

На правах рукописи



Хорев Василий Андреевич

АНТИФРИКЦИОННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ
В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ

2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» и в ООО «Вириал» (Санкт-Петербург)

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Фищев Валентин Николаевич

Официальные оппоненты: **Толочко Олег Викторович**, доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор

Быкова Алина Дмитриевна, кандидат технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» им. И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», старший научный сотрудник

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»**

Защита состоится 25 июня 2025 года в 15.30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.383.02 созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» по адресу: 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24-26/49 литера А, Белоколонный зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), <https://spbti.ru/filecat/515>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим отправлять по адресу: 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24-26/49 литера А, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Ученый совет, e-mail: dissowet@spbti.ru

Автореферат разослан 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Воронков Михаил Евгеньевич

Общая характеристика работы

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 исследования. 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 формования 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 формирующих узлов оборудования, что, как правило, является предметом «ноу хау» фирм-производителей или защищено патентами.

Цель и задачи диссертационной работы.

Цель диссертационной 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 формирующего 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-C». 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 «Leica DM 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 Smart Lab 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 гг.), 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.).

По результатам исследования опубликовано 3 статьи в журналах, из Перечня рецензируемых научных изданий или индексируемых международными базами данных, перечень которых определен в соответствии с рекомендациями ВАК, 1 патент РФ на полезную модель, 16 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы (89 наименований) и пяти приложений. Работа изложена на 119 страницах и содержит 11 таблиц и 48 рисунков.

Основное содержание работы

Во введении обоснованы актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе обобщены и проанализированы литературные данные, описывающие современное состояние и основные направления исследований в области трибологических свойств и методик испытаний антифрикционных композиционных материалов.

Для обеспечения надежности высокоскоростных узлов трения необходимо минимизировать негативные последствия граничного трения, возникающего при запуске и останове двигателя. В качестве материалов, работающих в узлах трения, применяются антифрикционные графитовые материалы. Одним из перспективных материалов для современных высокоскоростных узлов трения является изотропный пиролитический углерод. Однако его трибологические свойства изучены недостаточно.

Твердосплавные подшипники широко применяются в погружных насосах, используемых при добыче нефти, работающих в условиях высоких нагрузок, агрессивных и абразивосодержащих сред. Недостатком данных изделий является практически полное отсутствие работоспособности в условиях граничного и сухого трения, которое может кратковременно возникнуть в процессе выхода узла трения на рабочую скорость, что может привести к досрочному выходу из строя всего агрегата.

Рассмотрены триболого-технологические аспекты процесса формирования длинномерных абразивных заготовок методом экструзии. Важным вопросом являются процессы износа в процессе экструзии технологической оснастки в результате её взаимодействия с абразивной массой. Абразивный износ зачастую является ведущим фактором, определяющим изменение геометрических размеров пуансонов, матриц и, как следствие, точность размеров заготовок изделия. Решение данных проблем проблемы требует комплексного подхода и заключается как в

оптимальном подборе материалов технологической оснастки, так и в конструктивных решениях узлов оснастки.

Во второй главе приведено описание оборудования, перечислены и охарактеризованы методы исследования, использованные в работе.

Третья глава содержит описание объектов исследования.

В работе использовали образцы из следующих материалов:

1. Изотропный пиролитический углерод – турбостратный однофазный материал, полученный методом химического газофазного осаждения (ХГО) продуктов высокотемпературного термического разложения углеродсодержащих газов на графитовую подложку. Для исследования были отобраны бездефектные образцы, которые разделили 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 $(2,11 \pm 0,02) \text{ г/см}^3$.

2. Антифрикционный графит АТГ-С производства НПЦ «Салют» по ТУ 1915-005-07507216-03 на основе сланцевого кокса марки КС с дальнейшей пропиткой ультрафосфатом состава $\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{MnO} \cdot 6\text{P}_2\text{O}_5$ для достижения требуемой газопроницаемости.

3. Образцы на основе твердого сплава ВН20 с графитовыми добавками. Твердый сплав на основе WC-Ni был выбран в качестве основы по причине большей коррозионной стойкости в агрессивных средах, чем WC-Co. В качестве добавок использовали графиты с разной зольностью: малозольный ГМЗ (ТУ 48-20-90-82), специальный малозольный ГСМ-2 (ГОСТ 17022-81), терморасширенный ТРГ (ГОСТ 34708-2021).

4. 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.

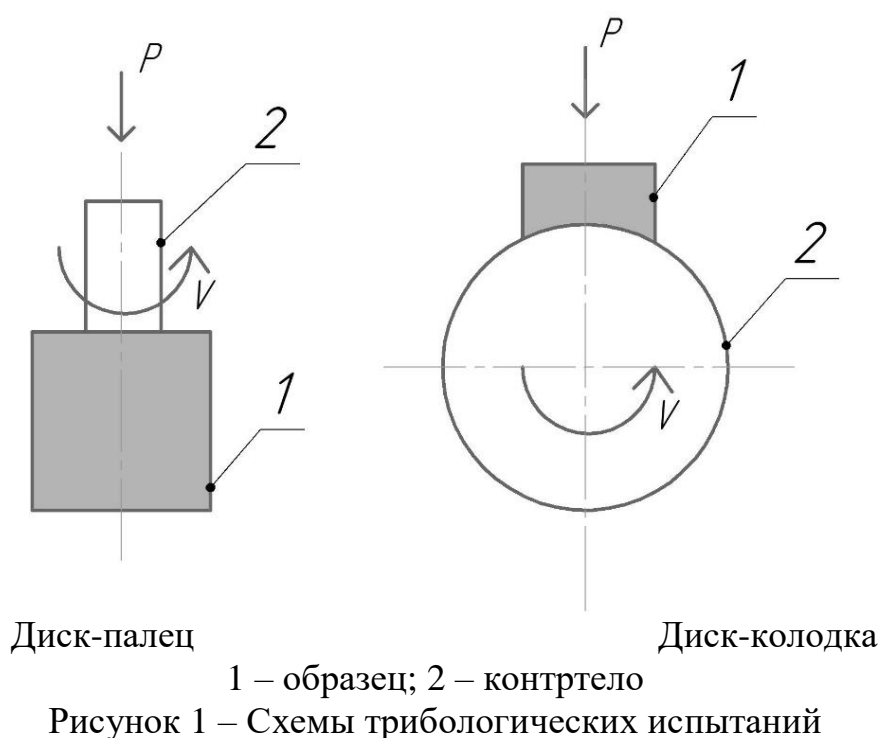
Четвертая глава посвящена модернизации испытательного оборудования и разработке методики трибологических испытаний в экстремальных условиях трения.

Методика измерения коэффициента трения основана на непосредственном измерении момента силы трения и величины осевой нагрузки с последующим вычислением коэффициента трения. Испытания по схеме «кольцо-кольцо» проводили на усовершенствованном в процессе исследования стенде на основе универсальной машины трения УМТ2168 при нагрузках от 250 Н до 5500 Н и скорости вращения 2500 об/мин. В качестве смазки использовали дистиллированную воду. Измерения завершали по достижении максимальной нагрузки или при наступлении «схватывания».

Разработана конструкция узла трения с медными разрезными вставками, которая обеспечивает равномерную передачу на образец усилия обжатия, а также более точную центровку образца относительно оси корпуса. Одновременно была определена оптимальная площадь поперечного сечения канавок для подвода смазочной среды с целью сохранения устойчивого гидродинамического режима трения.

Модернизирован имеющийся на предприятии ООО «Вириал» стенд для проведения высокоскоростных испытаний. Для достижения скоростей свыше 100 м/с схема испытания «диск-палец» заменена на схему «диск-колодка» (рисунок 1),

разработана новая конструкция крепления образца и доработан механизм передачи сигнала на датчик.



В результате удалось минимизировать уровень вибраций при высоких скоростях вращения, что позволило добиться стабильности и воспроизводимости результатов эксперимента при скоростях до 125 м/с. Коэффициент вариации сигнала не превышал 10 %.

Разработана, опробована и внедрена в производственный цикл методика проведения трибологических испытаний на модернизированном стенде при скоростях до 125 м/с и нагрузках до 60 Н. Дана метрологическая оценка результатов измерения трибологических характеристик.

Для изучения процессов формирования стержней был разработан, собран и испытан модельный экструдер на основе универсальной испытательной машины Test 113.100kN. 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.

На основе предложенного способа оценки степени трибологического воздействия абразивных пластичных масс на формующее оборудование по величине усилия при экструзии определено оптимальное сочетание содержания пластификатора и температуры, обеспечивающее получение бездефектных, недеформирующихся заготовок, пригодных для дальнейших технологических операций.

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. В работе разработано, опробовано и запатентовано устройство для

формования методом экструзии стержневых заготовок с внутренними винтовыми каналами.

Фотографии полученных в исследовании стержней с внутренними винтовыми каналами показаны на рисунке 2.



фрагмент заготовки стержня для
контроля расположения каналов

поперечный срез
полученного стержня

Рисунок 2 – Фотографии заготовок с внутренними винтовыми каналами

В пятой главе приведены результаты исследования трибологических свойств изотропного пиролитического углерода и антифрикционного графита АТГ-С.

На дифрактограммах изотропного пиролитического углерода присутствует выраженный основной пик (002) и 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 3.

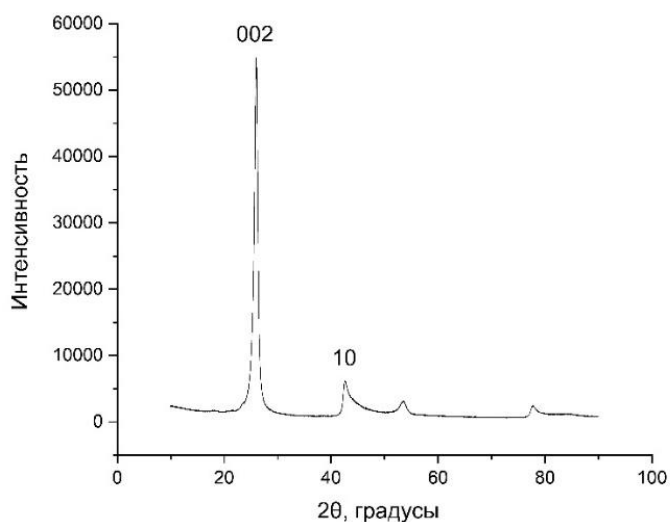
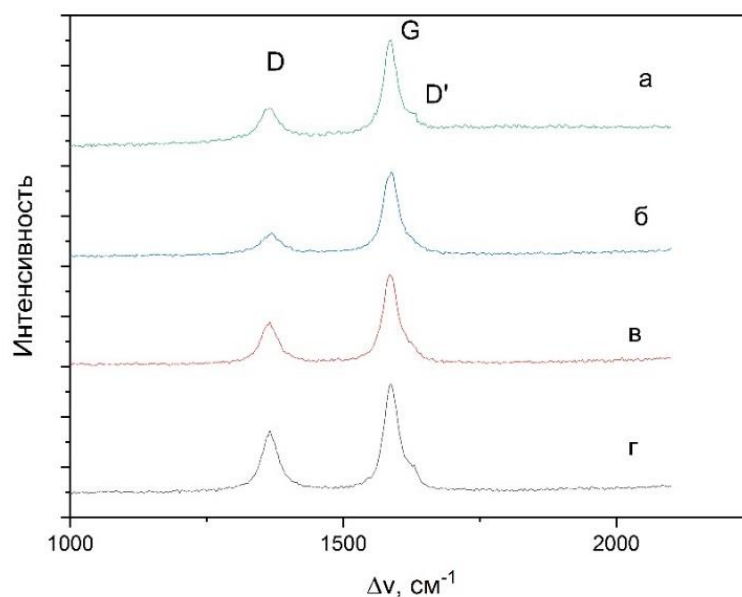


Рисунок 3 – Дифрактограмма изотропного пиролитического углерода

На полученных спектрах комбинационного рассеяния (КР-спектры) изотропного пиролитического углерода (рисунок 4) 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). 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.



Плотность а) $2,11 \text{ г/см}^3$; б) $2,04 \text{ г/см}^3$; в) $1,92 \text{ г/см}^3$; г) $1,84 \text{ г/см}^3$

Рисунок 4 – Спектры комбинационного рассеяния изотропного пиролитического углерода различной плотности

Степень дефектности структуры углеродных материалов оценивают по величине отношения интенсивностей полос D и G: чем величина $I(D)/I(G)$ больше, тем выше количество дефектных и разупорядоченных участков структуры графита. 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 в его структуре вакансий, а $I(D)/I(D') \approx 1,3$ свидетельствует о наличии sp^3 -гибридных атомов углерода. Характеристики полученных КР-спектров представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика КР-спектров

Плотность, г/см^3	$\Delta\nu (D), \text{см}^{-1}$	$\Delta\nu (G), \text{см}^{-1}$	$\Delta\nu (D'), \text{см}^{-1}$	$I(D)/I(G)$	$I(D)/I(D')$
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}

На основе проведенного исследования показано, что с ростом плотности изотропного пиролитического углерода увеличивается степень совершенства его структуры, а также по значению отношения $I(D)/I(D') \approx 1,3$ выдвинуто предположение, что в структуре изотропного пиролитического углерода присутствуют кластеры sp^3 -гибридных атомов углерода.

На основе анализа полученных дифрактограмм и КР-спектров рассчитаны величины областей когерентного рассеяния изучаемых образцов изотропного пиролитического углерода (таблица 2).

Таблица 2 – 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 формуле Шеррера

** – Расчет по соотношению Tuinstra-Koenig

Трибологические испытания проводили при скорости 125 м/с в условиях сухого трения. Результаты трибологических испытаний и измерений твердости ИПУ представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты трибологических испытаний и измерений твердости

Плотность образцов, г/см ³	$I(D)/I(G)$	$f_{тр}$	J_m , мг/с · 10 ⁻⁴	HV1, МПа
1,84	0,745	0,19 ± 0,03	156 ± 11	620 ± 10
1,92	0,710	0,18 ± 0,02	94 ± 23	585 ± 10
2,04	0,607	0,20 ± 0,02	51 ± 7	450 ± 10
2,11	0,633	0,16 ± 0,02	31 ± 9	400 ± 10

С ростом плотности и степени совершенства структуры скорость изнашивания изотропного пиролитического углерода (J_m) уменьшается в 5 раз, при этом влияния на коэффициент трения не наблюдается.

В результате статистического анализа данных таблицы 3 получены уравнения линейной регрессии с коэффициентами детерминации R^2 0,95 и 0,84 соответственно.

$$HV1 = 2301 - 908\gamma \quad (1),$$

$$I(D)/I(G) = 1,65 - 0,49\gamma \quad (2),$$

где γ – плотность образцов ИПУ, г/см³;

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

Столь высокие значения коэффициентов детерминации позволяют с достаточной степенью адекватности оценивать показатели твердости и степень совершенства структуры ИПУ, зная плотность материала.

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.

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

Трибологические характеристики антифрикционного графита АТГ-С, измеренные в условиях сухого трения при скорости 125 м/с, представлены в таблице 4.

В ходе испытаний наблюдалось постепенное повышение коэффициента трения с 0,17 на первой минуте испытания до стабилизации на значении 0,3 с третьей минуты испытания.

Таблица 4 – 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.

Сравнительное исследование трибологических характеристик антифрикционных углеграфитовых материалов АТГ-С и ИПУ 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.

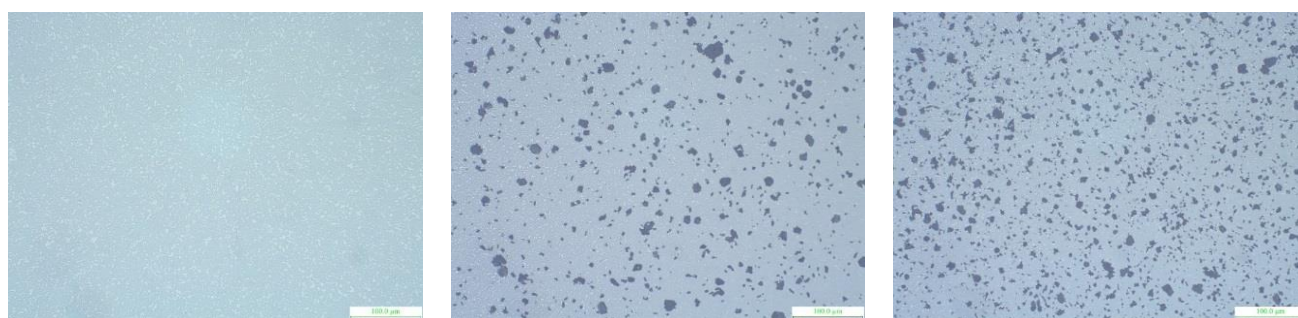
Шестая глава содержит результаты изучения трибологических свойств антифрикционных композиционных материалов на основе твердого сплава ВН20 (Ni – 20%, WC – 80%) в условиях трения при высоких нагрузках

Усредненные показатели свойств исследованных в работе композиций представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Свойства исследованных твердосплавных композиций

Вид графитовой добавки	Количество графитовой добавки, мас. %	Плотность, г/см ³	$\sigma_{изг.}$, 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 ± 120	0,04
	4	11,24 ± 0,02	1180 ± 90	0,04
ГСМ-2	2	12,18 ± 0,02	1790 ± 80	0,02
	4	11,29 ± 0,03	1250 ± 110	0,02

Примеры микроструктур, полученных образцов приведены на рисунке 5. На представленных микрофотографиях видно, что графитовая добавка распределена равномерно.



контрольный образец

содержание свободного углерода 2 мас. %

содержание свободного углерода 4 мас. %

Рисунок 5 – Микроструктура образцов твердого сплава с добавками графита ГМЗ, увеличение 200[×]

Трибологические испытания проводили при скорости 4,5 м/с в воде со ступенчатым повышением нагрузки на пару трения с 250 Н до 5500 Н, либо до наступления аварии в ходе испытаний.

Для имитации аварийной ситуации перехода от гидродинамического к сухому трению после притирки образцов в течение 10 минут при нагрузке 250 Н из камеры трения сливали воду. За результат сухого трения принимали время работы и коэффициент трения до разрушения образцов.

Результаты трибологических испытаний показали (таблица 6), 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. Выявлена тенденция к увеличению времени до потери работоспособности по мере снижения зольности графита.

Таблица 6 – Результаты трибологических испытаний

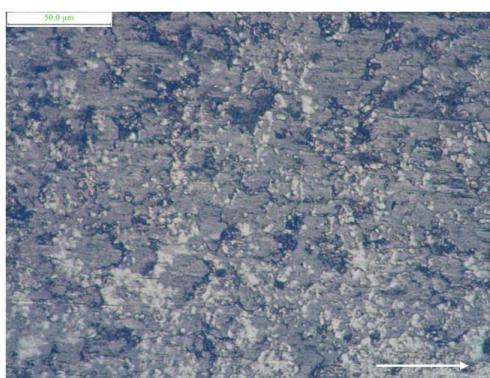
Вид добавки	Зольность добавки, мас. %	Результаты испытания образцов			
		в воде		в режиме сухого трения	
		$f_{тр}$ пары	$\sigma_{тр}$, МПа	$f_{тр}$ пары*	τ , с**
Без добавки	-	$0,01 \pm 0,004^*$	$5,0 \pm 1,0$	$0,02 \pm 0,007$	10 ± 5
ГМЗ	0,03	$0,01 \pm 0,005$	>13	$0,02 \pm 0,006$	80 ± 5
ТРГ	0,2	$0,01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

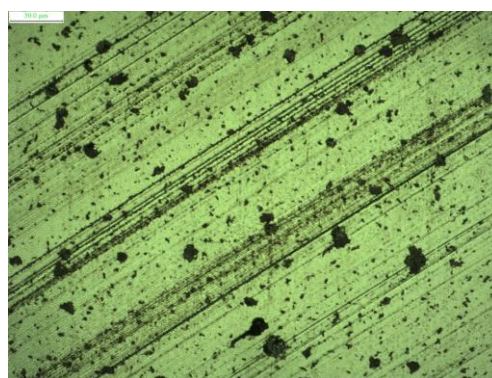
** Усредненные значения до потери работоспособности пары трения.

На микрофотографии (рисунок 6а) видно, что добавка графита распределена по поверхности трения с выраженным ориентированием по направлению вращения. На рисунке 6б 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, значительно увеличивая время работы пары трения.

а)



б)



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

Рисунок 6 – Микрофотографии образцов ВН20 с добавкой ГСМ-2

Увеличение 500[×]

Заключение

1. С использованием модернизированных стэндов 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 sp³-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 опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в журналах

1. Khorev, V. A. Tribological properties of pyrolytic carbon in high-speed tests / V. A. Khorev, V. I. Rummyantsev, G. A. Ponomarenko, A. S. Osmakov, V. N. Fishchev // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2020. – № 1. – P. 68-72.

2. Khorev, V. A. Influence of Graphite Additives on Tribological Properties of Nickel-Containing Hard Alloys / V. A. Khorev, S. Y. Kurochkin, V. I. Rummyantsev, V. N. Fishchev // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2023. – Т. 64. – № 2. – P. 180-183.

3. 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.

Тезисы докладов на конференциях

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Хорев, В. А. Влияние углеродной добавки на работоспособность твердосплавных подшипников / В. А. Хорев // Материалы XIII конференции «Традиции и инновации», посвященной 194-й годовщине образования Санкт-Петербургского технологического института (технического университета) – Россия, Санкт-Петербург, 30 ноября – 2 декабря 2022 – Сборник тезисов, С. 49.

15. Хорев, В. А. Сравнение рамановских спектров изотропного пиролитического углерода различной плотности / В. А. Хорев, Н. В. Захарова // Материалы XIII конференции «Традиции и инновации», посвященной 194-й годовщине образования Санкт-Петербургского технологического института (технического университета) – Россия, Санкт-Петербург, 30 ноября – 2 декабря 2022 – Сборник тезисов, С. 50.

16. Хорев, В. А. Влияние шероховатости поверхности на коэффициент трения изотропного пиролитического углерода / В. А. Хорев // Материалы XII конференции «Традиции и инновации», посвященной 193-й годовщине образования Санкт-Петербургского технологического института (технического университета) – Россия, Санкт-Петербург, 1-3 декабря 2021 – Сборник тезисов, С. 37.

Патент

Патент № 221444 Российская Федерация, В21С 23/21 (2006.01), В21С 25/02 (2006.01), В22F 3/20 (2006.01), В22F 5/10 (2006.01). Устройство для формования методом экструзии стержневых заготовок с внутренними винтовыми каналами : №2023120186 : заявл. 01.08.2023 : опубл. 07.11.2023 / Кочерга Л. Н., Вашарин С. А., Четлахида К. С., Хорев В. А. – 9 с.