характеризуется высоким значения коэффициента трения и, как следствие, накоплением повреждений, изнашиванием и изменениям геометрии поверхностей

трения, что ведёт к ухудшению эксплуатационных свойств изделия и возникновению функционального отказа [15, 18].

На рисунке 1 показана схема развития функционального отказа, возникающего в процессе износа трущихся деталей. Данная схема позволяет сформировать комплекс мероприятий по повышению надёжности уплотнительных и подшипниковых узлов. Для повышения ресурсных характеристик подшипника и уплотнения требуется подавить развитие процессов повреждаемости, указанных на схеме. Важно отметить, что чем выше процесс находится в цепочке развития повреждаемости, тем более эффективными являются мероприятия по управлению ресурсными характеристиками узла [15].



Рисунок 1 – Схема развития функционального отказа [15]

Таким образом, можно выделить основные негативные последствия граничного трения в подшипниках и уплотнениях высокоскоростных силовых агрегатов:

- повреждение поверхностей в зонах касания;
- повышенная скорость изнашивания поверхностей трения;
- повышенный фрикционный разогрев;
- загрязнение узла продуктами разложения смазочного масла.

Очевидно, что сокращение числа циклов запуска (останова и длительности экстремальных режимов) для эксплуатируемого агрегата в большинстве случаев невозможно. Таким образом, негативное влияние граничного трения в высокоскоростных механизмах можно ослабить только за счет конструктивно-технологических мер, например, подбором материалов [15, 19].

1.2 Углеродистые композиционные материалы

Углеродистыми композиционными материалами (УКМ) называют широкий класс материалов, состоящих из углеродной или графитовой матрицы с различными армирующими добавками (волокна, наноразмерные частицы, ткани и т.д.). В сравнении с альтернативными высокотемпературными конструкционными материалами, такими как поликристаллические графиты, вольфрам, тантал, молибден и др., УКМ имеют низкую плотность, высокую механическую прочность при повышенных температурах, высокую стойкость к термическим ударным нагрузкам, абляционную стойкость, что особенно важно при работе в условиях предельно высоких температур и скоростных газовых потоков [20, 21].

Сфера применения углеродистых композиционных материалов крайне обширна: футеровка печей, реакторов атомных электростанций, механические уплотнения ракетных, авиационных, газотурбинных двигателей, подшипники в высокоскоростных узлах трения, тормозные системы, теплозащитные конструкции и многое другое [20, 22–25]. Данный класс материалов нашел широкое применение

за счёт своих уникальных свойств, а именно: более низкой массы деталей, в сравнении с металлическими и керамическими материалами, высокой прочности при повышенных температурах, низкого коэффициента термического линейного расширения, высокой теплопроводности и стойкости к тепловому удару, стабильного коэффициента трения, а также химической стойкости.

С развитием углеграфитовых композиционных материалов сталь, сплавы на основе алюминия и титана становятся неконкурентоспособными, так как в виду высокой удельной прочности применение УКМ позволяет уменьшить массу изделия, не проигрывая при этом в прочности [20–23].

1.2.1 Антифрикционные углеграфитовые композиционные материалы, на основе углеродных порошковых систем

Антифрикционные углеграфитовые материалы (АУМ) – это материалы на основе природного или синтетического графита, способные работать в разных средах и при разных нагрузках [26]. С развитием машиностроения и методов горячей обработки металлов давлением применение в триботехнике графита и материалов на его основе расширилось. Они применяются для изготовления подшипников, поршневых и уплотнительных колец, механических уплотнений, эксплуатирующихся при повышенных температурах.

Жесткие уплотнения с кольцами обеспечивают надежную работу при высоких скоростях и температуре без смазки. Они применяются в паровых и газовых турбинах, поршневых и турбинных компрессорах, паровых машинах, насосах, химической аппаратуре и т. д.

Долгое время высокие антифрикционные свойства графита объяснялись только его кристаллическим строением [27]. Развитие высотной авиации опровергло это общепринятое мнение. Графитовые щетки электродвигателей на больших высотах теряли свои антифрикционные свойства. Было установлено, что

это связано с удалением в разреженном воздухе адсорбированных молекул воды [28]. По этой же причине при повышении температуры выше 100°C при атмосферном давлении графит теряет антифрикционные свойства [29].

Впоследствии было установлено, что высокие антифрикционные свойства графита могут проявляться при адсорбировании и интеркалировании других веществ. Разработаны компактные антифрикционные графитовые (АГ-600, АГ-1500) и углеграфитовые (АО-600, АО-1500) материалы. Специальные антифрикционные графиты марок АГ-1500 и АО-1500 в паре трения со сталью ограничены по температуре эксплуатации до 300°C и 400°C соответственно и предельно допустимой скоростью 20 м/с [29].

Основные марки углеграфитовых композиционных материалов:

1) АГ-1500 – антифрикционный графит на основе прокалённого кокса марки КНПС с добавкой природного графита;

2) АГ-1500СО5 – графит на основе прокалённого кокса, пропитанный свинцом с добавкой 5% олова;

3) ВАР-253у – углеродный материал на основе сажи, древесной муки, пропитанный фурфуроловым спиртом;

4) НИГРАН-В – углеродный материал на основе графитированного боя, пропитанный фурфуроловым спиртом;

5) АТГ-С – графит, на основе сланцевого кокса марки КС, пропитанного смешанным ультрафосфатом состава $K_2O \cdot 2MnO \cdot 6P_2O_5$.

Общая схема получения подобных материалов показана на рисунке 2.

Схема соответствует классической керамической технологии: сначала в результате дробления, помола, смешения кокса с добавками получают шихту заданного гранулометрического и химического состава. Затем происходят прессование заготовки и её сушка. Далее заготовки пропитывают пеком, для заполнения крупных пустот и графитизацию заготовок при высокой температуре. После этого полученные заготовки пропитывают различными составами, вновь подвергают термообработке и отправляют на механическую обработку. Добавки

могут быть самые разнообразные: неорганические соединения, высокомолекулярные спирты, металлы и т.д.

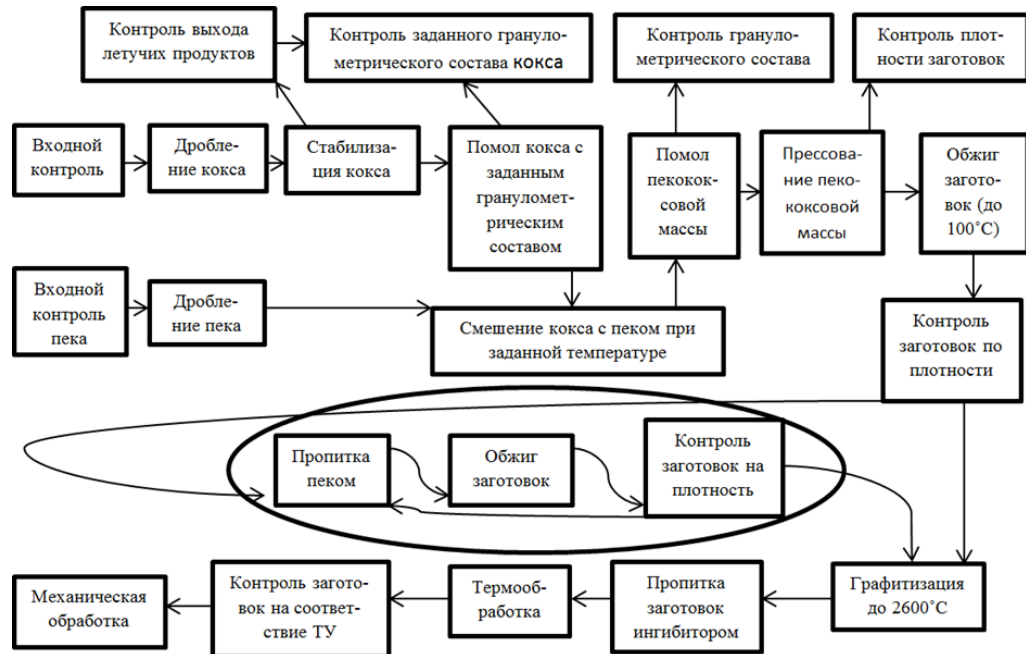


Рисунок 2 – Общая схема получения углеграфитовых композиционных материалов с различными пропитками [30]

Углеграфитовые композиционные материалы имеют следующие характеристики [29]:

- 1) Допустимая удельная нагрузка
 - для угольных – 20 кгс/см²,
 - для графитированных – до 15 кгс/см²;
- 2) Допустимая скорость до 10 м/сек;
- 3) Максимально допустимое рабочее давление 10 МПа.

Для работы в тяжелых условиях УГМ дополнительно пропитывают, после чего они способны работать при давлении (6,87–9,81) МПа. В жидких средах достигается коэффициент трения равный 0,001–0,005.

В таблице 1 представлены данные о свойствах некоторых углеграфитовых материалов.

Таблица 1 – Свойства некоторых марок графитов [28]

Марка графита	Плотность, кг/м ³ не менее	Предел прочности при изгибе, МПа не менее	Размер зерна, мкм
Антифрикционный графит АТГ-С ТУ1915-005-07507216-05	1750	100	20-25
Графитопласт ПУМА-С ТУ1915-005-07507216-05	1900	180	20-25
Графит МПГ-6С МПГ-7С ТУ1915-005-07507216-05	1750	110	20-25
Графит МПГ-7/1 ТУ1915-005-07507216-05	1850	120	20-25

Рассмотренные выше материалы имеют ряд существенных недостатков для применения в качестве высоконагруженных узлов трения, таких как склонность к разрушению при ударных и переменных нагрузках, а также к окислению при повышенных температурах [30, 31].

1.2.2 Изотропный пиролитический углерод

Пиролитический углерод – класс поликристаллических однофазных материалов, полученных методом химического осаждения углерода из газовой фазы (ХГО) на основной материал (подложку). Обладает высокой температурной и химической стойкостью, а также практически непроницаем для газов и жидкостей [32].

Процесс ХГО для получения пироуглеродных материалов анизотропной и изотропной модификаций реализуется путем термического разложения (пиролиза) потока газообразных углеводородных соединений при атмосферном давлении в среде водорода. Предварительно разогретый углеродсодержащий газ подается в

реакционную зону, в центре которой расположена подложка. В приповерхностной зоне подложки и/или в объеме газовой фазы происходит разложение исходного газа под действием термического фактора с последующим осаждением слоя компактного материала [33, 34].

Термохимические превращения исходных углеводородов, протекающие в реакционном объеме и на поверхности осаждения, сложны и многостадийны.

Упрощенная схема некоторых механизмов газофазного осаждения пиролитического углерода различных модификаций представлена на рисунке 3 [33].

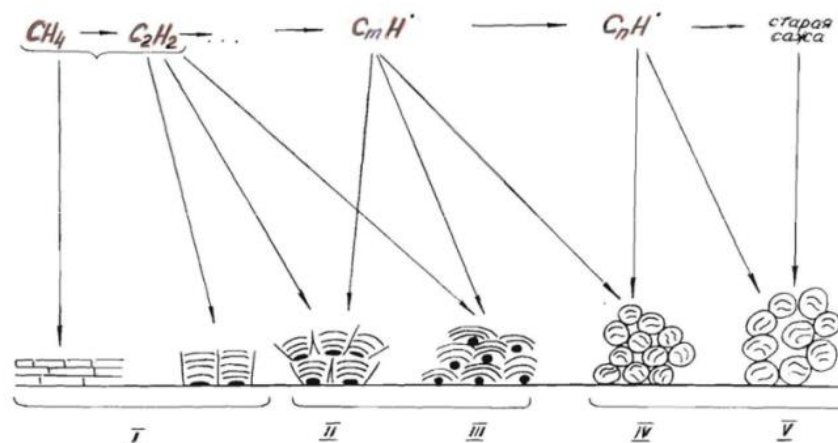


Рисунок 3 – Упрощенная схема механизмов осаждения пиролитического углерода различных модификаций [33]

Основной акт пиролиза метана – бимолекулярная реакция образования ацетилена (рисунок 3). При этом происходит многократная дегидрогенизация углеводородов с образованием полициклических ароматических радикалов, характеризующихся наличием неспаренных электронов, что благоприятствует их химической активности. Эти радикалы либо непосредственно конденсируются на поверхности осаждения (рисунок 3, зона I), либо объединяются в объеме в кластеры различных размеров и формы с последующим осаждением на подложке (рисунок 3, зона II). Наиболее глубокие структурные преобразования протекают в

объеме газовой фазы (рисунок 3, зона IV) при значительных пересыщениях по углероду. В ходе этих трансформаций не потерявшие активности и не завершившие процесса укрупнения кластеры объединяются в рентгеноаморфные сфероидальные образования. Нуклеация и рост идут во всем объеме газовой фазы. Возможно, что там же проходят и процессы частичной кристаллизации этих рентгеноаморфных образований, которые завершаются на поверхности осаждения [33–35].

Таким образом, схема на рисунке 3 отражает тот факт, что, регулируя в широком диапазоне технологические параметры процесса ХГО (температуру, расходы и концентрацию компонентов и др.), можно получать пироуглеродные материалы различного уровня анизотропии, компактности, структурного состояния нанослоя и других параметров [32–35].

Структура изотропного пиролитического углерода (ИПУ) образована сфероидальными слоистыми гранулами, уложенными плотно и без ориентации относительно какого-либо направления, что обеспечивает изотропию свойств. Сфероиды состоят из накручивающихся нанослоев углерода толщиной около 100 нм [32, 35].

Турбостратная структура углерода – это слоистая структура, в которой отсутствует закономерная ориентация графитовых слоев относительно гексагональной оси (рисунок 4) [36].

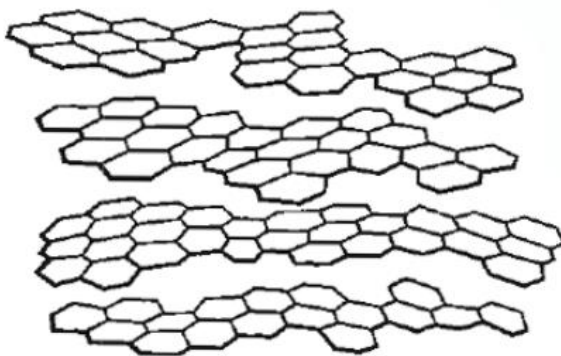


Рисунок 4 – Турбостратная структура углерода [36]

Нанослой и квазипараллельные разориентированные гексагональные монослои – основные элементы наноструктуры. Надкристаллитная структура (макроструктура) ИПУ равномерна и мелкозерниста. Размер, совершенство и компактность структуры изменяется с ростом плотности материала. Максимальный размер сфероидов составляет (4–5) мкм, в диапазоне плотности (2,0–2,1) г/см³ уменьшается до (1–2) мкм [35].

Благодаря своей специфичной структуре и чистоте, обусловленными методом получения, ИПУ имеет более высокие эксплуатационные характеристики, чем искусственный графит: в 2 раза более высокую прочность, более низкий и стабильный коэффициент трения, более высокую стойкость к окислению. Данный материал успешно применяется в качестве различных механических уплотнений [33–37].

1.2.3 Антифрикционные материалы с углеродной компонентой

В качестве антифрикционных добавок в композиционных материалах используют графит, легкоплавкие сплавы, сульфиды, галогениды, фториды и другие компоненты. Добавки в таких материалах играют роль твердой смазки. Впервые добавка графита была использована в бронзографитовых подшипниках, изготовленных на заводе «Электроугли» в 1932 году. В последующем для различных применений были разработаны меднографитовые, железнографитовые, металлографитофторопластовые и другие материалы [38].

В узлах трения, работающих в условиях высоких нагрузок, агрессивных и абразивосодержащих сред, часто применяют керамические материалы, такие как карбид кремния, нитрид кремния, диоксид циркония, твердые сплавы и др. Данные материалы имеют высокую сопротивляемость износу, коррозии, а также стабильно низкий коэффициент трения при жидкостном трении [39].

Однако при всех плюсах традиционных твердосплавных материалов подшипники скольжения на их основе имеют низкую работоспособность, и, следовательно, минимальный ресурс в условиях отсутствия или недостаточности смазки [40]. При этом происходит накопление повреждений, изнашивание и изменение геометрии поверхностей трения, что приводит к функциональному отказу узла трения и всего агрегата.

Дополнительным негативным фактором при эксплуатации твердых сплавов с кобальтовой связкой является образование микрогальванических пар между зернами WC (катод) и связкой (анод) при использовании водных смазок, что вызывает дополнительную коррозию и досрочный выход механизмов из строя. Как показали исследования [41], никель в качестве металла-связки существенно повышает коррозионную и окислительную стойкость твердосплавных деталей.

Одним из возможных решений данной проблемы является введение в твердый сплав добавки, которая может играть роль твердой смазки в условиях полужидкостного трения [38, 40, 42].

1.3 Триболого-технологические аспекты процесса формования заготовок длинномерного осевого режущего инструмента методом экструзии

В современных условиях развития машиностроения возрастает потребность в длинномерном осевом высокотвердом режущем инструменте [43, 44]. Под длинномерными заготовками стержней понимаются стержни длиной более 450 мм и соотношением длины к диаметру L/D свыше 8 [45, 46].

Наиболее распространенной технологией формования длинномерных заготовок осевого режущего инструмента является экструзия пластичных масс [47–49]. Данным способом производят осевой режущий инструмент, нагревательные элементы электрических печей и другие изделия. Основной проблемой данного

метода изготовления заготовок является сохранение постоянства поперечного сечения, и как следствие, свойств по длине заготовки.

Процесс экструзии масс, содержащих абразивные компоненты, сопровождается интенсивным износом внутренних поверхностей экструдера. Абразивный износ зачастую является основным фактором, определяющим износ инструмента и приводящим к потере точности геометрических размеров пуансонов, матриц и, как следствие, заготовок изделия. Решение данной проблемы требует комплексного подхода и заключается как в оптимальном подборе материалов технологической оснастки, так и в конструктивных решениях узлов оснастки [50–53].

Технология экструзии в большей степени зависит от пластификатора смеси и мало зависит от химического состава и свойств исходного порошкового материала. Пластификаторы могут быть как неорганические (например, глина), так и органические. Главным недостатком неорганических пластификаторов является невозможность их удаления из изделия, что сильно ограничивает область применения таких добавок. В технологии экструзии твердых сплавов наиболее распространёнными пластификаторами выступают воск, парафин, раствор синтетического каучука в бензине и другие [46].

Выводы из аналитического обзора

На основании анализа литературы по теме исследования показано, что

1. Для оптимального подбора материалов узлов трения необходимо иметь достоверные трибологические характеристики узла трения, полученные в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации, что вызывает необходимость модернизации выпускаемых промышленностью стендов.

2. Для высокоскоростных условий трения наиболее перспективны углеграфитовые композиционные материалы, в особенности изотропный

пиролитический углерод. Трибологические свойства данных материалов в условиях высокоскоростного трения исследованы недостаточно.

3. Предпочтительными материалами для использования в высоконагруженных узлах трения являются композиционные материалы на основе твердых сплавов.

4. Для минимизации влияния процессов износа технологической оснастки на профиль длинномерной заготовки и повышения эксплуатационных характеристик осевого режущего инструмента необходимо определить оптимальные технологические параметры экструзии длинномерных заготовок твердосплавного инструмента и конструктивные решения формующего оборудования.

Глава 2. Методы исследования

2.1 Определение кажущейся плотности

Плотность образцов определяли по ГОСТ 2409-95 с использованием лабораторных аналитических электронных весов «CE224-C».

2.2 Определение твердости образцов

Измерение твердости проводили на твердомере Falcon 500 в соответствии с ISO 14705-2008 по методу Виккерса.

Твердость рассчитывали по формуле:

$$HV = \frac{18540 \cdot P}{d^2 \cdot 1000}, \quad (1)$$

Где HV – твердость по Виккерсу, ГПа;

P – нагрузка на индентор, г;

d – средняя длина диагоналей отпечатка, мкм.

Определение твердости осуществляли на аншлифах с шероховатостью $Ra \leq 0,02$.

2.3 Наноиндентирование

Исследования проводились на нанотвердомере CSM Instruments TTX-NHT2, по методу Оливера-Фарра, в соответствии с ISO 14577-1:2002.

Суть метода Оливера-Фарра состоит в аппроксимации начального участка разгрузочной кривой (рисунок 5) степенной функцией [54]:

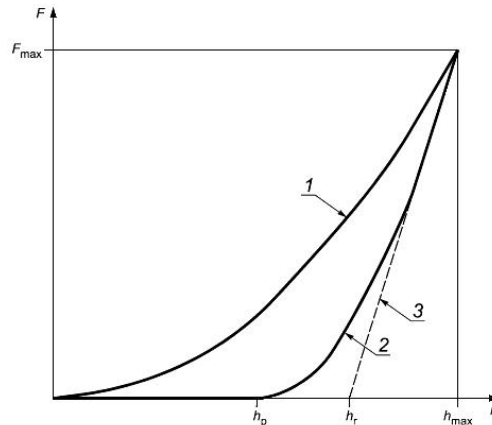
$$F_{\max} = B(h_{\max} - h_p)^m, \quad (2)$$

где $F_{\max}$ – максимальная нагрузка;

$h_{\max}$ – максимальная глубина проникновения индентора;

h_p – глубина проникновения индентора после снятия нагрузки;

B и m – эмпирически определяемые коэффициенты.



F – нагрузка на индентор; h – глубина проникновения индентора в материал; h_p – глубина проникновения индентора в материал, после снятия нагрузки; 1 – кривая нагружения; 2 – кривая разгрузки; 3 – касательная к кривой 2 при максимальной нагрузке на индентор

Рисунок 5 – Диаграмма наноиндентирования [54]

Глубина проникновения индентора (h_c), также определяется из графика нагружение – разгрузка по формуле:

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon \cdot \frac{F_{\max}}{mB(h_{\max} - h_p)^{m-1}}, \quad (3)$$

Где ε коэффициент, равный 0,75 для пирамиды Берковича.

Твердость рассчитывается по формуле [54]:

$$H = \frac{F_{\max}}{A}, \quad (4)$$

Где H – твердость;

A – площадь проекции отпечатка

2.4 Определение предела прочности при поперечном изгибе

Предел прочности твердосплавных образцов при поперечном изгибе определяли по трехточечной схеме на разрывной машине Р-50 согласно ГОСТ 20019. Скорость перемещения траверсы составляла 1,0 мм/мин, образцы имели форму призмы размером (5×5×35) мм.

Предел прочности при поперечном изгибе вычисляли без учета влияния возможной пластической деформации по формуле:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{3F \cdot l}{2h^2 \cdot b}, \quad (5)$$

где F – сила, соответствующая моменту разрушения образца, Н;

l – расстояние между осями опор, мм;

h – высота поперечного сечения образца, мм;

b – ширина поперечного сечения образца, мм.

2.5 Оптическая микроскопия

2.5.1 Подготовка образцов

Для исследования микроструктуры изготавливали шлифы с помощью автоматического шлифовально-полировального станка Buehler Beta/1 49-5100-230D Vector 60-1990, процесс полировки осуществляли до достижения шероховатости $Ra \leq 0,02$ мкм.

2.5.2 Оптическая микроскопия углеродных материалов

Контроль микроструктуры и наблюдение за поверхностью образцов после испытаний проводили на микроскопе Altamі с увеличением от $50^{\times}$ до $1000^{\times}$.

Исследование проводилось в отраженном свете по методу светлого поля. Для обнаружения прослоек анизотропного пиролитического углерода в структуре ИПУ шлифы просматривались в поляризованном свете. Результаты фиксировались в файлах формата jpg.

2.5.3 Оптическая микроскопия твердого сплава

Исследование микроструктуры твердых сплавов проводили согласно ГОСТ 9391 «Сплавы твердые спеченные. Методы определения пористости и микроструктуры».

Контроль микроструктуры и наблюдение за поверхностью образцов после испытаний проводили на микроскопах Altami и Leica при увеличении от 50[×] до 1000[×]. Оценка параметров микроструктуры осуществлялась с помощью программного пакета компьютерного анализа изображений «ВидеоТест – Структура 5.2»

Исследование проводилось в отраженном свете по методу светлого поля. Результаты фиксировались в файлах формата jpg.

2.6 Электронная микроскопия

Анализ микроструктуры и следов износа образцов проводился на сканирующем растровом электронном микроскопе MIRA 3 TESCAN.

2.7 Рентгеноструктурный анализ

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре Rigaku SmartLab 3 Powder на Cu K α -излучении в диапазоне углов 2θ 10-90° с шагом 0,05° при скорости 1°/мин.

По результатам измерения уширения дифракционных пиков рассчитывали размер области когерентного рассеяния l_a с использованием псевдораспределения Фойгта и формулы Шеррера, выраженному через малоугловую часть полуширины пика (рисунок 6) [55].

$$l_a = \frac{k\lambda}{\beta' \cos \theta}, \quad (6)$$

где k – безразмерный коэффициент формы, $k = 0,45$;

λ – длина волны рентгеновского излучения;

β' – малоугловая часть полуширины линии при половине максимальной интенсивности (рисунок 6);

Θ – угол Брэгга.

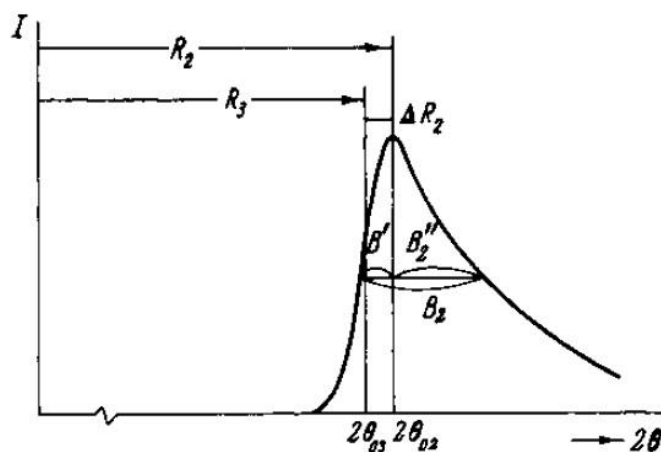


Рисунок 6 – Схематичное изображение дифракционного пика β' в частично трехмерно упорядоченных графитных материалах [55]

2.8 Спектроскопия комбинационного рассеяния света (рамановская спектроскопия)

Спектры комбинационного рассеяния получали на многофункциональной автоматизированной установке для атомно-силовой микроскопии и рамановской спектроскопии NTEGRA Spectra II лазером с длиной волны 473 нм (2,62 эВ) в диапазоне (0 – 2000) см⁻¹.

На основе анализа спектров комбинационного рассеяния света оценивали величину области когерентного рассеяния (l_a) из соотношения Tuinstra-Koenig [56]:

$$\frac{I(D)}{I(G)} \approx \frac{C}{l_a}, \quad (7)$$

где C – эмпирически определяемый коэффициент, зависящий от энергии лазера, а также степени разупорядоченности кристаллической структуры. Согласно [57] $C = 7,29$;

$I(D)$ и $I(G)$ – интенсивности линий D и G соответственно.

2.9 Определение зольности графитов

Зольность графитов определяли согласно ГОСТ 17818.4-90. Прокаливание вели при температуре 1000 °С с выдержкой 1 час.

2.10 Обработка результатов эксперимента

Обработку результатов эксперимента проводили в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения».

Оценку измеряемой величины $\bar{x}$, за которую принимают среднее арифметическое значение результатов измерений вычисляют по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (8)$$

Где x_i – i -й результат измерений

n – число результатов измерений.

Среднее квадратичное отклонение S группы, содержащей n результатов измерений, вычисляют по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (9)$$

Среднее квадратичное отклонение среднего арифметического $S_{\bar{x}}$ вычисляют по формуле:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (10)$$

Для выбранного коэффициента надежности ($\alpha=0,95$) вычисляли абсолютную погрешность результата измерений по формуле:

$$\Delta x = t_{\alpha} \cdot \Delta S_x, \quad (11)$$

где t_{α} - коэффициент Стьюдента.

Результат представляли в виде:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad (12)$$

Глава 3. Объекты исследования

3.1 Изотропный пиролитический углерод

Заготовки из изотропного пиролитического углерода (ИПУ) были изготовлены на предприятии ООО «Вириал» методом термического разложения метана в среде водорода.

На представленных фрактограммах (рисунки 7–9) видно, что структура ИПУ состоит из слоистых сфероидальных образований. Для низкоплотного материала (рисунок 7) сфероидальные образования не имеют выраженной формы, их размер составляет порядка 5–7 мкм. Слои, образующие сфероиды, в низкоплотном изотропном пиролитическом углероде более фрагментарны и менее закручены относительно центра сфероида. По мере роста плотности сфероидальные образования видны более отчетливо (рисунки 8 и 9), радиус кривизны составляющих их углеродных слоев уменьшается. Характерный размер сфероидов для высокоплотного материала порядка 1–3 мкм.

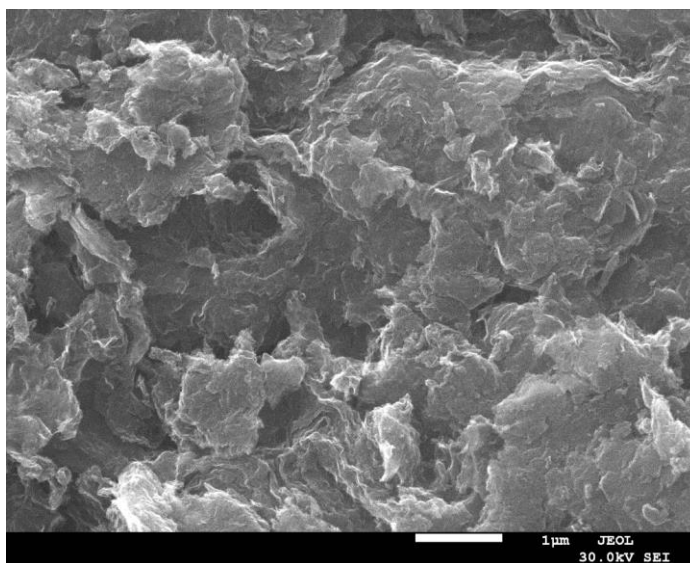


Рисунок 7 – Фрактограмма изотропного пиролитического углерода с плотностью 1,84 г/см³

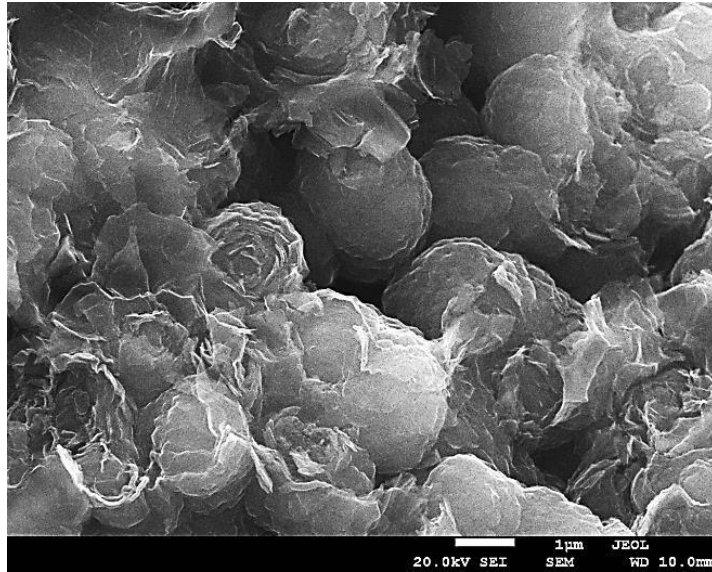


Рисунок 8 – Фрактограмма изотропного пиролитического углерода с плотностью $1,94 \text{ г/см}^3$

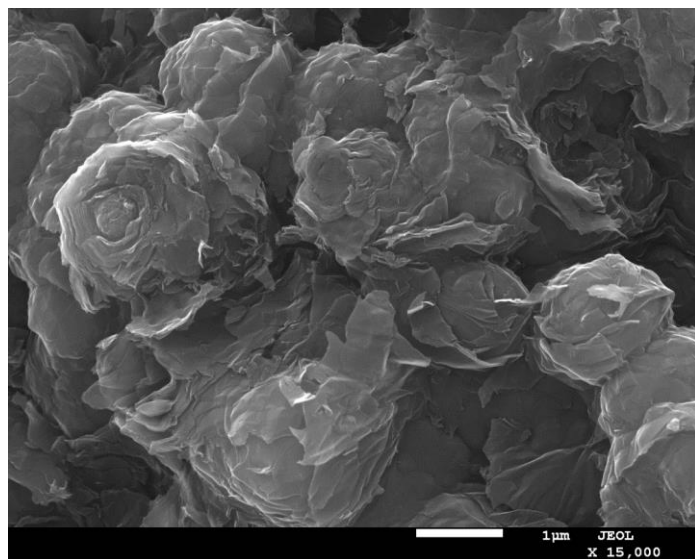


Рисунок 9 – Фрактограмма изотропного пиролитического углерода с плотностью $2,11 \text{ г/см}^3$

3.2 Антифрикционный графит АТГ-С

В работе использовался антифрикционный графит АТГ-С по ТУ 1915-005-07507216-05, выпущенный на предприятии «Салют».

Микроструктура графита АТГ-С показана на рисунке 10.

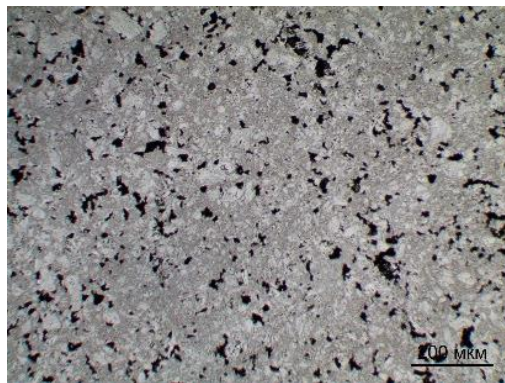


Рисунок 10 – Микроструктура антифрикционного графита АТГ-С, увеличение 200[×]

Микроструктура антифрикционного графита АТГ-С состоит из графита, зерен калий-марганцевого ультрафосфата и пор.

3.3 Твердый сплав WC-Ni с углеродными добавками

В работе использовали образцы, изготовленные на предприятии ООО «Вириал» по стандартной технологии на основе твердого сплава ВН20 с добавками углерода 2,0; 4,0 и 6,0 мас. % графита, а также контрольные образцы без добавки углерода.

В качестве углеродных добавок использовали графиты малозольный ГМЗ (ТУ 48-20-90-82), специальный малозольный ГСМ-2 (ГОСТ 17022-81), терморасширенный ТРГ (ГОСТ 34708-2021).

3.4 Пластифицированные массы на основе твердого сплава WC-Co для формования длинномерных заготовок

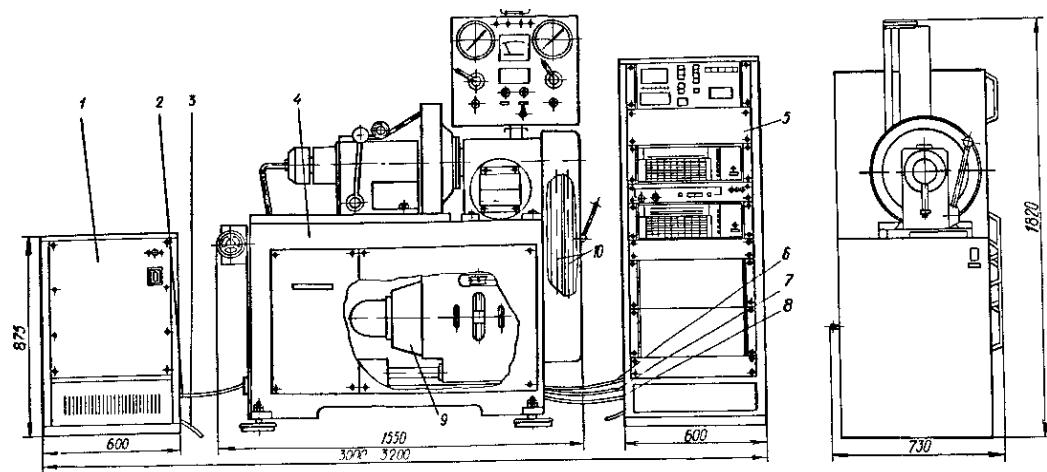
Для экструзии стержней были приготовлены формовочные массы на основе твердого сплава ВК10 с суммарным содержанием пластификатора 4, 6 и 8 об. %. В качестве пластификатора использовали смесь парафина с воском, в качестве ПАВ добавляли олеиновую кислоту.

Глава 4. Модернизация испытательного оборудования и разработка методики трибологических испытаний в экстремальных условиях трения

Для определения трибологических свойств ООО «Вириал» использовало универсальную машину трения УМТ2168 и разработанный предприятием торцевой трибометр ТТ. Однако, возможности указанного оборудования не удовлетворяли целям данного исследования, что вызвало необходимость их модернизации.

4.1 Усовершенствование методики трибологических испытаний на универсальной машине трения УМТ2168

Для проведения испытаний использовали трибологический стенд на основе универсальной машины трения УМТ2168. Схема универсальной машины трения УМТ2168 приведена на рисунке 11.

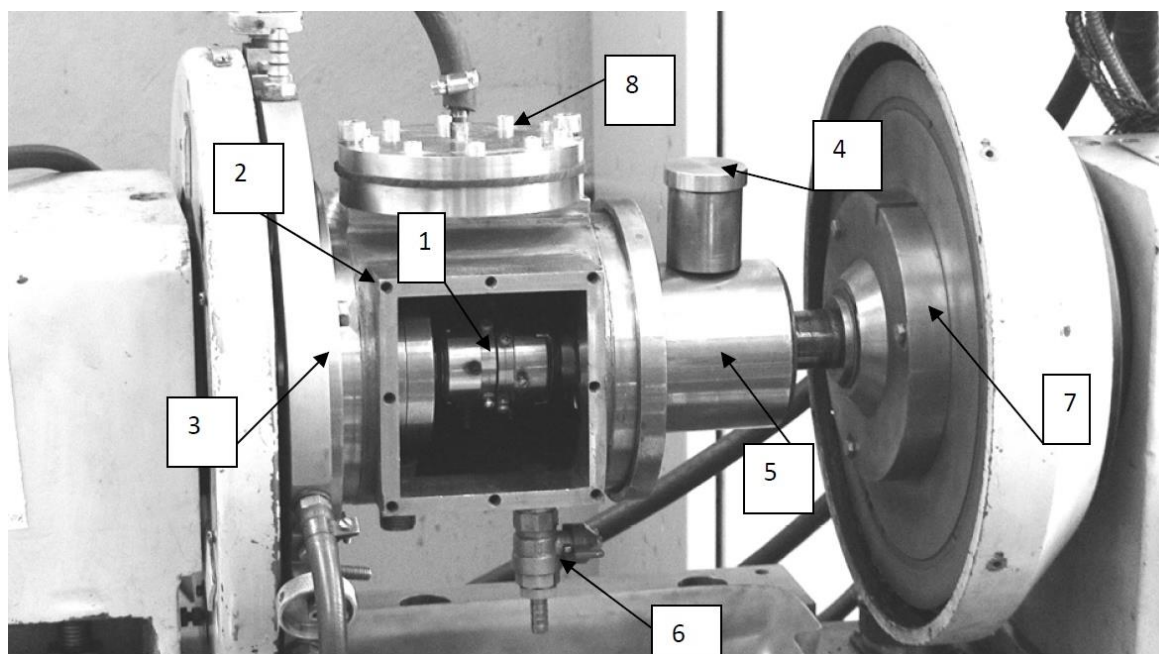


- 1 – пульт силовой; 2, 3, 6, 7, 8 – соединительные устройства;
 4 – испытательная установка; 5 – пульт управления; 9 – двигатель;
 10 – ременные передачи.

Рисунок 11 – Схема машины трения УМТ 2168

Диапазоны работы машины: по нагрузке от 0 Н до 6000 Н, по скорости вращения шпинделя от 300 об/мин до 3000 об/мин и по моменту трения до 40 Н·м, возможные схемы испытания: «кольцо-кольцо», «вал-втулка» и «диск-палец».

Для создания возможности проведения испытаний со смазочной средой универсальная машина трения была дооснащена специальной камерой трения (рисунок 12). Камера трения позволяет реализовать схему испытания кольцо-кольцо при постоянном присутствии жидкой среды, с абразивом или без него и измерять моменты трения величиной менее 1 Н·м.



- 1 – испытуемая пара трения; 2 – корпус камеры трения;
 3 – самоустанавливающийся диск, связанный с камертонным динамометром и индуктивным датчиком; 4 – масленка шпинделя; 5 – шпиндель камеры трения;
 6 – кран; 7 – планшайба; 8 – пневматическая камера.

Рисунок 12 – Камера трения

Показатели точности установки испытуемых образцов в камере трения соответствуют таковым при установке узлов трения в погружных насосах. Несоосность вращающегося и неподвижного колец в осевой опоре не должна

превышать 0,1 мм, торцевое биение контактирующих поверхностей должно быть не более 0,03 мм. Под опорными поверхностями стальных корпусов размещены резиновые прокладки, обеспечивающие при вращении их самоустановку и постоянный контакт трущихся поверхностей. Измерение фактических биений производится индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм и 0,001 мм.

Стенд также оснащен персональным компьютером и программным обеспечением для обработки данных, полученных во время испытания.

Методика измерения коэффициента трения основана на непосредственном измерении момента силы трения и величины осевой нагрузки с последующим вычислением коэффициента трения. Испытания проводят в камере трения по схеме «кольцо-кольцо» при нагрузках от 250 Н до 5500 Н и скорости вращения 2500 об/мин. В качестве смазки использовали дистиллированную воду. Измерения завершают по достижении максимальной нагрузки или при наступлении «схватывания».

Для расчета собственного момента трения на поверхностях испытуемых колец, с целью учета «паразитных» потерь, из измеренной величины полного момента вычитали значения момента холостого хода (от трения в шарикоподшипниках и в манжетах при нулевом осевом усилии).

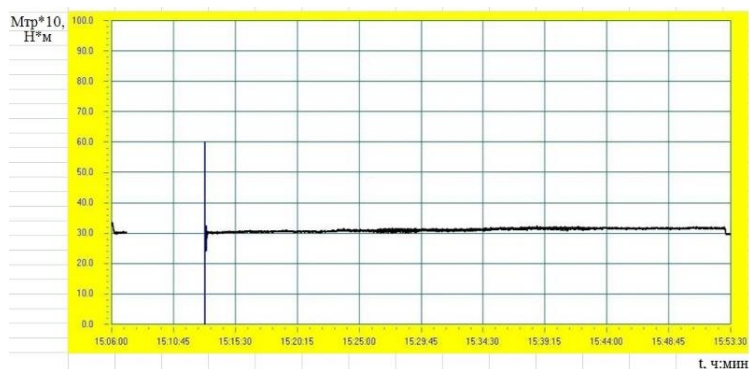
Проверку работоспособности исследуемых композиций в условиях сухого трения проводили по схеме:

- Притирка пары трения в дистиллированной воде в течение 10 минут.
- Полный слив воды, полноту которого контролировали через смотровое окно.
- После удаления смазывающей среды отмечали время до потери работоспособности (прихвата) пары трения.

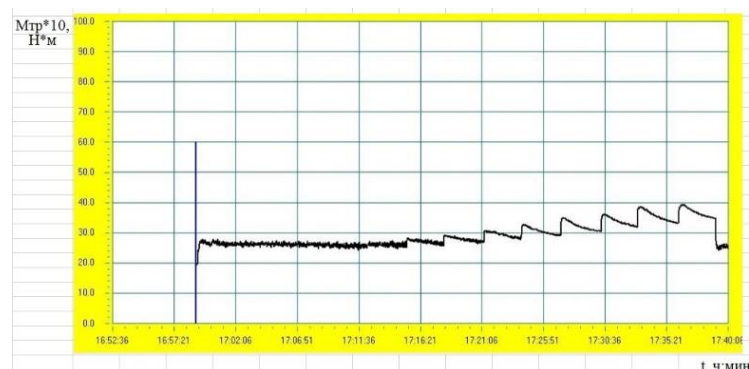
4.2 Модернизация узла трения трибостенда УМТ2168

Практика проводимых трибоиспытаний выявила проблемы, требующие решения. При нормальном течении процесса испытания график зависимости момента трения от времени представляет собой прямую линию, при этом величина момента трения практически не изменяется (рисунок 13а). В отдельных случаях в процессе эксперимента при достижении некоторой величины нагрузки момент трения начинает увеличиваться, а график приобретает пилообразный вид (рисунок 13б).

а)



б)



а) – при нормальном процессе испытания $\Delta M_{тр} = 0,2 Н \cdot м$.

б) – пилообразный график $\Delta M_{тр} = 1,5 Н \cdot м$;

Рисунок 13 – Зависимость момента трения от времени

Подобный характер зависимости момента трения от времени затрудняет оценку трибологических характеристик пар трения. Расчет погрешностей для двух указанных случаев представлен в приложении Б.

В первоначальной конструкции для закрепления колец при испытаниях были использованы специальные корпуса с резьбовыми отверстиями для винтов, с помощью которых образцы закреплялись в камере трения (рисунок 14а). Чтобы предотвратить проворачивание образцов в стальных корпусах, на образце делали лыску, в которую упирался один из винтов.

Такой способ крепления колец отличается от принятого в промышленности, предусматривающего посадку керамического кольца на специальный клей и завальцовку его в металлический корпус. Кроме того, из-за неравномерной затяжки винтов возможно возникновение локальных напряжений в местах контакта керамического кольца с винтами, а также смещение оси кольца относительно оси корпуса.



а) первоначальная конструкция узла трения;

б) модернизированная конструкция узла трения

Рисунок 14 – Конструкция узла трения

С целью устранения указанных нарушений была предложена конструкция узла трения с медными разрезными вставками, которая обеспечивает равномерную передачу усилия обжатия [58]. На рисунке 14б показана усовершенствованная конструкция узла трения испытательного стенда.

Усовершенствование конструкции узла трения позволило исключить возможность неравномерной затяжки закрепляющих винтов, а также обеспечить более точную установку элементов пары трения относительно друг друга. Благодаря вышеуказанным изменениям был выявлен и исправлен недостаток, связанный с малым сечением канавок для подвода смазки в образцах с габаритами $\varnothing 66/\varnothing 33/8$ (таблица 2) [59–61].

Таблица 2 – Зависимость потерь мощности на трение от площади поперечного сечения канавок

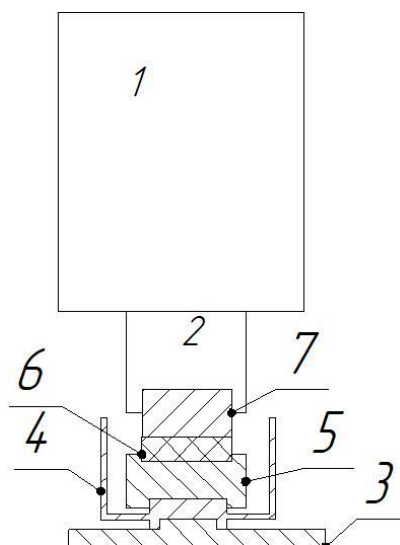
Номер группы образцов	Площадь поперечного сечения канавок, мм ²	Потери мощности на трение, Вт при нагрузках 3000/5000 Н
1	$1,98 \pm 0,12$	$(30 \pm 3)/(30 \pm 5)$
2	$1,31 \pm 0,13$	$(50 \pm 7)/(50 \pm 10)$
3	$0,82 \pm 0,12$	$(260 \pm 35)/(630 \pm 50)$

Как видно из таблицы 2, для сохранения гидродинамического режима трения колец габаритом $\varnothing 66/\varnothing 33/8$ (мм) площадь сечения канавки для подвода смазочной среды должна быть не менее 1,9 мм².

4.3 Методика проведения высокоскоростных трибологических испытаний

4.3.1 Модернизация стенда ВТ1М для высокоскоростных трибологических испытаний

Для решения задач настоящего исследования был необходим испытательный стенд, позволяющий проводить испытания с линейными скоростями выше 100 м/с. С целью экономии средств и времени было решено переоборудовать имеющийся на предприятии ООО «Вириал» трибостенд, конструкция которого показана на рисунке 15.



1 – высокоскоростной электрошпиндель; 2 – узел крепления контртела; 3 – основание трибометра; 4 – емкость для смазки; 5 – узел крепления образца; 6 – образец; 7 – контртело.

Рисунок 15 – Конструкция трибостенда до модернизации

Стенд работал по схеме «диск-палец» (рисунок 16) при максимальной скорости вращения шпинделя 24 000 об/мин, при линейных скоростях до 7,5 м/с и нагрузке от 30 Н до 300 Н.

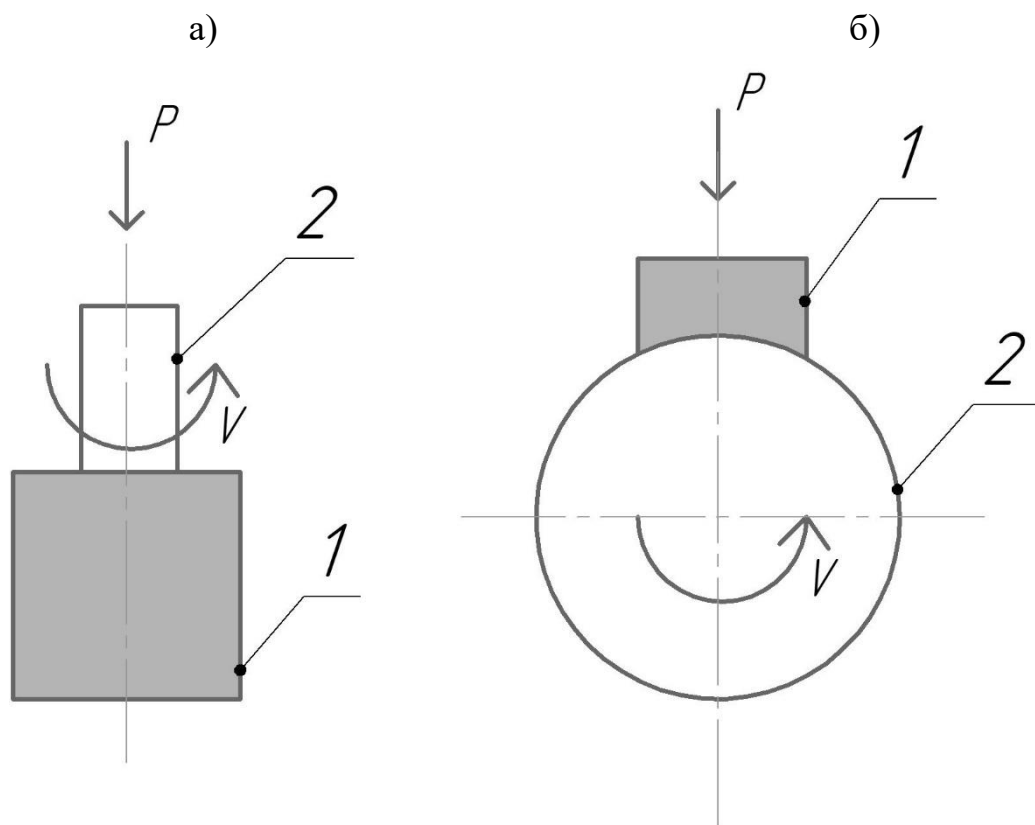
Для достижения максимальных скоростей, без увеличения мощности двигателя было решено заменить схему «диск-палец» на схему испытаний «диск-колодка» (рисунок 16), которая позволяет широко варьировать линейную скорость испытания с помощью сменных дисков различного радиуса в соответствии с формулой (13):

$$v = \frac{2\pi nR}{60}, \quad (13)$$

где v – линейная скорость, м/с;

n – частота вращения диска, об/мин;

R – радиус диска, м.

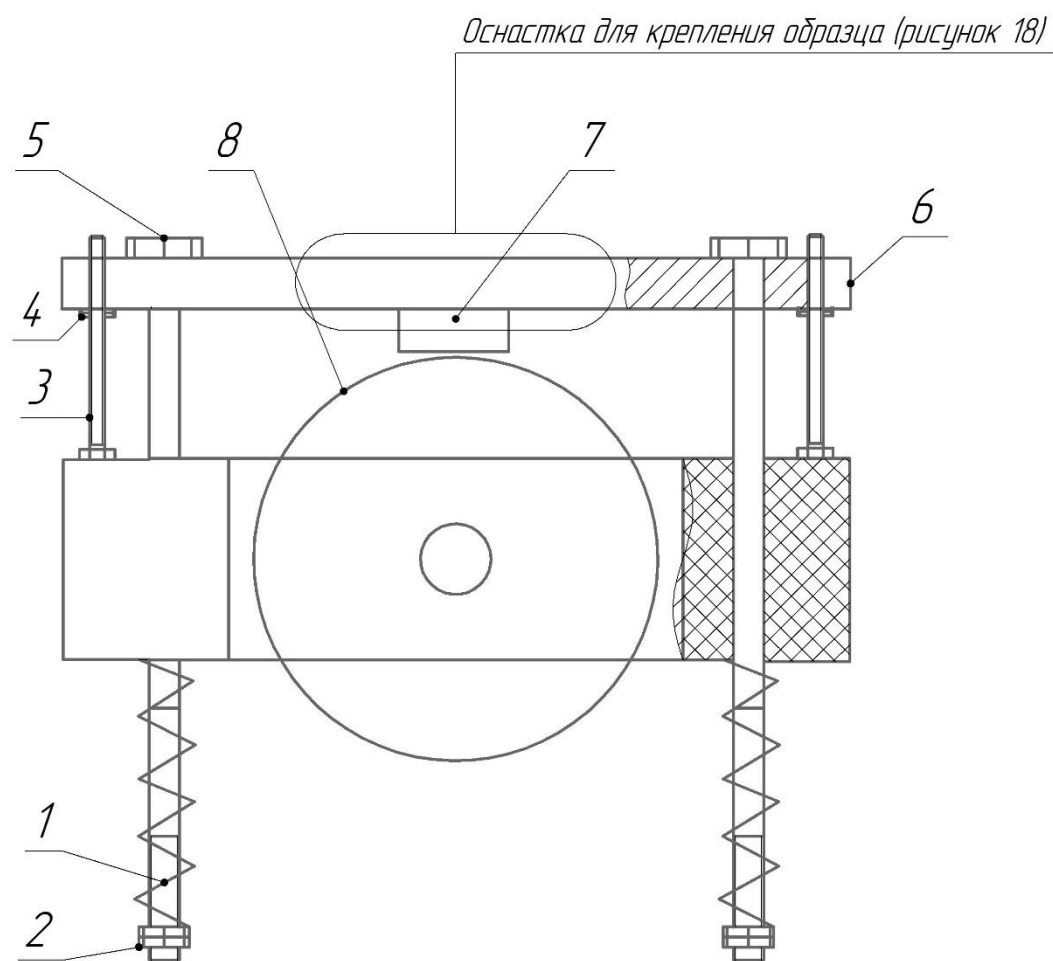


1 – образец; 2 – контртело

а) диск-палец; б) диск-колодка

Рисунок 16 – Схемы трибологических испытаний

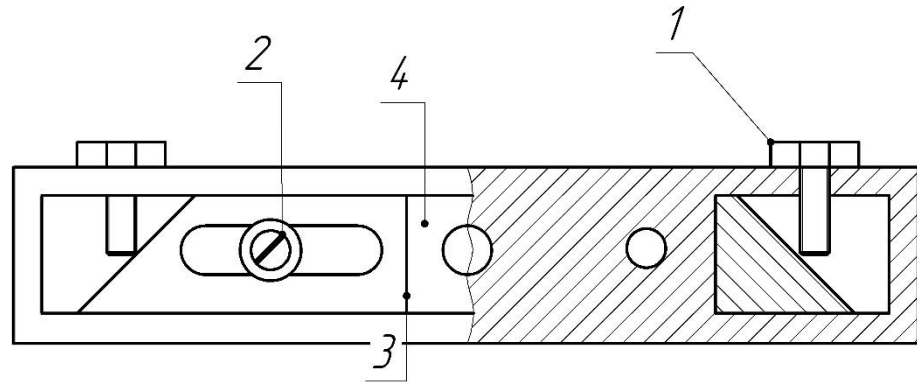
Из стали ХВГ были изготовлены диски диаметром 100 мм и толщиной 20 мм, а также изготовлен новый узел трения для крепления и передачи нагрузки на образец (рисунок 17).



1 – пружина; 2 – регулировочная и стопорная гайки; 3 – ограничительные винты; 4 – стопорная гайка; 5 – направляющая; 6 – станина для крепления образца; 7 – образец; 8 – контртело.

Рисунок 17 – Схема модернизированного узла трения

Нагрузка на образец передается путем сжатия пружин 1, регулируемого гайками 2. Ограничительные винты 3 служат предохранителями от столкновения оснастки с диском на случай аварийной ситуации и позволяют сохранить целостность и работоспособность крепления узла трения в дальнейшем.



1 – винты для зажима образца по длине; 2 – болт крепления прижимной пластины; 3 – прижимная пластина; 4 – опорная плоскость.

Рисунок 18 – Оснастка для крепления образца

Образец устанавливается на опорную плоскость 4, затем выставляется относительно центра оснастки и зажимается винтами 1 и с помощью пластин 3 и винтов 2 окончательно фиксируется в оснастке.

Для измерения нагрузки на образец производится калибровка пружин с помощью грузов по 0,2 кг и строится градуировочный график зависимости нагрузки от сжатия пружин типа $y = Ax + B$. Пример графика приведен на рисунке 19.

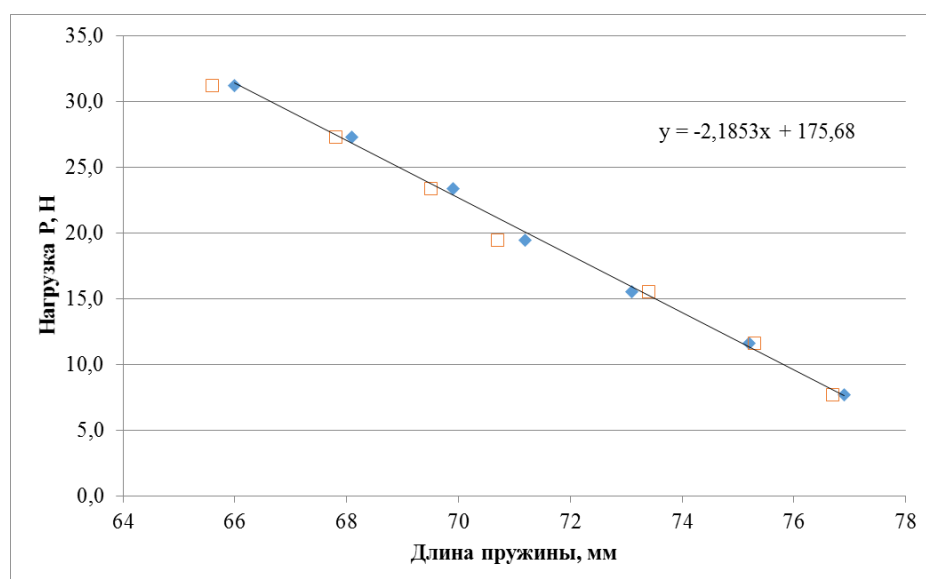


Рисунок 19 – Пример градуировочного графика пружин трибостенда

Перестроенная под новую схему испытаний, установка позволила получать стабильные данные по коэффициенту трения при линейных скоростях до 80 м/с [62], однако на более высоких скоростях трения возникали вибрации, которые приводили к перекосам и нестабильности площади контакта образца со стальным контртелом, а также влияли на стабильность показаний датчика [63], коэффициент вариации (КВ) сигнала превосходил 20 % (рисунок 20).

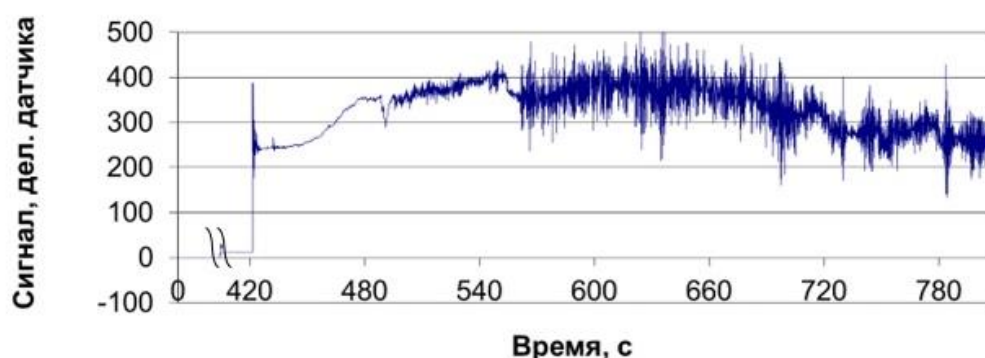


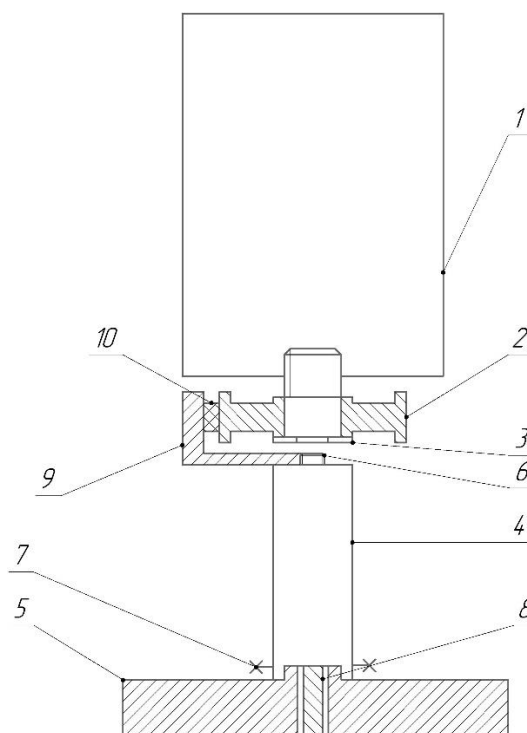
Рисунок 20 – График зависимости сигнала датчика от времени при скоростях выше 80 м/с

Для предотвращения перекосов образца, повышения жесткости конструкции и избавления от люфтов было решено заменить чашу 4 (рисунок 15) с двумя шарикоподшипниками на колонну с двумя разнесенными друг от друга коническими радиально-упорными подшипниками, устанавливаемыми попарно с предварительным натягом при установке. Данный тип подшипников обеспечивает более высокую грузоподъемность по сравнению с шариковыми радиально-упорными.

Также для уменьшения уровня вибраций на высоких скоростях была выполнена балансировка вращающегося диска. Биение диска в результате балансировки составило 0,02 мм. Схема модернизированного трибостенда показана на рисунке 21.

В результате проделанной работы удалось избавиться от неточностей установки образца и минимизировать уровень вибраций при скоростях вращения

свыше 80 м/с, что позволило добиться стабильности и воспроизводимости результатов эксперимента при скоростях до 125 м/с [64], КВ сигнала менее 10 % (рисунок 22).



1 – высокоскоростной электрошпиндель; 2 – контртело; 3 – винт для крепления контртела; 4 – колонна, передающая момент вращения на датчик угла поворота ЛИР-510; 5 – основание трибостенда; 6 – винт, для присоединения узла крепления образца; 7 – винты, удерживающие колонну; 8 – шток датчика ЛИР-510; 9 – узел крепления и передачи нагрузки; 10 – образец.

Рисунок 21 – Конструкция трибостенда с усовершенствованной колонной

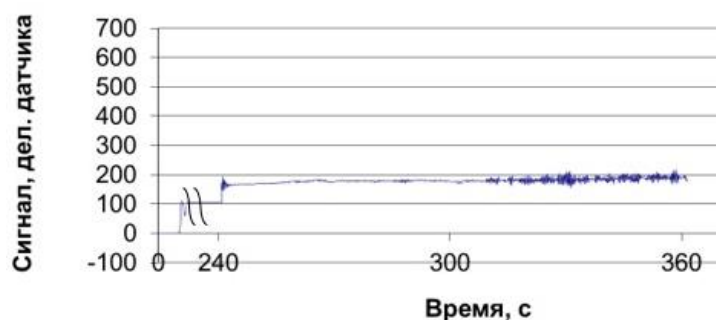
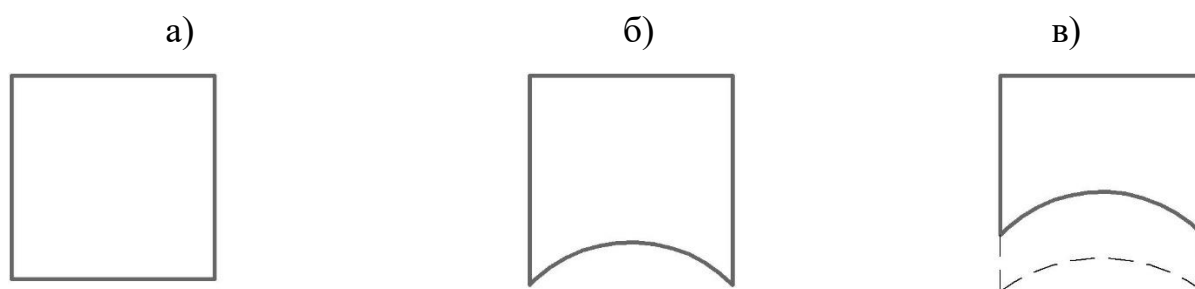


Рисунок 22 – График зависимости сигнала датчика от времени. КВ = 4,5 %

4.3.2 Проведение высокоскоростных трибологических испытаний на модернизированном стенде

Для проведения высокоскоростных трибологических испытаний из заготовок вырезали образцы с размерами $10 \times 10 \times 10$ мм.

Перед началом испытания поверхность образцов полировали до шероховатости поверхности (0,11–0,17) мкм, после чего проводили предварительную приработку кубического образца по диску до достижения им формы колодки (рисунок 23б). Затем измеряли массу каждого образца, проводили испытание и повторно замеряли массу. Перед замером массы образцы выдерживали в сушильном шкафу до постоянства массы. Измерения проводили на лабораторных весах с погрешностью 0,5 мг.



а) до приработки; б) после приработки; в) после испытания

Рисунок 23 - Схематичное изображение образца

После подачи питания на электродвигатель скорость 125 м/с достигается приблизительно за 5–6 секунд. Общее время испытания составляло 5 минут. Поскольку время достижения заданной скорости составляет приблизительно 2 % от всего времени испытания, процессами, происходящими на указанной стадии, пренебрегали. Испытания для каждого материала в одних и тех же условиях проводились не менее 10 раз.

По результатам испытаний рассчитывали момент трения (M_{TP} , Н·м), коэффициент трения (f_{Tp}), скорость изнашивания (I , мг/с).

Момент трения рассчитывался по формуле:

$$M_{TP} = A \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{15} \right) + B, \quad (14)$$

где α – показатель датчика угла поворота колонны, угловые секунды;

α_0 – нулевой показатель датчика угла поворота колонны, угловые секунды;

A и B – коэффициенты уравнения градуировки пружины.

Коэффициент трения рассчитывали по формуле:

$$f_{Tp} = \frac{M_{TP}}{N \cdot R}, \quad (15)$$

где N – нагрузка на образец, Н;

R – радиус диска-контртела, м.

Критическая нагрузка соответствует такому номинальному давлению в контакте на поверхности трибосопряжения, при котором происходит потеря устойчивости работы пары трения, сопровождающаяся резким возрастанием коэффициента трения и/или её прихвата [5]. Критическую нагрузку рассчитывали по формуле:

$$\sigma = \frac{P}{S}, \quad (16)$$

Где P – максимальная нагрузка на пару трения, Н

S – площадь трения, мм

Скорость изнашивания рассчитывали по формуле:

$$J_m = \frac{(M_1 - M_2)}{t \cdot 1000}, \quad (17)$$

где M_1 , M_2 – масса образца до и после испытания соответственно, г;

t – время испытания, с.

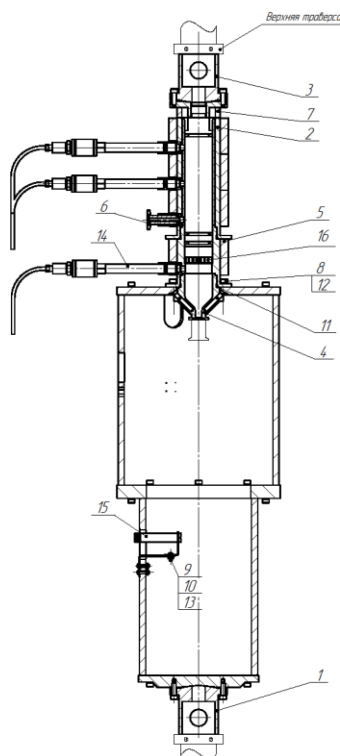
4.4. Разработка конструкции устройства для формования твердосплавных стержневых заготовок с внутренними винтовыми каналами

Заготовки для длинномерного осевого режущего инструмента изготавливаются методом экструзии. Для снижения скорости изнашивания оборудования необходимо, по возможности, уменьшить коэффициент трения между формовочной массой и поверхностью деталей экструдера. Поскольку непосредственный замер коэффициента трения в условиях экструзии крайне затруднителен, для косвенной оценки можно использовать величину нагрузки на поршень экструдера: чем выше коэффициент трения в паре формируемая масса – поверхность деталей экструдера, тем выше потребуется нагрузка для преодоления силы трения покоя и начала движения. Исходя из вышесказанного, оптимальным режимом экструзии можно считать тот, при котором нагрузка на поршень минимальна при условии получения необходимого качества формируемой заготовки.

Для изучения процессов формования стержней был собран модельный экструдер на основе универсальной испытательной машины Test 113.100 kN. Нагрев смеси осуществлялся четырьмя нагревателями по всей высоте рабочего цилиндра экструдера и в экструзионной головке. Температуру контролировали датчиками МИДА с погрешностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Нагрузку на поршень и скорость перемещения массы в ходе процесса определяли с помощью датчиков универсальной испытательной машины Test 113.100 kN. Погрешность определения нагрузки 0,3 %, погрешность определения скорости движения траверсы, а, следовательно, и массы 0,01 мм/мин.

Процесс экструзии проводили при неизменной температуре в течение опыта, постоянной скорости перемещения поршня и при остаточном давлении 0,1 МПа.

Схема модельного экструдера представлена на рисунке 24.



1, 3 – крепления экструзионного стенда к траверсам испытательной машины;
 2 – корпус экструдера; 4 – экструзионная головка; 5 – нагреватель; 6 – штуцер для подключения вакуумного насоса; 7 – ограничители хода поршня; 8, 12 – крепёж;
 9, 10, 13 – приспособления для крепления и регулировки положения инфракрасного термометра; 11 – уплотнительное кольцо; 14 – датчики МИДА (температуры и давления); 15 – инфракрасный термометр; 16 – решетка

Рисунок 24 – Схема модельного экструдера

Для экструзии стержней были использованы формовочные массы на основе твердого сплава ВК10 с суммарным содержанием пластификатора 4, 6 и 8 об. %. В качестве пластификатора использовали смесь парафина с воском, в качестве ПАВ добавляли олеиновую кислоту.

Для определения оптимального сочетания содержания пластификатора и температуры процесса были проведены опыты по экструзии стержней диаметром 14,6 мм и длиной 450 мм при скорости движения поршня 5 мм/мин. Результаты опытов показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты экспериментов

Номер опыта	Содержание пластификатора, об. %	Температура материала, °C	Максимальная нагрузка на поршень, Н	Результат
1	4	48	32000	Процесс экструзии не начался. При разборке экструдера обнаружен спрессованный порошок, не проявляющий пластичных свойств.
2		55	30500	
3		63	21700	Скорость движения массы в процессе экструзии неравномерная, поверхность заготовки испещрена трещинами, стержни разрушались под действием собственного веса при длине образца 80-120 мм.
4	6	48	15500	Наблюдались пульсации при движении массы, сопровождающиеся постепенным ростом, а затем резким падением нагрузки на диаграмме «нагрузка-перемещение траверсы». На поверхности стержня наблюдались трещины.
5		56	9500	Движение стержня равномерное, на поверхности видимые дефекты отсутствуют.
6		63	7700	Результаты аналогичны опыту № 5, но заготовка легко деформировалась при ее перемещении в ложемент.
7	8	48	4800	Результаты аналогичны опыту № 5.
8		53	1900	Результаты аналогичны опыту № 6.
9		60	600	Масса потеряла свои вязкопластические свойства и вела себя как жидкость.

На рисунках 25–27 представлены диаграммы «нагрузка-перемещение массы», соответствующие различному характеру движения заготовки в процессе формования.

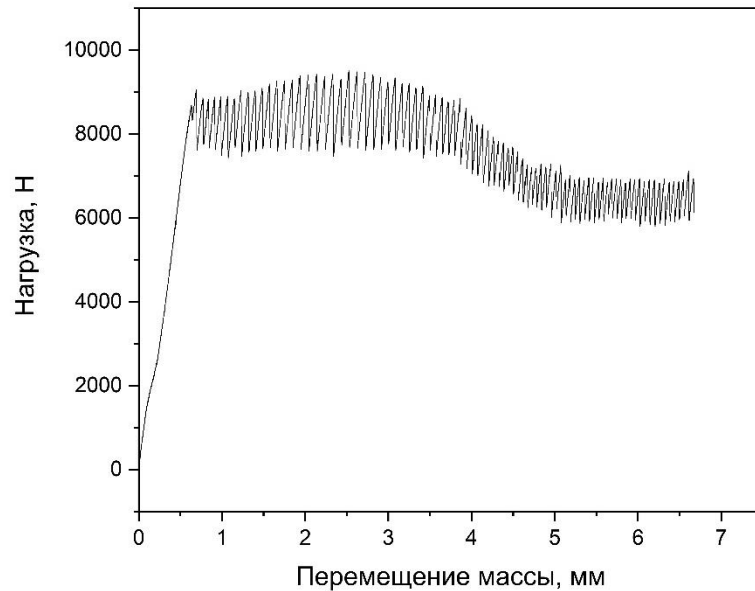


Рисунок 25 – Диаграмма нагрузка-перемещение массы при пульсирующем движении заготовки

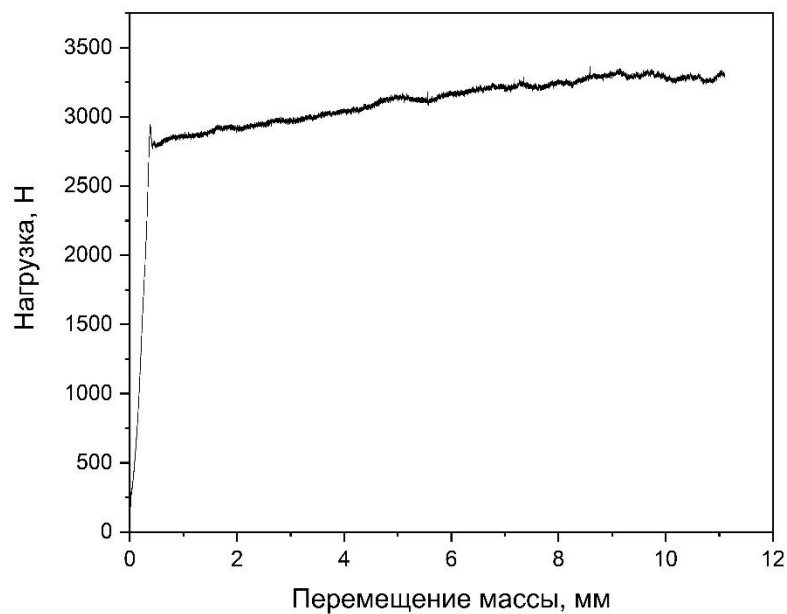


Рисунок 26 – Диаграмма нагрузка-перемещение массы при равномерном движении стержня

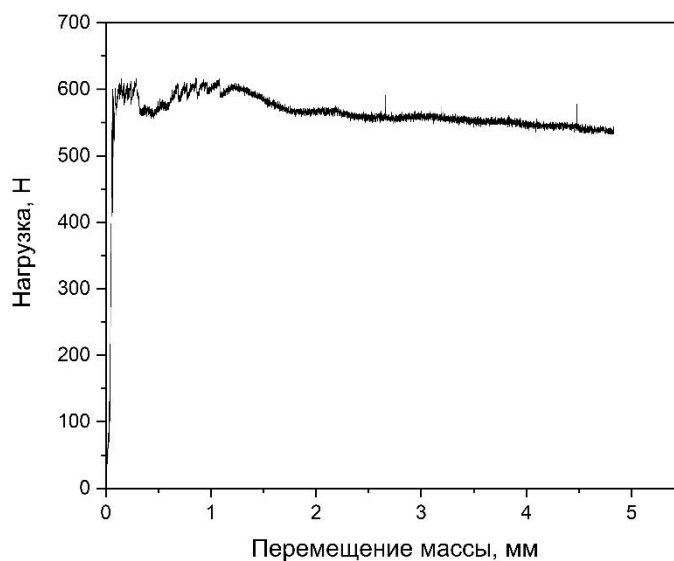


Рисунок 27 – Диаграмма нагрузка-перемещение массы перегретой смеси

Исходя из результатов, представленных в таблице 3, определено, что содержание пластификатора 4 об. % недостаточно для получения заготовок длинномерных твердосплавных стержней.

Стержни из смеси с содержанием пластификатора 8 об. % после процесса формования легко деформируются при перемещении в ложемент вследствие более медленного остывания.

Помимо этого, после спекания заготовок с повышенным содержанием пластификатора наблюдались трещины, вызванные избыточным газообразованием при повышении температуры (рисунок 28). Данные проблемы можно решить, введя дополнительные промежуточные стадии, но это замедляет и удорожает производство инструмента.

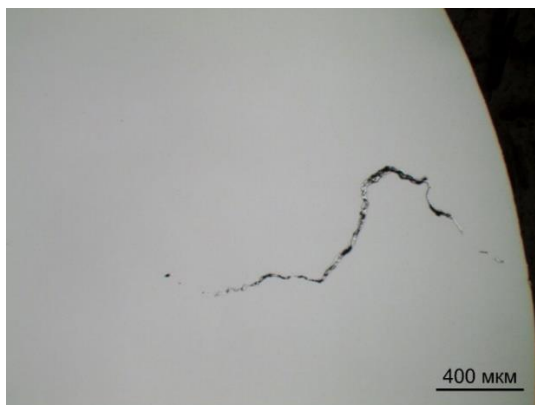


Рисунок 28 – Пример трещины в микроструктуре стержня с содержанием пластификатора 8 об. %

Состав, содержащий 6 об. % пластификатора, оказался менее чувствителен к нагреву, чем состав с содержанием 4 об. %, и, в отличие от состава с 8 об. % пластификатора, не требовал дополнительных операций по подготовке к спеканию. На основе полученных данных для дальнейших экспериментов был выбран состав с содержанием пластификатора 6 об. %.

Глубокое сверление предъявляет особые требования к технологии, инструменту и оборудованию. Процесс резания происходит в закрытом или полузакрытом режиме, поэтому состояние режущего инструмента нельзя наблюдать напрямую, теплота резания не рассеивается, удаление стружки затруднено. Чтобы своевременно предотвратить слишком быстрый и чрезмерный износ кромок инструмента при высоких рабочих температурах, его необходимо охлаждать, тем самым избегая поломки инструмента и увеличивая его срок службы.

Для обеспечения необходимого режима обработки деталей требуется подвод смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) непосредственно в зону резания. Подачу СОЖ можно осуществить различными методами, но наиболее эффективным является подача через специальные винтовые каналы внутри режущего инструмента (рисунок 29).

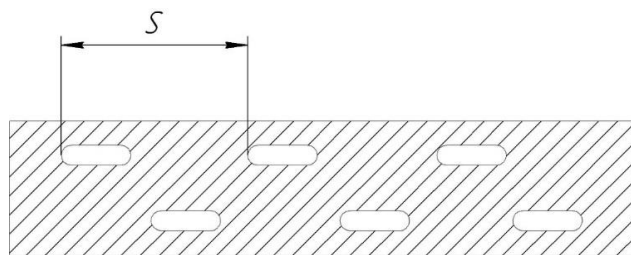


Рисунок 29 – Схема поперечного разреза стержня. S – шаг каналов

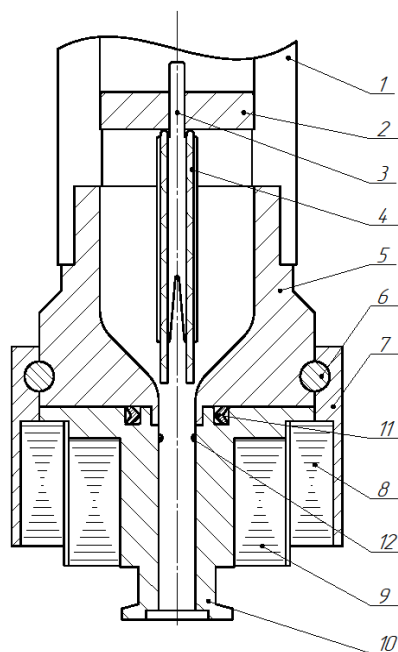
При разработке конструкции устройства для формования методом экструзии стержневых заготовок с внутренними винтовыми каналами были решены следующие задачи:

- 1) обеспечена возможность изменения шага внутренних каналов;
- 2) предусмотрен быстрый переход на другой типоразмер заготовки;
- 3) поскольку твердые сплавы обладают высокой абразивностью, обеспечена возможность легкой замены изношенных деталей.

Решение указанных проблем было достигнуто за счет непосредственного соединения экструзионной головки с ротором бескорпусного электродвигателя и снабжения ее мундштуками, которые при их износе можно заменять. Тем самым была получена возможность варьировать шаг внутренних каналов при изменении скорости вращения стержня, и формовать на одном устройстве стержни различных типоразмеров, соблюдая их точность.

Принцип работы разработанного устройства (рисунок 30) заключается в следующем: в экструдере 1 установлено крепление лески 2, которое фиксирует направляющую лески 3. Во время движения поршня материал проходит через крепление лески 2. В направляющей лески 3 находятся нейлоновые нити 4, которые обеспечивают образование прямолинейных каналов в заготовке во время прохождения через них материала. Статор двигателя 8 фиксируется на экструзионной головке 5 через крепление двигателя 7 с помощью крепежных штифтов 6. Экструдер 1 и экструзионная головка 5 неподвижны и соединены между собой с помощью резьбового соединения. Формообразующая матрица 10 представляет собой вращающуюся насадку. Между неподвижной экструзионной

головкой 5 и вращающейся формообразующей матрицей 10 имеется зазор, герметичность системы обеспечивается уплотнительным кольцом 11. Вращающаяся формообразующая матрица 10 устанавливается непосредственно в ротор двигателя 9. Когда материал проходит в экструзионную головку 5 и попадает в формообразующую матрицу 10, стержневая заготовка начинает закручиваться за счет двух или более расположенных на внутренней стенке формообразующей матрицы выступов 12, а прямолинейные каналы в заготовке также начинают закручиваться вместе с самой заготовкой, что на выходе даёт закрученную стержневую заготовку с внутренними винтовыми каналами. Помимо приведения заготовки во вращение выступы используются и для нанесения на наружную поверхность заготовки винтовых канавок, по шагу которых можно судить о шаге внутренних каналов.



1 – экструдер; 2 – крепление лески; 3 – направляющая лески;
 4 – нейлоновые нити; 5 – экструзионная головка; 6 – крепежные штифты;
 7 – крепление двигателя; 8 – статор двигателя; 9 – ротор двигателя;
 10 – формообразующая матрица; 11 – уплотнительное кольцо; 12 – выступы

Рисунок 30 – Устройство для формования методом экструзии стержневых заготовок с внутренними винтовыми каналами

Испытания показали работоспособность конструкции: были получены стержни с внутренними винтовыми каналами. Фотография фрагмента стержня и микрофотография поперечного разреза спеченного стержня показаны на рисунках 31 и 32.



Рисунок 31 – Фрагмент заготовки стержня для контроля расположения каналов

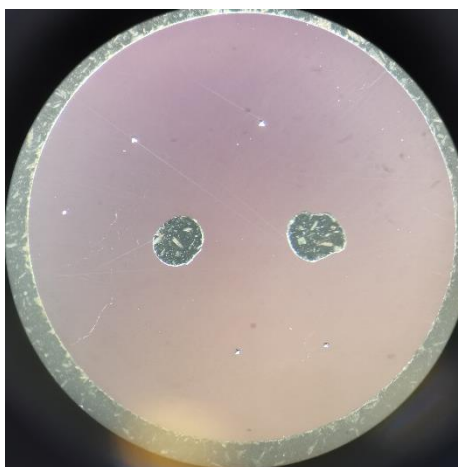


Рисунок 32 – Шлиф поперечного среза полученного стержня

Как видно из рисунков 31 и 32 полученный стержень имеет внутренние винтовые каналы с фиксированным шагом, симметрично расположенные относительно центральной оси стержня.

На разработанную конструкцию экструзионной головки получен патент на полезную модель «Устройство для формования методом экструзии стержневых заготовок с внутренними винтовыми каналами» (Приложение В).

4.5 Метрологическая оценка результатов измерения трибологических характеристик

Обработку результатов эксперимента проводили в соответствии с методикой, разработанной ООО «Метрологический центр РОСНАНО», «Конструкционные гетерофазные керамические и металлокерамические материалы. Триботехнические характеристики. Методика измерения коэффициента трения и критической удельной нагрузки» (свидетельство об аттестации методики измерений № 10/01.00302-2010/2012).

$$M_{\text{экспер.}} = f \cdot R_{\text{ср}} \cdot K \cdot P + M_{\text{собств.}}, \quad (18)$$

где $M_{\text{экспер.}}$ – момент трения испытываемой пары трения, Н·м;

$M_{\text{собств.}}$ – собственный момент трения камеры трения, Н·м;

$f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения испытываемой пары;

K – коэффициент, определяемый при калибровке силоизмерителя;

$R_{\text{ср}}$ – средний радиус трибосопряжения, м;

P – осевая нагрузка, Н.

Если принять, что $f_{\text{тр}} \cdot R_{\text{ср}} \cdot K = a$, а $M_{\text{собств.}} = b$, то уравнение (18) принимает вид:

$$y = a \cdot x + b, \quad (19)$$

где x соответствует P , а y – $M_{\text{экспер}}$

Значения коэффициентов a и b определяют методом наименьших квадратов [65].

Стандартную неопределенность типа A , обусловленную источниками неопределенности, имеющими случайный характер, для тангенса угла наклона (a) принимают равной значению σ_a , а для измерения коэффициента трения f вычисляют по формуле:

$$U_A = \frac{\sigma_a}{R_{\text{ср}} \cdot K} \quad (20)$$

По типу В вычисляют относительную суммарную стандартную неопределенность, обусловленную источниками неопределенности, имеющими систематический характер. Распределение значений величин внутри границ считают равномерными.

Относительную суммарную стандартную неопределенность $\tilde{U}_B$ измерения коэффициента трения f , вычисленную по типу В, определяют по формуле:

$$U_B = \sqrt{\tilde{U}_{B,K}^2 + \tilde{U}_{B,Rcp}^2} \quad (21)$$

Суммарную стандартную неопределенность U_B определяют по формуле:

$$U_B = \tilde{U}_B \cdot f \quad (22)$$

Суммарную стандартную неопределенности U_C вычисляют по формуле:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (23)$$

Расширенную неопределенность $U_{0.95}$ при коэффициенте охвата равном 2 определяют, как:

$$U_{0.95} = 2U_C \quad (24)$$

Результат измерений коэффициента трения $f_{тр}$ записывают в виде:

$$f_{тр} = f \pm U_{0.95} \quad (25)$$

Пример расчета погрешностей представлен в Приложении В.

Выводы по главе 4

1. В результате модернизации имеющихся на ООО «Вириал» установок создан комплекс испытательного оборудования для проведения трибологических испытаний, позволяющий оценивать характеристики углеграфитовых композиционных материалов и твердосплавных композиций при высоких скоростях или высоких нагрузках.

2. В результате замены схемы испытаний «диск-палец» на схему «диск-колодка» и разработки нового узла крепления образцов достигнута скорость испытания 125 м/с.

3. На основе разработанной методики проведения трибологических испытаний на высокоскоростном стенде ВТ1М в технологический процесс производства изделий из изотропного пиролитического углерода включена операция контроля трибологических свойств в условиях сухого трения при скоростях до 125 м/с (Приложение Г).

4. Обоснован метод оценки коэффициента трения между формовочной массой и поверхностью деталей экструдера по величине усилия при экструзии и виду диаграммы «нагрузка – перемещение массы», на основе чего предложен принцип определения оптимального сочетания содержания пластификатора и температуры, обеспечивающее получение бездефектных, недеформирующихся заготовок, пригодных для дальнейших технологических операций.

5. Разработана конструкция экструзионной головки, на которую получен патент RU 221444 U «Устройство для формования методом экструзии стержневых заготовок с внутренними винтовыми каналами».

Глава 5. Трибологические свойства углеграфитовых композиционных материалов

5.1 Изотропный пиролитический углерод

На рисунке 33 приведен пример бездефектной микроструктуры изотропного пиролитического углерода плотностью $1,92 \text{ г/см}^3$.

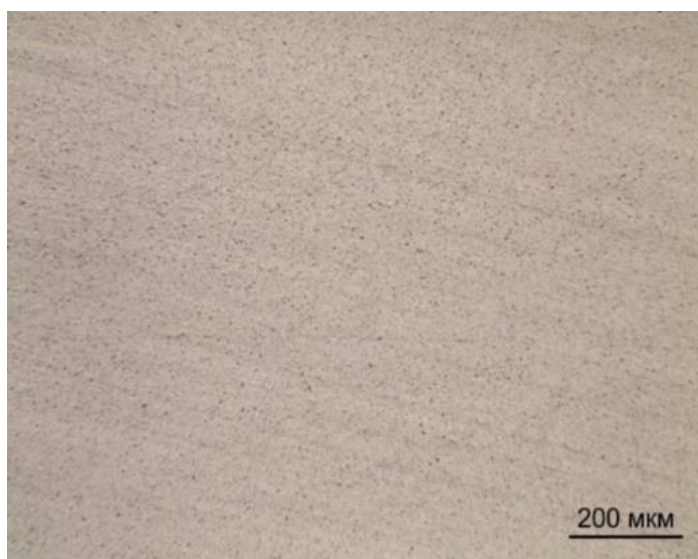
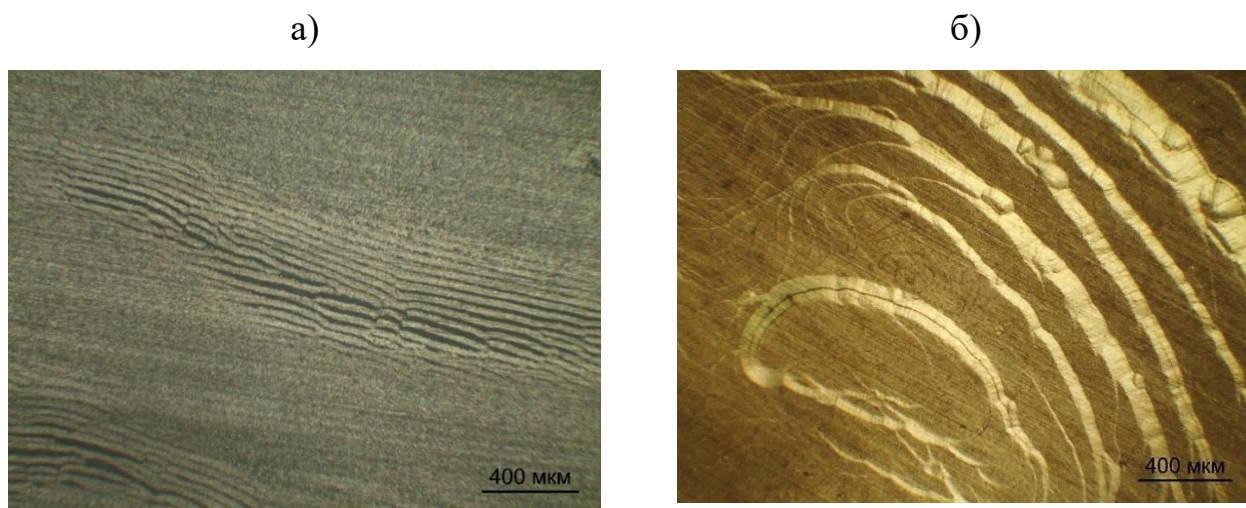


Рисунок 33 – Бездефектная микроструктура изотропного пиролитического углерода плотностью $1,92 \text{ г/см}^3$

В процессе получения пиролитического углерода могут возникать такие дефекты микроструктуры ИПУ, как сажистые прослойки (рисунок 34а) и включения анизотропного пиролитического углерода (рисунок 34б). Практика показывает, что присутствие в ИПУ макрогетерогенных прослоек оказывает отрицательное влияние на свойства материала [33–35].



а) сажистые прослойки; б) включения анизотропного пиролитического углерода

Рисунок 34 – Дефекты в микроструктуре изотропного пиролитического углерода

Для исследования свойств отобрали бездефектные образцы ИПУ, которые были разделены по плотности $(1,84 \pm 0,02) \text{ г/см}^3$, $(1,92 \pm 0,03) \text{ г/см}^3$, $(2,04 \pm 0,02) \text{ г/см}^3$ и $(2,11 \pm 0,02) \text{ г/см}^3$.

На полученных дифрактограммах ИПУ (Приложение Д) присутствует выраженный основной пик (002), а также характерное для турбостратных материалов «затухание» пика (10), что говорит об отсутствии строгой ориентации графитовых нанослоев относительно гексагональной оси. Примесных фаз в образцах не обнаружено.

Пример дифрактограммы изотропного пиролитического углерода представлен на рисунке 35.

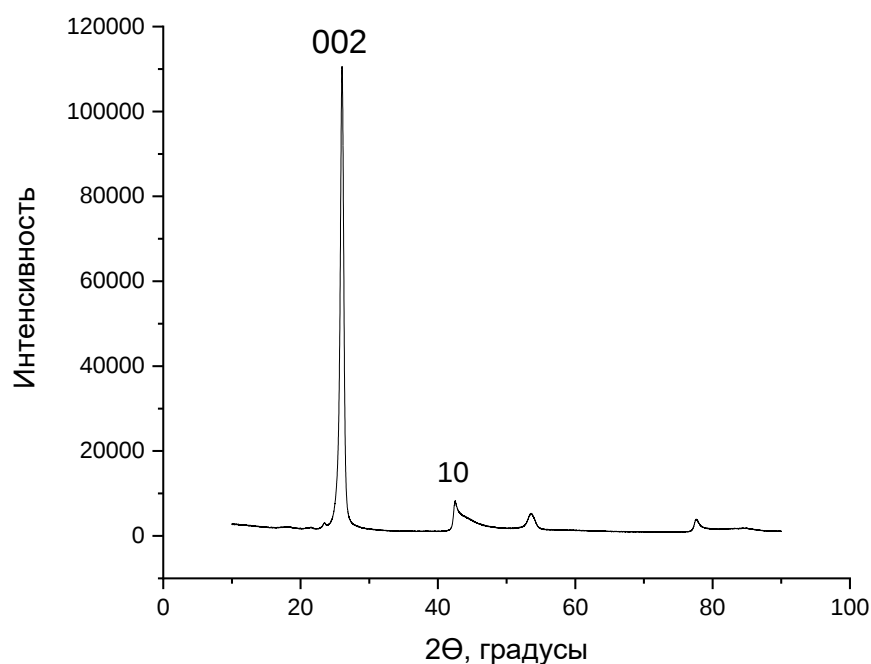


Рисунок 35 – Пример дифрактограммы изотропного пиролизического углерода

В качестве метода выявления структурных особенностей, степени упорядоченности и однородности углеродных материалов широко используется спектроскопия комбинационного рассеяния монохроматического излучения (рамановская спектроскопия) [56, 57, 66–70].

В спектрах комбинационного рассеяния (КР спектры) углеродных материалов присутствуют две характеристичные полосы: при $\sim 1560\text{ см}^{-1}$, обозначаемая как G (graphite), полоса монокристаллического графита, и при $\sim 1360\text{ см}^{-1}$, обозначается D (disorder) [66–70]. Для совершенной кристаллической решетки графита линия D теоретически запрещена (рисунок 36), и может проявляться в спектре при появлении различных дефектных участков в кристаллической структуре графита [66–70]. При этом интенсивность вышеуказанной линии пропорциональна концентрации дефектов кристаллической структуры графита.

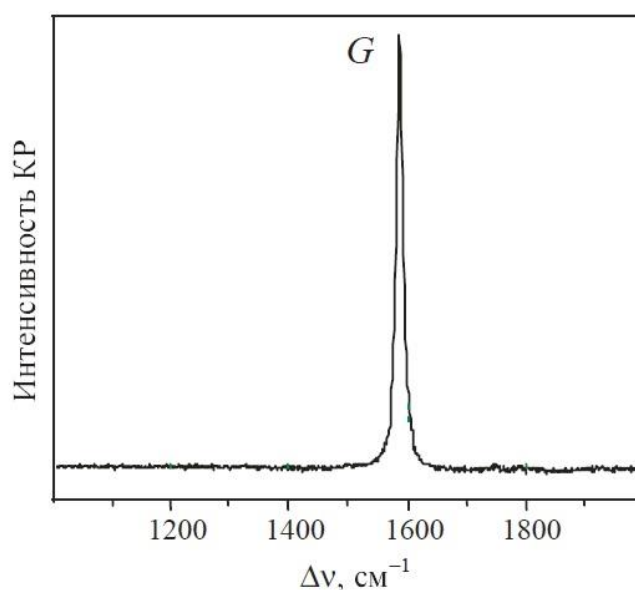
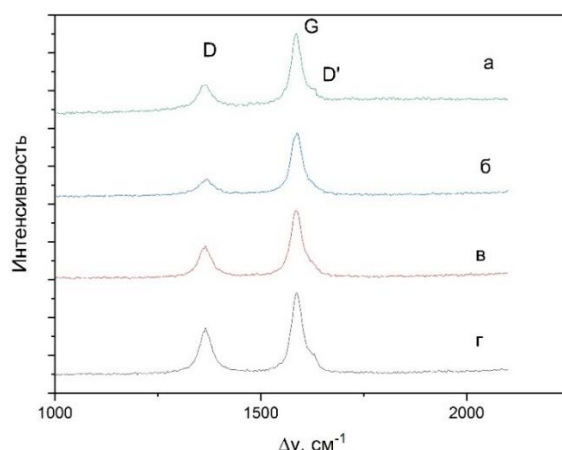


Рисунок 36 – Спектр комбинационного рассеяния
монокристаллического графита [67]

Авторы работ [56, 57, 66–70] предлагают судить о степени дефектности структуры углеродных материалов по величине отношения интенсивностей полос D и G и показывают, что чем величина $I(D)/I(G)$ больше, тем выше количество дефектных и разупорядоченных участков структуры графита.

Помимо полос D и G в спектрах комбинационного рассеяния дефектного графита может присутствовать пик D', характеризующийся волновым числом $\sim 1620 \text{ см}^{-1}$, который зачастую накладывается на линию G. Отношение интенсивностей $I(D)/I(D')$ позволяет судить о природе дефектов, присутствующих в различных углеродных структурах. Например, для графена значение отношения $I(D)/I(D') \approx 10,5$, что говорит о присутствии вакансий в его структуре, а величина отношения $I(D)/I(D') \approx 1,3$ свидетельствует о наличии sp^3 -гибридных атомов углерода [70]. Авторы работы [70] указывают на то, что в структуре графена sp^3 -гибридизованные атомы углерода находятся в виде наноразмерных кластеров.

На рисунке 37 представлены спектры комбинационного рассеяния исследуемых образцов. На рассматриваемых спектрах присутствуют выраженные пики D, G и D'.



Плотность а) 2,11 г/см³; б) 2,04 г/см³; в) 1,92 г/см³; г) 1,84 г/см³

Рисунок 37 – Спектры комбинационного рассеяния изотропного пиролитического углерода различной плотности

Из таблицы 4 видно, что расположение характеристических линий рамановских спектров исследованных образцов в пределах погрешности, не зависят от плотности изотропного пиролитического углерода. При этом величина отношения интенсивностей $I(D)/I(G)$ снижается при увеличении плотности образцов, что свидетельствует о снижении степени дефектности материала по мере роста его плотности.

На всех представленных КР-спектрах имеет место суперпозиция линий D' и G. Величины отношения $I(D)/I(D')$ для представленных образцов лежат в пределах от 1,05 до 1,36, что позволяет сделать предположение о присутствии в структуре ИПУ нанокластеров sp^3 -гибридизованных атомов углерода [34, 71–73].

Таблица 4 – Характеристика КР-спектров

Плотность, г/см ³	$\Delta\nu$ (D), см ⁻¹	$\Delta\nu$ (G), см ⁻¹	$\Delta\nu$ (D'), см ⁻¹	$I(D)/I(G)$	$I(D)/I(D')$
1,84	1365	1587	1626	0,745	1,358
1,92	1365	1584	1626	0,710	1,251
2,04	1368	1585	1627	0,607	1,004
2,11	1365	1587	1629	0,633	1,050

$\Delta\nu$ – Сдвиг комбинационного рассеяния, см⁻¹

В таблице 5 приведены размеры областей когерентного рассеяния l_a , рассчитанные по уравнениям 6 и 7. Параметры l_a , полученные различными методами, незначительно различаются между собой и показывают одинаковую тенденцию к увеличению с ростом плотности изотропного пиролитического углерода.

Таблица 5 – Размеры областей когерентного рассеяния образцов ИПУ

Плотность, г/см ³	l_a , *, нм	l_a , **, нм
1,84	9,8	7,9
1,92	10,3	8,9
2,04	12,2	10,3
2,11	11,5	9,4

* – Расчет по соотношению 6

** – Расчет по соотношению 7

Трибологические характеристики образцов изотропного пиролитического углерода оценивали при скорости вращения контртела 125 м/с и нагрузке на образец 25 Н.

Усредненные по 10 опытам в каждой группе образцов результаты трибологических испытаний приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты трибологических испытаний

Плотность, г/см ³	I(D)/I(G)	$f_{тр}$	J_m , мг/с · 10 ⁻⁴
1,84	0,745	0,19 ± 0,03	156 ± 11
1,92	0,710	0,18 ± 0,02	94 ± 23
2,04	0,607	0,20 ± 0,02	51 ± 7
2,11	0,633	0,16 ± 0,02	31 ± 9

Как видно из таблицы 6, в условиях высокоскоростного трения в контакте со сталью ХВГ коэффициент трения изотропного пиролитического углерода различной плотности, в пределах погрешности, одинаков. Скорость изнашивания, напротив, показывает сильную зависимость от плотности и степени совершенства структуры материала (рисунок 38).

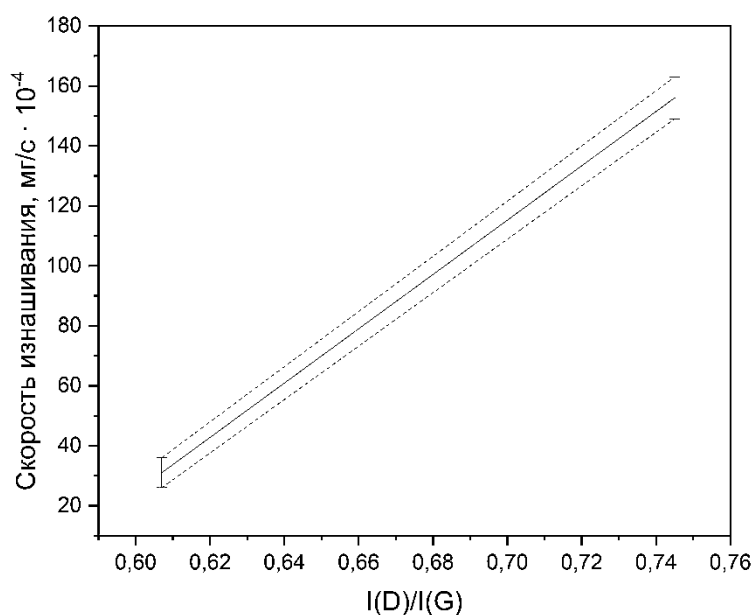


Рисунок 38 – Зависимость скорости изнашивания от степени совершенства структуры изотропного пиролитического углерода

По результатам статистического анализа [65] данных таблицы 6 были получены уравнения линейной регрессии 26 и 27 с коэффициентами детерминации R^2 0,95 и 0,86 соответственно:

$$J_m = 976 - 452\gamma \quad (26)$$

$$J_m = 804 \cdot I(D)/I(G) - 460 \quad (27)$$

где γ – плотность, г/см³

J_m – скорость изнашивания, мг/с · 10⁻⁴.

Экстраполяция уравнений 26 и 27 к нулевой величине скорости изнашивания изотропного пиролитического углерода в контакте со сталью ХВГ дает значение показателя степени совершенства кристаллической структуры ИПУ $I(D)/I(G) \approx$

0,572 при плотности материала $\approx 2,16 \text{ г/см}^3$. Расчетные величины близки к параметрам, свойственным образцу с плотностью $2,11 \text{ г/см}^3$ (таблица 6), что говорит о состоянии структуры исследуемого материала с указанной плотностью, близком к оптимальному.

На рисунке 39 представлена поверхность износа изотропного пиролитического углерода с плотностью $2,11 \text{ г/см}^3$. Трещин, локальных выкрашиваний и царапин не наблюдается. Судя по виду поверхности трения, изнашивание ИПУ идет послойно по механизму усталостного износа [74].

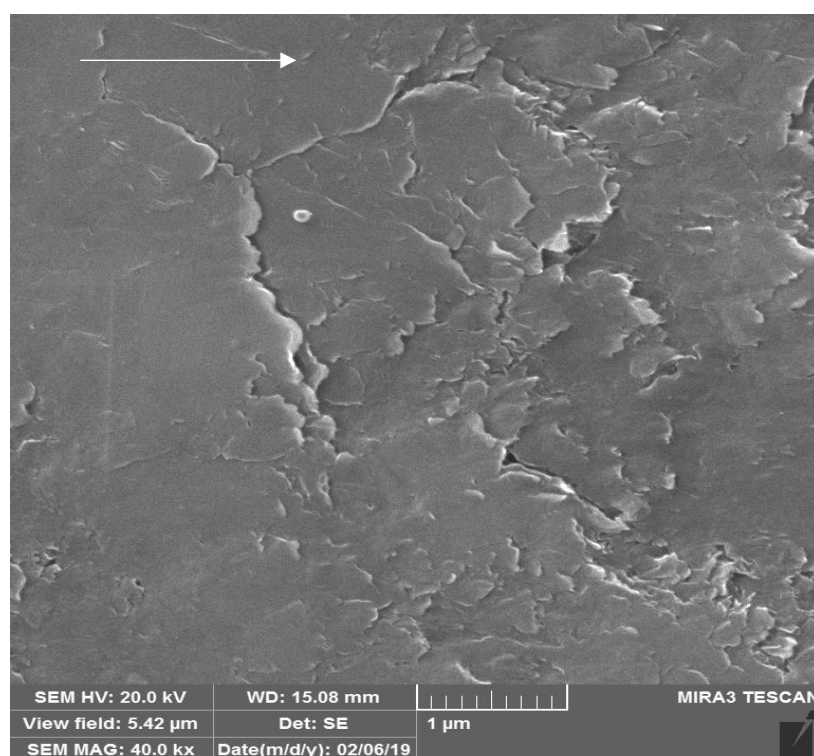


Рисунок 39 – Дорожка износа ИПУ $\gamma = 2,11 \text{ г/см}^3$

Общепринято [1–6, 75–77], что износостойкость материала напрямую связана с его твердостью. Данная зависимость обычно применяется в контексте трения в присутствии абразивных частиц: изнашивание происходит только тогда, когда твердость абразива выше твердости материала. Твердость контртела из стали ХВГ значительно превышает твердость ИПУ, поэтому данная зависимость предположительно должна прослеживаться и в нашем случае.

На рисунке 40 показан отпечаток пирамиды Виккерса на поверхности образца изотропного пиролитического углерода. Видно, что отпечаток правильной формы, без сколов и трещин.

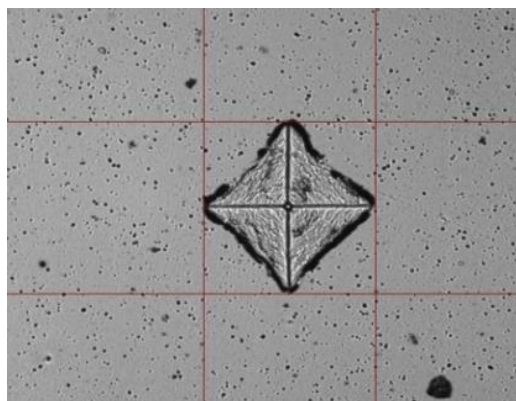


Рисунок 40 – Пример отпечатка пирамиды Виккерса на поверхности ИПУ

График зависимости твердости от плотности изотропного пиролитического углерода представлен на рисунке 41.

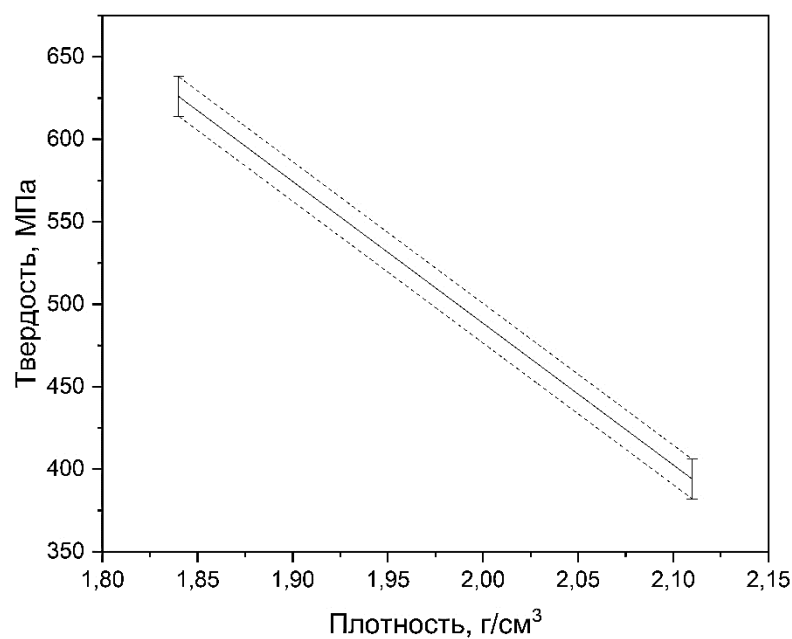


Рисунок 41 – Зависимость твердости от плотности ИПУ

В результате статистического анализа [65] данных рисунка 41 и таблицы 6 были получены следующие уравнения линейной регрессии:

$$HV1 = 2301 - 908\gamma \quad (28)$$

$$HV1 = 1683 \cdot I(D)/I(G) - 628 \quad (29)$$

$$I(D)/I(G) = 1,65 - 0,49\gamma \quad (30)$$

где γ – плотность, г/см³

HV1 – твердость по Виккерсу при нагрузке 1 кгс, МПа;

Коэффициенты детерминации R^2 уравнений регрессии 28, 29 и 30 имеют значения 0,95, 0,94 и 0,84 соответственно. Столь высокие значения коэффициентов детерминации позволяют с достаточной степенью адекватности оценивать показатели твердости, степень совершенства структуры ИПУ, зная плотность материала.

Как видно из графика на рисунке 42 и уравнения 29, твердость находится в антибатной зависимости от плотности изотропного пиролитического углерода. Твердость ИПУ тем больше, чем выше концентрация дефектов.

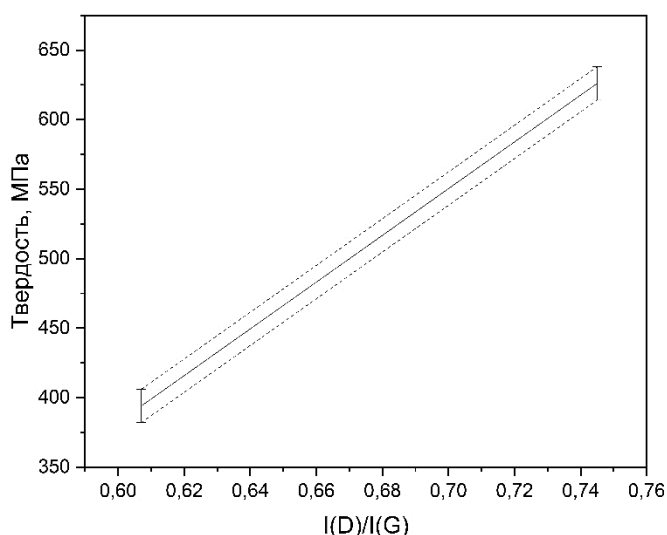


Рисунок 42 – Зависимость твердости от степени совершенства ИПУ

Уменьшение твердости ИПУ при повышении степени совершенства структуры и плотности материала можно объяснить особенностями индентационного метода определения твердости. При измерении твердости материал в зоне воздействия индентора подвергается микропластической деформации, заключающейся в смещении базисных плоскостей кристаллической решетки относительно друг друга. Для углеродных материалов слоистого строения, включая ИПУ, характерна sp^2 -гибридизация атомных орбиталей, т.е. нанокластеры sp^3 -гибридизированных атомов углерода, локализованных вне монослоя, можно рассматривать как дефекты структуры, затрудняющие микропластическую деформацию, что приводит к повышению измеряемых показателей твердости материала [33, 34, 78]. Аналогичные предположения были сделаны в работах [33, 34] на основе результатов анализа рентгеновских дифрактограмм.

С ростом плотности растет размер области когерентного рассеяния изотропного пиролитического углерода, поэтому количество и вклад кластеров sp^3 -гибридных атомов углерода в значение твердости уменьшается.

На износостойкость изотропного пиролитического углерода данный эффект влияния не оказывает, напротив с уменьшением твердости и количества дефектов в структуре износостойкость ИПУ увеличивается. По всей видимости, дефектность сфероидальных образований и углеродных слоев, составляющих их, в низкоплотном материале способствует более легкому их разрушению по сравнению с высокоплотным материалом. Поэтому вклад твердости в износостойкость изотропного пиролитического углерода оказывается несущественным.

5.2 Антифрикционный графит АТГ-С

Антифрикционный графит АТГ-С предназначен для работы в уплотнениях газотурбинных двигателей. Графит АТГ-С изготавливается на основе сланцевого кокса марки КС с дальнейшей пропиткой ультрафосфатом состава $K_2O \cdot 2MnO \cdot 6P_2O_5$ для достижения требуемой газопроницаемости.

Трибологические испытания проводили при скорости вращения контртела 125 м/с и нагрузке на образец 25 Н. В ходе проведения трибологических испытаний антифрикционного графита наблюдали постепенное повышение коэффициента трения с 0,17 на первой минуте испытания до стабилизации на значении 0,3, начиная с третьей минуты испытания. Результаты представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Свойства антифрикционного графита АТГ-С

Плотность, г/см ³	$f_{тр}^*$	J_m , мг/с · 10 ⁻⁴
1,96 ± 0,03	0,3 ± 0,03	206 ± 27

*– начиная с третьей минуты испытания.

Ввиду неоднородности микроструктуры АТГ-С интегральная оценка его твердости по методу Виккерса затруднительна, поэтому было принято решение провести наноиндентирование отдельных зерен [79].

В процессе наноиндентирования было выявлено, что кроме зерен графита, зерен калий-марганцевого ультрафосфата, различающихся по внешнему виду и твердости, микроструктура АТГ-С содержит не заявленные производителем более твердые включения, предположительно оксида марганца. Результаты наноиндентирования представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты наноиндентирования

Микротвердость компонент микроструктуры, ГПа		
Графит	Калий-марганцевый ультрафосфат	Предположительно оксид марганца
$0,60 \pm 0,05$	$0,23 \pm 0,06$	$3,4 \pm 0,5$

На рисунке 43 представлен характерный вид дорожки износа антифрикционного графита АТГ-С.

У антифрикционного графита АТГ-С слои разориентированы, что, вероятно, затрудняет его приработку, так как на поверхности трения имеются слои, находящиеся под разными углами к плоскости трения. Слои, перпендикулярные к плоскости трения, «задираются», что приводит к локальному перегреву и неоднородному износу (рисунок 43). Судя по виду поверхности трения имеет место смешанный тип износа, наряду с усталостным механизмом действует и абразивный механизм [74]. Возможным источником абразивных частиц могут служить структурные неоднородности материала АТГ-С с резко отличающейся твердостью в его микроструктуре.

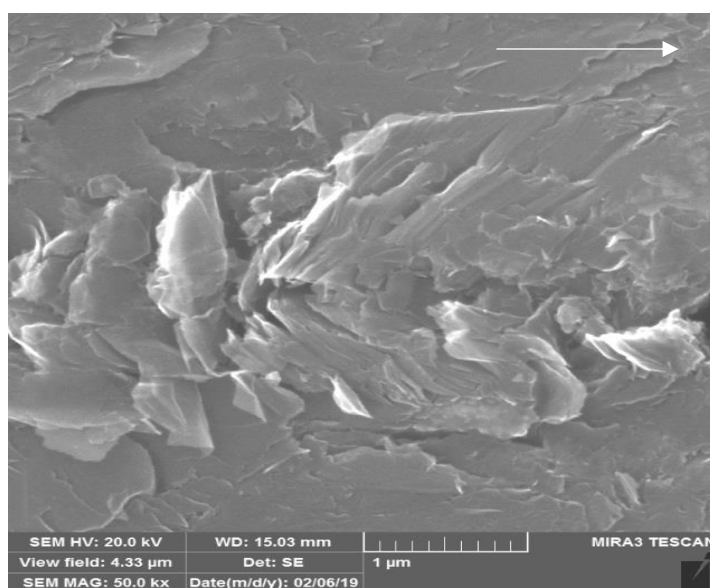


Рисунок 43 – Дорожка износа АТГ-С, стрелка указывает направление движения

Выводы по главе 5

1. Впервые получены трибохарактеристики изотропного пиролитического углерода (ИПУ) с плотностью от 1,84 до 2,11 г/см³ при скоростях трения 125 м/с. Показано, что сопротивляемость износу изотропного пиролитического углерода увеличивается с ростом плотности и степени совершенства кристаллической структуры материала. Коэффициент трения от плотности ИПУ, в пределах погрешности не зависит.

2. На основе анализа полученных в работе данных рентгеновской спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния монохроматического излучения (спектров Рамана) изотропного пиролитического углерода высказано предположение о наличии в кристаллической решетке ИПУ дефектов в виде нанокластеров sp^3 -гибридизированных атомов углерода.

3. Получены регрессионные зависимости, с высокой степенью корреляции связывающие показатели степени совершенства структуры ИПУ, его твердости и скорости изнашивания в узлах трения с плотностью материала, что позволяет с достаточной степенью адекватности оценивать показатели твердости, степень совершенства структуры ИПУ, зная плотность материала.

4. Снижение твердости изотропного пиролитического углерода, определяемой методом индентирования, по мере роста его плотности может быть объяснено снижением концентрации дефектов в кристаллической структуре ИПУ.

5. Для получения изотропного пиролитического углерода с повышенной износостойкостью необходимо стремиться к достижению плотности материала не менее 2,1 г/см³.

6. Сравнительное исследование трибологических свойств ИПУ и антифрикционного графита АТГ-С при одинаковых скоростях трения показало, что изотропный пиролитический углерод имеет в 1,5 раза более низкий коэффициент трения и до 6,5 раз более высокую сопротивляемость износу, чем АТГ-С.

Глава 6. Антифрикционные композиционные твердосплавные материалы для эксплуатации в условиях трения при высоких нагрузках

В качестве материалов, работающих при высоких нагрузках в условиях воздействия агрессивных и абразивосодержащих сред, применяют твердые сплавы, имеющие высокую сопротивляемость износу, коррозии, а также стабильно низкий коэффициент трения при жидкостном трении [80]. Однако при всех плюсах традиционных твердосплавных материалов подшипники скольжения на их основе имеют низкую работоспособность, и, следовательно, минимальный ресурс в условиях отсутствия или недостаточности смазки [40, 42]. При этом происходит накопление повреждений, изнашивание и изменение геометрии поверхностей трения, что приводит к функциональному отказу узла трения и всего агрегата.

6.1 Влияние добавки графита на трибологические показатели твердого сплава ВН20

В насосном оборудовании, подшипники которого смазываются перекачиваемой средой, требуемая подача смазки обеспечивается только после выхода насоса на номинальную частоту вращения. При пуске и остановке оборудования подшипники кратковременно испытывают недостаток смазки. Для снижения негативных последствий работы в условиях сухого или полусухого трения используют добавки, играющие роль твердых смазок [81, 82].

Данные добавки, в частности графит, улучшают трибологические свойства материала, однако снижают прочие физико-механические свойства твердого сплава, такие как прочность, твердость и др. [83]. Для нахождения оптимального баланса между вышеуказанными свойствами необходимо подбирать состав материала так, чтобы добавка оказывала существенное влияние на трибоповедение материала, но при этом падение прочности и твердости не было бы значимым.

В работе были исследованы физико-механические свойства композиций твердого сплава WC-Ni с добавками малозольного графита ГМЗ 2, 4 и 6 мас. % и контрольных образцов без добавки. Физико-механические свойства полученных композиций представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Физико-механические свойства композиций

Количество графитовой добавки, мас. %	Плотность, г/см ³	$\sigma_{изг.}$, МПа	HV30, ГПа
0	$13,71 \pm 0,01$	2670 ± 110	$8,8 \pm 0,5$
2	$12,30 \pm 0,02$	1800 ± 90	$6,2 \pm 0,8$
4	$11,36 \pm 0,03$	1250 ± 105	$4,3 \pm 0,7$
6	$9,11 \pm 0,08$	410 ± 90	$1,1 \pm 0,4$

В ходе экспериментов было выявлено снижение прочности в 6 раз и в 8 раз падение твердости композиции на основе WC-Ni при добавлении 6 мас. % графита. Столь низкие значения прочности и твердости для высоконагруженных узлов трения, работающих в присутствии абразивных сред неприемлемы, поэтому от дальнейшего изучения составов с содержанием графита более 4 мас. % было решено отказаться. В работе были использованы образцы с содержанием графита 2 и 4 мас. %.

Усредненные показатели свойств, исследованных в работе образцов представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Свойства исследуемых твердосплавных образцов

Вид графитовой добавки	Количество графитовой добавки, мас. %	Плотность, г/см ³	Б _{изг.} , МПа	Пористость, об. %
Без добавки	0	13,71 ± 0,02	2670 ± 110	0,02
ГМЗ	2	12,30 ± 0,03	1820 ± 90	0,04
	4	11,36 ± 0,02	1330 ± 100	0,04
ТРГ	2	12,27 ± 0,01	1790 ± 125	0,04
	4	11,24 ± 0,02	1180 ± 90	0,04
ГСМ-2	2	12,18 ± 0,02	1790 ± 75	0,02
	4	11,29 ± 0,03	1250 ± 105	0,02

Примеры микроструктур, полученных образцов приведены на рисунках 44–46.



Рисунок 44 – Микроструктура контрольного образца твердого сплава BN20, увеличение 200[×]

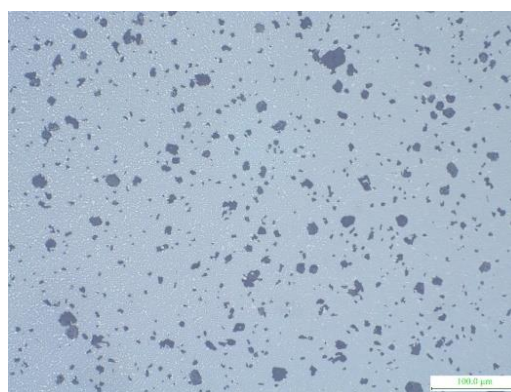


Рисунок 45 – Микроструктура образца с графитовой добавкой, содержание свободного углерода 2 мас. %, увеличение 200[×]

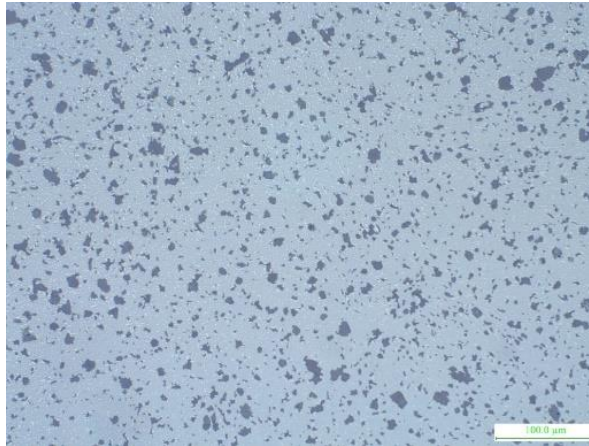


Рисунок 46 – Микроструктура образца с графитовой добавкой, содержание свободного углерода 4 мас. %, увеличение 200[×]

Для трибологических испытаний использовали образцы в виде колец, с наружным диаметром 40 мм, внутренним диаметром 29 мм и высотой 7 мм.

На рисунке 47 представлены графики зависимости момента трения от нагрузки на контрольную пару трения (без добавки графита) и на пары трения с добавками графита при наличии смазки. Обнаружена некоторая критическая нагрузка, при достижении которой наблюдается резкое увеличение момента трения, связанное с прихватом трущихся поверхностей (см. график для ВН20). Для образцов с добавками графита критическая нагрузка на пару трения в ходе трибологических испытаний не была достигнута.

Графики зависимостей (рисунок 47) имеют линейный характер, причем величина момента трения для образцов с добавками графитов ГМЗ и ГСМ-2 слабо уменьшается по мере возрастания нагрузки, а момент трения у пары без добавок в докритической области и с добавкой графита ТРГ от нагрузки не зависит. Полученные результаты согласуются с данными [84–86].

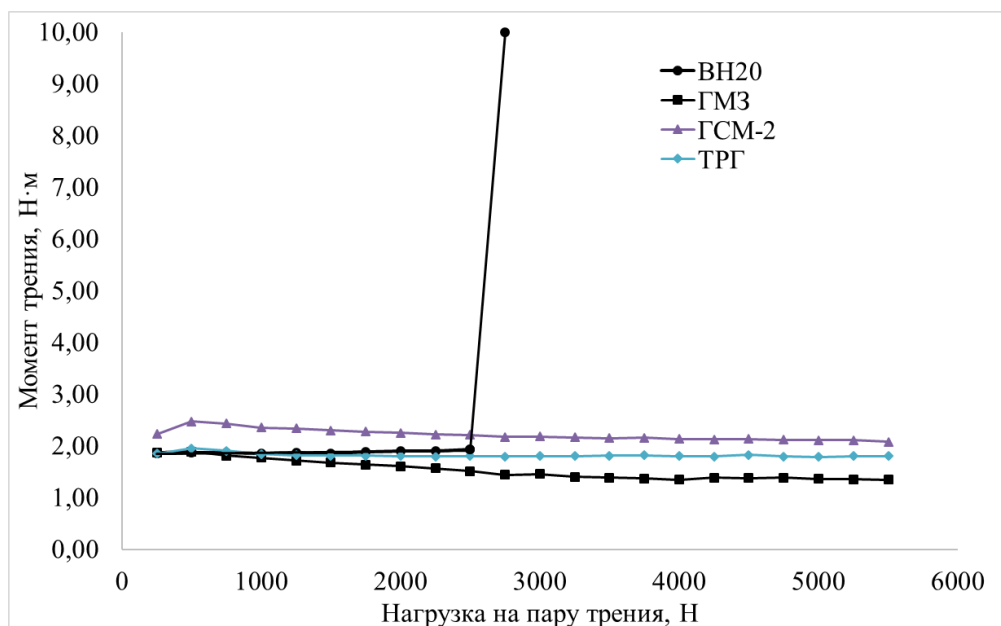


Рисунок 47 – Зависимости момента трения твердого сплава от нагрузки на пару трения

Добавка графита к никельсодержащему твердому сплаву не оказывает существенного влияния на величину и стабильность коэффициента трения (таблица 11). Однако введение графита в состав твердого сплава значительно увеличило несущую способность пары трения в присутствии смазки.

Таблица 11 – Результаты трибологических испытаний

Вид добавки	Зольность добавки, мас. %	Результаты испытания образцов			
		в воде		в режиме сухого трения	
		$f_{\text{тр пары}}$	$\sigma_{\text{тр, МПа}}$	$f_{\text{тр пары}}^*$	$\tau, \text{с}^{**}$
Без добавки	-	$0,01 \pm 0,004^*$	$5,0 \pm 1,0$	$0,02 \pm 0,007$	10 ± 5
ГМЗ	0,03	$0,01 \pm 0,005$	>13	$0,02 \pm 0,006$	80 ± 5
ТРГ	0,2	$0,01 \pm 0,004$	>13	$0,02 \pm 0,007$	70 ± 5
ГСМ-2	0,5	$0,01 \pm 0,005$	>13	$0,02 \pm 0,007$	65 ± 5

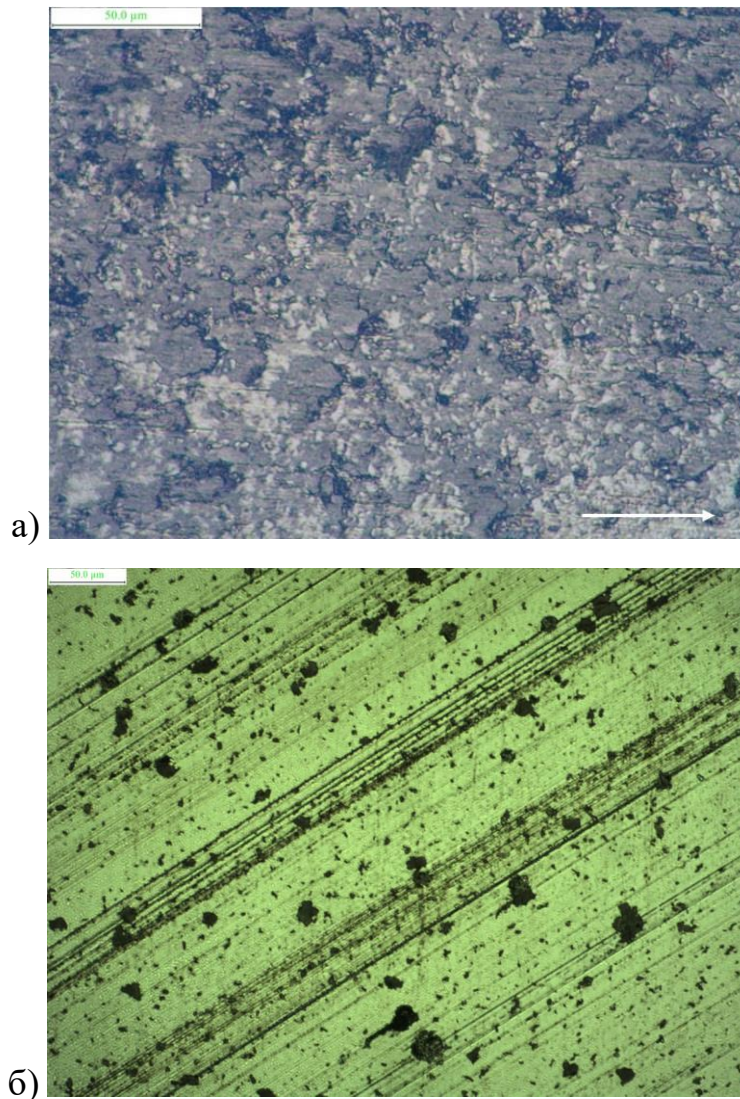
* – До наступления разрушения.

** – Усредненные значения времени до потери работоспособности пары трения.

Испытания в режиме сухого трения показали, что коэффициент трения всех пар не зависит ни от присутствия добавки графита в твердом сплаве, ни от вида графита. Вместе с тем, твердый сплав ВН20 без добавки графита в режиме сухого трения практически неработоспособен, тогда как введение графита до восьми раз увеличивает продолжительность периода сохранения работоспособности пары трения.

Наблюдается тенденция к увеличению времени до потери работоспособности по мере снижения зольности графита. Аналогичная тенденция прослеживается при рассмотрении влияния вида добавки на величину момента трения.

На микрофотографии (рисунок 48а) видно, что добавка графита распределена по поверхности трения с выраженным ориентированием по направлению вращения. На рисунке 48б показана микрофотография поверхности трения после испытаний в присутствии воды. Графитовая добавка находится в виде отдельных включений в структуре образца, и распределения графита по поверхности трения не наблюдается. Следовательно, при наличии смазки графитовая добавка не участвует в процессе трения напрямую, так как при выкрашивании частички графита удаляются из зоны трения смазочной средой (водой). В условиях сухого трения добавка графита распределяется по поверхности трения тонким слоем и выступает в качестве твердой смазки [87–89], значительно увеличивая время работы пары трения.



а – поверхность после испытания в режиме сухого трения (стрелкой указано направление вращения); б – следы износа после испытания в воде

Рисунок 48 – Микрофотографии образцов ВН20 с добавкой ГСМ-2

Выводы по 6 главе

1. Введение добавки малозольных графитов в структуру никельсодержащего твердого сплава ВН20 более чем в 2 раза увеличило несущую способность пары трения в присутствии водной смазки.

2. В условиях сухого трения графит распределяется по поверхности трения тонким слоем и выступает в качестве твердой смазки, до восьми раз увеличивая продолжительность периода сохранения работоспособности пары трения.

3. Выявлена тенденция к увеличению времени до потери работоспособности по мере снижения зольности графита.

4. Показано, что для получения изделий на основе твердых сплавов типа ВН с повышенной работоспособностью в условиях сухого трения при нагрузках свыше 250 Н необходимо использовать добавки графита с зольностью не более 0,2 мас. %.

Заключение

1. С использованием модернизированных стендов получены трибологические характеристики изотропного пиролитического углерода (ИПУ), композиций твердого сплава ВН20 с добавками графита в экстремальных условиях трения и определено, что:

- для получения изделий с повышенной износостойкостью при скоростях сухого трения свыше 70 м/с необходимо, чтобы заготовка изотропного пиролитического углерода имела плотность не менее 2,1 г/см³;

- для получения изделий на основе твердых сплавов типа ВН с повышенной работоспособностью в условиях сухого трения при нагрузках свыше 250 Н необходимо использовать добавки графита с зольностью не более 0,2 мас. %.

2. Разработана, апробирована и внедрена в технологический процесс производства изделий методика трибологических испытаний при скоростях до 125 м/с и нагрузках до 60 Н.

3. На основе результатов анализа данных спектроскопии комбинационного рассеяния монохроматического излучения (спектров Рамана) высказано предположение о природе дефектов в кристаллической структуре изотропного пиролитического углерода в виде нанокластеров sp^3 -гибридизированных атомов углерода.

Получены регрессионные зависимости, с высокой степенью корреляции связывающие показатели степени совершенства структуры ИПУ, его твердости и скорости изнашивания в узлах трения с плотностью материала.

4. Показано, что при добавлении до 4 мас. % малозольного графита до восьми раз увеличивается продолжительность периода сохранения работоспособности пары трения в условиях сухого трения и в 2 раза вырастает несущая способность пары трения в присутствии водной смазки.

5. Предложен метод оценки степени трибологического воздействия абразивных пластичных масс на формующее оборудование по величине усилия при

экструзии, позволяющий определять оптимальное сочетание содержания пластификатора и температуры, обеспечивающее получение бездефектных, недеформирующихся заготовок, пригодных для дальнейших технологических операций.

6. С целью обеспечения эффективной эксплуатации длинномерного режущего инструмента в условиях глубокого сверления разработана конструкция экструзионной головки, защищенная патентом на полезную модель RU 221444 U «Устройство для формования методом экструзии стержневых заготовок с внутренними винтовыми каналами».

Список литературы

1. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов / А. В. Чичинадзе [и др.] 2-е изд., испр. и доп.; под ред. А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 2001. – 664с. – ISBN 5-217-03053-4.
2. Полюшкин, Н. Г. Основы теории трения, износа и смазки: Учебное пособие / Н. Г. Полюшкин – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2013. – 192 с.
3. Загайко, С.А. Основы теории трения и изнашивания / С. А. Загайко – Уфа : УГАТУ, 2011. – 102 с. – ISBN 978-5-4221-0178-8
4. Хопин, П. Н. Трибология: учебник для вузов / П. Н. Хопин, С. В. Шишкин – Москва : Изд-во Юрайт – 2024. – 236 с. – ISBN 978-5-534-14021-7
5. Пенкин, Н. С. Основы трибологии и триботехники: учебное пособие для вузов / Н.С. Пенкин, А. Н. Пенкин, В. М. Сербин – 2-е изд., стереотипное. – Москва : Машиностроение – 2014. – 208 с. – ISBN 978-5-94275-583-6
6. Попов, В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений / В. Л. Попов – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с. – ISBN 978-5-9221-1443-1
7. Харина, В. К. Методика исследований подшипников и подшипниковых узлов механизации крыла / В. К. Харина // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2008. – № 127. – С. 167-172.
8. Справочник по конструкционным материалам / Б. Н. Арзамасов, Т. В. Соловьева, С. А. Герасимов [и др.]; Под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 660 с. – ISBN 5-7038-2651-9
9. Машины для испытаний на трение [Электронный ресурс]. – URL: <https://tochpribor-nw.ru/production/friction-testing/> (дата обращения 27.10.2023)

10. Машина сухого трения И-47 [Электронный ресурс]. – URL: <http://tpmarket.ru/mashiny-ispytatelnye/mashiny-dlya-ispytaniy-materialov-na-trenie-iznos-ustalost/mashina-suhogo-treniya-i-47-135> (дата обращения 27.10.2023)
11. ММ-W1A Испытательная машина для испытаний на трение и износ [Электронный ресурс]. – URL: <https://nerkon.ru/catalog/ispytatelnie-mashiny-i-pressy/mashinyi-dlya-ispytaniya-na-trenie-i-iznos/mashina-dlya-ispytaniy.html> (дата обращения 27.10.2023)
12. Трибометр T2000 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.melytec.ru/production/hardometer/nanotechnology/tribometry/t2000/> (дата обращения 27.10.2023)
13. Трибометр TRB [Электронный ресурс]. – URL: <https://paar.ru/products/laboratorное-oborudovanie/tribometry/tribometr-shtift-disk-trb/> (дата обращения 27.10.2023)
14. Универсальный трибометр RTEC [Электронный ресурс]. – URL: <https://theseuslab.by/p62034592-universalnyj-tribometr-rtec.html> (дата обращения 27.10.2023)
15. Паровай, Е. Ф. Актуальные проблемы надежности узлов трения газотурбинных двигателей / Е. Ф. Паровай, Д. И. Ибатуллин // Вестник СГАУ. – 2015. – Т. 14. - № 3-2. – С. 375-383.
16. Овчар, З. Н. Совершенствование конструкции торцовых уплотнений нефтеперекачивающих насосов на основе анализа гидромеханических и тепловых процессов / З. Н. Овчар, Ю. К. Машков, Н. А. Прокудина // Трение и износ. – 2006. – Т. 27 – № 2. – С. 185-190.
17. Новиков, А. В. Прогнозирование работоспособности лопаток ТВД с учетом их постэксплуатационного состояния / А. В. Новиков, А. А. Быбин, Р. Р. Невьянцева [и др.] // Газовая промышленность. – 2012. – № 3. – С. 55-58.
18. Лепеш, Г. В. Исследование математической модели процесса высокоскоростного трения и изнашивания / Г. В. Лепеш, А. Г. Лепеш // Техно-технологические проблемы сервиса. – 2015. – № 2 (32). – С. 60-66.

19. Зорин, В. А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники (Обзор) / В. А. Зорин // Конструкции из композиционных материалов. – 2011. – № 4. – С. 44-59.
20. Власенко, А. В. Применения перспективных композиционных материалов для проектов ракетно-космической техники / А. В. Власенко, В. В. Скрябин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 1. – № 12. – С. 71-73.
21. Chowdhury, P. Damage tolerance of carbon-carbon composites in aerospace application / P. Chowdhury, H. Sehitoglu, R. Rateick // Carbon. – 2018. – № 126. – P. 382-393.
22. Гуняев, Г. М. Углерод-углеродные композиционные материалы / Г. М. Гуняев, М. Я. Гофин // Авиационные материалы и технологии. – 2013 – № S1. – С. 62-90.
23. Scarponi, C. Carbon-carbon composites in aerospace engineering / C. Scarponi // Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering. – Woodhead Publishing. – 2016. – P. 385-412.
24. Копылов, А. В. Определение термостойкости углеродных композитов на авиапредприятиях для их безопасного и эффективного применения в теплонапряжённых конструкциях авиационных двигателей нового поколения / А. В. Копылов, Б. В. Зубков // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2014. – № 204. – С. 50-57.
25. Islam, M. S. Grafting carbon nanotubes directly onto carbon fibers for superior mechanical stability: Towards next generation aerospace composites and energy storage applications / M. S. Islam, Y. Deng, L. Tong [et al.] // Carbon. – 2016. – № 96. – P. 701-710.
26. Семенов, А. П. Высокотемпературные твердые смазочные вещества / А. П. Семенов // Трение и износ. – 2007. – Т. 28. – № 5. – С. 525-538.
27. Savage, R. H. Graphite Lubrication / R. H. Savage // J. Appl. Phys. – 1948 (19). – № 1. – P. 1-10

28. Искусственный графит / В. С. Островский, Ю. С. Виргильев, В. И. Костилов, Н. Н. Шипков. – Москва : Металлургия, 1986. – 272 с.

29. Неметаллические композиционные материалы в элементах конструкций и производстве авиационных газотурбинных двигателей / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, С. А. Колесников, Ю. Н. Васильев. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 368 с. – ISBN 978-5-7038-3054-3

30. Ткаченко С. Н. Поверхностное легирование деталей из углерод-углеродистых композиционных материалов для авиационной промышленности с целью повышения жаростойкости / С. Н. Ткаченко // Вестник двигателестроения. – 2014. – № 1. – С. 147-151.

31. Стерин, И. С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки: Учебное пособие для машиностроительных специальностей СПУ / И. С. Стерин. – Санкт-Петербург : Политехника, 2003. – 343 с. – ISBN 5-7325-0636-5

32. Осмаков А. С. Изотропный пироуглерод – материал для контактных уплотнительных систем газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) / А. С. Осмаков, О. В. Авдеев, Л. Н. Кочерга, Е. В. Родин, В. И. Румянцев // Сборник докладов симпозиума в рамках научно-технического конгресса «Международного Форума Двигателестроения». – 2014. – С. 4.

33. Осмаков, А.С. Структура пироуглеродных материалов и ее связь с условиями осаждения: специальность 05.17.01. «Технология неорганических веществ»; 02.00.04 «Физхимия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Осмаков Андрей Сергеевич; ГИПХ. – Ленинград, 1989. – 146 с.

34. Нагорный, В. Г. Конструкционные углеродные материалы / В. Г. Нагорный. – Москва : Металлургия. – 1985. – 68 с.

35. Губин, С. П. Графен и родственные наноформы углерода / С. П. Губин, С. В. Ткачев. – 2-е изд. – Москва : Книжный дом «Либроком», 2012. – 104 с. – ISBN 978-5-397-03286-5

36. Перевай, Т.А. Порошковая металлургия: учебное пособие / Т. А. Перевай. – Севастополь : СевГУ, 2024. – 81 с.
37. Хорев, В. А. Трибологические свойства пиролитического углерода в условиях высокоскоростных испытаний / В. А. Хорев, В. И. Румянцев, Г. А. Пономаренко, А. С. Осмаков, В. Н. Фищев // Новые огнеупоры. – 2020. – № 1. – С. 71-75.
38. Кузнецов, А. С. Разработка и исследование композиционного материала для изготовления деталей узлов трения различных машин и механизмов, работающих в условиях ограниченной смазки / А. С. Кузнецов, Ю. А. Пахалин // Вестник Пензенского государственного университета. – 2017. – Т. 2 – № 17. – С. 100-104.
39. Pereira, P. Tribological behaviour of different formulations of WC composites / P. Pereira, L. M. Vilhena, J. Sacramento // Wear. – 2022. – Т. 506. – P. 204415.
40. Bondarenko, V. Advanced technologies of production of cemented carbides and composite materials based on them: conference materials «15th international plansee seminar» (May) / V. Bondarenko, E. Pavlotskaya, L. Martynova, I. Epik [et al]. Reutte – 2001. – P. 189-203.
41. Pereira, P. Influence of Different Binders and Severe Environmental Conditions on the Tribological and Electrochemical Behaviour of WC-Based Composites / P. Pereira, L. M. Vilhena, J. Sacramento, A. M. R. Senos // Lubricants. – 2022. – Vol. 10. – P. 145.
42. Хорев, В. А. Влияние добавок графита на трибологические характеристики никельсодержащих твердых сплавов / В. А. Хорев, С. Ю. Курочкин, В. И. Румянцев, В. Н. Фищев, Г. А. Пономаренко // Новые огнеупоры. – 2023. – № 4. – С. 16-19.
43. Савилов, А. В. Современное состояние производства высокопроизводительного режущего инструмента из порошковых быстрорежущих

сталей и твердых сплавов / А. В. Савилов, Д. С. Никулин, Е. П. Николаева, А. Е. Родыгина // *iPolytech Journal*. – 2013. – № 6 (77). – С. 26-33.

44. Истоцкий, В. В. Научноёмкая технология производства фасонных твердосплавных инструментов с винтовыми зубьями / В. В. Истоцкий, В. Б. Протасьев // *Научноёмкие технологии в машиностроении*. – 2019. – № 5. – С. 24-31.

45. Бобылёв, Э. Э. Повышение стойкости режущего твердосплавного инструмента путем управления состоянием и свойствами его поверхностных слоев с помощью комплексной химико-термической обработки / Э. Э. Бобылёв // *Инженерный журнал: наука и инновации*. – 2020. – № 12 (108). – С. 1-14.

46. Сайдахмедов, Р. Х. Современное состояние производства твердого сплава и причины разрушения буровых инструментов / Р. Х. Сайдахмедов, И. О. Камолова, А. М. Рахматов // *Композиционные материалы*. – 2021. – № 1. – С. 137-140.

47. Oliveira, G. Material Extrusion to Manufacture Carbide-Based Advanced Cutting Tools / G. Oliveira, A. Senos, C. Fernandes [et al.] // *Materials*. – 2023. – Т. 16. – № 21. – P. 6902.

48. Fayyaz, A. Fabrication of cemented tungsten carbide components by micro-powder injection moulding / A. Fayyaz, M., N. Muhamad, A. B. Sulong [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – Т. 214. – № 7. – P. 1436-1444.

49. Lengauer, W. Fabrication and properties of extrusion-based 3D-printed hardmetal and cermet components / W. Lengauer, I. Duretek, M. Furst [et al.] // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2019. – Т. 82. – P. 141-149.

50. Пятов, В. В. Теоретические и технологические основы холодной экструзии порошковых материалов / В. В. Пятов. – Витебск: УО ВГТУ, 2002. – 237 с. – ISBN 985-66-55-47-1

51. Ильющенко, А. Ф. Получение методом инъекционного формования, структура и свойства твердого сплава ВК 10 / А. Ф. Ильющенко, С. Г. Барай, К. В. Мигаль, Е. В. Жук // *Порошковая металлургия*. – 2019. – С. 101-109.

52. Fayyaz, A. Micro-powder injection molding of cemented tungsten carbide: Feedstock preparation and properties / A. Fayyaz, N. Muhamad, A. Bakar [et al.] // *Ceramics International*. – 2006. – Vol. 41. – P. 3605-3612.

53. Панчук, В. Г. Автоматизация исследований естественного износа рабочей поверхности фильеры керамического пресса / В. Г. Панчук, В. А. Мельник, М. В. Мотрук // *Наукові нотатки*. – 2015. – № 51. – С. 134-137.

54. Головин, Ю.И. Наноиндентирование и его возможности / Ю. И. Головин. – Москва : Машиностроение, 2009. – 312 с. – ISBN 978-5-94275-476-1

55. Курдюмов А.В. Об электронографическом дисперсионном анализе графитных материалов с частично трехмерно упорядоченной структурой / А. В. Курдюмов, А. Н. Пилянкевич // *Журнал структурной химии*. – 1968. – Т. 9 – № 5. – С. 858-862.

56. Zickler, G. A. A reconsideration of the relationship between the crystallite size La of carbons determined by X-ray diffraction and Raman spectroscopy / G. A. Zickler, B. M. Smarsly, N. Gierlinger [et al.] // *Carbon*. – 2006. – Vol. 44. – № 15. – P. 3239-3246.

57. Maslova O. A. Determination of crystallite size in polished graphitized carbon by Raman spectroscopy / O. A. Maslova, M. R. Ammar, G. Guimbretiere [et al.] // *Physical review B*. – 2012. – Т. 86. – № 13. – P. 134205.

58. Хорев, В. А. Отработка методики трибологических испытаний антифрикционных карбидокремниевых материалов / В. А. Хорев, Г. А. Пономаренко // *Материалы VII научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки-2017» – Россия, Санкт-Петербург, 5-7 апреля 2017 – Сборник тезисов*, С. 58.

59. Хорев, В. А. Влияние конструкции элементов подшипников скольжения из реакционноспечного карбида кремния на их работоспособность / В. А. Хорев, Г. А. Пономаренко // *Материалы конференции «Традиции и инновации», посвященной 189-й годовщине образования Санкт-Петербургского*

технологического института (технического университета) – Россия, Санкт-Петербург, 30 ноября – 1 декабря 2017 – Сборник тезисов, С. 112.

60. Дадаханов, Н. К. Методика проведения исследований на приборах для изучения процесса изнашивания / Н. К. Дадаханов, М. Хасанов // *Universum: технические науки*. – 2021. – № 4-2 (85). – С. 69-73.

61. Хорев, В. А. Износ узлов трения из реакционноспеченного карбида кремния при работе в водной среде / В. А. Хорев // *Материалы XIV конференции «Традиции и инновации», посвященной 195-й годовщине образования Санкт-Петербургского технологического института (технического университета) – Россия, Санкт-Петербург, 20-23 ноября 2023 – Сборник тезисов*, С. 74.

62. Хорев, В. А. Отработка методики трибологических испытаний антифрикционных материалов при высокоскоростных режимах трения / В. А. Хорев, Г. А. Пономаренко // *Материалы VII научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки-2018» – Россия, Санкт-Петербург, 2-5 апреля 2018 – Сборник тезисов*, С. 50.

63. Хорев, В. А. Методологические проблемы высокоскоростных трибологических испытаний / В. А. Хорев // *Материалы XI научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки-2021» – Россия, Санкт-Петербург, 7-9 апреля 2021 – Сборник тезисов*, С. 160.

64. Хорев, В. А. Трибологические характеристики антифрикционных углеграфитовых материалов / В. А. Хорев, Г. А. Пономаренко // *Материалы IX научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки-2019» – Россия, Санкт-Петербург, 1-3 апреля 2019 – Сборник тезисов*, С. 71.

65. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов. / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк. – 1985. – 327 с.

66. Силаев, В. И. Опыт исследований природных углеродистых веществ и некоторых их синтетических аналогов / В. И. Силаев, В. П. Лютоев, В. А.

Петровский, А. Ф. Хазов // Мінералогічний журнал. – 2013. – Т. 3. – № 3. – С. 33-47.

67. Букалов, С. С. Исследование строения графитов и некоторых других sp^2 углеродных материалов методами микро-спектроскопии КР и рентгеновской дифрактометрии / С. С. Букалов, Л. А. Михалицын, Я. В. Зубавичус [и др.] // Российский химический журнал. – 2006. – Т. 50. – № 1. – С. 83-91.

68. Casiraghi, C. Bonding in hydrogenated diamond-like carbon by Raman spectroscopy / C. Casiraghi, F. Piazza, A. C. Ferrari [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2005. – V. 14. – P. 1098-1102.

69. Pimenta, M. A. Studying disorder in graphite-based systems by Raman spectroscopy / M. A. Pimenta, G. Dresselhaus, M. S. Dresselhaus [et al.] // Physical chemistry chemical physics. – 2007. – Т. 9. – № 11. – P. 1276-1290.

70. Eckmann, A. Probing the Nature of Defects in Graphene by Raman Spectroscopy / A. Eckmann, A. Felten, A. Mishchenko [et al.] // Nano Letters. – 2012 – V.12 – № 8 – P. 3925-3930.

71. Хорев, В.А. Взаимосвязь твердости и скорости изнашивания со степенью дефектности структуры изотропного пиролитического углерода / В. А. Хорев, Н. В. Захарова, В. Н. Фищев // Международная конференция огнеупорщиков и металлургов – Россия, Москва, 18-19 мая 2023 – Новые огнеупоры. – 2023. – № 5. – С. 44.

72. Хорев В. А. Влияние степени дефектности структуры изотропного пиролитического углерода на его твердость и скорость изнашивания / В. А. Хорев, В. И. Румянцев, А. С. Осмаков [и др.] // Новые огнеупоры. – 2024. – № 3. – С. 31-36

73. Кристаллизация алмаза / Д. В. Федосеев, Б. В. Дерягин, И. Г. Варшавская, А. С. Тянь-Шанская. – Москва : Наука, 1984. – 136 с.

74. Хорев, В. А. Влияние микроструктуры антифрикционных углеграфитовых материалов на степень повреждаемости трущихся поверхностей в режимах высокоскоростного сухого трения / В. А. Хорев // Материалы XVII молодежной научной конференции, школы молодых ученых, посвященной 100-

летию со дня рождения академика РАН М. М. Шульца – Россия, Санкт-Петербург, 5-6 декабря 2019 – Сборник тезисов, С. 112-114.

75. Ткаченко, С.Н. Поверхностное легирование деталей из углерод-углеродистых композиционных материалов для авиационной промышленности с целью повышения жаростойкости / С. Н. Ткаченко // Вестник двигателестроения. – 2014. – № 1. – С. 147-151.

76. Дроздов, Ю. Н. Обобщенные характеристики для определения ресурса по износу технической керамики / Ю. Н. Дроздов, В. А. Надеин, Т. М. Савинова // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. – № 1. – С. 22-28.

77. Kim S. S. A new parameter for assessment of ceramic wear / S. S. Kim, S. W. Kim, S. M. Hsu // Wear. – 1994. – Т. 179. – № 1-2. – Р. 69-73.

78. Хорев, В. А. Зависимость твердости изотропного пиролитического углерода от плотности / В. А. Хорев // Материалы XIV научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки-2024. Творчество молодежи – будущему России» – Россия, Санкт-Петербург, 22-24 апреля 2024 – Сборник тезисов, С. 70.

79. Хорев, В. А. Инструментальное индентирование антифрикционных углеграфитовых материалов / В. А. Хорев // Материалы XII научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки-2022» – Россия, Санкт-Петербург, 20-22 апреля 2022 – Сборник тезисов, С. 55.

80. Хорев, В. А. Влияние вида углеродной компоненты на работоспособность твердосплавных подшипников WC-Ni-C / В. А. Хорев, С. Ю. Курочкин, В. И. Румянцев, В. Н. Фищев // Международная конференция огнеупорщиков и металлургов – Россия, Москва, 19-20 мая 2022 г – Новые огнеупоры. – 2022. – № 5. – С. 30-31.

81. Нуралин, Б. Н. Применение твёрдого антифрикционного композитного материала в конструкции подшипников скольжения / Б. Н. Нуралин, С. Н. Куанышев, К. М. Куанышев, М. К. Куанышев // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2016. – № 6 (62). – С. 61-64.

82. Ахметзянов, Р. Р. Разработка состава и технологии изготовления подшипников скольжения на основе серографитовых композиционных материалов / Р. Р. Ахметзянов, М. Х. Фасхутдинов, Э. Р. Галимов, Н. Я. Галимова // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – 2016. – Т. 72. – № 3. – С. 78-81.

83. Хорев В. А. Влияние углеродсодержащей добавки на прочностные характеристики системы WC-Ni-C / В. А. Хорев, Г. А. Пономаренко // Материалы XI научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки-2021» – Россия, Санкт-Петербург, 7-9 апреля 2021 – Сборник тезисов, С. 128.

84. Bonny, K. Friction and wear characteristics of WC–Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact / K. Bonny, P. De Baets, Y. Perez [et al.] // Wear. – 2010. – Vol. 268, № 11/12. – P. 1504-1517.

85. Фальковский, В. А. Твердые сплавы / В. А. Фальковский, Л. И. Клячко. – Москва : Руда и металлы, 2005. – 413 с. – ISBN 5-8216-0067-8

86. Ахметзянов, Р. Р. Эффективность применения композиционных материалов в трибосопряжениях / Р. Р. Ахметзянов, М. Х. Фасхутдинов, Э. Р. Галимов [и др.] // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – 2017. – Т. 73. – № 2. – С. 92-96.

87. Носков, А. С. Исследование технологии нанесения на поверхность дорожки качения подшипников твердой графитовой смазки методом ультразвуковой поверхностной обработки / А. С. Носков, А. В. Королев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 3. – № 2 (58). – С. 107-109.

88. Ахметзянов Р. Р. Твердые смазочные материалы и их применение / Р. Р. Ахметзянов, Х. С. Фасхутдинов, Т. Н. Вагизов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 13. – С. 306-307.

89. Хорев, В. А. Влияние добавки графита на трибологические характеристики твердосплавных подшипников в условиях сухого трения / В. А.

Хорев // Материалы XIII научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки-2023» – Россия, Санкт-Петербург, 11-13 апреля 2023 – Сборник тезисов, С. 62

Приложение А. Краткие сведения о трибологии

Введение

Обеспечение триботехнических требований и показателей определяется разработкой, нормированием и соблюдением комплекса взаимосвязанных правил, норм и требований к изделиям при их проектировании, изготовлении и эксплуатации с целью повышения их износостойкости и надежности, сбережения дефицитных материалов, экономии энергии, повышения уровня безопасности изделий, а также улучшения других триботехнических свойств и характеристик.

1. Основные понятия, термины и определения трибологии

Термины и определения, относящиеся к процессам трения, изнашивания и смазки, регламентированы ГОСТ 27674-88 и ГОСТ 30858-2003 [1, 2].

К основным понятиям относятся:

Трение (фрикционное взаимодействие) – процесс взаимодействия твердых тел при их относительном движении (смещении) либо при движении тела в газообразной или жидкой среде.

Внешнее (простое) трение – явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии [3].

Внутреннее трение – явление сопротивления относительному перемещению частей одного и того же тела [3].

Сила трения – это сила, возникающая в месте соприкосновения тел и препятствующая их относительному движению (рис.А.1).

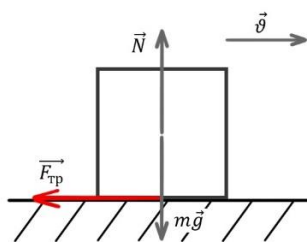


Рисунок А.1 – Схема действия силы трения

Сила трения движения – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленной к границе раздела между этими телами [2].

Коэффициентом трения (μ) называют коэффициент пропорциональности, связывающий силу трения ($F_{\text{тр}}$), которая равна по величине внешней силе и направлена в противоположную сторону, и силу нормального давления (N) тела на опору.

$$F_{\text{тр}} = \mu N, \quad (\text{А. 1})$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения;

N – сила нормального давления тела на опору;

μ – коэффициент трения.

Различают:

- сухое трение – трение двух тел при отсутствии на поверхности трения смазочного материала любого вида;
- трение со смазкой – трение двух тел при наличии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида;
- трение скольжения – трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по значению и (или) направлению;
- трение качения – трение движения, при котором скорости соприкасающихся тел одинаковы по значению и направлению, по крайней мере в одной точке зоны контакта [1].

Приработка – процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

Схватывание при трении – явление местного соединения двух твердых тел, происходящих вследствие действия молекулярных сил при трении.

Совместимость при трении – свойство материалов, сопряженных поверхностей предотвращать схватывание поверхностей при трении.

Прилегаемость при трении – свойство материала при трении увеличивать поверхность трения за счет упругой и пластической деформации поверхностного слоя.

Фрикционные материалы – материалы, предназначенные или используемые для работы в узлах трения, передающих или рассеивающих кинетическую энергию движущихся масс (в тормозах, муфтах, сцеплениях, демпферах, вариаторах и др.) [4].

Антифрикционные материалы – материалы, используемые для работы в несущих или направляющих узлах трения (подшипники скольжения, роторные и торцовые уплотнения). Принято считать, что коэффициент трения антифрикционных материалов при наличии смазки составляет от 0,001 до 0,05, а без неё от 0,004 до 0,3. Антифрикционные материалы применяют как в виде объемных элементов, так и в виде покрытий [4].

Пара трения – система из двух элементов, соприкасающиеся поверхности которых в процессе работы перемещаются относительно друг друга [3]. Пара трения может состоять как из одноименных материалов, например, опорные подшипники насосов для перекачки пластовой жидкости, где и опорный неподвижный элемент и движущийся состоят из карбида кремния, так и из разных материалов, например, пара трения сталь-баббит.

Контртело – элемент пары трения, работающий совместно с материалом пары трения [2].

В процессе работы материал испытывает разнообразные воздействия, как физико-механической, так и химической природы. В результате этих воздействий возникают поверхностные и объемные изменения в материале, которые могут привести изделие в непригодное для эксплуатации состояние. Поэтому для определения работоспособности и долговечности материала используют понятия износа и изнашивания.

Износ – результат изнашивания, определяемый в соответствующих единицах.

Допустимый износ – значение износа, при котором изделие сохраняет работоспособность.

Предельный износ – износ, при котором дальнейшая эксплуатация детали или узла становится невозможной вследствие невыполнения деталью заданных функций, недопустимого снижения экономичности или надежности механизма.

Местный износ – износ на отдельном участке поверхности трения.

Задир – повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении движения. Задир является одним из видов катастрофического износа [2].

Изнашивание – процесс отделения материала с поверхности твердого тела и/или увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении массы, размеров и формы тела.

Износостойкость – способность материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения.

Скорость изнашивания (J_m , J_v , J_l) – является отношением величины износа по массе, по объему, по размеру соответственно ко времени изнашивания:

$$J_m = \frac{\Delta m}{t}, \quad (\text{A.2})$$

где Δm – изменение массы детали в результате изнашивания, кг (г, мг);

t – время, ч

$$J_v = \frac{\Delta V}{t}, \quad (\text{A.3})$$

где ΔV – изменение объема детали, $\text{м}^3/\text{мм}^3/\text{мкм}^3$;

$$J_l = \frac{\Delta l}{t}, \quad (\text{A.4})$$

где Δl – изменение геометрического параметра, м (мм, мкм).

Интенсивность изнашивания (I_m , I_v , I_l) – является отношением величины износа к пути трения или объему выполненной работы. Выражается зависимостями, аналогичными формулам А.2, А.3 и А.4.

При определении интенсивности изнашивания машин, имеющих значительное количество узлов трения, часто бывает целесообразно относить износ к показателю общему для всех узлов. Например, для подвижного состава этим показателем может быть пробег в км.

2. Основные виды и модели изнашивания материалов

Прогнозирование трибологических характеристик материалов представляет сложную проблему, т.к. их износ зависит от множества факторов, таких как геометрия контакта, свойств и особенностей микроструктуры материала, шероховатости поверхности, режимов нагружения, вида смазочного материала и других. Явления, связанные с тепловым ударом вследствие неравномерного нагрева или охлаждения материалов, могут вызвать развитие имеющихся в них трещин. Напряжения, возникающие при весьма быстром изменении температуры, могут быть значительными и приводить к хрупкому разрушению и термической усталости. По этой причине разработка теоретических моделей, учитывающих механизм изнашивания материала, и нахождение компонент хрупкого контактного разрушения сопряжены со значительными трудностями [5].

2.1 Абразивное изнашивание

Абразивное изнашивание – механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия на него более твердых тел или частиц.

В роли абразивных частиц могут выступать:

- выступы микро- и макронеровности более твердого тела;
- продукты износа твердых тел;
- продукты разложения некоторых присадок к смазочным материалам;
- частицы, попавшие в зону трения из загрязненного воздуха, неочищенных смазочных материалов и топлива;
- частицы, шаржированные в поверхностный слой в результате финишной механической обработки детали;
- частицы, вовлекаемые в поток жидкостью или газом.

Трение в присутствии абразивных частиц характеризуется нестационарностью контактов твердых частиц с изнашивающейся поверхностью, широким спектром и высокой концентрацией напряжений, а также физико-химической активацией поверхностей твердых тел. Процессы абразивного изнашивания зависят от формы и размеров абразивных частиц, возможности их закрепления в материале (шаржирование поверхности), соотношения твердости материала и абразива. Разрушение поверхности может быть результатом однократного взаимодействия абразива (срезание) или многоактного процесса деформирования поверхности абразивными частицами [4].

Для определения характера разрушения материала, в первом приближении, можно использовать коэффициент соотношения твердостей K_T :

$$K_T = \frac{H_M}{H_a}, \quad (A.5)$$

где H_M – твердость материала;

H_a – твердость абразива.

При значении $K_T < 0,5$ возможно прямое разрушение материала, при $K_T > 0,7$ прямое одноактное разрушение материала маловероятно и процесс переходит в многоцикловый. Однако, при взаимодействии массы зерен абразива с поверхностью изнашивание материалов носит в основном многоцикловый характер даже в тяжелых условиях работы [4].

Для абразивного изнашивания были предложены следующие модели:

1) Эванс [6]:

$$V = \frac{\alpha \sum_{i=1}^n N_i l_i}{K_{1c}^{0,75} H^{0,5}}, \quad (\text{A.6})$$

где V – объем износа;

α – коэффициент пропорциональности;

N_i – нагрузка на i -ю абразивную частицу;

l_i – длина пути i -й абразивной частицы;

K_{1c} – трещиностойкость материала;

H – твердость материала.

2) Аджай, Лудема [7]:

$$I_v = \alpha \frac{N^{1,125}}{K_{1c}^{0,5} H^{0,625}} \left(\frac{E}{H}\right)^{0,8}, \quad (\text{A.7})$$

где I_v – интенсивность изнашивания;

α – коэффициент пропорциональности;

N – нагрузка на пару трения;

K_{1c} – трещиностойкость материала;

H – твердость материала;

E – модуль упругости материала.

Как видно из формул А.6 и А.7 способность пары трения сопротивляться абразивному износу напрямую зависит от твердости материала пары трения. Если пара трения состоит из материалов с резко отличающейся твердостью, частицы более твердого материала могут являться причиной появления абразивных частиц в зоне трения и оказывать дополнительное абразивное воздействие на более мягкий материал.

2.2 Усталостное изнашивание

Усталостное изнашивание – механическое изнашивание материалов в результате многократного деформирования микрообъемов материала. Данный вид

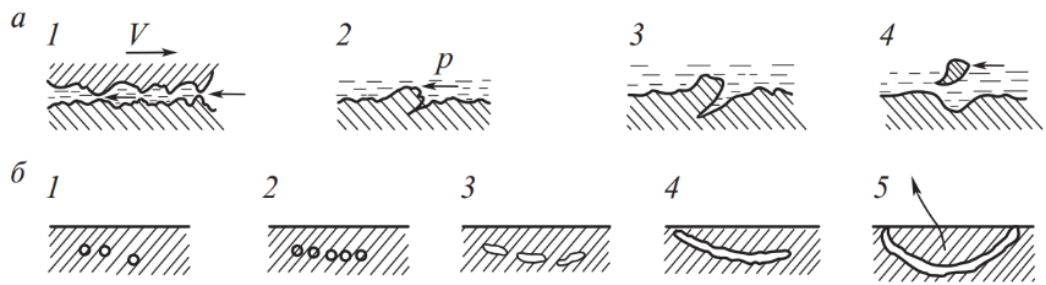
изнашивания характерен для подшипников скольжения, зубчатых передач и других механизмов, находящихся в условиях циклического контактного нагружения, независимо от наличия смазочной среды [8].

Первичные микротрещины при усталостном изнашивании могут образовываться как на поверхности трения, так и в подповерхностном слое. Механизмы появления усталостных микротрещин схематично показаны на рисунке А.2.

Процесс возникновения поверхностных микротрещин проходит через четыре стадии. При вступлении в контакт двух поверхностей в относительном движении сначала на трущейся поверхности образуются усталостные микротрещины. На второй стадии смазочный материал проникает в микротрещины и способствует их расклиниванию (3-я стадия). На четвертой стадии происходит выкрашивание частиц металла, в результате чего на поверхности детали появляются мелкие ямки (питтинг).

Возникновение подповерхностных микротрещин (рисунок А.2б) начинается с зарождения подповерхностных дислокаций. На второй стадии идет процесс накопления дислокаций, далее образуются полости, которые на четвертой стадии сливаются в микротрещины, параллельные поверхности трения. На завершающей пятой стадии при достижении микротрещиной некоторой критической длины отделяется частица износа.

Подповерхностные микротрещины зарождаются, как правило, у деталей с неоднородной структурой материала, а также у деталей, работающих при больших контактных напряжениях.



а) на поверхности,

б) в подповерхностном слое

Рисунок А.2 – Схема усталостного изнашивания поверхности и возникновения первичной микротрещины [8]

Интенсивность усталостного изнашивания материала I описывается следующими соотношениями [8]:

$$I = \frac{\Delta h}{L} = \frac{\Delta V_c}{A_c L} = i \frac{A_r}{A_c}, \quad (\text{А. 8})$$

где Δh – толщина изношенного слоя;

L – путь трения;

ΔV_c – контурный объем изношенного материала;

A_c – контурная площадь поверхности контакта;

A_r – площадь фактического контакта;

i – удельный износ.

Удельный износ определяется по формуле:

$$i = \frac{\Delta V_r}{d \cdot A_r}, \quad (\text{А. 9})$$

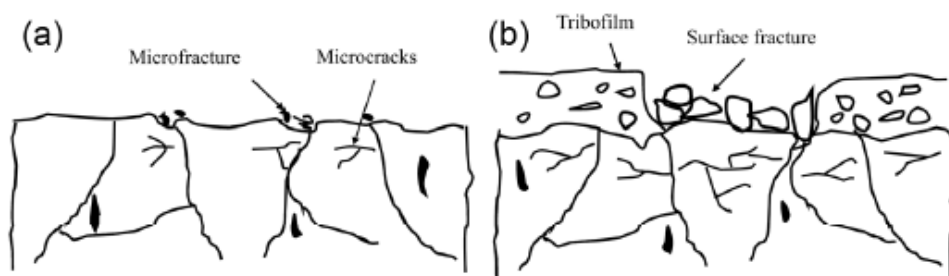
Где ΔV_r – фактический объем изношенного материала;

d – диаметр пятна касания.

2.3 Коррозионно-механическое изнашивание

Большинство узлов трения промышленного оборудования при эксплуатации находятся в контакте с коррозионно-активными средами: кислотами, щелочами, солевыми растворами, почвой и т.д.

Коррозионно-механическое изнашивание сопровождается образованием пленок на поверхности деталей в результате химического взаимодействия материала узла трения со смазочной средой или примесями, содержащимися в смазочной среде, с последующим удалением новообразованных пленок с поверхности трения (рисунок А.3).



а) в мягких условиях работы, усталостный механизм износа;

б) в жестких условиях работы с образованием и последующим удалением трибоплёнок

Рисунок А.3 – Схематичное изображение поверхности трения SiC после работы в масле [9]

Ввиду действия различных факторов в ходе эксплуатации узлов трения, таких как присутствие различных примесей в смазочной среде, постепенное повреждение поверхности трущихся деталей, повышенная температура в пятнах контакта и других, возможна интенсификация взаимодействия поверхностного слоя материала и/или присутствующих в смазке примесей и смазки. Например, при эксплуатации твердых сплавов с кобальтовой связкой при использовании водных смазок происходит образование микрогальванических пар между зернами WC

(катод) и связкой (анод) (рисунок А.4), что вызывает дополнительную коррозию и досрочный выход механизмов из строя.

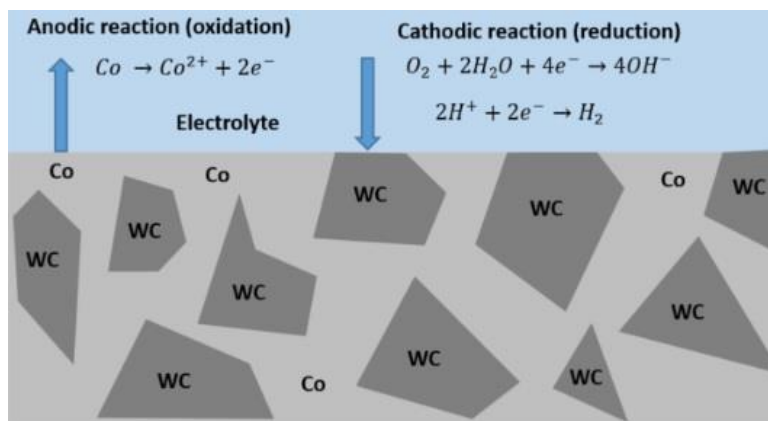


Рисунок А.4 – Схема, представляющая поведение композита WC-Co в растворе электролита, действующего как микрогальваническая пара [10]

Бороться с коррозионными процессами в узлах трения можно правильным подбором совместимости материалов пар трения и смазочных сред. Как показали исследования [10], никель в качестве металла-связки существенно повышает коррозионную и окислительную стойкость твердосплавных деталей.

2.4 Обобщенная модель изнашивания материалов

В исследованиях [6, 7, 11–15] предложены полуэмпирические модели для частных случаев изнашивания, таких как абразивное, изнашивание при качении и т.д.

Однако, предложенные модели изнашивания не учитывают весь комплекс явлений, протекающих на поверхностях взаимодействующих тел, поэтому авторами работ [5, 13] была предложена полуэмпирическая модель для прогнозирования объемной интенсивности изнашивания, с учетом физико-химического взаимодействия истираемого материала со смазкой.

$$I_V = \alpha \Phi_1^a \Phi_2^b \Phi_3^c \Phi_4^d \Phi_5^e \Phi_6^g \quad (\text{A.10})$$

где $\Phi_1 = \mu \cdot p / HV$ – фактор, характеризующий напряженное состояние контакта и безразмерную площадь фактического контакта тел (здесь μ – коэффициент трения; p – нормальное напряжение сжатия; HV – твердость по Виккерсу менее твердого из контактирующих материалов).

$\Phi_2 = E \cdot (R_a)^{0,5} / K_{1c}$ – фактор, характеризующий хрупкость материала, влияние шероховатости поверхности и модуля упругости (здесь E – модуль упругости; R_a – среднее арифметическое отклонение профиля более твердого тела; K_{1c} – трещиностойкость).

$\Phi_3 = d \cdot \sigma_{изг}^2 / K_{1c}^2$ – фактор, характера разрушения, чем он больше, тем ближе разрушение к хрупкому (здесь d – средний размер зерна, $\sigma_{изг}$ – прочность при изгибе).

$\Phi_4 = RT / E_x$ – фактор, характеризующий химическое модифицирование поверхностей трения. Химическое модифицирование сопряженных поверхностей препятствует их схватыванию и интенсивному изнашиванию при тяжелых режимах трения (здесь T – абсолютная температура в контакте; R – универсальная газовая постоянная; E_x – энергия активации разрыва межатомных связей соединений на поверхности).

$\Phi_5 = q \delta_T / (\lambda T_{кр})$ – фактор, характеризующий влияние температурного градиента и теплового пограничного слоя (здесь q – плотность теплового потока; δ_T – толщина теплового пограничного слоя; λ – коэффициент теплопроводности; $T_{кр}$ – критическая температура в зоне контакта).

$\Phi_6 = h / \chi$ – фактор, характеризующий относительную толщину смазочного слоя в контакте (здесь h – толщина смазочного слоя; χ – характерный размер абразивной частицы).

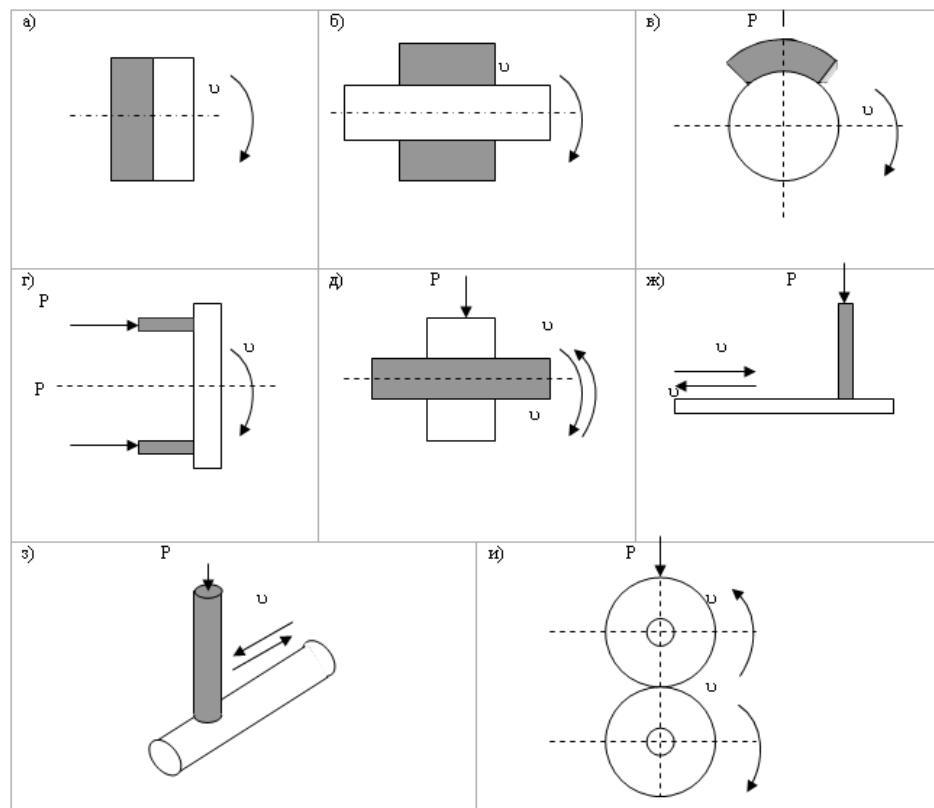
α, a, b, c, d, e, g – коэффициенты, определяемые экспериментально.

Хотя в вышеуказанной полуэмпирической модели учитывается множество факторов, влияющих на поведение узла трения, многие компоненты выражения (10) определяются экспериментально (коэффициент α и показатели степеней в выражении), а, например, расчет температуры в пятне (точке) контакта является

отдельной трудоемкой задачей [14, 16]. Поэтому точно предсказать поведение узла трения без непосредственных испытаний практически невозможно.

3. Основные схемы контакта в узлах трения

Существует множество схем контактирования для имитации различных трибосопряжений, таких как тормоза, муфты, подшипники и другие. Наиболее часто встречающиеся при испытаниях показаны на рисунке А.5. Также встречаются специфичные схемы контактирования, такие как: винт-гайка, поршневое кольцо-цилиндр, зубчатая или червячная пара уплотнения.



- а) – кольцо-кольцо; б) – вал-втулка; в) – ролик-колодка; г) – палец-диск;
 д) – вал-втулка при качении; ж) – палец-плоскость; з) – палец-ролик при качении;
 и) – ролик-ролик

Рисунок А.5 – Схемы контактирования образцов в парах трения [8]

Схемы контакта отличаются друг от друга следующими параметрами:

- геометрией образцов
- способом приложения нагрузки (осевая, радиальная, смешанная)
- схемой движения (вращение одной детали относительно неподвижного контртела, возвратно-поступательное движение, вращение деталей навстречу друг другу и т.д.)

Разнообразие схем контактирования необходимо, во-первых, для моделирования различных видов разрушения поверхности трением, во-вторых, для воспроизведения физико-химических процессов, происходящих в реальных зонах контакта.

4. Виды трибологических испытаний

Различают лабораторные, стендовые и натурные (эксплуатационные) испытания.

Лабораторные испытания проводят при исследовании общих закономерностей процессов трения и изнашивания, стендовые – при исследовании конкретного узла трения, оптимизации его параметров. При лабораторных трибологических испытаниях материалов производится оценка их физико-механических свойств и влияния режимов трения на их фрикционные свойства. Для проведения лабораторных исследований промышленностью выпускаются стандартные установки и машины трения, в современных моделях которых закладываются достаточно большие возможности по варьированию наиболее значимых внешних факторов, проведению испытаний при различных схемах изнашивания и регистрации основных триботехнических характеристик. Часто при проведении исследований в конкретных условиях трения возможностей стандартных машин трения оказывается недостаточно, и возникает необходимость создавать установки, моделирующие определенный исследуемый процесс изнашивания.

При стендовых испытаниях узлов трения оценивается влияние их конструктивных особенностей на триботехнические характеристики узла.

Стендовые испытания проводятся на установках (стендах), состоящих из исследуемого узла трения или его физической модели, созданной с использованием принципов физического моделирования, и устройств, позволяющих варьировать факторы, влияющие на работоспособность узла, и регистрировать его триботехнические характеристики.

Натурные испытания производятся на реальной машине или механизме, и при их проведении оценивается взаимное влияние различных узлов трения машины или механизма на их работоспособность, производится оценка надежности и долговечности его работы [8].

Абсолютно одинаковых деталей и материалов не бывает, даже если детали или исследуемые образцы изготавливаются из одной отливки и по единой технологии. Самые незначительные по площади участки поверхности имеют свои характерные особенности и вступление их в контакт с контртелом носит случайный характер. Поэтому любое испытание следует проводить неоднократно, и для оценки влияния различных факторов на процесс трения и изнашивания руководствоваться средними значениями получаемых данных [8].

Список цитируемой литературы в приложении А

1. ГОСТ 30858-2003. Обеспечение износостойкости изделий. Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Основные положения : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен впервые : дата введения 2006-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 8 с.

2. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения : государственный стандарт союза ССР : издание официальное : взамен ГОСТ 23.002-78 : дата введения 1989-01-01 / Комитет стандартизации и метрологии СССР. – Москва : Издательство стандартов, 1988. – 20 с.

3. Загайко, С.А. Основы теории трения и изнашивания / С. А. Загайко – Уфа: УГАТУ, 2011. – 102 с. – ISBN 978-5-4221-0178-8
4. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов / А. В. Чичинадзе [и др.] 2-е изд., испр. и доп.; под ред. А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 2001. – 664с. - ISBN 5-217-03053-4
5. Дроздов, Ю. Н. Обобщенные характеристики для определения ресурса по износу технической керамики / Ю. Н. Дроздов, В. А. Надеин, Т. М. Савинова // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. – № 1. – С. 22-28.
6. Evans, A. G. Quasi-static solid particle damage in brittle solids—I. Observations analysis and implications / A. G. Evans, T. R. Wilshaw // Acta Metallurgica. – 1976. – Т. 24. – № 10. – P. 939-956.
7. Гаршин, А. П. Керамика для машиностроения / А. П. Гаршин, В. М. Гропянов, Г. П. Зайцев, С. С. Семенов // Москва : Научтехлитиздат. – 2003. – Т. 384. – 384 с.
8. Пенкин, Н. С. Основы трибологии и триботехники: учебное пособие для вузов / Н.С. Пенкин, А. Н. Пенкин, В. М. Сербин – 2-е изд., стереотипное. – Москва : Машиностроение – 2014. – 208 с. – ISBN 978-5-94275-583-6
9. Sharma, S. K. Tribological behavior of silicon carbide ceramics-a review / S. K. Sharma, B. V. Kumar, Y. W. Kim // Journal of the Korean Ceramic Society. – 2016. – Т. 53. – № 6. – P. 581-596.
10. Pereira, P. Influence of Different Binders and Severe Environmental Conditions on the Tribological and Electrochemical Behaviour of WC-Based Composites / P. Pereira, L. M. Vilhena, J. Sacramento, A. M. R. Senos // Lubricants. – 2022. – Vol. 10. – P. 145.
11. Kim, S. S. Wear mechanism of ceramic materials in dry rolling friction / S. S. Kim, K. Kato, K. Hokkirigawg, H. Abe // Trans. of ASME. J. of Tribology. – 1986 (108). – P. 522–526.
12. Kim, S. S. A new parameter for assessment of ceramic wear / S. S. Kim, S. W. Kim, S. M. Hsu // Wear. – 1994. – Т. 179. – № 1-2. – P. 69-73.

13. Hsu, S. M. Wear prediction of ceramics / S. M. Hsu, M. Shen // Wear. – 2004. – Т. 256. – № 9-10. – Р. 867-878.
14. Лепеш, Г. В. Исследование математической модели процесса высокоскоростного трения и изнашивания / Г. В. Лепеш, А. Г. Лепеш // Техно-технологические проблемы сервиса. – 2015. – № 2 (32). – С. 60-66.
15. Ковшов, А. Г. Расчётно-экспериментальная идентификация активационных параметров модели изнашивания поверхностей трения / А. Г. Ковшов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – № 4(2). – С. 341-346.
16. Амосов, А. П. Элементарные теплофизические модели трения / А. П. Амосов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 4(3). – С. 656-662.

Приложение Б. Свидетельство о выдаче патента на полезную модель



Приложение В. Пример расчета погрешности величины коэффициента трения

В таблице представлен результаты расчета погрешностей величины коэффициента трения для «пилообразного» и «прямолинейного» графиков зависимости момента трения от времени. Расчет произведен по формулам 18–25.

Таблица В.1 – Пример расчета погрешности величины коэффициента трения

Коэффициент	Вид графика	
	Пилообразный	Прямолинейный
a	0,000340	0,000055
b	2,60	2,89
R_{cp} , м	0,044	0,044
f	0,0075	0,0021
U_a	0,0006	0,0004
U_b	0,0002	0,0001
U_c	0,0006	0,0004
$U_{0,95}$	0,0013	0,0008
$f_{тр}$	$(7,5 \pm 1,3) \cdot 10^{-3}$	$(2,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$

Коэффициент a прямо пропорционален коэффициенту трения. При нормальном течении процесса испытания (график зависимости момента трения от времени – прямолинейный) величина коэффициента трения, равно как и расширенная неопределенность $U_{0,95}$ измерения коэффициента трения, значительно ниже, чем при получении пилообразного графика.

**Приложение Г. Акт внедрения методики в технологический процесс
производства изделий из изотропного пиролитического углерода**



ВИРИАЛ®
VIRIAL

Генеральный директор
ООО «Вириал»
/Румянцев В.И./
«18» 05 2021

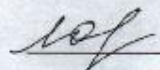


АКТ

о внедрении в технологический процесс производства
изделий из изотропного пиролитического углерода
Методики проведения трибологических испытаний
на высокоскоростном трибостенде BT1M.

Настоящий акт составлен представителями ООО «Вириал»: директором по развитию Кочергой Л.Н., начальником отдела материаловедения Осмаковым А.С. о том, что в 2021 году на предприятии ООО «Вириал» в технологический процесс производства изделий из изотропного пиролитического углерода включена операция контроля трибологических свойств в условиях сухого трения при скоростях до 125 м/с на основе «Методики проведения трибологических испытаний на высокоскоростном трибостенде BT1M», разработанной инженером испытательной лаборатории №1 ООО «Вириал» Хоревым В.А. в рамках выполнения работ «Совершенствование опытной технологии получения радиально-торцевых контактных уплотнений из пирогرافита изотропного, на базе лабораторной установки ООО «Вириал» по договору ОДК/2264/10/2020/643 от 03.11.2020.

Директор по развитию  Л.Н. Кочерга

Начальник отдела материаловедения  А.С. Осмаков



**Приложение Д. Полученные дифрактограммы изотропного
пиролитического углерода**

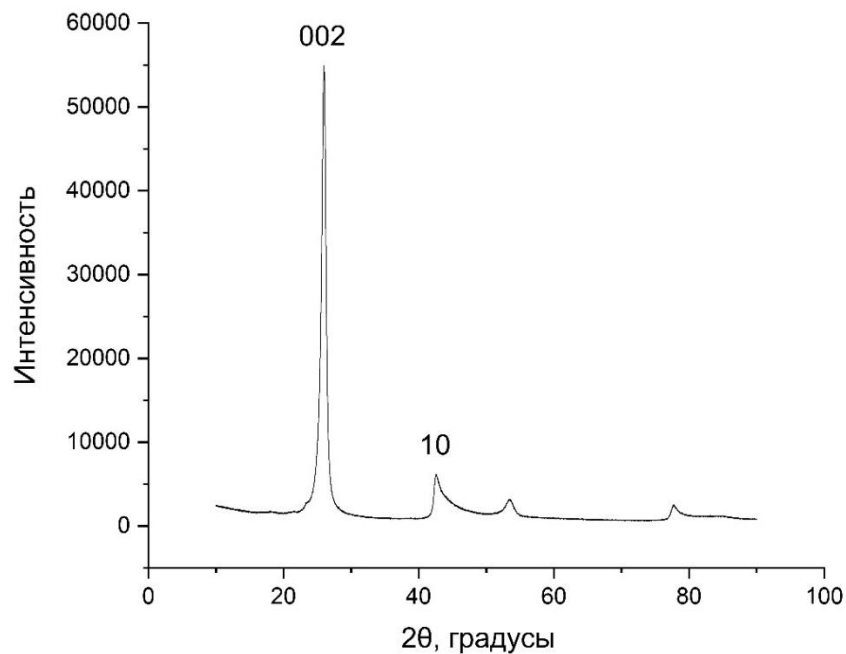


Рисунок Д.1 – Дифрактограмма изотропного пиролитического углерода с плотностью 1,84 г/см³

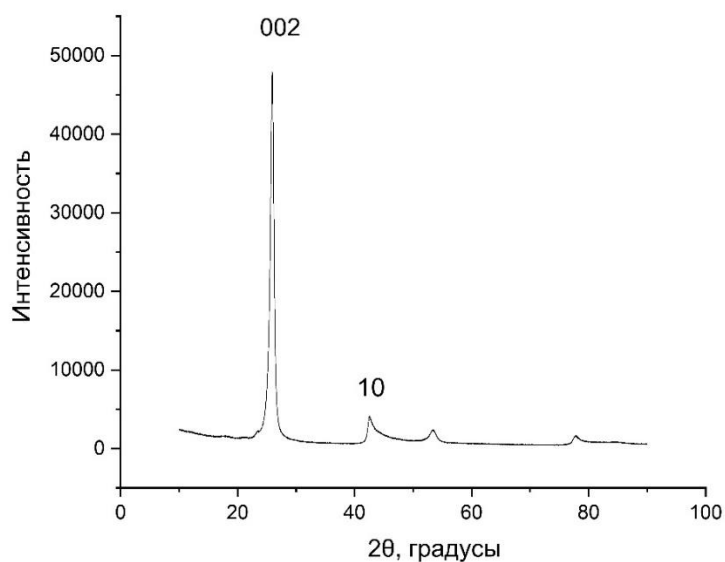


Рисунок Д.2 – Дифрактограмма изотропного пиролитического углерода с плотностью 1,92 г/см³

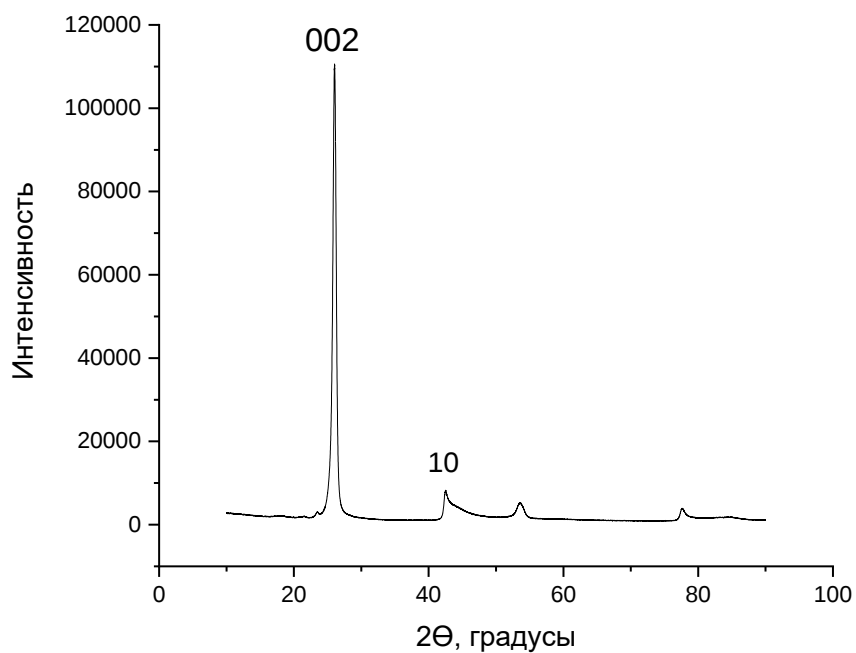


Рисунок Д.3 – Дифрактограмма изотропного пиролизического углерода с плотностью 2,04 г/см³

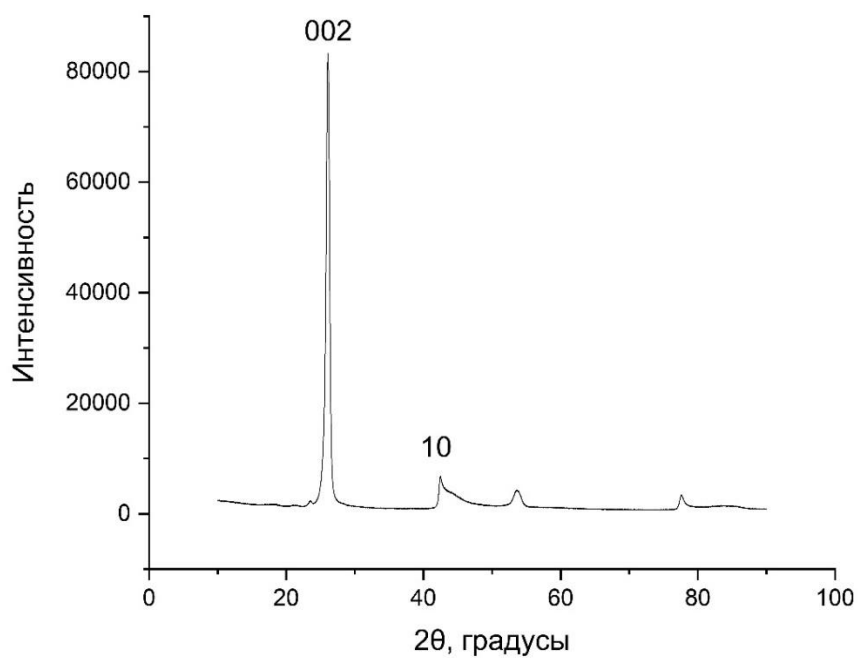


Рисунок Д.4 – Дифрактограмма изотропного пиролизического углерода с плотностью 2,11 г/см³