

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ЕМАЕВ ИЛЬЯ ИГОРЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОДВИЖНЫХ
СОПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕСТИМОСТИ
ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Специальность 05.02.04 – Трение и износ в машинах

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Н.К. Криони

УФА – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ	
ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	16
1.1. Узлы, работающие в экстремальных условиях трения	17
1.2. Вопросы трибологии тяжелонагруженных трибосопряжений в машинах и при металлообработке	25
1.2.1 Особенности трения и изнашивания	25
1.2.2. Смазочные материалы	33
1.3. Вопросы трибологии эндопротезов, применяемых при артропластике тазобедренных суставов	43
1.3.1. Особенности трения и изнашивания	43
1.3.2. Биологические среды	48
1.4. Пути повышения работоспособности подвижных сопряжений в экстремальных условиях трения.	52
Выводы по главе 1	53
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗЫ	
ИССЛЕДОВАНИЯ	55
2.1 Термодинамический анализ зоны трения	55
2.1.1. Неравновесная термодинамика трения и изнашивания	55
2.1.2. Обоснование принципа уменьшения коэффициента трения при использовании смазок с добавками	59
2.2. Гидродинамическая аналогия в исследовании адгезионного взаимодействия при трении	61
2.3. Экспериментальное исследование триботехнических характеристик пластичных смазок (ПС)	64
2.3.1. Испытания на четырехшариковой машине трения (ЧМТ)	64
2.3.2. Исследования адгезионного взаимодействия	65
2.3.3 Исследования изнашивания	70
2.4. Исследование структуры материалов	72
2.4.1 Металлографическая оптика	72
2.4.2 Растровая электронная микроскопия	72
2.5. Исследование триботехнических характеристик эндопротезов тазобедренного сустава	73
2.5.1 Материалы, оборудование и методы исследования	73
2.5.2 Лазерная сканирующая микроскопия	76
2.6. Измерение микротвёрдости компонентов эндопротезов	77

2.7. Окисление дисперсионной среды исследуемых смазок и методика их приготовления	78
Выводы по главе 2	79
ГЛАВА 3. ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМ КАРКАСОМ	80
3.1. Трибологические характеристики смазочных материалов с углеродным каркасом	80
3.2. Регрессионный анализ влияния углеродного каркаса на трибологические характеристики смазочного материала	87
3.3. Исследование химического состава и сравнение триботехнических характеристик ПСМ, модифицированных углеродным каркасом и дисульфидом молибдена	93
3.4. Сравнение триботехнических характеристик ПСМ, модифицированных естественным и искусственным углеродным каркасом	97
3.5. Влияние окисления озоном дисперсной среды на характеристики адгезионного взаимодействия при трении с учетом давления и температуры	103
3.6. Исследование коэффициента трения скольжения	108
3.7. Влияние смазочной композиции на износ при трении	112
Выводы по главе 3	116
ГЛАВА 4. ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНДОПРОТЕЗОВ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА	118
4.1. Влияние материалов пары трения «головка – вкладыш», синовиальной жидкости на адгезионную составляющую трения в эндопротезах тазобедренного сустава (исследование на моделях)	118
4.2. Характеристики адгезионного взаимодействия различных пар трения, которые используются при артропластике тазобедренного сустава (результаты стендовых испытаний)	122
4.3. Сравнение триботехнических характеристик различных эндопротезов и тазобедренных суставов кролика	128
4.4. Зависимость износа эндопротезов от показателей адгезионного взаимодействия пар трения	130
Выводы по главе 4	133

ГЛАВА 5. ОБОБЩЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ	135
5.1. Обобщения по улучшению триботехнических характеристик ПСМ, использующихся в подвижных тяжело нагруженных трибосопряжениях	135
5.2. Исследование с помощью 3D – лазерной микроскопии постимплантационных изменений компонентов эндопротезов тазобедренного сустава	139
5.3. Информационная база данных по триботехническим характеристикам и совместимости трущихся поверхностей	145
5.3.1. Описание справочников	145
5.3.2. Описание подсистем, входящих в ИБД ТТХ	147
Выводы по 5 главе	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	153
Основные результаты и выводы	153
Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы	155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	156
ПРИЛОЖЕНИЕ	172

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

C	—	индекс совместимости трущихся поверхностей;
f	—	коэффициент трения скольжения;
f_δ	—	деформационная составляющая коэффициента трения;
f_a	—	молекулярная составляющая коэффициента трения при упругом контакте;
f_m	—	молекулярная составляющая коэффициента трения при пластическом контакте;
$F_{\text{экс}}$	—	окружная сила на диске, вращающем индентор;
h_r	—	износ, связанный с удалением продуктов изнашивания, т.е. толщина изношенного слоя;
$h_{r\Sigma}$	—	суммарный износ трибосопряжений;
H_μ	—	микротвердость материала;
J_h	—	интенсивность изнашивания;
K	—	интенсивность изнашивания, т.е. износ, приходящийся на одно воздействие;
l	—	путь трения;
m	—	весовой износ;
N	—	число циклов воздействий, приводящих к износу;
p_c	—	контурное давление;
p_r	—	нормальное напряжение на контакте;
p_{rn}	—	предельные нормальные напряжения на контакте;
P	—	нагрузка;
r	—	радиус сферического индентора;
r_{omn}	—	радиус отпечатка (лунки) на испытуемых образцах;
Ra	—	параметр шероховатости (среднее арифметическое отклонение профиля);

S	—	площадь касания тел при трении;
$V_{изн}$	—	изношенный объем;
β	—	коэффициент упрочнения молекулярных связей под действием сжимающих напряжений;
γ	—	удельный вес (плотность) материала;
θ	—	температура триботехнического контакта, °C;
τ_n	—	прочность адгезионных связей на срез;
τ_0	—	прочность адгезионных связей на срез в отсутствии нормальной нагрузки.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Современный уровень технического прогресса требует постоянного совершенствования выпускаемой продукции по производительности и качеству, делая ее конкурентоспособной. Это приводит к возрастающим требованиям к эксплуатационным характеристикам различных изделий. Поэтому в механизмах и машинах все большее применение находят так называемые подвижные сопряжения, работающие в экстремальных условиях трения и изнашивания (ПС ЭУТИ). Такие сопряжения работают в условиях вакуума, низких и высоких температур, в коррозионной среде и т.п. К числу ПС ЭУТИ относятся также тяжело нагруженные трибосопряжения (ТНТС), используемые в машиностроении, а также кинематические узлы (эндопротезы), работающие в биологической среде и используемые в артропластике.

При конструировании и эксплуатации ПС ЭУТИ на первый план выступают вопросы совместимости трущихся поверхностей – способности фрикционной пары при принятой смазочной среде или в отсутствии смазки приспособляться друг к другу в процессе трения, обеспечивая заданную долговечность.

Перспективным направлением повышения эксплуатационных свойств ТНТС является применение пластичных смазочных материалов (ПСМ), совершенствование которых осуществляется путем обоснованного выбора состава ПСМ (дисперсионной среды, дисперсионной фазы, модификаторов структуры и добавок, обеспечивающих смазке необходимый уровень функциональных свойств).

Повышение эксплуатационных свойств эндопротезов в значительной мере связано с обоснованным выбором материалов пары трения «шаровая головка – вкладыш» с учетом совместимости трущихся поверхностей и биологической среды.

Таким образом, обоснованный выбор состава ПСМ для ТНТС, а также материалов трибопары эндопротезов является актуальной задачей в условиях повышенных требований, предъявляемых к ПС ЭУТИ. О важности решения данной задачи свидетельствует тот факт, что исследования в этой области включены в Федеральную целевую программу «Исследование и разработка по приоритетным направлениям и развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (№ 426 от 21.05. 2013), а также то, что они выполнены при поддержке государства в лице Минобрнауки России, Соглашение № 14.574.21.0179 от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0179.

Объект исследования. Триботехнические характеристики пластичных смазок на основе композиции технического углерода (углеродного каркаса), используемых в тяжелонагруженных трибосопряжениях машин, а также триботехнические характеристики эндопротезов тазобедренного сустава, работающих в среде синовиальной жидкости.

Степень разработанности темы. Большой вклад в изучение проблемы трения, изнашивания и смазки ПС ЭУТИ внесли отечественные ученые Буше Н.А., Гаркунов Д.Н., Дроздов Ю.Н., Любарский И.М., Колесников В.И., Костецкий Б.И., Крагельский И.В., Матвеевский Р.М., Михин Н.М., Семенов А.П., Силин А.А. и др., а также многие зарубежные ученые. В их работах показано, что адгезионное взаимодействие трущихся поверхностей в ПС ЭУТИ играет главенствующую роль в формировании индекса совместимости трущихся поверхностей и других триботехнических характеристик.

В развитие этого научного направления исследований ПС ЭУТИ назрела необходимость установления функциональных связей между показателями адгезионного взаимодействия трущихся поверхностей (с учетом материала, температуры, давления и смазочной среды) и эксплуатационными свойствами ПС ЭУТИ (износом, коэффициентом трения, несущей способностью фрикционного контакта, задиростойкостью и т.п.). Установленные закономерности позволят выработать и реализовать рекомендации по

совершенствованию ПС ЭУТИ. Теоретическими предпосылками для получения указанных функциональных связей могут послужить:

– методология оценки совместимости трущихся поверхностей, успешно примененная в работах Буше Н.А., Копытько В.В., Шустера Л.Ш. и др.

– использование гидродинамической аналогии для оценки показателей адгезионного взаимодействия в подвижном фрикционном контакте с учётом контактирующих материалов, окружающей среды, температуры, давления и др. факторов, влияющих на совместимость трущихся поверхностей и их работоспособность. Этот метод успешно применялся в работах Захарова С.М., Любарского И.М., Крагельского И.В., Михина Н.М. и др.

Наиболее перспективным направлением повышения эксплуатационных свойств ПС ЭУТИ является установление закономерностей влияния контактирующих материалов и условий трения на совместимость трущихся поверхностей.

Цель работы – установление закономерностей влияния сочетания контактирующих материалов, смазки и условий трения на совместимость трущихся поверхностей и их изнашивание и на этой основе улучшение служебных свойств пластичных смазок на основе композиции технического углерода (углеродного каркаса – УК), а также эндопротезов тазобедренного сустава (ЭТБС).

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. На основании использования гидродинамической аналогии выполнить анализ влияния температуры и физико-механических свойств зоны фрикционного контакта на индекс совместимости трущихся поверхностей и установить условия его улучшения.

2. Выявить закономерности влияния дисперсной основы и наполнителя пластичной смазки (в том числе углеродного каркаса), температуры и давления на основные триботехнические характеристики подвижного

фрикционного контакта, совместимость трущихся поверхностей и их изнашивание.

3. Изучить влияние окисления озоном дисперсной основы пластичных смазочных материалов (ПСМ), температуры и давления на триботехнические характеристики подвижных трибосопряжений, противозадирные и противоизносные свойства ПСМ.

4. Выполнить исследования адгезионной составляющей трения в различных эндопротезах тазобедренного сустава.

5. Провести стендовые трибологические испытания различных эндопротезов и естественного тазобедренного сустава кролика.

6. Изучить постимплантационные изменения (износ) компонентов эндопротезов тазобедренного сустава.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- выполненные экспериментальные исследования подтвердили, что в соответствии с гидродинамической аналогией на индекс C совместимости трущихся поверхностей оказывает существенное влияние температура (прямое и косвенное), физико-механические свойства зоны фрикционного контакта («третьего тела») и смазочная среда;

- установлено, что окисление основы ПСМ озоном и активные компоненты углеродного каркаса, используемого в качестве комплексной добавки, оказывают благоприятное влияние на характеристики адгезионного взаимодействия, повышают противозадирные и противоизносные свойства ПСМ;

- показано, что переход от «мягких» вкладышей (полиэтиленовых) к более «твердым» (керамическим) в ЭТБС снижает индекс совместимости трущихся поверхностей, повышает их износостойкость и уменьшает зависимость изнашивания от давления на фрикционном контакте;

- полученные экспериментальные зависимости интенсивности и скорости изнашивания исследуемых трибосопряжений (существенно отличающихся по условиям трения) от индекса C совместимости трущихся

поверхностей свидетельствуют о том, что коэффициент β упрочнения адгезионных связей, определяющий величину C , отражает часть энергии трения, расходуемой на изнашивание (в соответствии с энергетической теорией трения).

Практическую ценность представляют:

1. Предложенная ПСМ на основе композиции технического углерода для тяжело нагруженных узлов трения.
2. Установленные теоретико – экспериментальные зависимости между составом пластичных смазок и их триботехническими характеристиками (с учетом температуры и удельной нагрузки), обеспечивающими работоспособность тяжело нагруженных узлов трения вплоть до 600 °С с повышением их износостойкости до 2-х раз.
3. Разработанная и апробированная оригинальная методика стендовых испытаний пары трения «головка – вкладыш» с помощью модернизированной четырехшариковой машины трения ЧМТ-1 и выводом результатов на экран, которая может быть использована для исследования материалов, применяемых в ЭТБС.
4. Рекомендации по применению материалов ЭТБС с учетом веса пациентов и степени двигательной активности, что может быть одним из ключевых факторов увеличения срока службы конструкции, более чем в 3 раза.
5. Установленные зависимости изнашивания трибосопряжений от коэффициента β упрочнения адгезионных связей, позволяющие прогнозировать эксплуатационную долговечность этих сопряжений по износостойкости.
6. Модернизированная и дополненная результатами данной работы информационная база данных по триботехническим и технологическим характеристикам (ИБД ТТХ).

Методы и методология диссертационного исследования.

Поставленные в диссертации задачи решались на основе теоретических и

экспериментальных исследований контактного адгезионного взаимодействия между подвижными поверхностями твердых тел. При этом использовались: гидродинамическая аналогия, положения неравновесной термодинамики, теории трения и износа, а также теории вероятностей и математической статистики. В экспериментальных исследованиях применялись стандартизированные и оригинальные методики триботехнических испытаний. Для исследования структуры поверхностей трения использовалась металлографическая оценка, с помощью растровой микроскопии выполнялся химанализ этих поверхностей. Анализ постимплантационных изменений компонентов эндопротезов выполнены на основе 3D – лазерной микроскопии.

Основные научные положения и результаты, полученные лично автором и выносимые на защиту:

- обоснование с помощью методологии оценки совместимости трущихся поверхностей и гидродинамической аналогии выбора добавок, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств высокотемпературных трибосопряжений, а также выбора материалов пары трения «шаровая головка – вкладыш», работающей в биологической среде;
- закономерности влияния дисперсной среды пластичной смазки и модификации углеродным каркасом на функциональные свойства тяжелонагруженных трибосопряжений;
- механизм влияния материалов пар трения кинематического узла «головка – вкладыш» ЭТБС и биологической среды на зависимость трибологических характеристик этого узла от давления;
- характеристики адгезионного взаимодействия в искусственном кинематическом узле ЭТБС не достигают уровня показателей интактного (естественного) тазобедренного сустава, что свидетельствует о потенциальных возможностях совершенствования ЭТБС;
- определяющим фактором в повышении износостойкости подвижных сопряжений являются показатели адгезионного взаимодействия

при трении и, в первую очередь, коэффициент β упрочнения адгезионных связей (характеризующий индекс совместимости трущихся поверхностей).

Степень достоверности. Обоснованность выдвинутых автором выводов и рекомендаций подтверждается использованием известных положений фундаментальных наук, сходимостью полученных теоретических результатов с большим объемом экспериментальных данных, а также с результатами исследований других авторов.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается корректным применением современных представлений физической и химической природы адгезионного взаимодействия трущихся поверхностей. Экспериментальные результаты получены с помощью растрового электронного микроскопа «JSM – 679OLV», 3D – лазерной сканирующей и 2D – оптической микроскопии на микроскопах LSM-Exciter и Axiotech, а также стандартизированных средств измерений (прошедших государственную проверку) и обработаны в соответствии с классическими соотношениями математической статистики.

Достоверность новизны технических решений подтверждены патентом РФ: Пат. 2.602.327 Российская Федерация, МПК C10M 161/00, C10M 125/02, C10N 30/06, C10N 40/02 Смазочный материал на основе композиции технического углерода для тяжело нагруженных узлов трения.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических форумах: научно-техническая конференция «Трибология – Машиностроению» (ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, 2014, 2016 гг.); Всероссийская научно – техническая конференция «Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий (г. Уфа, 2015 г.); Мавлютовские чтения: XIII Всероссийская молодежная научно – техническая конференция (г. Уфа, 2015 г.); Мавлютовские чтения: Российская научно – техническая конференция (г. Уфа, 2016 г.); Симпозиум «Современные инженерные проблемы базовых

отраслей промышленности международного научно-технического форума «Первые международные Косыгинские чтения» (г. Москва, ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017 г.); Научный семинар по трению и износу в машинах им. М.М. Хрущева (ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, 2018 г.).

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

В подвижных сопряжениях различных механизмов происходит трение двух контактирующих поверхностей в присутствии окружающей среды, при этом изнашиваются обе поверхности одновременно. Износ сопряжения измеряется теми геометрическими параметрами (одним или несколькими), которые определяют изменение относительного положения сопряженных деталей, произошедшее в результате износа их поверхностей.

Износ сопряжения является характеристикой, которая непосредственно связана с потерей машиной (или механизмом) начальных рабочих свойств. При этом большое значение имеют конструктивные и кинематические особенности данной фрикционной пары, так как они определяют характер и направление возможного перемещения (сближения) деталей при износе.

Трибосопряжения подразделяются на следующие виды:

- антифрикционного назначения, в которых трение играет отрицательную роль;
- фрикционного назначения, в которых трение играет положительную роль;
- неподвижные разъемные и неразъемные сопряжения, в которых происходит фреттинг-изнашивание;
- тяжело нагруженные сопряжения, работающие в ЭУТИ.

К трибосопряжениям антифрикционного назначения относятся подшипники, зубчатые, червячные, винтовые и цепные передачи, запорная арматура трубопроводов, манжетные уплотнения, скользящие контакты (в том числе, электрические), цилиндропоршневые сопряжения и т.п.

К трибосопряжениям фрикционного назначения относятся: тормозные устройства, фрикционные и ременные передачи, управляемые и самоуправляемые муфты, сопряжения колесо (шина) – дорога и т.п.

К неподвижным разъемным и неразъемным сопряжениям, в которых происходит фреттинг – изнашивание, относятся: резьбовые, шпоночные, шлицевые и заклепочные соединения, соединение хвостовика лопатки с диском турбины и т.п.

Тяжело нагруженные трибосопряжения работают в условиях вакуума, низких или высоких температур, при высоком давлении, в технологических процессах механообработки материалов, в коррозионной среде и т.п.

В данной работе поставлена цель повысить работоспособность подвижных сопряжений в экстремальных условиях трения и изнашивания (ПС ЭУТИ). Предложенный подход к решению поставленной задачи показан на примере применения пластичной смазки, модифицированной углеродным каркасом, в ТНТС при высоких температурах и давлении, а также выбора материала пар трения в эндопротезах, используемых при артропластике тазобедренного сустава человека и работающих в биологической среде.

1.1. Узлы, работающие в экстремальных условиях трения

Ниже приведены некоторые примеры подвижных сопряжений, работающих в экстремальных условиях трения, с анализом их конструктивных особенностей и эксплуатационных режимов работы.

Абразивная среда, высокая температура и динамические нагрузки определяют тяжелые условия трения, в которых работает *трубопроводная арматура* в нефти – газовой отрасли. Эта арматура выходит из строя из-за поломок, трещин, разгерметизации вследствие износа и изменения размеров запорных элементов привода.

Важным звеном в трубопроводной арматуре являются запорные устройства, в том числе различные краны. В зависимости от формы тела вращения краны подразделяются: цилиндрические, шаровые и конусные. В нефтеперерабатывающей отрасли большое распространение имеют шаровые краны [1,2,3].

На рисунке 1.1. приведена типовая конструкция шарового крана. В шаре 3 имеется сквозное отверстие, которое в зависимости от положения штока 2 открывает или перекрывает поток.

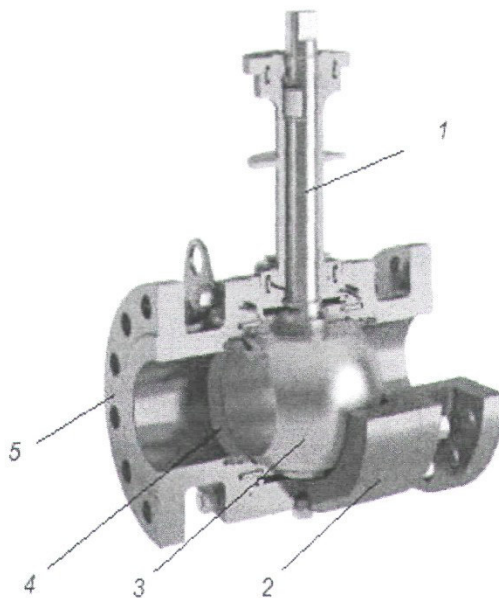


Рисунок 1.1 – Типовая конструкция шарового крана:

1 – шток; 2 – корпус; 3 – шар; 4 – седло; 5 – фланец

Вакуумная дистилляция при перегонке и гидрокрекинге нефтепродуктов осуществляется по схеме, приведенной на рис. 1.2. В этой схеме цифры 1,2,3, 4 и 5 обозначают шаровые краны. При нефтеперегонке температура среды может повышаться до 540 °С, а давление до 240 бар с высокой кислотной коррозией.

ГОСТ 55509 – 2013 регламентирует требования к материалам в арматуростроении [4]. Для изготовления деталей запорной арматуры получили коррозионностойкие и жаропрочные стали и сплавы [5]: 12X18H9T, 10X18H9Л, ХН28ВМАБ, ХН70ВМЮТ и т.п.

В работе [6] установлено, что техническая керамика является перспективным материалом в арматуростроении. Однако изготовление затворных элементов из такой керамики весьма трудоемко [7]. В работе [7] предложен новый материал для шаровых кранов (керметы на основе карбида

титана с дисперсной средой из ЖС6У). В материалах [8,9,10] отмечено, что использование таких керметов с износостойкими покрытиями существенно повышает работоспособность запорной арматуры по показателям износостойкости и энергозатратам.

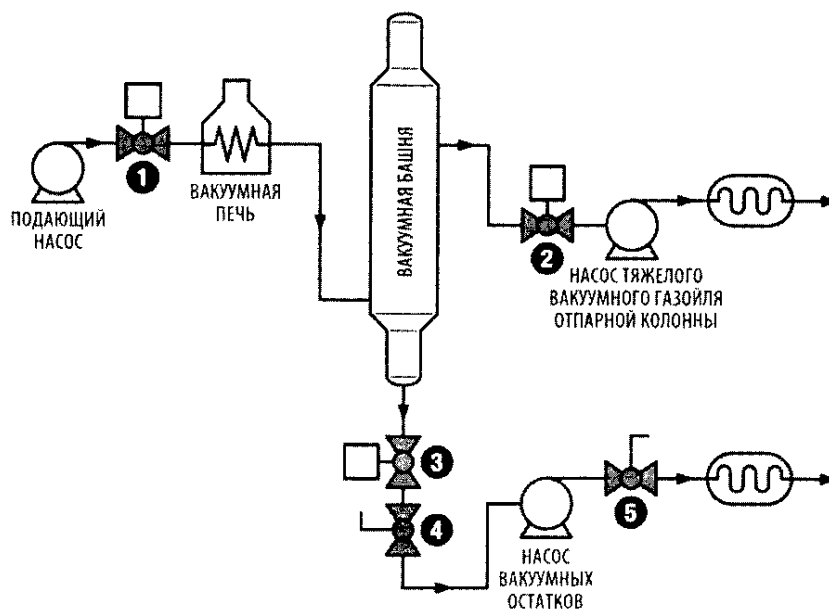


Рисунок 1.2 – Схема вакуумной дистилляции

Механические компрессоры по принципу действия подразделяются на две большие группы: динамические и объемные. Большое распространение получили объемные пластинчато-роторные компрессоры [11,12,13], т.е. в них сжатие газа происходит за счет изменения объема полости сжатия. Основные элементы пластинчато-роторного компрессора (ПРК) изображена на рис. 1.3.

В компрессоре существует два контура движения: масляный контур (движение масла внутри компрессора) и воздушный контур (движение воздуха в компрессоре). Крупными стрелками изображено направление движения воздуха. Малыми стрелками изображено направление движения масла.

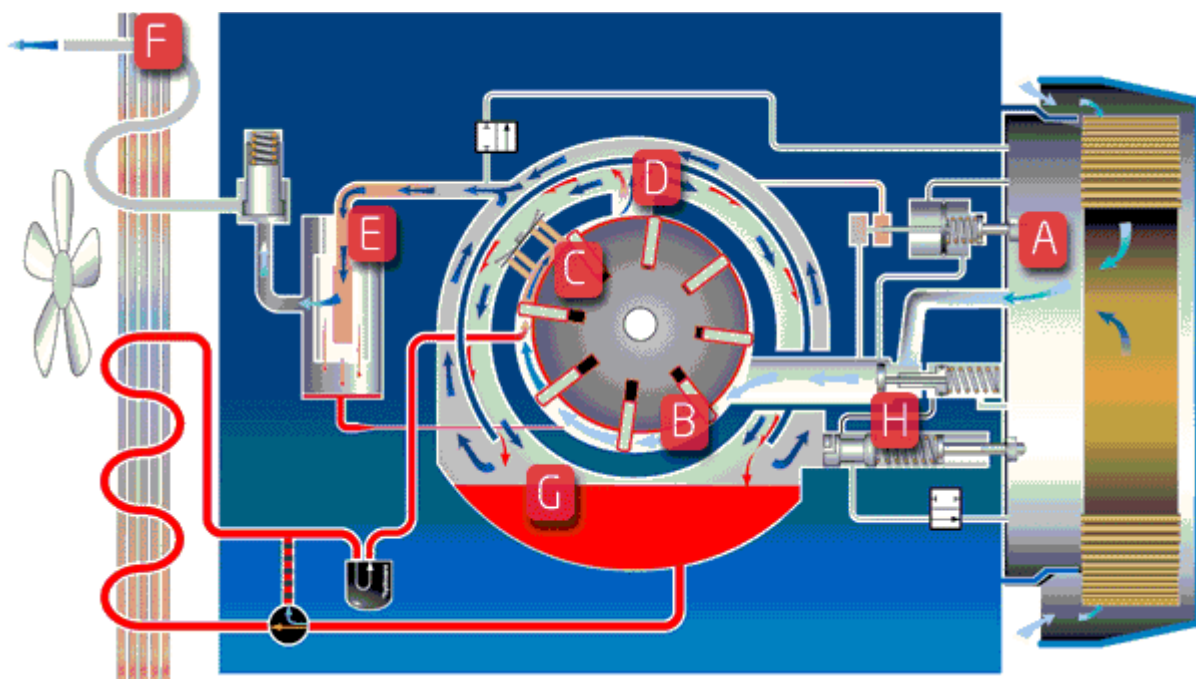


Рисунок 1.3 – Схема работы пластинчато-роторного компрессора

Масляный контур компрессора изображен темным цветом в нижней части рисунка. В него входят термодинамический клапан и масляный фильтр. При включении компрессора сжатый воздух поступает через воздушный фильтр, входное отверстие в торцевой крышке блока сжатия и всасывающий клапан (А), далее воздух поступает в блок сжатия (В). В этом блоке воздух сжимается за счет изменения объема камеры сжатия. Объем камеры образуется с помощью статора, ротора и пластин, которые установлены в пазах ротора. Масляный перепускной клапан (С) предотвращает гидравлический удар и выброс излишков масла из камеры сжатия, которые могут остаться после остановки компрессора перед его запуском. При этом воздушно – масляная смесь выходит из блока сжатия (D) и движется в его нижнюю часть, при выходе из блока сжатия масло отделяется от сжатого воздуха с помощью первичного маслоотделителя. По стенкам масло стекает в нижнюю часть блока сжатия. Затем сжатый и предварительно очищенный воздух движется в сепаратор тонкой очистки (Е), где происходит финальное отделение масла из сжатого воздуха до 3 мг/м^3 . После этого очищенный воздух проходит через клапан поддержания давления

и поступает в воздушно – масляный радиатор (F) , где происходит охлаждение. Далее сжатый воздух поступает в трубопровод к потребителю. Пластинчато-роторный блок состоит из одного ротора, статора и минимум восьми пластин, толщина которых ограничена. На пластину во время работы на пластину действуют силы: центробежная и трения. Масляная пленка между статором и пластинами возникает после начала работы компрессора, поэтому во время стартов и остановов возникает трение пластин о статор и их повышенный износ.

Высота масляного слоя между пластинами и статором составляет всего несколько микрон, поэтому пыль, содержащая твердые включения крупных размеров, выступает как абразив, который царапает статор и изнашивает пластины. Износ этого сопряжения приводит к перепуску сжимаемого воздуха из одной камеры сжатия в другую, что существенно снижает производительность компрессора.

При умеренных режимах работы (со средним и высоким давлением) температура нагнетания может достигать до 160 °С и выше. В качестве материалов ротора, статора и пластин, как правило используются цементуемые стали (25Х, 20 и т.п.), закаленные после цементации на высокую твердость (для уменьшения изнашивания).

Тележки для сушки и обжига кирпича являются оборудованием, предназначенным для размещения и транспортировки кирпича при выполнении технологического процесса на кирпичных заводах (рис. 1.4). Как видно из рисунка, тележка состоит из платформы, которая с помощью четырех металлических колес может перемещаться от ручного или механизированного привода. Оси колес закреплены на платформе. Между осями и колесами размещены подшипники, в которых для уменьшения потерь на трение используется, как правило, пластичная смазка.

Для размещения тары с заготовками кирпича на платформе тележки предусмотрена П-образная стойка, к которой приварены специальные поперечины.

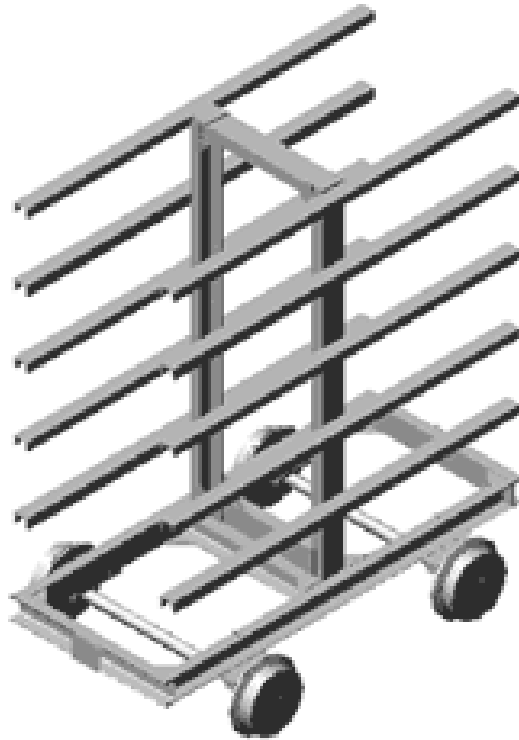


Рисунок 1.4 – Тележка для сушки кирпича

Технологический процесс изготовления силикатного и керамического кирпича является довольно сложным процессом, в котором предусматривается выдержка в печах заготовок при довольно высоких температурах (200 – 400 °С) длительное время, а процесс обжига заготовок заканчивается при температуре 1 000 – 1050 °С [14,15,16]. При этом оси и подшипники тележек испытывают большие давления (порядка 200 – 300 МПа). Поэтому в качестве материала осей используются жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы (ХН28ВМАБ, ХН70ВМЮТ и т.п.).

Колеса тележки устанавливаются на подшипники скольжения или качения, в которых подвижные сопряжения работают в особо тяжелых условиях трения.

Рабочая зона контактирования инструмента с обрабатываемым материалом в процессе механической обработки при изготовлении различных деталей представляет собой подвижное трибосопряжение с различными схемами деформирования.

Обрабатываемыми материалами могут быть любые конструкционные стали, сплавы и композиты [17 – 20], имеющие различные химические и структурно – фазовые составы [21 – 24]. В качестве инструментальных материалов широко используют высоколегированные стали и сплавы, керамику и керметы [25 – 28]. В последнее время на поверхности инструментов различными способами наносят разные износостойкие покрытия [29 – 32].

Скорость резания материалов (а следовательно, скорость трения в зоне резания) может изменяться от нескольких метров в минуту до 400 – 500 м/мин, при этом температура контактных поверхностей повышается до 1000 °С и выше, давление может достигать 800 – 1000 МПа и выше [33 – 36].

При обработке материалов давлением в зависимости от типа технологической операции скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей может существенно изменяться (от нескольких долей мм/с до 400 м/с на высадочных автоматах), давление на контакте может достигать 800 – 1000 МПа и выше, а температура изменяется от 300 до 1000 °С и выше [37 – 39].

Эндопротезы тазобедренного сустава представляют собой кинематический узел трения (рис. 1.5), состоящий из чашки, вкладыша, шаровидной головки и ножки [40 - 41]. Вкладыш находится внутри чашки, а головка накручивается на конус ножки протеза. Головка в пределах анатомической амплитуды двигается внутри вкладыша. Контактную область «вкладыш – головка» называют узлом трения. По – существу, эндопротез является искусственным суставом, имеющим большое внешнее сходство с настоящим (естественным). В процессе движения эндопротез принимает на себя обычные физические нагрузки и выполняет те же действия, что и здоровый орган.

Головка эндопротеза изготавливается из керамических материалов или сплавов на основе кобальта, молибдена и хрома. Поверхность головки имеет

высокий квалитет шероховатости (полируется) для обеспечения скольжения внутри вертлужного компонента (вкладыша) эндопротеза.



Рисунок 1.5 – Эндопротез тазобедренного сустава

Вертлужный компонент (вкладыш) изготавливают из керамики, металла, ультравысокомолекулярного полиэтилена и полиэтилена, усиленного металлическими элементами.

Применяемые в эндопротезах материалы обладают следующими свойствами:

- биосовместимостью с тканями человеческого организма, чтобы не вызывать реакцию отторжения со стороны организма;
- устойчивостью к коррозии, изнашиванию и разрушению, чтобы сохранять форму и функциональность в течение длительного времени (для нормальной работы сустава);
- механическими характеристиками, соответствующими заменяемым биологическим структурам, чтобы выдерживать весовые нагрузки,

устойчивость к давлению, обеспечивать гибкость и возможность скольжения компонентов друг относительно друга.

В значительной мере срок службы эндопротеза зависит от износостойкости материалов в узле трения. По видам материалов пар трения различают следующие сочетания: металл – металл; металл – керамика; металл – полиэтилен; керамика – полиэтилен; керамика – керамика. Работают эти сочетания в биологической среде – синовиальной жидкости, вырабатываемой организмом или при ее отсутствии при патологиях и начале движения [42 – 43].

Для возможности подстраивания эндопротеза под телосложение и массу тела пациента каждый элемент может иметь различные размеры. Наибольшее применение нашли эндопротезы с головками диаметрами 28, 32 и 36 мм.

Давление на контактирующих поверхностях головки и вкладыша может достигать значений 15 – 20 МПа при температуре человеческого организма 35 – 40 °С [42].

1.2. Вопросы трибологии тяжелонагруженных трибосопряжений в машинах и при металлообработке

1.2.1 Особенности трения и изнашивания

Следует признать, что к настоящему времени вопросы трибологии *трубопрочной запорной арматуры* изучены недостаточно. Тем не менее, можно сослаться на ряд зарубежных работ [43 – 52] с приведенными результатами по влиянию среды на износостойкость керметов.

В работе [49] представлен результат исследования трибологических характеристик керметов (TiC и TiCCN), в частности зависимость износа материалов от связующих компонентов. Изучен химсостав следов износа.

Выполненные исследования показали, что при объемном содержании Ni_3Al 30% кермет на основе TiC имеет наилучшие триботехнические характеристики. Однако ни в этой, ни в вышеуказанных работах отсутствуют какие – либо обобщения, касающиеся механизма изнашивания трибосопряжения как единого узла трения с учетом совместимости трущихся поверхностей [53].

Наиболее полно и всесторонне рассмотрены трибологические вопросы запорной арматуры («шар – седло») трубопроводов в работах [54 – 56]. В этих работах авторы научно обосновали механизм формирования объемного износа трибосопряжений и установили, что этот износ зависит от величины коэффициента β упрочнения адгезионных связей на фрикционном контакте (рис. 1.6) и эта зависимость может быть описана степенной функцией:

$$V = c \cdot \beta^m, \quad (1.1)$$

где для изученных пар трения $c = 27$; $m = 2$.

Металлографические исследования изношенных поверхностей, приведенные в работе [57], подтвердили преимущественное адгезионное изнашивание контактирующих поверхностей. Как показано в работе [58], коэффициент β , учитывающий влияние давления на тангенциальную прочность τ_n адгезионных связей, является по существу критерием совместимости трущихся поверхностей. Таким образом, в этих исследованиях установлено, что работоспособность тяжело нагруженного трибосопряжения «шар – седло» в значительной мере определяется характеристиками адгезионного взаимодействия при трении. Материалы контактирующих поверхностей, температура контакта и окружающая среда влияют на величину износа V через изменение коэффициента β . Давление на контакте изменяет коэффициент C .

Зависимости (1.1) позволяют уже на стадии проектирования тяжело нагруженного узла трения прогнозировать, оценить и повысить его работоспособность за счет совместимости трущихся поверхностей.

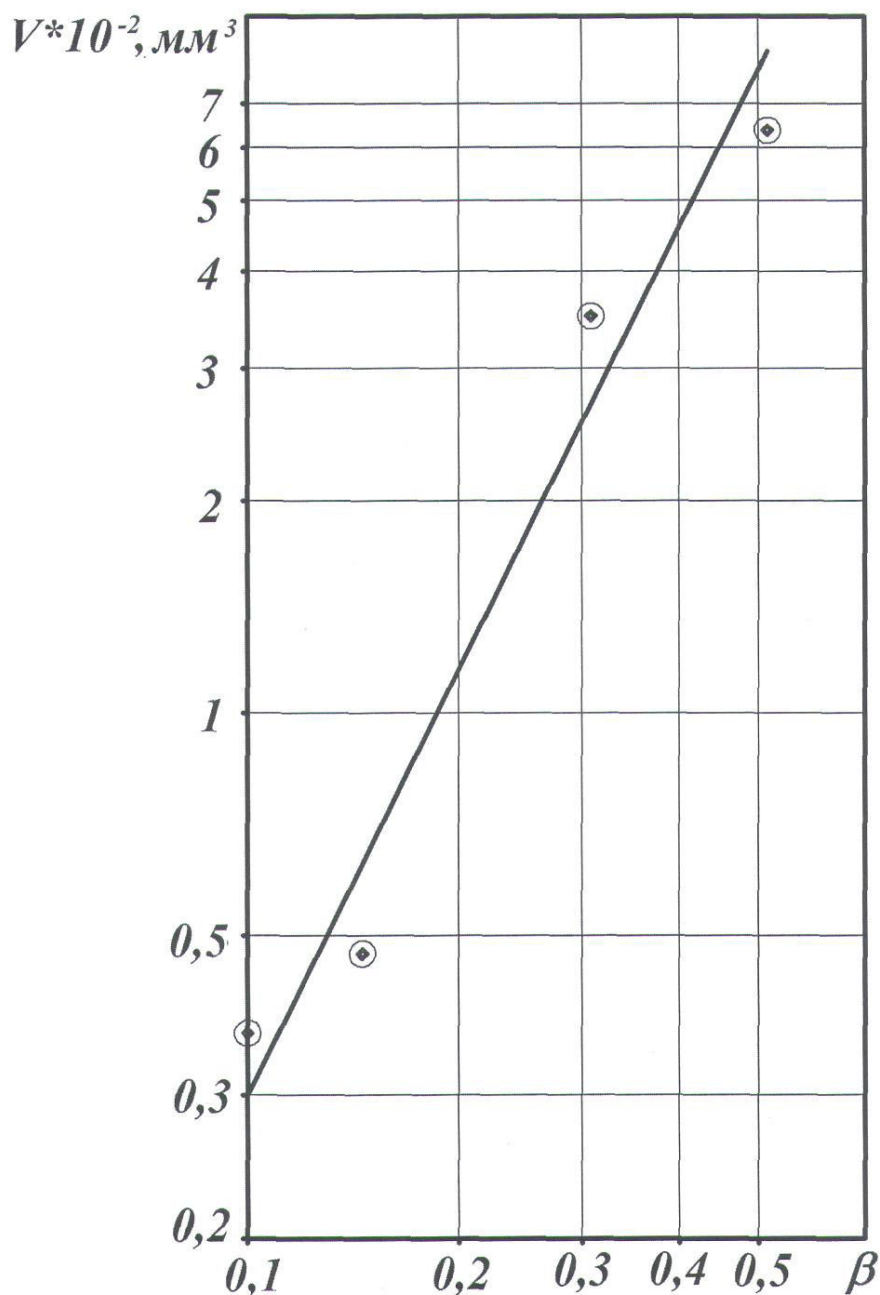


Рисунок 1.6 – Износ сопряжений из одинаковых материалов (TiC-ЖС6У; ЖС6У; TiC-ЖС6У с покрытием из Zr-Ti-N-C и TiN), в зависимости от пьезокоэффициента β [58]

Наиболее полно и глубоко явления трения и износа в вакууме, создаваемом с помощью различных *механических компрессоров*, изучены в работах [60 – 61]. В более поздних работах [62 – 65] исследуется в основном решение некоторых частных вопросов повышения работоспособности

отдельных элементов узлов трения компрессоров. Каких либо обобщающих выводов и результатов эти работы не содержат. Вместе с тем, некоторые закономерности в этих работах прослеживаются.

Большинство исследователей сходятся во мнении, что при понижении давления газовой среды защитное действие окисных пленок поверхностного слоя контактирующих деталей уменьшается и растет адгезионная составляющая сил трения. При этом нарушается положительный градиент механических свойств в точках контакта, в результате чего происходят изменения характеристик трения и износа [66]. Но возможны отклонения: в зависимости от свойств материалов контактирующих поверхностей и конкретных параметров трения реализуются те или иные конкурирующие физико–химические и механические процессы [67, 68]. В результате чего возникают переходные (пороговые) явления при трении. Эти явления связаны со структурными или фазовыми переходами, с процессами упрочнения и разупрочнения, изменением химического взаимодействия с окружающей средой и т.п. Это можно проиллюстрировать рис. 1.7, взятым из [66]. На этом рисунке представлено влияние состава и давления остаточных газов на интенсивность изнашивания стали. Из рис. 1.7 видно, что содержание кислорода является одним из факторов, определяющих резкое повышение износа при достижении определенной степени разряжения. К сожалению, при этом не приводится каких-либо данных о поведении характеристик адгезионного взаимодействия. Возможно, именно они являются определяющими в том, что при трении в вакууме в большинстве случаев интенсивность износа сопряжений в десятки раз возрастает.

Подшипники *тележек для сушки и обжига кирпича* также работают в ЭУТИ. Наиболее полно и детально изучены в работах Дроздова Ю.Н. и его школы [69,70].

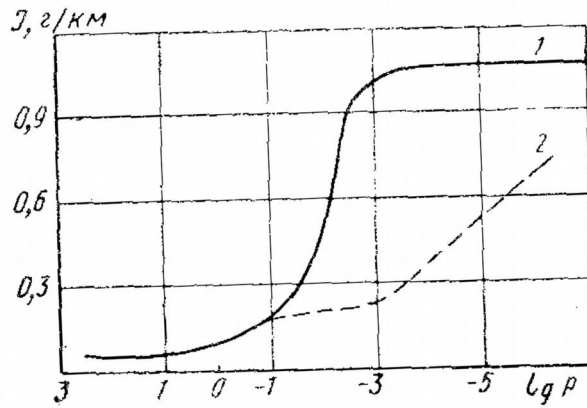


Рисунок 1.7 – Влияние состава остаточных газов на интенсивность износа стали 45 при скорости скольжения 2,4 м/сек [66]:

1 – без напуска кислорода; 2 – с напуском кислорода

Можно еще указать ряд работ, в которых рассматриваются вопросы высокотемпературной трибологии [71 – 73]. В указанных выше работах отмечается, что при большом давлении и повышенных температурах в зоне трения образуется «узел схватывания», так называемое «третье тело» [66], который может иметь более высокую прочность, чем основной металл, находящийся в глубине детали. Тогда разрушение поверхности будет происходить в менее прочном материале с образованием задира [59] и повышением износа. Находящиеся на поверхностях трения пленки окислов и различные загрязнения препятствуют образованию соединений (адгезионных связей [60]). С повышением температуры контакта материал деталей размягчается, пленки частично удаляются, в результате чего резко увеличивается склонность поверхности к схватыванию [74].

В условиях высоких давлений и температур на фрикционном контакте происходит сближение атомов контактирующих материалов на расстояние межатомного взаимодействия и обмен электронами, что приводит к образованию прочных химических связей «узлов трения», которые в работе [66] названы «третьим телом».

Таким образом, из приведенного выше анализа следует, что при выборе материалов для ТНТС, работающих в ЭУТИ на первый план выступает совместимость трущихся поверхностей [53], т.е. способность данной пары в смазочной среде или в ее отсутствии приспособливаться друг к другу в процессе взаимного перемещения, обеспечивая заданную долговечность. Выше отмечено, что при трении появление задира связано с наступлением порога внешнего трения, а он, как следует из работы [75], зависит от отношения τ_{mn} прочности адгезионных (межатомных и межмолекулярных) связей к давлению p_{rn} , при котором происходят пластические деформации на подвижном фрикционном контакте.

В работах [58,76,77] предложено оценивать совместимость трущихся поверхностей величиной C , являющейся по существу индексом совместимости:

$$C = \frac{\tau_{mn}}{p_{rn}} \quad (1.2)$$

В этих работах показано, что

$$C = \frac{\tau_{mn}}{p_{rn}} \approx \beta, \quad (1.3)$$

где β - коэффициент влияния повышения давления на прочность адгезионных связей на срез.

Установлено, что пороговой температуре трения $\theta_{пор}$ соответствует пороговое значение коэффициента $\beta_{пор}$ и зависит оно от химического и структурно-фазового состава контактирующих материалов, степени деформационного упрочнения и пр.

Следовательно, в этих работах предложен и апробирован критерий, позволяющий вести целенаправленные работы по повышению работоспособности тяжело нагруженных подвижных сопряжений с учетом заданных эксплуатационных условий.

Из исследований в области трибологии рабочей зоны контактирования инструмента с обрабатываемым материалом следует отметить работы [78 – 80], в которых проблема повышения износостойкости инструментов

решается за счет создания условий для адаптации поверхностей трения в процессе резания металлов. При этом используются методы неравновесной термодинамики [81 – 83], а в работе [84] впервые приведены функциональные зависимости интенсивности изнашивания лезвийного инструмента от показателей адгезионного взаимодействия в зоне резания.

Показано, что независимо от обрабатываемого материала зависимость линейного износа J_h от отношения предельной прочности $\tau_{\text{пп}}$ адгезионных связей на срез к твердости HV инструментального материала (с учетом температуры резания) описывается степенной функцией

$$J_h = A \cdot \left(\frac{\tau_{\text{пп}}}{HV} \right)^m, \quad (1.4)$$

где параметры A и m зависят от марки инструментального материала.

В работе [30] на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований [80] изучены термодинамические условия структурно – фазовой адаптации поверхностей трения с учетом их изнашивания в процессе резания металлов. Авторы получили следующее выражение для оценки линейной интенсивности изнашивания J_h :

$$J_h = \frac{2X^2 \cdot k}{Y} \cdot \frac{\tau_{\text{пп}} \cdot D_{\text{ср}}}{\lambda_{\text{ср}} T \rho}, \quad (1.5)$$

где X – некоторая часть механической энергии трения, которая рассеивается в виде тепла; Y – некоторая часть общего производства энтропии при трении, которая расходуется на формирование потока вещества; $\lambda_{\text{ср}}$ – средняя теплопроводность; T – температура; $D_{\text{ср}}$ – средний коэффициент диффузии во вторичных структурах в предположении независимости их от скорости резания; $\lambda_{\text{пп}}$ – предельная прочность адгезионных связей на срез в условиях скольжения контакта; ρ – плотность вещества изношенных частиц; k – коэффициент пропорциональности между массой изношенных частиц и потоком энтропии.

Приведенные в работе [30] экспериментальные данные по изнашиванию инструментов при различных видах лезвийной обработки показывают, что формула (1.4) адекватна этим данным при повышении

температур до некоторой величины $T_{\text{хар}}$, названной [30] как характерная, именно при этой температуре интенсивность изнашивания инструмента минимальная. Профессор А.Д. Макаров назвал эту температуру оптимальной температурой резания θ_o .

Объясняется это тем, что до температуры $T_{\text{хар}}(\theta_o)$ состояние вторичных структур (ВС) на фрикционном контакте «инструмент - обрабатываемый материал» является стационарным с минимальным производством энтропии. При температурах выше $T_{\text{хар}}(\theta_o)$ могут устанавливаться новые связи между потоком вещества (износом) и температурой, которые связаны с появлением новой структуры, способствующей упорядочению системы. Новым источником диссипации энергии может быть, например, не самопроизвольная химическая реакция с отрицательным производством энтропии, инициируемая трением [86,87]. Такие реакции могут происходить при трении на воздухе [88] и в присутствии различных сред, в том числе смазки [89,90].

Следует при этом заметить, что термодинамические аспекты трения в присутствии смазочной среды в настоящее время недостаточно изучены [91]. Актуальность этого вопроса особенно возрастает, если учесть установленный факт взаимосвязи величин пороговой $\theta_{\text{пор}}$ и характерной $T_{\text{хар}}(\theta_o)$ температур на фрикционном контакте [92]. При этом показано, что химические и структурно - фазовые составы контактирующих материалов, повышающие пороговую температуру $\theta_{\text{пор}}$, т.е. повышающие работоспособность подвижных сопряжений неизменно приводят к снижению оптимальной температуры θ_o резания этих материалов (т.е. снижению их обрабатываемости резанием).

Таким образом, исследования совместимости трущихся поверхностей с учетом окружающей среды не только открывают новые возможности повышения работоспособности сопряженных подвижных деталей, но и позволяют прогнозировать оптимальные режимы резания при их изготовлении.

Термодинамические аспекты обработки материалов давлением в настоящее время изучены недостаточно. И проблемы с образованием задира в зонах касания инструмента с деформированным материалом имеются [92], т.е. и здесь на первый план выступает проблема совместимости трущихся поверхностей как для тяжело нагруженных трибосопряжений.

1.2.2. Смазочные материалы

Наиболее важной функцией смазки является уменьшение сил внешнего трения (коэффициент трения) и снижение износа.

Смазочные материалы независимо от их назначения и условий применения должны отвечать следующим требованиям [93]:

- надежно выполнять свои функции в заданном диапазоне температур, нагрузок, скоростей перемещения;
- минимально изменять свои свойства при внешних воздействиях в условиях эксплуатации и хранения;
- не оказывать воздействия на контактирующие с ними материалы;
- не оказывать вредного воздействия на окружающую среду (экологическая безопасность);
- обеспечивать максимальную взрыво- и пожаробезопасность;
- должны быть обеспечены максимально дешевыми недефицитными сырьевыми компонентами.

Смазочные материалы по агрегатному состоянию обычно подразделяют на жидкие (масла), пластичные (пластичные смазки), твердые и газообразные.

В основе жидких смазочных материалов (масел) – базовые масла, в которые для повышения уровня тех или иных служебных свойств добавляют присадки. Особенностью твердых смазочных материалов является то, что они обладают меньшим сопротивлением сдвигу, чем тот, из которого изготовлены трущиеся детали. Пластичные смазки занимают промежуточное положение между маслами и твердыми смазочными материалами. Они представляют

собой многокомпонентные коллоидные системы, содержащие дисперсионную среду — жидкую основу (масло) и дисперсную фазу — загуститель (10...30 %). Они могут содержать также добавки, присадки и наполнители для улучшения эксплуатационных свойств. Загуститель делает жидкое масло малоподвижным, оно не растекается под действием собственного веса, не меняет своей формы подобно твердому телу, и начинает течь лишь под действием нагрузок, превышающих некоторый предел прочности.

Выбирают тип смазочного материала по условиям работы узла трения [94,95]. Например, для смазывания двигателей внутреннего сгорания используются жидкие смазочные материалы. Они используются для смазывания в условиях циркуляционной системы смазки других агрегатов. Если же смазочный материал можно ввести только при монтаже узла трения или периодически, то используют пластичные смазки. В условиях, когда жидкие или пластичные смазочные материалы неприменимы, например, в условиях глубокого вакуума и ионизирующего излучения, то применяют твердые смазочные материалы.

По назначению пластичные смазки делятся на три основные группы:

- смазки антифрикционные — снижают износ и трение сопряженных деталей, предотвращающие заедание узлов трения.
- смазки консервационные — снижают коррозионное разрушение металлоизделий.
- смазки уплотнительные — герметизируют зазоры и неплотности узлов и деталей.

Требования к качеству пластичным смазкам определяются конкретными условиями их эксплуатации в технике. Они должны не вытекать из узла трения, но в то же время подтекать к парам трения и обеспечивать их смазывание. Наиболее важны объемно-механические и смазочные свойства смазок.

Объемно — механические свойства смазок. Частицы загустителя образуют в дисперсной среде структурный каркас, наличие и состояние

которого определяет реологическое поведение пластичной смазки. При весьма малых нагрузках пластичная смазка ведет себя подобно твердому телу и подчиняется закону Гука, а после того, как будет превзойден некоторый предел прочности, он ведет себя как вязкое тело. При напряжениях, превосходящих предел прочности, течение смазки будет сопровождаться непрерывным разрушением и восстановлением (вследствие тиксотропных свойств смазок) структурного каркаса, но при высоких скоростях деформации каркас уже не успевает восстанавливаться.

Важнейшей прочностной характеристикой пластичных смазок является значение предела прочности на сдвиг. Оно соответствует минимальному напряжению, при достижении которого происходит необратимая деформация (сдвиг) смазки. Эта величина отражает способность пластичных смазок поступать к рабочим поверхностям и задерживаться на них и не стекать с вертикальных и наклонных поверхностей, а также не вытекать из негерметизированных узлов трения. При большом пределе прочности смазка может не подтекать к трибологическому контакту. Повышение температуры смазки уменьшает предел прочности. Пределом работоспособности пластичной смазки является температура, при которой предел прочности приближается к нулю, т. е. смазка переходит в жидкое состояние и вытекает из узла трения.

От вязкостных свойств пластичных смазок зависит прокачиваемость смазок, их сопротивление относительному перемещению пар трения, а также способность доставки смазки. Как и вязкость масел, вязкость смазок зависит от температуры.

Следует иметь в виду, что значительное разупрочнение смазки при интенсивном механическом воздействии приводит к ее вытеканию из узла трения, а чрезмерное уплотнение смазки при восстановлении каркаса может затруднить подачу смазки к узлу трения. Механическая стабильность прежде всего обеспечивается типом и концентрацией загустителя, составом и

свойствами дисперсионной среды, а также наличием в системе поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Механические свойства смазок оценивают также по величине пенетрации. Этот показатель чисто сравнительный и не определяющий эксплуатационных свойств смазок, но удобен для оценки воспроизводимости их свойств. В ряде зарубежных стран на величине пенетрации базируется классификация пластичных смазок.

Трибологические параметры пластичных смазок, характеризующие их противоизносные, противозадирные и антифрикционные свойства, зависят от целого набора факторов: состава смазки, технологии ее приготовления, толщины смазочного слоя, степени заполнения узла трения и т.д. При этом влияние различных факторов для различных групп смазок проявляется в различной степени. Важным свойством пластичных смазок является легкость подтекания смазочного материала в зону трения.

Обычно, смазочные свойства пластичных смазок оценивают по результатам испытания на стандартной четырехшариковой машине по методике, аналогичной применяемой при испытании масел.

Пластичный смазочный материал состоит, как минимум, из двух компонентов: масла (дисперсионной среды) и загустителя (дисперсной фазы). Дисперсная фаза, образующая структурный каркас смазки, по-существу определяет ее свойства. Однако, дисперсионная среда, воздействуя на изменение размеров частиц дисперсной фазы, оказывает влияние на структуру и свойства смазок. Например, с увеличением содержания ароматических углеводородов в нефтяных маслах существенно увеличиваются размеры волокон каркаса мыльных смазок. В состав пластичных смазок вводят также различные модификаторы структуры, которые обеспечивают формирование их оптимальной структуры, и добавки (малорастворимые присадки и твердые наполнители), которые придают смазке необходимый уровень функциональных свойств.

Ниже подробнее рассмотрены основные компоненты современных пластичных смазок.

Дисперсионная среда. Это жидкая основа пластичных смазок. Она составляет 80...90 % массы смазки и представляет собой нефтяное (от 70 до 95 % общего выпуска), синтетическое или растительное масло. Широкое применение нефтяных масел как жидкой основы пластичных смазок обусловлено их доступностью, относительной дешевизной и хорошей совместимостью с загустителем. В основном это нефтяные дистиллятные масла (вязкостью 5...120 мм²/с при 50 °С) или их смеси с остаточными маслами.

Более дорогие синтетические масла применяют в качестве дисперсионных сред пластичных смазок, предназначенных для работы в широком интервале температур и давлений, при контакте с абразивными средами, а также для работы в вакууме. Весьма эффективны смеси синтетических и нефтяных масел, поскольку они существенно дешевле, но при оптимальном сочетании компонентов позволяют получить смазки с высоким уровнем эксплуатационных (в частности объемно-механических и смазочных) свойств. Перспективным сырьем для дисперсионных сред пластичных смазок являются растительные масла, продукты переработки которых отличаются высокой термостабильностью и эффективны в смазках специального назначения.

Дисперсная фаза (загуститель). По типу загустителя пластичные смазки, как уже отмечено выше, могут быть мыльными, углеводородными и неорганическими.

Более 80 % пластичных смазок выпускают на мыльных загустителях. По типу катиона их делят на кальцевые, бариевые, литиевые и т. д. (порядка 10 мыл и их смесей). Состав и строение анионной части молекул мыла, оказывающей также большое влияние на структуру и свойства смазок, определяются применяемым жировым сырьем. Так, кальцевые и литиевые смазки, приготовленные на смесях индивидуальных жирных кислот, имеют в

2...3 раза больший предел прочности, чем приготовленные на мылах любой из исходных кислот в отдельности.

В зависимости от применяемого сырья для приготовления мыльных загустителей выделяют смазки на синтетических жирных кислотах СЖК (полученных путем окисления парафинов), на природных жирах и на технических жирных кислотах (стеариновой, 12-оксистеариновой). Эффективны комплексные мыльные смазки, приготовленные на мылах высших жирных и солях низкомолекулярных органических (а также иногда и минеральных) кислот. Такие смазки называют в зависимости от катиона комплексными кальциевыми, комплексными литиевыми, комплексными алюминиевыми – смазками. Для каждой группы мыльных смазок существует свой интервал концентрации загустителя, модификаторов структуры и технологические режимы приготовления, обеспечивающие стабильную структуру.

К твердым углеводородам, применяемым в качестве загустителя, относятся церезины, петролатумы, парафины и их смеси. Они легкоплавки и применяются, главным образом, в консервационных смазках.

Широким температурным диапазоном работоспособности, эффективностью в условиях контакта с радиоактивными средами и хорошей радиационной стабильностью обладают пластичные смазки, в качестве загустителя которых используют продукты неорганического происхождения. Это силикагель, бенотонитовые глины и технический углерод. Обычно эти загустители имеют низкую смазочную и защитную способность.

Для формирования требуемой коллоидной структуры пластичных смазок в их состав кроме дисперсионной среды и загустителя вводят небольшие количества веществ органического или неорганического происхождения, называемых модификаторами структуры. Роль первых из них выполняют полярные компоненты дисперсионной среды (смолы, нефтяные кислоты), присадки, вводимые в смазку до формирования структуры, а также продукты, образующиеся в смазках при их изготовлении (так называемые

технологические ПАВ – продукты окисления дисперсной среды, избыток жирового сырья и продукты его превращений). Неорганические модификаторы структуры (вода, избыток щелочи в мыльных смазках и др.) также могут быть отнесены к технологическим ПАВ.

Повышение уровня функциональных свойств пластичных смазок достигается прежде всего *введением добавок — маслорастворимых присадок, твердых добавок и их композиций*. В основном, в пластичных смазках используют те же присадки, что и в маслах, хотя проявление функционального действия присадок осложняется присутствием загустителя, его взаимодействием с поверхностью твердого тела, с другими компонентами смазки. Следует иметь в виду, что присадки имеют значительную поверхностную активность на границе раздела фаз: дисперсная фаза – дисперсионная среда, что может оказать существенное влияние на формирование структуры смазки и на ее свойства, в том числе вызвать ее разупрочнение.

Как было заявлено выше, одним из направлений исследования в данной работе является: на основе выявленных закономерностей влияния на совместимость трущихся поверхностей контактирующих материалов, смазки и ЭУТИ улучшение служебных свойств пластичной смазки.

Характеристики смазок во многом зависят от свойств масляной основы: их окисляемость; работоспособность смазок в определенном интервале температур, силовых и скоростных нагрузок; коллоидная стабильность смазок; защитные свойства смазок; устойчивость к агрессивным средам и т.д.

Известно, что окисление моторного масла в двигателях внутреннего сгорания приводит к образованию смол, нагара и разрушению присадок; присутствующих в нём, и как следствие, к снижению эксплуатационных свойств. Вместе с тем, во многих работах показано, что окисление сераорганических соединений, содержащихся в базовой основе масла (сульфидов, тиофенов), улучшает эксплуатационные свойства смазочного материала, высокотемпературные и триботехнические характеристики.

По данной тематике опубликованы работы, в которых исследовалось окисление (окислительное обессеривание) [96, 97] нефтепродуктов, в том числе и масляных дистиллятов [98,99]. В этих работах установлено, что при окислении нефтепродуктов происходит процесс превращения содержащихся в них сульфидов в сульфоксиды и в сульфоны – более термоустойчивые соединения.

Промышленное производство базовых масел включает в себя процессы селективной очистки масляных дистиллятов и деасфальтизаторов, депарафинизации рафинатов, контактной очистки глиной, гидроочистку. При селективной очистке масляных фракций избирательными растворителями в основном удаляются ароматические углеводороды, сераорганические соединения и смолы.

В больших количествах сульфиды являются одной из причин ухудшения термохимической стабильности (образования твердой фазы при повышенной температуре) и усиления коррозионной активности нефтяных масел [100,101]. Вместе с тем, существует метод [99] окисления сераорганических соединений (сульфидов) и перехода их в сульфоксиды и сульфоны, которые затем можно отделить от углеводородов с помощью избирательного растворителя вместе с нежелательными компонентами.

Сульфоксиды и сульфоны, полученные при окислении нефтяных сульфидов, обладают широким спектром ценных свойств и областей применения, в частности, нефтяные сульфоксиды являются эффективными флотореагентами и экстрагентами при извлечении редких и благородных металлов, представляют интерес в качестве лечебных препаратов для крупного рогатого скота, функциональных добавок в полимерной и резинотехнической промышленности [99]. Смазочные материалы, содержащие соединения сульфаксидов и сульфонов, обладают более высокими эксплуатационными свойствами (смазывающими и высокотемпературными характеристиками). В этих работах авторы экспериментально подтверждают, что избирательное окисление

сераорганических соединений масла значительно улучшает его смазывающие свойства. Исследования поведения окисленных масляных фракций показали положительное влияние процесса окисления на триботехнические характеристики масел. В работе [102] показано положительное влияние окисления нефтяного масла на его трибологические свойства, так как работоспособность масла во многом зависит от показателя пороговой температуры выгорания [100]. В процессе окисления масляной фракции, содержащиеся в ней сульфиды окисляются до сульфонов, а соединения сульфонов выдерживают более высокие температуры, в отличие от сульфидов. Активированное таким образом нефтяное масло является смазочным материалом с высокой термостойкостью [102].

В настоящее время известно несколько способов окисления сераорганических соединений содержащихся в нефтепродуктах и масляных дистиллятах в том числе. Одним из основных и существенных показателей производительности способа является глубина окисления сульфидов в сульфоксиды и сульфоны.

Пероксид водорода в среде уксусной кислоты является классическим окислителем сульфидов до сульфоксидов. Известны различные варианты окисления сульфидов пероксидом водорода с целью получения как индивидуальных сульфоксидов и сульфонов, так и смеси нефтяных сульфоксидов [103]. Выделение сульфоксидов из органического слоя проводится методом элюэнтной адсорбционной хроматографии на силикагеле [97,103]. Известен перхлоратный способ получения сульфоксидов из нефтяного сырья [104]. Он не требует предварительного получения сернисто-ароматических концентратов и применения растворителя уксусной кислоты. При этом конверсия исходных сульфидов составляет около 85 содержащихся в нефтяном дистилляте. Известен способ получения нефтяных сульфоксидов окислением концентрата сульфидов 27-40 %-ным пероксидом водорода без растворителя и эмульгатора при температурах 70-100°C с добавкой каталитических количеств серной кислоты [105].

Технология озонолитического обессеривания дизельных топлив была апробирована на Ташкентском асфальто-битумном заводе на примере получения прямогонного дистиллята (200 – 350 °С), содержавшего 3,34 % масс. серы, в том числе 1,80 % - сульфидной, 0,32 % - сульфоксидной и 1,22 % - тиофеновой [106].

Установлено, что при расходе озона 96 г/кг из исходного топлива удаляется около 54 %, при трехкратном увеличении расхода озона - около 85 %, а при четырехкратном - более 90 % первоначально содержащейся в нем серы.

При этом, концентрация серы в извлекаемых экстрактах повышалась максимально до 9,9 % масс., за счет присутствия в них до 70 % масс. сульфоксидов и сульфонов.

Как было отмечено выше, для улучшения функциональных свойств пластичных смазок в них вводят модификаторы структуры, добавки и различные наполнители.

В настоящее время исследователи и производители обратили внимание на так называемый углеродный каркас (УК), который представляет собой продукцию переработки нефти, минерального масла, получаемый в результате реакции Фриделя-Крафтса [107], а после длительной очистки и нагрева осадок становится нейтральным и содержит в связанном виде химические элементы, которые могут повысить противозадирные и противоизносные свойства пластичных смазок [94, 101]: углерод, сера, фосфор и др.

Проведённые исследования [108] показали, что УК является весьма перспективным материалом для использования в качестве модифицирующей добавки, существенно улучшающей триботехнические характеристики пластичных смазочных материалов (ПСМ).

Однако в литературе отсутствуют сведения о комплексном влиянии сочетания УК, вида и состояния дисперсионной среды, загустителя и пр. на трибологические характеристики ПСМ.

1.3. Вопросы трибологии эндопротезов, применяемых при артропластике тазобедренных суставов

1.3.1. Особенности трения и изнашивания

Артропластика тазобедренного сустава — один из наиболее эффективных способов двигательной реабилитации при поражениях крупных суставов скелета. Однако в послеоперационном периоде возникает ряд проблем, решение которых позволит уменьшить частоту неудовлетворительных исходов. Примером может послужить расшатывание в эндопротезах, которое в большинстве случаев связано с износом трибосопряжений [41,108-110]. Поиск новых материалов для оптимизации функционирования имплантата позволил улучшить эксплуатационные качества современных эндопротезов, однако ещё сохраняется ряд нерешённых задач [111,112]. Помимо рассматриваемого кинематического узла трения между головкой эндопротеза и вкладышем существуют ещё несколько трибосопряжений: “вертлужная впадина — вертлужный компонент”, “головка эндопротеза — конус шейки имплантата”, “вертлужный компонент — вкладыш”, “бедренный компонент — бедро”, в которых происходит предварительное смещение (в пределах 100 мкм) с неполным коэффициентом трения покоя [113]. Указанные трибосопряжения работают в условиях фреттинг-коррозии, что в дальнейшем приводит к нестабильности и расшатыванию всего имплантата. Вместе с тем, изученный кинематический узел трибосопряжения между головкой эндопротеза и вкладышем эндопротеза является наиболее важной парой трения, так как в основном от него зависит срок службы имплантата. Разнообразие пар эндопротезов говорит об отсутствии “золотого стандарта” [41]. В связи с этим представляет практический и научный интерес оценка пар трения (с учетом индекса

совместимости трущихся поверхностей), применяемых при артропластике суставов.

В представленном ниже обзоре литературы по рассматриваемому вопросу следует иметь в виду, что представляемые результаты получены, как правило, в лабораториях фирм-производителей эндопротезов на аппаратуре, имитирующей работу тазобедренного сустава человека. С одной стороны, эти результаты конкретны, реальны и решают поставленные конкретные задачи. Но с другой стороны эти результаты затрудняют делать какие-либо обобщающие научные выводы и давать перспективные рекомендации. Кроме того, следует при этом учитывать, что в эндопротезах происходит износ пары трения (с соответствующим смещением элементов эндопротеза). В отличие от износа инструмента (одного элемента пары трения) в операциях механообработка материала.

Основными проблемами эндопротезирования суставов в настоящее время является изнашивание эндопротезов и воспалительные реакции тканей, инициированные продуктами износа [41, 108, 109]. Возрастающий уровень требований к медицинскому обслуживанию населения обусловлен необходимостью повышения трибологического ресурса эндопротезов.

Многолетний опыт эндопротезирования позволил установить наиболее рациональные сочетания материалов в эндопротезах суставов [114]. Они приведены в таблице 1.1. Как показали исследования [114], чашки из полимера СВМПЭ хорошо работают в паре с головкой из керамики (скорость изнашивания 0,05-0,13 мм/год) и со всеми металлическими сплавами, кроме титановых. Титан в биологической среде инициирует коррозионное механическое изнашивание головок [115]. Материалы ПОМ и ПЭТФ обладают низкой износостойкостью.

Таблица 1.1 – Применение пар трения в эндопротезах тазобедренного сустава [115]

Материал головки	Материал чашки						
	Полимеры					Металл	Керамика
	ПТФЭ	СВМП	ТФХЭ	ПОМ	ПЭТФ	CoCrMo	Al ₂ O ₃

		Э					
FeCrNiMo	×	++	×	●	●	—	—
FeCrNiMoNbN	●	++	—	●	●	—	—
CoCrMo	●	++	×	×	×	++	—
TiAlV	●	×	×	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	●	++	●	●	●	—	++
ZrO ₂	●	+	●	●	●	—	—

Примечание: «+» – клиническая апробация; «++» – многолетнее клиническое использование; «—» – непригодно по техническим причинам; «●» – не исследовалось; «×» – клинически непригоден. СВМПЭ – сверхвысокомолекулярный полиэтилен; ПТФЭ – политетрафторэтилен; ПОМ – полиоксиэтилен; ТФХЭ – тифторхлорэтилен.

Многие ортопеды с парами трения «металл - металл» связывают серьёзные надежды на улучшение результатов эндопротезирования. Например, пара трения CoCrMo – CoCrMo показывает скорость изнашивания менее десятка мкм в год.

Наиболее низкую скорость изнашивания (менее 5 мкм/год показывает пара трения Al₂O₃ – керамика с Al₂O – керамикой. В настоящее время основными материалами для изготовления эндопротезов тазобедренного сустава является [116]: для чашек – полимер СВМПЭ, для головок – FeCrNiMoMn, CoCrMo и керами Al₂O₃.

Изнашивание головок из нержавеющей стали FeCrNiMnMoNbN (JSO 5832/9) примерно одинаково с головками из сплава CoCrMo. Но головки из сплава CoCrMo более устойчивые к механическим повреждениям и абразивному изнашиванию, а при работе с вкладышами из СВМПЭ показывают скорость изнашивания, сопоставимую с аналогичным показателем пары трения «СВМПЭ – Al₂O₃ – керамика». Элементы эндопротезов из титановых сплавов ещё не нашли должного применения из-за низких трибологических характеристик титана и его сплавов, но работы по усовершенствованию таких эндопротезов ведутся.

В настоящее время проводятся исследования по применению металлического циркония для изготовления головок. Однако, металлической цирконий – труднообрабатываемый материал с высокой стоимостью. Его

биосовместимость недостаточно изучена, он даёт остаточную радиацию, но имеет весьма высокую износостойкость.

В работе [117] сообщается о рекордной износостойкости пары CoCrMo-CoCrMo. Чашка и головка эндопротезов из этого сплава с высоким содержанием углерода (более 0,2%) были изготовлены компанией Mathus Medikal Ltd. Исследования показали, что скорость изнашивания эндопротезов Mathus составляет всего 2 мкм/год.

Изнашивание чашек. Имплантируемые эндопротезы в подавляющем большинстве содержат чашки (вкладыши) из СВМПЭ (рис. 1.8) [118].

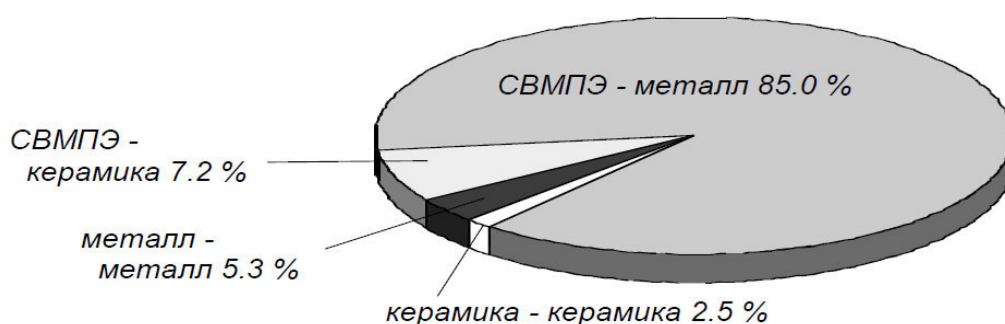


Рисунок 1.8 – Объемы использования эндопротезов тазобедренного сустава в зависимости от сочетания материалов в паре трения эндопротезов [118]

Как видно из этой диаграммы, примерно в 85% эндопротезов применяется металлополимерный материал СВМПЭ благодаря низкому коэффициенту трения, высокой технологичности, хорошим демпфирующим свойствам и низкой цене. В работе [119] показано, что изнашивание СВМПЭ в паре с металлическим контртелом происходит по установленному механизму (рис. 1.9). Под воздействием динамических нагрузок происходит установленный износ поверхностей трения с образованием подповерхностных трещин, расширению с последующим образованием продуктов износа.

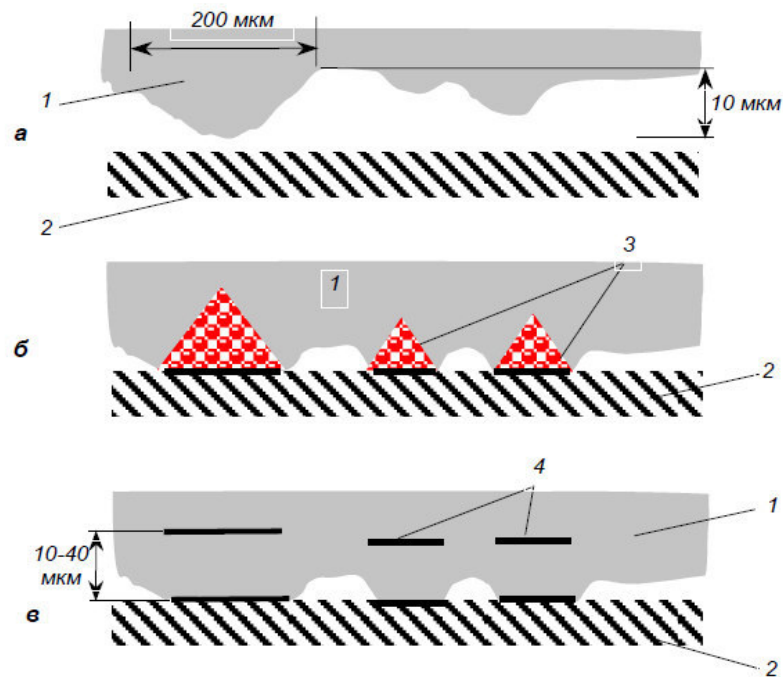


Рисунок 1.9 – Механизм изнашивания полиэтилена в имплантированных эндопротезах [119]: а – начало контактирования; б – нагружение пары трения и изнашивание микровыступов; в – начальная фаза разрушения СВМПЭ; 1 – полимер; 2 – металл; 3 – зона концентрации напряжений; 4 – трещина

Альтернативой полимерных материалов в настоящее время является полиэфирэфиркетон с углеволокном [120]. Испытания на имитаторе чашек из эргоматериала в паре с керамической головкой показали что, износ был в 30 раз меньше, чем у пар с «ВМПЭ-керамика». Кроме того этот материал имеет большую биосовместимость и высокую химическую стабильность, но большая жесткость полиэфирэфиркетона снижает деформирование эндопротезом ударных нагрузок, что ускоряет механическое повреждение эндопротезов.

Как показали исследования [120], керамические компоненты эндопротезов изнашиваются с достаточно малой скоростью (1-5 мкм/год). Частицы износа Al_2O_3 -керамика биоинертна и на них не развивается клеточная реакция.

1.3.2. Биологические среды

Жидкость, заполняющая полость суставов в естественных условиях, называется синовиальной жидкостью (СЖ). Эта жидкость представляет собой густую эластичную массу прозрачную и слегка желтоватую. Она выполняет в организме функцию внутрисуставной смазки, предотвращающей контакт суставных поверхностей и их изнашивание; обеспечивает питание суставного хряща; служит дополнительным амортизатором и т.п. Синовиальная жидкость продуцируется синовиальной оболочкой и заполняет ее полость [121].

СЖ состоит в основном из 2-х компонентов: жидкостного и белково-полисахаридного, т.е. СЖ представляет собой, по сути, плазму крови. Вязко-эластичные свойства СЖ обеспечивают гиалуронан-полисахарид из группы гликозаминогликанов. Гиалуронан обеспечивает также эластичность хряща.

При нагружении суставов из глубоких слоёв хряща через поры и пространства между волокнами выделяется СЖ для смазки. Когда нагрузка уменьшается, СЖ уходит обратно внутрь хряща. Поэтому скольжение суставов хряща происходит практически без трения даже при значительных физических нагрузках. Любые нарушения в процессе синтеза СЖ приводят к различным поражениям суставов, таким как остеоартроз и др. [121].

Для имитации физиологической среды организма зачастую используют раствор Рингера [121]. Стандартный раствор Рингера состоит из 6,5 г NaCl, 0,42 г KCl и CaCl₂ в литре дистиллированной воды. Этот физиологический раствор с введённой глюкозой исследователи трибологии эндопротезов зачастую используют как биологическую смазочную среду [122].

В искусственных суставах (в том числе, эндопротезах) процесс смазывания происходит по иным механизмам, не позволяющим реализовать биологические механизмы, свойственные хрящу. В эндопротезах невозможно использовать трибологические свойства СЖ, не работает

механизм смазки суставов [123]. На основании изложенного, можно предположить, что ЭТБС работают в режиме граничного трения [94, 113], т.е. смазывание может происходить на малых участках трения, а на других участках – соприкосновение микронеровностей или наличие тонкой (доли мкм) плёнки СЖ, вязкость которой не оказывает влияния на трение.

В работе [124] приведены результаты расчётов толщины смазочной плёнки СЖ в искусственных и естественных суставах, которые изображены на рис. 1.10. Видно, что в здоровом тазобедренном суставе толщина СЖ до 2 мкм, в артрозном суставе – до 1 мкм, а в ЭТБС из «СВМПЭ-металл» толщина смазочной плёнки – до 0,2-0,5 мкм.

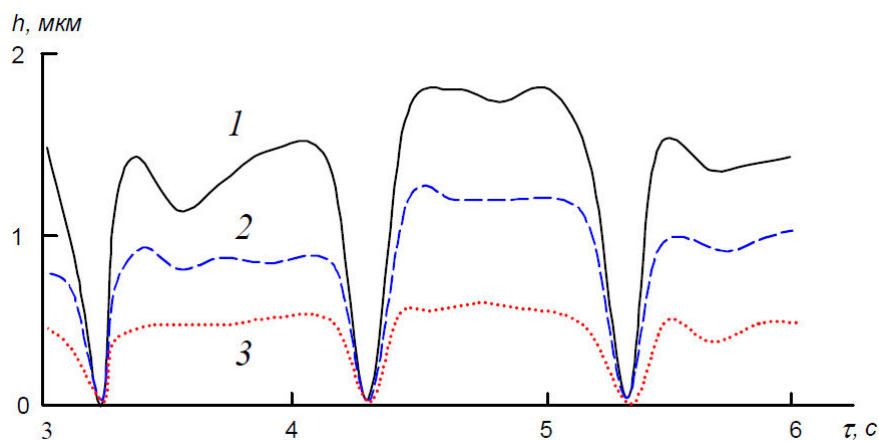


Рисунок 1.10 – Толщина слоя СЖ
во время ходьбы [124]: 1 – здоровый сустав; 2 – артрозный;
3 – эндопротез «СВМПЭ-металл»

В указанной выше работе, показано, что в эндопротезах с парами трения «керамика-керамика» и «металл-металл» значения толщины СЖ не превышают 0,1 мкм. Следовательно, состояние имплантированных ЭТБС ближе к артрозному суставу.

В работе [125] показано, что для улучшения смазки СЖ и уменьшения износа эндопротезов на поверхности металлических головок необходимо нанести с помощью алмазной иглы канавки, образующие регулярный микро рельеф (рис. 1.11). При этом, как показали исследования улучшается

смазывание поверхностей трения и уменьшающий момент трения металлической головки в паре с чашкой из СВМПЭ на 25-35%.

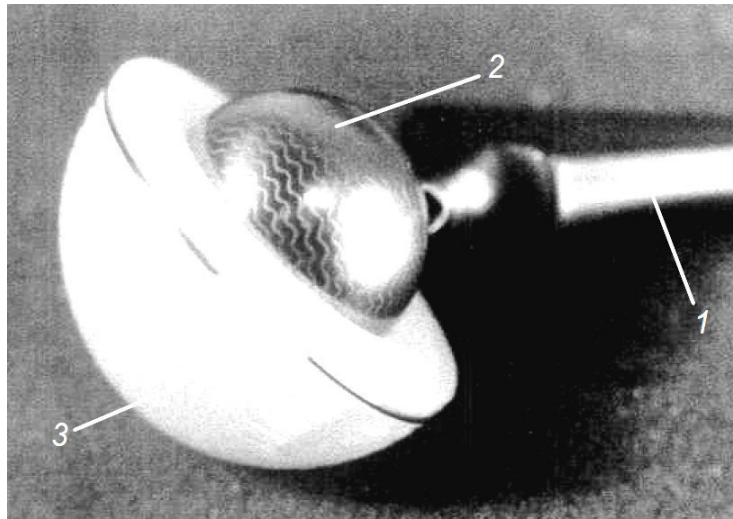


Рисунок 1.11 – Внешний вид узла трения эндопротеза тазобедренного сустава с микрорельефом на металлической головке [125]:

1 – ножка; 2 – головка; 3 – чашка из СВМПЭ

Хотя плёнка СЖ в эндопротезах имеет небольшую толщину, из рис. 1.12 видно, что ее наличие существенно уменьшает момент трения (с 5 Нм до 0,8 Нм) при контактировании в глюкозно-солёном растворе Рингера, имитирующем физиологическую среду организма [120]. В работе [122] показано, что коэффициент трения новых эндопротезов без смазки $\mu = 0,11 \pm 0,05$, а при смазке жидкой среды с вязкостью $\eta = 0,01$ Па·с – $\mu = 0,04 \pm 0,001$.

Таким образом, на основании выше приведённых данных можно констатировать, что работа имплантированных эндопротезов в биологической среде организма существенно отличается от функционирования естественных суставов и происходит в более тяжёлых условиях трения, чем на стендах, имитирующих работу естественных суставов.

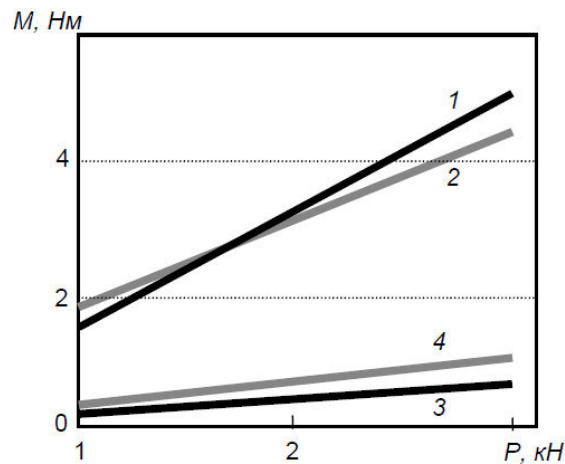


Рисунок 1.12 – Влияние нагрузки (P) и смазки на момент трения (M) в парах «чашка – головка» [120]:

1,3 – пара трения BIOLOX[®] – BIOLOX[®]; 2,4 – BIOLOX[®]/CBМПЭ.

1,2 – трение без смазки; 3,4 – трение в растворе Рингера при 37°

В работе [125] приведены средние скорости изнашивания различных пар трения в имплантированных эндопротезах тазобедренного сустава. К сожалению, эти сведения не позволяют сделать какие-либо обобщающие научные выводы и на их основании разработать рекомендации по повышению работоспособности эндопротезов тазобедренного сустава (ЭП ТБС), так как:

- не исследовано влияние контактирующих материалов, биологической среды и давления на прочность адгезионных связей на срез, которые играют при трении вращения [94] решающую роль в формировании трибологических характеристик пары трения в эндопротезах;
- не изучено влияние контактирующих материалов и биологической среды на совместимость трущихся поверхностей в эндопротезах;
- не разработаны научно обоснованные рекомендации по повышению работоспособности ЭП ТБС.

1.4 Пути повышения работоспособности подвижных сопряжений в экстремальных условиях трения.

Как было указано выше, практической целью данной научной работы является повышение работоспособности ПС ЭУТИ: тяжело нагруженных трибосопряжений – на основе совершенствования пластичного смазочного материала и ЭП ТБС – на основе обоснованного выбора материалов пар трения. Научным обоснованием для выбора пути, ведущего к достижению этой цели, могут быть теоретические предпосылки, подтвержденные экспериментально, а также закономерности, полученные на основе экспериментальных данных и имеющие научные объяснения.

Теоретическими предпосылками для достижения указанной цели в данной работе могут послужить:

- применение методов неравновесной термодинамики для оптимизации трибологических характеристик, успешно применённые в работах [30, 80, 86, 87];
- использование гидродинамической аналогии для оценки показателей адгезионного взаимодействия в подвижном фрикционном контакте с учётом контактирующих материалов, окружающей среды, температуры, давления и др. факторов, влияющих на совместимость трущихся поверхностей и их работоспособность. Этот метод успешно применялся в работах [58, 60, 76, 77 и др.].

Применение методов неравновесной термодинамики позволяет выявить условия (за счёт применения соответствующих материалов, смазочной среды и пр.), при которых в процессе трения происходит образование на фрикционном контакте вторичных структур (ВС), уменьшающих характеристики адгезионного взаимодействия в подвижных сопряжениях.

Гидродинамическая аналогия позволит объяснить формирование величины физико-механических характеристики так называемого «третьего тела» [66], образовавшегося на фактической площади касания твёрдых тел в результате адгезионного взаимодействия при трении, и влияние на них химического состава и структуры контактирующих материалов, температуры и окружающей среды. Эти характеристики «третьего тела», как показано

выше, по существу, формируют индекс совместимости трущихся поверхностей и этим самым существенно влияют на работоспособность подвижных сопряжений.

Представленные выше выражения (1.1) и (1.4) отражают закономерности, полученные на основе экспериментальных данных. Получение подобных зависимостей для ПС ЭУТИ позволит разработать рекомендации по повышению работоспособности эндопротезов тазобедренного сустава (с учётом возраста пациента, режима его жизни и пр.) за счёт правильного выбора материалов пары трения в эндопротезах с учётом совместимости контактных поверхностей, а также повысить работоспособность тяжело нагруженных трибосопряжений. Таким образом, реализация того и другого подхода к решению задачи повышения работоспособности ПС ЭУТИ требует проведения исследований триботехнических характеристик пар трения, в том числе показателей адгезионного взаимодействия с учётом материалов пар трения, давления, температуры и окружающей среды.

Выводы по главе I

1. К настоящему времени в публикациях по трибологии не предложен какой-либо общий подход, позволяющий с единых позиций выработать рекомендации по повышению работоспособности ПС ЭУТИ. Представленные в публикациях результаты решают в основном конкретные задачи улучшения работы таких узлов трения, что затрудняет делать какие либо обобщающие научные выводы и перспективные практические предложения.
2. Теоретическими предпосылками для выработки рекомендаций по повышению работоспособности ПС ЭУТИ могут послужить:
 - применение методов неравновесной термодинамики, которые позволяют выявить условия, при которых в процессе трения могут образовываться

вторичные структуры, уменьшающие характеристики адгезионного взаимодействия на подвижном функциональном контакте;

– гидродинамическая аналогия, позволяющая оценить влияние химического и структурно-фазового составов контактирующих материалов, температуры и окружающей среды на физико-механические характеристики так называемого «третьего тела», образовавшего на фактической площади касания в результате адгезионного взаимодействия при трении.

3. Закономерности, установленные на основании результатов экспериментальных исследований позволят:

– для эндопротезов тазобедренного сустава выработать рекомендации по повышению их работоспособности (с учётом возраста пациента, режима его жизни и т.д.) за счёт правильного выбора материалов пары трения с учётом совместимости их контактных поверхностей;

– обосновать применение углеродного каркаса в качестве добавки в пластическую смазку, используемую в тяжело нагруженных и высокотемпературных трибосопряжениях и обеспечивающую улучшение триботехнических характеристик ПСМ.

3. Совместимость трущихся поверхностей может послужить единым показателем научно-обоснованного подхода при выработке практических рекомендаций по повышению работоспособности ПС ЭУТИ. Объективная оценка индекса совместимости трущихся поверхностей требует проведения исследований адгезионного взаимодействия с учётом материалов пары трения, давления, температуры и окружающей среды.

На основании изложенного сформулированы цель и задачи настоящей диссертационной работы.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Термодинамический анализ зоны трения

2.1.1 Неравновесная термодинамика трения и изнашивания

Как известно [66-69], в приповерхностном слое происходят основные явления при трении. Для оценки коэффициента трения и изнашивания состояния этого слоя представляют практический и научный интерес термодинамические аспекты.

Рассмотрим упрощенную систему, состоящую из одного трущегося тела и источника энергии в зоне трения, не имеющего массы и не обладающей энтропией.

Из работы [127] известно, что энтропия трущегося тела изменяется при механическом трении; за счёт внешних воздействий, при физико-химических процессах в теле (потока энтропии (dS_i)). Теплообмен и присоединение химических веществ приводят к повышению энтропии тела ввиду второго закона термодинамики [81], где $dS_i > 0$. В то же время при одинаковом уровне энергии в процессе самоорганизации энтропия тела должна снижаться [86, 87], что обеспечивается в том числе процессом изнашивания, что за счёт увеличения положительного dS_i может компенсировать и повышение энтропии.

К снижению энтропии в процессе трения могут привести некоторые превращения, происходящие в поверхностных слоях. Во время образования вторичных структур (ВС) их энтропия может повыситься или понизиться по сравнению с энтропией веществ, вступающих во взаимодействие (материалы контртел, составляющие смазки, атмосферы и т.д.).

Рассмотрим более подробно возможные варианты [87]. В начале образования вторичных структур изменение энтропии трущегося тела (ΔS) состоит из следующих составляющих:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_i + \Delta S_2 + \Delta S_3 - \Delta S_4 \vee \Delta S_5, \quad (2.1)$$

где ΔS_i – поток энтропии без учёта массообмена, ΔS_i – производство энтропии без учёта превращений в поверхностных слоях, ΔS_2 – изменение энтропии за счёт присоединения веществ со своей энтропией, ΔS_3 – изменение энтропии за счёт превращений в поверхностных слоях, ΔS_4 – изменение энтропии, связанное с изнашиванием, т.е. с отводом вещества.

Из работы [81] известно, что $\Delta S_i > 0$. По второму закону термодинамики [81,82,83] $\Delta S_i > 0$. Химические вещества добавляют телу энтропию, поэтому $\Delta S_2 > 0$.

Составляющая энтропии ΔS_3 может быть положительной и отрицательной. В работе [89] показано, что при прохождении химических реакций с отрицательным химическим сродством $\Delta S_3 < 0$, а при образовании твердых растворов до насыщения или стехиометрических химических соединений $\Delta S_3 > 0$.

Общее изменение производства энтропии состоит из суммы ΔS_3 и ΔS_i и может быть только положительным, поэтому при отрицательном значении ΔS_3 :

$$\Delta S_i - \Delta S_3 > 0. \quad (2.2)$$

Обычно, в расчетах предполагают, что величина ΔS_4 всегда отрицательна, так как уносящиеся при изнашивании частицы удаляются из системы со своей энергией, поэтому в (2.1) при $|\Delta S_4|$ поставлен знак «минус».

Можно предположить, что в условиях приработки происходит рост вторичных структур по уравнению [86, 87], когда их некоторая часть μ ($\mu < 1$):

$$\Delta S_4 = \mu \Delta S_3 + \mu \Delta S_2 + \mu \Delta S_5, \quad (2.3)$$

где ΔS_5 – изменение энтропии тела в связи с износом его основного материала.

Если предположить, что

$$\Delta S_3 > 0, \quad (2.4)$$

то с учётом (2.3) выражение (2.1) примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_i + \Delta S_2 + |\Delta S_3| - \mu |\Delta S_3| - \mu \Delta S_2 - \mu \Delta S_5 = \\ \Delta S_1 + \Delta S_i + (1 - \mu) |\Delta S_3| + (1 - \mu) \Delta S_2 - \mu \Delta S_5. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Из выражения (2.5) видно, что единственный отрицательный член в правой части – это последний. Можно предположить, что именно он в основном и определяет износ трущегося тела. Из (2.5) видно, для реализации процесса самоорганизации существует некоторая величина повышенного износа для снижения энтропии [127].

Если предположить, что

$$\Delta S_3 < 0, \quad (2.6)$$

то выражение (2.1) примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta S = \Delta S_i + \Delta S_i + \Delta S_2 - |\Delta S_3| + \mu |\Delta S_3| - \mu \Delta S_2 - \mu \Delta S_5 = \\ \Delta S_i + \Delta S_i - (1-\mu) |\Delta S_3| + (1-\mu) \Delta S_2 - \mu \Delta S_5. \end{aligned} \quad (2.7)$$

В выражении (2.7) присутствуют два отрицательных члена: один член связан с износом ($\mu \Delta S_5$), другой – с химическим превращением в поверхностных слоях ($(1-\mu) |\Delta S_3|$). Поэтому в этом случае одна и та же величина снижения энтропии, что и в (2.5), может быть достигнута в этом случае при более низком износе трущихся тел. Отсюда можно сделать вывод, что интенсивность изнашивания неравновесных вторичных структур при прочих равных условиях должна быть меньше, чем равновесных. Это подтверждается в работах [83, 86, 87, 90].

В выражениях (2.1 – 2.7) ΔS_3 присутствует как часть производства энтропии которое всегда положительно. Поэтому разность $\Delta S_i - (1-\mu) |\Delta S_3|$ должна быть положительной, т.е.

$$\Delta S_i + (1-\mu) |\Delta S_3| > 0. \quad (2.8)$$

Из выражения (2.8) видно, что компенсация возрастания энтропии невозможна только за счёт её снижения при неравновесных превращениях в поверхностных слоях.

В работах [86, 87] показано, что вторичные структуры и процессы, происходящие в них, стабилизируются в стационарном состоянии. Это означает, что количество веществ перешедших во вторичные структуры из окружающей среды и трущихся тел, должно равняться количеству веществ, удаленных в процессе изнашивания, т.е. в стационарном состоянии $\mu = 1$.

При дифференцировании измерения энтропии в выражениях (2.1, 2.5 и 2.7) по времени получим скорость изменения энтропии (для упрощения в дальнейшем не указывается символ Δ):

при условии (2.4)

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_l}{dt} + \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_3}{dt}(1-\mu) + \frac{dS_2}{dt}(1-\mu) - \mu \frac{dS_5}{dt}; \quad (2.9)$$

при условии (2.6):

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_l}{dt} + \frac{dS_i}{dt} - \frac{dS_3}{dt}(1-\mu) + \frac{dS_2}{dt}(1-\mu) - \mu \frac{dS_5}{dt}. \quad (2.10)$$

В стационарном состоянии выражения (2.9) и (2.10) имеют одинаковый вид:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_l}{dt} + \frac{dS_i}{dt} - \frac{dS_5}{dt} = 0. \quad (2.11)$$

Следовательно, для поддержания стационарного состояния обязательно должен осуществляться износ материала-основы, так как согласно выражению (2.11) последний член, связанный с износом основы, отрицателен.

Как следует из выражения (2.11), снижение производства энтропии при неизменном потоке энтропии приводит к снижению интенсивности изнашивания основного материала, в т.ч. в стационарном состоянии. Следует при этом учитывать, что неравновесные процессы способствуют снижению интенсивности изнашивания основного материала трущегося тела и уменьшают производство энтропии в сравнении с равновесными процессами [87].

2.1.2 Обоснование принципа уменьшения коэффициента трения при использовании смазок с добавками

Как показано выше, что изменение энтропии термодинамической системы можно представить как:

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (2.12)$$

где $d_e S$ – изменение энтропии, связанное с обменом веществом и энергией с внешней средой; $d_i S$ – изменение энтропии, связанное «некомпенсированными преобразованиями», т.е. эта энтропия производится необратимыми процессами внутри системы.

В стационарном состоянии изменение энтропии во времени t равно нулю, т.е.

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_e S}{dt} + \frac{d_i S}{dt} = 0 \quad (2.13)$$

и при этом должны соблюдаться условия:

$$\frac{d_i S}{dt} \geq 0, \quad \text{тогда} \quad \frac{d_e S}{dt} \leq 0. \quad (2.14)$$

Рассмотрим термодинамические аспекты трибосистемы с подогревом зоны трения, позволяющие предположить рекомендации по выбору и применению высокотемпературных пластичных смазок с добавками. Предположим, что во ВС этой трибосистемы проходят только три основных термодинамических потока:

- поток тепла от трения;
- поток тепла от подогрева;
- поток вещества.

Полагаем, что термодинамические силы первых двух потоков (связанных с перепадом температур) фиксированы, так как осуществляется принудительное скольжение и подогрев; термодинамические силы потоков вещества – не фиксированы, так как прохождение этих потоков не подаётся отдельному регулированию. Пригожин И. [81] научно обосновал, что потоки нефиксированных сил в стационарном состоянии исчезают, а без потока вещества изменение энтропии вторичных структур будет равно

$$\frac{dS}{dt} = J_h \cdot X_h + J_e \cdot X_e, \quad (2.15)$$

где J_h – поток тепла от трения; $J_h = f \cdot p_r \cdot V$ (f – коэффициент трения; p_r – фактическая удельная нормальная нагрузка; V – скорость скольжения);

J_e – поток тепла от нагрева; по закону переноса теплоты Био – Фурье

$J_e = -\lambda \cdot (\text{grad } T) / \delta$ (λ – теплопроводность, $(\text{grad } T)$ – градиент температуры, δ – толщина вторичных структур); X_h и X_e – термодинамические силы, вызывающие потоки тепла от трения и подогрева;

$$X_h = X_e = \frac{\text{grad } T}{T^2}.$$

После соответствующих подстановок для стационарного состояния трибосистемы с подогревом получили:

$$f \cdot p_r \cdot V = \lambda \cdot (\text{grad } T) / l. \quad (2.16)$$

Из выражения (2.16) коэффициент трения

$$f = \frac{\lambda \cdot (\text{grad } T)}{p_r \cdot V}. \quad (2.17)$$

Из выражения (2.17) видно, что коэффициент трения в узлах трения с подогревом в значительной мере должен зависеть от коэффициента теплопроводности λ вторичных структур на фрикционном контакте, давления p_r и скорости скольжения. В работах [30, 91] приведены экспериментальные данные, которые по существу подтверждают зависимость (2.17). Полученное выражение (2.17) может служить основанием для выработки рекомендаций по разработке, выбору и применению пластичных смазок, модифицированных добавками, в тяжело нагруженных высокотемпературных трибосопряжениях.

2.2 Гидродинамическая аналогия в исследовании адгезионного взаимодействия при трении

Под адгезионным взаимодействием понимают все виды межатомного и межмолекулярного взаимодействия между твёрдыми телами при их контактировании [66], они могут иметь химическую (хемосорбция) и физическую (Ван-дер-Ваальсовы силы) природу [129, 130].

В результате обобществления валентных электронов в металлах образуются металлические связи [131], которые во время контакта

металлических поверхностей сближаются на минимальные расстояния, соизмеримые с параметрами решётки, в результате значительно повышается энергия атомов и создаётся дополнительную активность [132]. Стоит еще отметить, что на поверхности деформированных металлов происходит механическая активация [133] в местах концентрации дефектов.

Попытки создания теории адгезионного взаимодействия при трении были предприняты в работах [60,66,84]. Рассмотрим основные аспекты такого подхода. В работе [134] показано, что если время оседлой жизни атома равно:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{w}{k \cdot \theta}}, \quad (2.18)$$

где τ_0 – период колебания около положения равновесия; w – энергия активации процесса перескока; k – постоянная Больцмана; θ – абсолютная температура, то средняя скорость перемещения атомов (или дырок) равна:

$$V_a = C \cdot e^{\frac{-w}{k \cdot \theta}}, \quad (2.19)$$

где C – константа.

Предполагается, что именно с такой скоростью идет процесс рекомбинации адгезионных связей на фрикционном контакте. Применяя гидродинамическую аналогию можно определить сопротивление сдвигу в «третьем теле»: оно в первом приближении будет подчиняться уравнению Ньютона для двумерного параллельно-струйного течения вязкой жидкости [60]:

$$\sigma_{\tau a} = \eta \cdot \frac{dV}{dz}, \quad (2.20)$$

где η – коэффициент внутреннего трения; z – координата по толщине «третьего тела»; V – скорость скольжения.

В процесс трения в зоне контакта действуют касательные и сжимающие напряжения. Под действием этих напряжений изменяется форма «третьего тела», система стремится вернуться в равновесное состояние.

Для расчета коэффициента трения в работе [66] используется выражение Эйринга и Мура:

$$\eta = B_1 \cdot e^{\frac{E_b + p \cdot \Delta A}{R \cdot \theta}}, \quad (2.21)$$

где B_1 – константа; p – давление; ΔA – приращение объёма; R – постоянная Клапейрона; E_b – энергия активации вязкого течения.

Второй член в выражении (2.21) учитывает то, что для разрыва (среза) адгезионной связи необходимо преодолеть путь ΔA и затрачиваемая на это работа соответственно выразится через $p \cdot \Delta A$.

По аналогии с выражением (2.21) сопротивление сдвигу τ_n , связанное с подвижностью «третьего тела», представляется как

$$\tau_n = B_1 \cdot e^{\frac{E_b + p \cdot \Delta A}{R \cdot \theta}} \cdot \frac{dV}{dz}. \quad (2.22)$$

При постоянной скорости трения предположим, что $dV/dz = \text{const} = A_1$.

Тогда, приняв $A_1 \cdot B_1 = C_1$, получают:

$$\tau_n = C_1 \cdot e^{\frac{E_b + p \cdot \Delta A}{R \cdot \theta}}. \quad (2.23)$$

Если разложить экспоненту $e^{\frac{E_b + p \cdot \Delta A}{R \cdot \theta}}$ в ряд и отбросить из-за малости члены, начиная с третьего, то:

$$\tau_n = C_1 \cdot \left(1 + \frac{E_b}{R\theta} + \frac{p \cdot \Delta A}{R\theta} \right). \quad (2.24)$$

Вводятся обозначения:

$$\tau_0 = C_1 \cdot \left(1 + \frac{E_b}{R\theta} \right), \quad (2.25)$$

$$\beta = \frac{C_1 \cdot \Delta A}{R\theta}. \quad (2.26)$$

Тогда

$$\tau_n = \tau_0 + \beta \cdot p. \quad (2.27)$$

Из выражения (2.27) видно, что τ_n обратно пропорциональна температуре и прямо пропорциональна нормальным напряжениям на контакте. Также влияние оказывает величина ΔA , энергия вязкого течения тела E_b и температура контакта.

Термодинамическая теория металлов Я.И. Френкеля и кинетическая теория прочности твёрдых тел С.Н. Журкова подтверждает линейный характер зависимости $\tau_n = f(p_r)$ [134].

Выражения (2.24 – 2.26) для расчета характеристик адгезионного взаимодействия при трении в настоящее время использовать невозможно из-за отсутствия достоверных данных по параметрам ΔA , E_b и C_1 для контакта поликристаллических твердых тел. Поэтому выполняются экспериментальные исследования.

2.3 Экспериментальное исследование триботехнических характеристик пластичных смазок (ПС)

2.3.1 Испытания на четырехшариковой машине трения (ЧМТ)

Противоизносные и противозадирные свойства ПСМ определяли на ЧМТ по ГОСТ 9490-75 (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Четырехшариковая машина трения

Показателем противоизносных свойств служил диаметр пятна износа ($D_{и}$), который вычисляли как среднее арифметическое значение диаметров пятен износа трех нижних шариков после работы ЧМТ в течение одного часа при нагрузке 0,4 кН.

Противозадирные свойства определяли по критической нагрузке задира $P_{кр}$ (предельной нагрузочной способности), нагрузке сваривания $P_{св}$ (несущей способности) и индексу задира I_z , которые характеризовали предельную работоспособность смазочного материала.

2.3.2 Исследования адгезионного взаимодействия

Исследования адгезионного взаимодействия трущихся поверхностей выполняется на установке [58, 126] (рис. 2.2), в которой реализована физическая модель, отражающая реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте. Для определения момента трения сферический индентор (имитирующий единичную неровность пятна касания трущихся

твердых тел), сдавленный двумя плоскопараллельными образцами, вращается под нагрузкой вокруг собственной оси (рис. 2.3). Фактическая сила $F_{\text{экс}}$, которая необходима для вращения индентора, связана главным образом со сдвиговой прочностью $\tau_{\text{п}}$ адгезионных связей. Так как деформационной составляющей трения можно пренебречь из-за низкой шероховатости и высокой точности контактирующих поверхностей. В установке используется электроконтакт, что обеспечивает характерное распределение температуры по глубине контактирующих тел.



Рисунок 2.2 – Адгезиометр

Для определения зависимости прочности адгезионных связей на срез $\tau_{\text{п}}$ от контактного давления $p_{\text{т}}$ необходимо знать не только действующие силы, но и изменяющиеся площади касания сферического индентора и плоского образца. При ступенчато возрастающей нагрузке эти площади определяют только расчетным путем со значительными погрешностями из-за отсутствия достоверных сведений о физико-механических свойствах приконтактных слоев, неизвестности значений коэффициента трения и влияния на него давления и т.д.

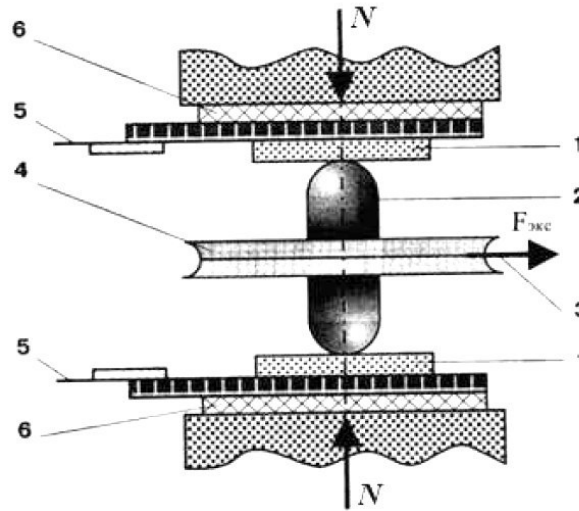


Рисунок 2.3 – Модель фрикционного контакта: 1 – образцы; 2 – индентор; 3 – тросик; 4 – диск; 5 – медные пластины; 6 – изоляция

Для определения зависимости $\tau_{\text{п}}(p_{\text{т}})$ использовали метод постепенно снижающихся нагрузок: от максимальных, соответствующих пластическим деформациям на контакте, до минимально возможных по точности измерительных приборов.

Суммарную массу разновесок M выбирали такой, чтобы в начале каждого опыта в месте касания индентора и образца создавался пластический контакт с радиусом отпечатка $r_{\text{отп}}$. По нему в дальнейшем определяли площадь контакта пары трения. Полагали, что при уменьшении нагрузки $N_i = M_i g$ ($i \geq 5$) площадь контакта исследуемой пары трения практически не изменяется, так как упругим восстановлением отпечатка можно пренебречь. Фиксируемые значения $\tau_{\text{п}}$ определяли из соотношения [58]:

$$\tau_i = 0,75 \frac{F_{\text{экс}} R_{\text{экс}}}{\pi r_{\text{отп}}^3}; i = 1, \dots, 5, \quad (2.28)$$

где $F_{\text{экс}i}$ — окружная сила, приводящая во вращение индентор и соответствующая нагрузке N_i ; $R_{\text{экс}}$ — радиус диска, в котором закреплялся индентор; $r_{\text{отп}}$ — радиус отпечатка (лунки) на образцах.

Полагали, что из-за малых размеров лунки контактные давления, действующие на поверхность сферы, постоянны и равны [58]:

$$p_{ri} = \frac{N_i}{\pi r_{omn}^2}. \quad (2.29)$$

По формулам (2.28) и (2.29) вычисляли предельные значения $\tau_{пп}$ и $p_{пп}$, соответствующие пластическому контакту, т.е. начальной суммарной массе разноресовок.

Адгезионную (молекулярную) составляющую коэффициента трения f_m , соответствующую пластическому контакту – иди индекс совместимости трущихся поверхностей С (1.2), вычисляли по формуле [58]:

$$f_m = \frac{\tau_{nn}}{p_{rn}} = 0,75 \frac{F_{экс} R_{экс}}{M g r_{omn}}. \quad (2.30)$$

Как было отмечено выше, примененный в работе способ сравнения триботехнических характеристик различных ПСМ предполагает проведение исследований не только на ЧМТ, но и исследование адгезионного взаимодействия с учетом температуры и давления. В работе использовался электроконтактный нагрев (при напряжении 12 В и силе тока от 50 до 230 А). Во избежание искрения ток в контакт подавался после приложения нагрузки и отключение перед снятием последней по весу нагрузки. Поэтому материалы индентора и образцов должны были быть токопроводящими. При этом твердость индентора должна существенно превосходить твердость образцов, чтобы при нагружении индентор сохранял сферическую форму. Более того он должен сохранять эту форму при повышенных температурах (до 600 °С и выше) и давлениях, близких к пластическому контакту (1 300 – 2 500 МПа). Этому условию хорошо удовлетворяют инструментальные металлы – керамические сплавы. В работе для индентора выбран сплав ВК8, обладающий достаточно высокой жаростойкостью и хорошей обрабатываемостью.

Для определения зависимости прочности τ_n на срез адгезионных связей от давления использовался способ ступенчатого изменяющихся нагрузок. При этом максимальная нагрузка соответствовала пластическому контакту с образованием лунки радиусом $r_{отп}$.

τ_n и p_r вычисляли как отношение нагрузки к площади лунки. При этом упругим восстановлением лунки в связи с изменением нагрузки пренебрегали, допуская определенную погрешность. Эта погрешность тем меньше, чем более пластичен материал образцов. В работе образцы использовали из стали 45, выдерживающей высокие давления (до 2 500 МПа) и обладающей достаточно высокой пластичностью.

Образцы для исследований представляли собой диски диаметром 20...25 мм из стали 45 и толщиной 5...7 мм, инденторы — цилиндры диаметром 5 мм со сферическими торцами ($R_{сф} = 2,5$ мм). Исследуемые поверхности имели параметр шероховатости $Ra = 0,2...0,4$ мкм. Сферический индентор радиусом 2,5 мм изготавливали из инструментального сплава ВК8.

При двух- или трехкратном повторении эксперимента вероятное отклонение τ_n не превышает 5...8 %.

Перед каждым экспериментом поверхности образцов и индентора обезжиривали техническим спиртом и наносили на них слой испытываемой ПСМ. Все эксперименты повторяли по три раза и получали среднеарифметические результаты.

Эксперименты выполняли при следующих температурах контакта $\theta = 20, 150, 300, 450, 600$ °С, на микроскопе определяли радиус $r_{отп}$ отпечатка на плоских образцах. Нагрузку N изменяли с шагом 480 Н, нормальные напряжения, действующие на поверхность сферы, рассчитывали по формуле (2.2).

Как показано в работе [58], в условиях упругого контакта величина τ_n линейно зависит от p_r при различных температурах θ и подчиняется уравнению:

$$\tau_n = \tau_0 + \beta \cdot p_r, \quad (2.31)$$

где τ_0 — напряжение среза при отсутствии нормальных напряжений; β — коэффициент упрочнения адгезионных связей от нормальных напряжений. Это позволяет экстраполированием прямых $\tau_n = f(p_r)$ до $p_r = 0$ определить τ_0 , а также величину β — как тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс.

Эти параметры могут быть получены и в результате регрессионного анализа экспериментальных данных. При этом коэффициент регрессии определяется как:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^m p_{ri} \cdot \tau_i - \sum_{i=1}^m p_{ri} \cdot \sum_{i=1}^m \tau_i}{\sum_{i=1}^m p_{ri}^2 - \sum_{i=1}^m p_{ri} \cdot \sum_{i=1}^m p_{ri}}, \quad (2.32)$$

где m – число наблюдений, а свободный член регрессии:

$$\tau_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_i - \beta \sum_{i=1}^m p_{ri}}{m}, \quad (2.33)$$

Выборочный коэффициент r_k , характеризующий силу исследуемой связи, вычисляли по найденному значению коэффициента регрессии:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^m p_{ri} \cdot \tau_i - \sum_{i=1}^m p_{ri} \cdot \sum_{i=1}^m \tau_i}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^m p_{ri}^2 - \sum_{i=1}^m p_{ri} \cdot \sum_{i=1}^m p_{ri} \right) \left(\sum_{i=1}^m \tau_i^2 - \sum_{i=1}^m \tau_i \cdot \sum_{i=1}^m \tau_i \right)}}. \quad (2.34)$$

Расчеты показали, что выборочный коэффициент корреляции во всех опытах был в пределах 0,97 – 0,985, что указывает на наличие устойчивой функциональной базы.

После расчетов получали температурные зависимости триботехнических характеристик: молекулярной составляющей коэффициента трения; прочности на срез адгезионных связей и нормальных напряжений для подвижного пластического контакта.

2.3.3 Исследования изнашивания

Исследования изнашивания пары трения проводили на трибометре «NANOVEA TRB» (рис. 2.4).

На этом трибометре воспроизводится трение и изнашивание с использованием вращательного механизма. Скорости можно регулировать за счет изменения частоты вращения образцов от 0,01 до 2 000 об/мин. Программное обеспечение трибометра позволяет получать данные по коэффициенту трения в режиме реального времени.

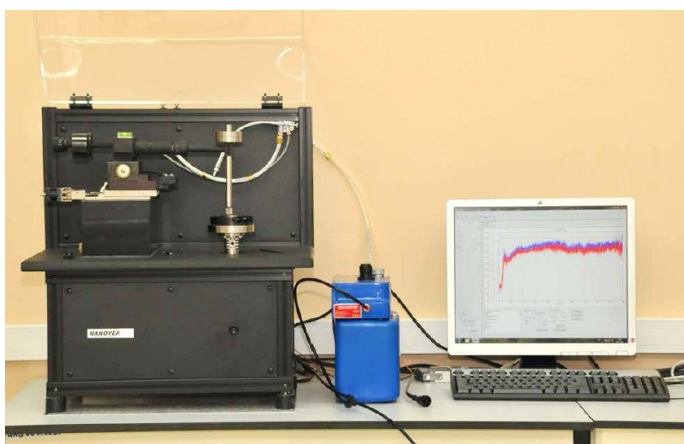


Рисунок 2.4 – Трибометр «NANOVEA TRB»

Все опыты проводили при скорости скольжения 0,15 м/с и нормальном нагружении 2Н. Число циклов для всех пар трения равнялось $N \approx 15\,000$.

Для выполнения исследований по изнашиванию использовали те же образцы, на которых выполняли адгезионные исследования (см. выше).

Опыты выполняли со смазкой и без смазки при температуре 23 – 25 °С и относительной влажности воздуха 50 %. Поверхности образцов и индентора перед началом эксперимента протирали спиртом и просушивали.

Величина изнашивания материала индентора и образцов определяли по потере объема $V_{\text{изн}}$:

$$V_{\text{изн}} = \frac{m}{\gamma}, \quad (2.35)$$

где $V_{\text{изн}}$ – изношенный объем; m – весовой износ; γ – удельный вес (плотность) испытуемого материала.

Вес образцов до и после триботехнических экспериментов измеряли на электронных весах «METTLER TOLEDO» (рис. 2.5) с точностью измерения до 10^{-6} гр.



Рисунок 2.5 – Электронные весы «METTLER TOLEDO»

Интенсивность J_h изнашивания индентора определяется по ГОСТ 27674-88 как отношение значения износа h_r (мкм) к пути трения l (м), на котором происходило изнашивание:

$$h_r = \frac{V_{\text{изн}}}{S}, \quad (2.36)$$

где S – площадь касания тел при трении.

$$J_{hu} = \frac{h_r}{l} = \frac{V_{\text{изн}}}{S \cdot l}. \quad (2.37)$$

Определяющим в оценке изнашивания является не длина пути трения, а приводящие к износу локальные взаимодействия, поэтому сравнение износа образцов выполняли по величине интенсивности изнашивания K :

$$K = \frac{h_r}{N}, \quad (2.38)$$

где N – число циклов воздействий, приводящих к линейному износу h_r , т.е. по существу, величина K представляет собой износ, приходящийся на одно воздействие.

2.4 Исследование структуры материалов

2.4.1 Металлографическая оптика

Изучение микроструктуры материалов выполняли на оптическом микроскопе «OLYMPUS GX51» (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Оптический микроскоп «OLYMPUS GX51»

Для изучения микроструктуры материалов использовались плоскопараллельные образцы с отполированной поверхностью ($R_a = 0,32$ мкм).

2.4.2 Растровая электронная микроскопия

В данной работе химический состав образцов был проанализирован с помощью сканирующего микроскопа «JSM-6490LV» (рис. 2.7).

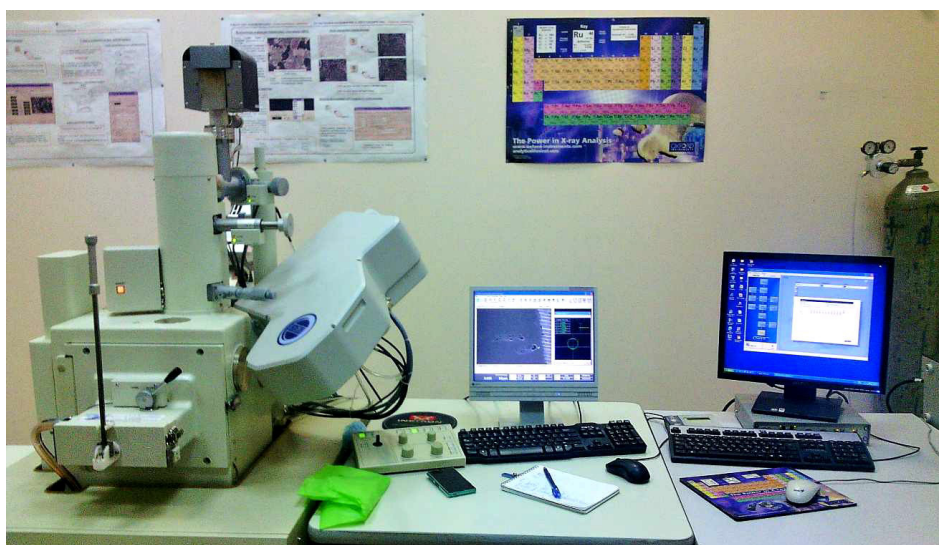


Рисунок 2.7 - Сканирующий микроскоп «JSM-6490LV»

Этот растровый электронный микроскоп (РЭМ) позволяет получить объемное изображение поверхности материала и данные по химическому составу, присутствующих химических элементов в образце.

2.5 Исследование триботехнических характеристик эндопротезов тазобедренного сустава

2.5.1 Материалы, оборудование и методы исследования

В данной работе изучены различные пары трения кинематического узла «головка — вкладыш» эндопротезов тазобедренного сустава человека, соответствующих техническим условиям, предъявляемым к современным имплантатам: “металл — металл”, “металл — полиэтилен”, “оксид алюминия — полиэтилен”, “циркониевая керамика — полиэтилен”, “алюминиевая керамика — полиэтилен”, “покрытие нитрид титана — полиэтилен”, “циркониевая керамика — алюминиевая керамика”, “алюминиевая керамика — алюминиевая керамика”, “покрытие нитрид титана — алюминиевая керамика”, “оксид алюминия — алюминиевая керамика” при сухом трении и в условиях биологической среды (СЖ). Полиэтиленовый вкладыш представлял собой поперечно связанный полиэтилен ультравысокой молекулярной массы (XLPE), металлические детали состояли из сплава с преимущественным содержанием кобальта, хрома и молибдена. Керамические детали включали в себя 2 разновидности керамики: алюминиевую, в которой содержание двуокси алюминия было более 80%, двуокиси циркония около 17%, и циркониевую керамику. Отдельно рассматривались головки эндопротезов из оксид алюминия, состоящей из 2,5% ниобия и 97,5% циркония, а также головка эндопротеза с покрытием из нитрида титана.

Выполнены исследования трибологических характеристик тазобедренных суставов кроликов в норме и при остеоартрозе. Материалом

для исследования послужили наблюдения за 9 лабораторными кроликами с моделью посттравматического остеоартроза тазобедренного сустава.

Опыты проводили на адгезиометре ГОСТ 16429–70 [58,126] (рис. 2.8) и модернизированной четырёхшариковой машине трения (ЧМТ-1) ГОСТ 9490–75 (рис. 2.9) при ступенчатом изменении осевой нагрузки для суставов кролика от 60 до 100 Н и для эндопротезов – P от 500 до 10000 Н. В качестве вращающегося элемента использовали головки ЭТБС диаметром 28, 32 и 36 мм, которые прижимали к вкладышам силой P .

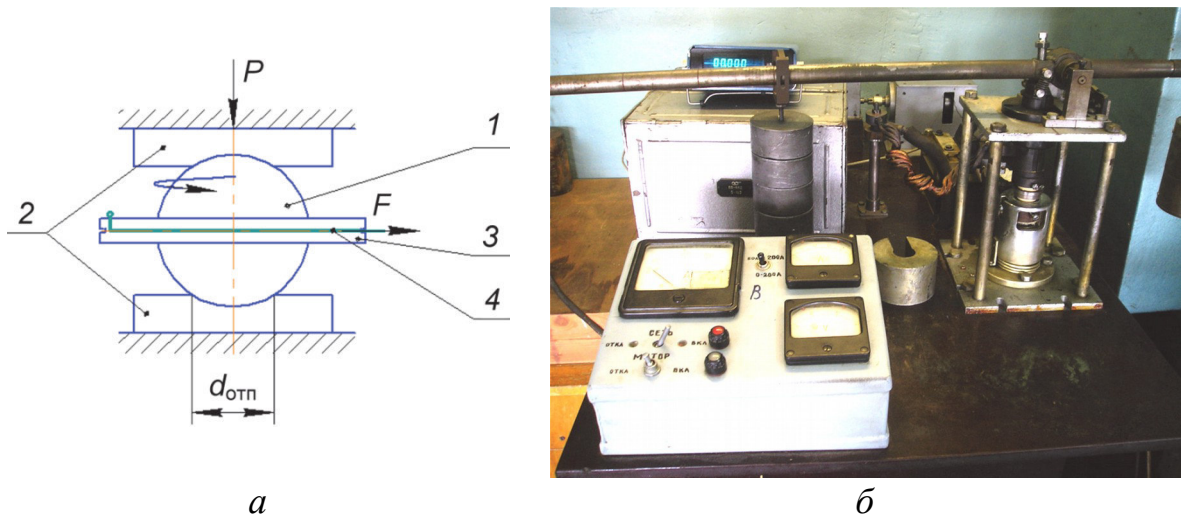


Рисунок 2.8 – Схема работы (а) и вид (б) одношарикового адгезиометра:

1 – головка эндопротеза; 2 – образцы вкладыша;

3 – диск; 4 – тросик для вращения головки

Частота вращения приводного вала равнялась 1 об/мин благодаря модернизации ЧМТ-1 установкой частотного электропреобразователя и планетарного редуктора, силоизмерительная тензометрическая система с датчиком 1925ИС-М $P_{\text{ном}} = 0,5$ кН и с дальнейшим аналого-цифровым преобразованием и выводом графика “сила трения F — время” на компьютер.

По величинам P , F и $d_{\text{отп}}$ вычисляли: давление p_r на фрикционном контакте, соответствующую прочность $\tau_{\text{п}}$ адгезионных связей на срез, а также величину f_m , характеризующую молекулярную (адгезионную) составляющую коэффициента трения [58]. На основании полученных результатов строятся

зависимости для различных пар трения $\tau_{\text{п}}$ от p_r в условиях присутствия и отсутствия биологической среды, что позволило определить величину коэффициента f_m и её изменение.

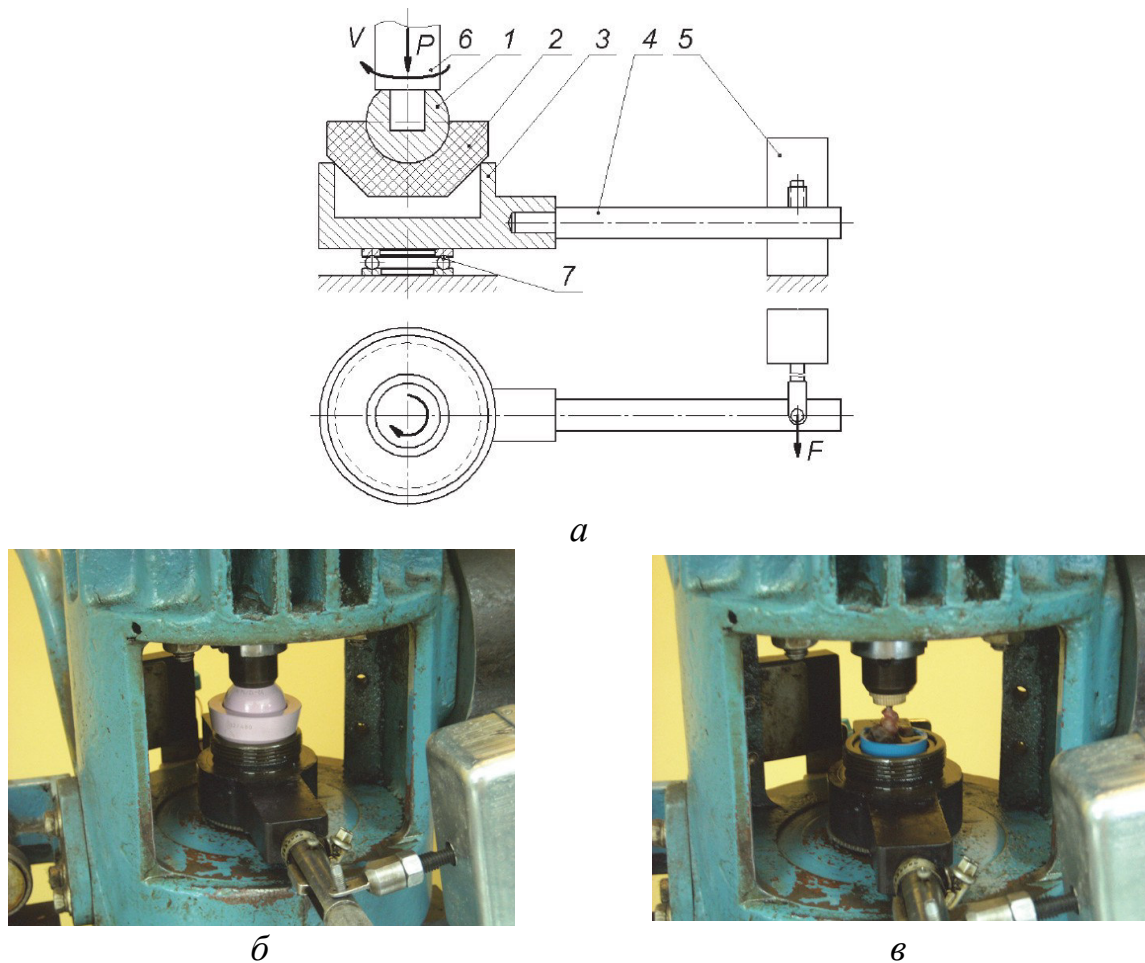


Рисунок 2.9 – Схема работы (а) и общие виды ЧМТ-1 при исследовании эндопротезов (б) и суставов кролика (в): 1 – головка эндопротеза; 2 – вкладыш эндопротеза; 3 – чаша; 4 – рычаг; 5 – датчик фиксирования силы трения F ; 6 – приводной вал; 7 – упорный подшипник качения

В качестве биологической среды использовали синовиальную жидкость, которую наносили кисточкой на поверхности трения.

2.5.2 Лазерная сканирующая микроскопия

Для исследования деформационного рельефа поверхности (ДРП) областей сопряжения элементов эндопротезов ТБС при износе в работе применялась лазерная сканирующая микроскопия (ЛСМ).

Лазерная сканирующая микроскопия применялась для исследования ДРП областей сопряжения элементов эндопротеза ТБС при износе. Исследованы интактные эндопротезы ТБС и компоненты кинематических узлов искусственных суставов, удаленные в сроки более 10 лет после имплантации. Интактные эндопротезы были представлены по 3 образца головок и вкладышей материалов: керамика (алюминиевая и циркониевая); CoCrMo; головка эндопротеза с покрытием из TiN; головка с покрытием из циркония и ниобия; вкладыш из поперечно-связанного полиэтилена.

Изучение поверхности имплантатов выполнялись с помощью 2D-оптической и 3D-лазерной сканирующей микроскопии на микроскопах «Axiotech» (Carl Zeiss, Germany) и «LSM-Exciter» (рис. 2.10) с оценкой параметра среднего арифметического отклонения RS_a профиля рельефа от средней плоскости XV в 3 зонах эндопротезов. Оценивались также сферичность головок и вкладышей эндопротезов с использованием координатно-измерительной машины «Contura-G2».



а



б

Рисунок 2.10 – Микроскопы LSM-Exciter (а) и Axiotech (б)

На макро (панорама ($k \sim 2 \times 2$) с объективом $05^{\times}$), мезо (объективы $05^{\times}$ и $10^{\times}$ с разрешением > 1 мкм ($2...4$ мкм)) и микро (объективы $20^{\times}$ и $50^{\times}$ с разрешением < 1 мкм ($0,4...1$ мкм)), нано (объектив $100^{\times}$ с разрешением ~ 180 нм) уровнях исследовали морфологию рельефа изношенной поверхности элементов эндопротеза.

Постимплантационные изменения изучали на головках и вкладышах эндопротезов тазобедренного сустава CoCrMo-Пол (5 шт.), Biolox forte (содержание керамики – 99,7% Al_2O_3) – Пол (3 шт.), CoCrMo-CoCrMo (2 шт.).

2.6 Измерение микротвёрдости компонентов эндопротезов

Локальная микротвёрдость компонентов эндопротезов по Викерсу (HV) при нагрузке 100 Н оценивалась с помощью приставки «МНТ-10» на микроскопе «Axiovert-100A» (Carl Zeiss, Germany) – рис. 2.11.

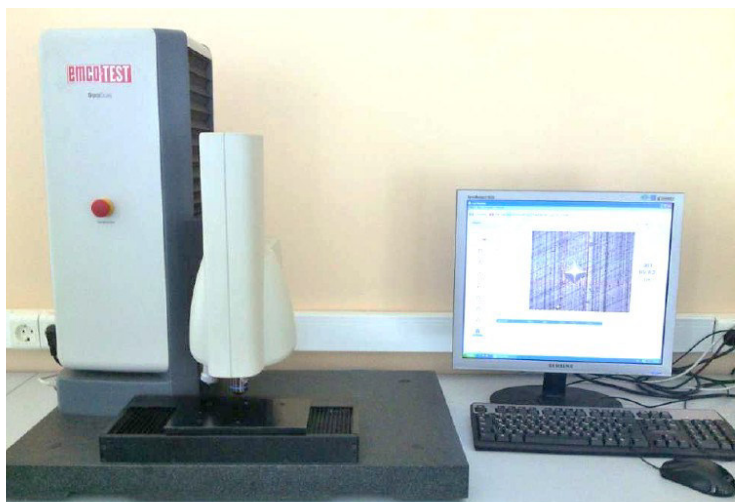


Рисунок 2.11 – Микротвердомер «Axiovert-100A»

Средние значения микротвёрдости фиксировались после десяти измерений в различных точках изучаемого образца.

Все результаты выводились в отдельном файле с изображением графика изменения микротвёрдости по точкам.

2.7 Окисление дисперсионной среды исследуемых смазок и методика их приготовления

Окисление масел озоном проводили генератором «Крозон – 2001» OZP-1Y (рис. 2.12). Озонатор укомплектован компрессором. Производительность по озону 1 г/ч.

Окисление озоном исследуемых масел проводили при температуре 100 °С и в присутствии катализатора. Масла озонировали в течении 1 часа. Емкости с озонированным материалом хранились в защищенном от солнечных лучей месте.



Рисунок 2.12 – «Крозон – 2001» OZP-1Y

В качестве наполнителей в ПСМ в работе использовали покупные графит (Г), дисульфид молибдена (ДМ), а также «углеродный каркас» (УК) собственного приготовления.

При приготовлении ПСМ с УК хорошо высушенный в печи «углеродный каркас» предварительно тщательно перемалывали в ступе до состояния мельчайшего порошка (не более 5 мкм). Этот порошок перемешивали с минеральным маслом до пастообразного состояния. Аналогичным образом готовили и другие ПСМ. Их исследовали для сравнения полученных результатов.

Выводы по главе 2

1. Как показал термодинамический анализ, коэффициент трения в подвижных трибосопряжениях с подогревом в значительной мере может зависеть от коэффициента λ теплопроводности вторичных структур, давления p , скорости скольжения, градиента температур и толщины вторичной структуры.
2. Как показала гидродинамическая аналогия, определенный вклад в улучшение триботехнических характеристик контактирующих поверхностей трения вносит уменьшение пластичности формирующегося на фрикционном контакте «третьего тела» в результате адгезионного взаимодействия, а также повышение энергии активации вязкого течения. Это может послужить основанием для выбора материала контактирующих поверхностей, обеспечивающих уменьшение индекса совместимости и изнашивания при трении.
3. Экспериментальные исследования адгезионного взаимодействия пары трения должны выполняться при разных давлениях (вплоть до пластических деформаций на контакте) и температурах, а также с учетом окружающей среды.

ГЛАВА 3. ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМ КАРКАСОМ

3.1 Трибологические характеристики смазочных материалов с углеродным каркасом

Как указывалось выше, современные смазочные материалы (СМ) представляют собой, как правило, сложные многокомпонентные системы, отвечающие комплексу требований к их технологическим и эксплуатационным свойствам. Опыт известных производственных предприятий показывает, что рациональное применение смазок в узлах агрегатов машин позволяет повысить их надежность, долговечность, износостойкость, экономичность и коэффициент полезного действия; в технологических процессах механической обработки позволяет повысить производительность труда, уменьшить материально- и энергозатраты, улучшить качество обработанной поверхности деталей и санитарно-гигиенические условия труда.

Широкое применение в тяжелонагруженных узлах трения машин и механизмов, работающих при повышенных температурах, а также в технологических операциях холодной обработки металлов давлением (высадке, калибровании, листовой вытяжке и т.п.), нашли пластичные смазочные материалы (ПСМ) [100,101]. Для повышения эффективности применения ПСМ используют различного рода наполнители (присадки) [94,102].

К противозадирным и противоизносным присадкам относят химические соединения, которые в качестве компонентов смазочных композиций способны предупреждать заедание и интенсивный износ трущихся поверхностей при экстремальных и умеренных режимах трения.

Если антифрикционные присадки, являющиеся в большинстве случаев поверхностно-активными веществами (ПАВ), лишь адсорбируются или хемосорбируются на трущихся поверхностях, то противоизносные присадки в основном химически взаимодействуют с металлом, образуя прочные граничные пленки. Эти пленки противодействуют накоплению остаточных деформаций и разрушению (изнашиванию) контактных поверхностей. В результате размеры и форма контактирующих металлических деталей мало или совсем не изменяются.

До настоящего времени нет единой точки зрения ни на механизм действия противоизносных присадок, ни на методы, позволяющие исследовать его. Однако уже давно установлено, что эффективность противоизносных присадок зависит от наличия в их молекулах «активных» химических элементов (серы, хлора, йода, фосфора, азота и т.д.).

К веществам, нашедшим широкое применение в качестве противозадирных присадок к масляным смазочным материалам, относятся: углерод, элементарная сера, сульфидирование, нефтяные масла, хлорированные парафины, полибутены и т.д.

При формировании граничных пленок предполагается ступенчатый механизм действия присадок: адсорбация на металлической поверхности; хемосорбция; термическая деструкция активных компонентов и металлоорганических соединений с образованием простейших серо-, хлор- и фосфосодержащих соединений; образование граничных пленок типа сульфидов, хлоридов и т.п.

Проявление той или иной ступени при образовании смазочных пленок зависит от ряда факторов, среди которых можно выделить температуру. Учитывая ступенчатость действия активных компонентов смазочных материалов и решающее влияние температуры, можно, исходя из реальных температур в зоне трения и известных температурных триботехнических характеристик СМ, целенаправленно решать вопросы выбора оптимального состава СМ для конкретных условий работы.

При всем многообразии наполнителей (присадок), используемых для модификации ПСМ, до настоящего времени не исследована возможность применения в качестве присадки так называемого «углеродного каркаса» получаемого как побочного продукта переработки нефти. Углеродный каркас является по-существу комплексным материалом, содержащим в связанном виде химические элементы, которые повышают противозадирные и противоизносные свойства СМ: углерод, сера и т.д.

Рассмотрим результаты исследования триботехнических характеристик ПСМ, модифицированных углеродным каркасом, с учетом давления и температуры на контактных поверхностях. В частности, молекулярную составляющую коэффициента трения (τ_n/p_r) при различных давлениях p_r и температурах θ на фрикционном контакте [58].; критическую нагрузку задира $P_{кр}$, нагрузку сваривания $P_{св}$ и индекс задира I_z , характеризующие предельную работоспособность смазочного материала и способность изменять изнашивание трущихся поверхностей при изменении нагрузки.

Все эксперименты повторяли по 3 раза и рассматривали среднеарифметические результаты.

Исследовали триботехнические характеристики следующих ПСМ на основе высоковязких минеральных масел [100]; модифицированных графитом (ПСМ-Г) и углеродным каркасом (ПСМ-УК). Смазочные композиции исследуемых ПСМ состояли из 60% цилиндрического масла, 20% литола и 20% модифицирующих добавок.

Полученные экспериментальные результаты по противозадирным и противоизносным характеристикам испытываемых ПСМ приведены в таблице 3.1.

Из таблицы 3.1 видно, что ПСМ-УК обеспечивает более благоприятные противозадирные и противоизносные триботехнические характеристики по сравнению с другим испытываемым ПСМ. Причем, разница по этим характеристикам весьма существенная.

Таблица 3.1 – Противозадирные и противоизносные характеристики смазочных материалов

Испытываемый смазочный материал	Триботехнические характеристики			
	$P_{кр}$, Н	$P_{св}$, Н	I_3 , Н	D_u , мм
ПСМ-Г	840	4470	70,06	0,82
ПСМ-УК	1060	5620	94,16	0,6

Для объяснения полученных на ЧМТ результатов рассмотрим экспериментальные данные по адгезионному взаимодействию при различных давлениях и температурах фрикционного контакта, приведённые в таблице 3.2 и на рис. 3.1 – 3.3.

Таблица 3.2 – Влияние температуры на триботехнические характеристики при использовании ПСМ, модифицированного разными добавками

Добавка в ПСМ	θ , °С	p_{rn} , МПа	τ_{nn} , МПа	τ_{nn} / p_{rn}	β	τ_o , МПа
Графит	20	2053	133	0,065	0,043	46
	150	1754	170	0,097	0,082	26
	300	1652	167	0,101	0,078	39
	450	1559	177	0,113	0,088	40
	600	1516	148	0,098	0,077	32
Углеродный каркас	20	2053	183	0,089	0,075	30
	150	1988	121	0,061	0,050	23
	300	1808	89	0,049	0,045	8
	450	1754	73	0,042	0,036	10
	600	1702	55	0,032	0,029	5

Из рис. 3.1 видно, что зависимость прочности τ_n на срез адгезионных связей от давления p_r во всём исследованном диапазоне температур имеет биномиальный характер и описывается уравнением:

$$\tau_n = \tau_o + \beta \cdot p_r, \quad (3.1)$$

где τ_o – прочность на срез адгезионных связей при отсутствии давления на контакте; β – коэффициент упрочнения адгезионных связей от действия давления на контакте.

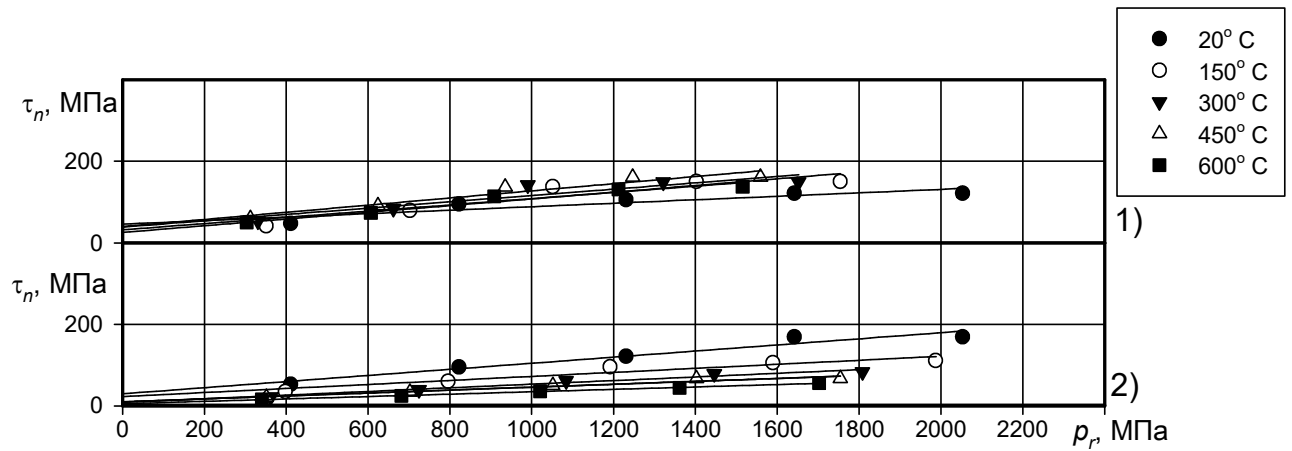


Рисунок 3.1 – Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта при использовании ПСМ с: 1 – графитом; 2 – УК

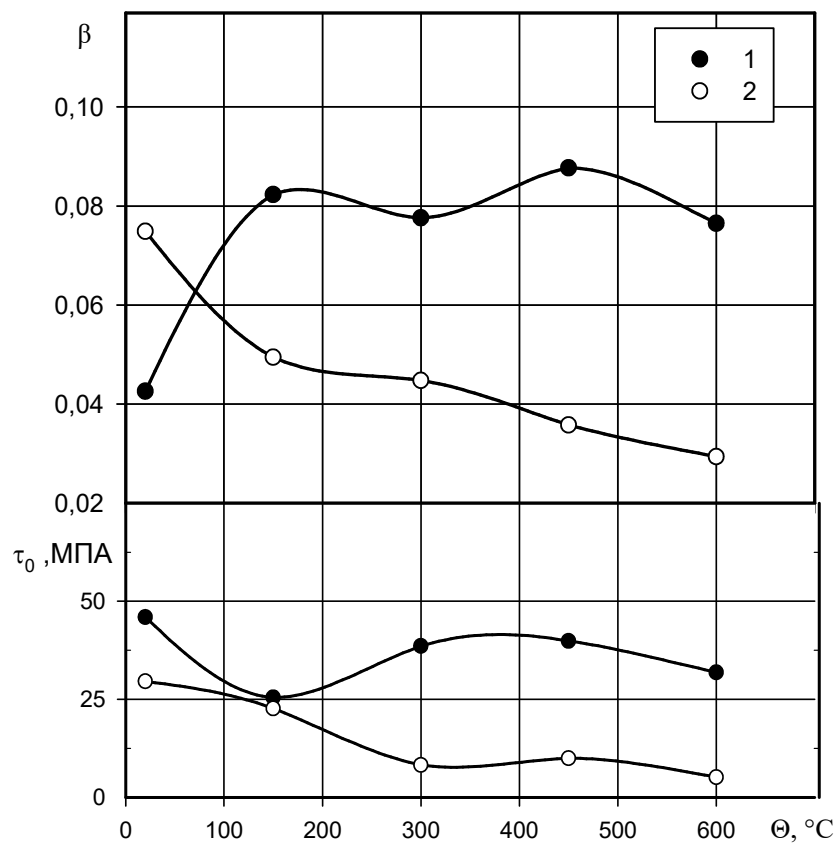


Рисунок 3.2 – Влияние температуры на характеристики адгезионного взаимодействия при использовании ПСМ с: 1 – графитом; 2 – УК

Уравнение (3.1) находится в полном соответствии с выражением (2.27), полученным по гидродинамической аналогии формирования и разрушения «третьего тела», образующегося на фактических площадках контакта при трении.

Более того, из табл. 3.2 и рис. 3.2 видно, что температура θ контакта оказывает определенное влияние на параметры β и τ_o , что тоже находится в полном соответствии с выражениями (2.25) и (2.26), полученными теоретически – из гидродинамической аналогии.

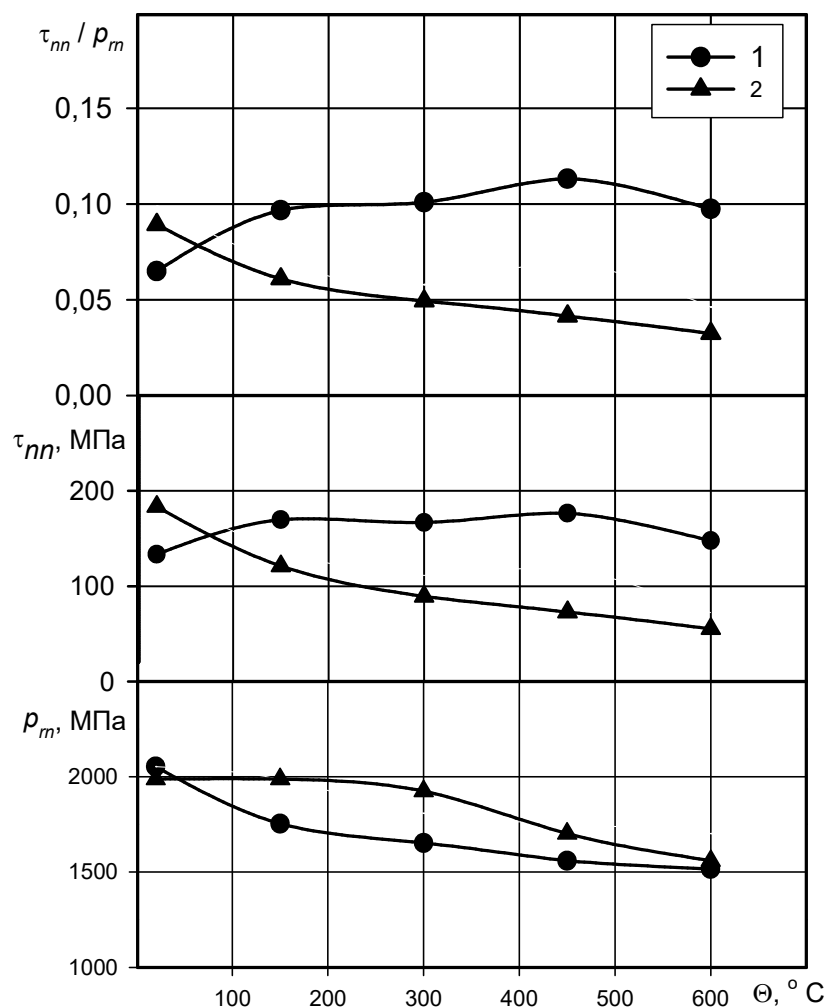


Рисунок 3.3 – Влияние температуры на предельные по нагрузке триботехнические характеристики при использовании ПСМ с:
1 – графитом; 2 – УК.

Кроме того, на предельные значения прочности τ_{nn} на срез адгезионных связей – в соответствии с уравнением (3.1) – оказывает предельное значение p_{rn} давления, вызывающее пластическую деформацию контакта. Как указывалось выше [28, 66], величина p_{rn} связана с твёрдостью испытуемых образцов, поэтому, как и твёрдость, изменяется [35] в связи с изменением температуры. Все эти факторы и формируют зависимости величины τ_{nn} , а также молекулярной (адгезионной) составляющей коэффициента трения

$$f_m = \frac{\tau_{nn}}{p_{rn}} = \frac{\tau_0}{p_{rn}} + \beta, \quad (3.2)$$

от температуры контакта (рис. 3.3).

Следует при этом иметь в виду, что при пластическом контакте

$$f_m = C = \frac{\tau_{nn}}{p_{rn}} = \frac{\tau_0}{p_{rn}} + \beta, \quad (3.2)$$

где C – индекс совместимости трущихся поверхностей. Из табл. 3.2 видно, что величина τ_0 значительно меньше величин p_{rn} , поэтому в первом приближении:

$$C \approx \beta. \quad (3.3)$$

На рис. 3.3 приведены температурные зависимости предельных величин p_{rn} , τ_{nn} , τ_{nn}/p_{rn} , соответствующих пластическим деформациям на фрикционном контакте, т.е. по максимальным значениям величин на графиках $\tau_n = f(p_r)$ из рис. 3.1.

Из рис. 3.3 видно, что при использовании ПСМ – Г (с графитом) зависимости τ_{nn} и τ_{nn}/p_{rn} носят экстремальный характер с максимумом при $\theta = 450$ °С. Для ПСМ-УК (с углеродным каркасом) с повышением температуры (в рассматриваемом диапазоне) величины τ_{nn} и τ_{nn}/p_{rn} монотонно уменьшаются. Причём, значения τ_{nn} и τ_{nn}/p_{rn} для ПСМ – УК в 2 – 3 раза меньше соответствующих значений для ПСМ – Г.

Из рис. 3.3 видно также, что нагрузочная способность фрикционного контакта, характеризуемая величиной p_{rn} , пропорциональной кратковременному пределу текучести σ_t более мягкого тела пары трения [66, 68], с повышением температуры θ уменьшается. При этом применение ПСМ

–УК взамен ПСМ – Г заметно (на 10-15%) повышает нагрузочную способность подвижного фрикционного контакта.

Данные, приведенные на рис. 3.3, позволяют объяснить результаты, приведенные в таб. 3.1. С повышением температуры триботехнические характеристики пары ВК8 – сталь 45 при использовании смазочного материала, модифицированного углеродным каркасом, за счет содержащихся в нем активных компонентов, уменьшают прочность $\tau_{\text{пл}}$ на срез адгезионных связей и молекулярную составляющую коэффициента трения ($\tau_{\text{пл}}/p_{\text{тп}}$), в значительной мере влияющих на интенсивность изнашивания и локальную прочность фрикционного контакта [58]. Причем, в исследованном диапазоне температур (до 600 °С) при сравнении ПСМ-УК и ПСМ-Г это уменьшение весьма существенно – в 2 – 3 раза.

Возможно, именно эти обстоятельства и приводят к увеличению противозадирных характеристик $P_{кр}$, $P_{св}$, I_3 , а также к уменьшению показателя износа D_u .

На основании результатов данного исследования можно сделать вывод, что углеродный каркас – весьма перспективный материал в качестве модифицирующего компонента, существенно улучшающего триботехнические характеристики ПСМ.

3.2 Регрессионный анализ влияния углеродного каркаса на трибологические характеристики смазочного материала

В работе [135] показано, что если в качестве добавки в ПСМ использовать УК, получаемого из остаточного продукта переработки нефти, обеспечиваются более благоприятные триботехнические характеристики, чем графит – более известный модификатор. Данное исследование направлено на изучение влияния процентного содержания УК на триботехнические характеристики ПСМ.

Рассмотрим результаты математико – статистического экспериментального изучения влияния процентного содержания УК и основы – цилиндрического масла (ЦМ) на следующие триботехнические характеристики на ЧМТ по ГОСТ 9490 – 75: нагрузку сваривания $P_{св}$, критическую нагрузку $P_{кр}$, диаметр пятна износа D_u , индекс задира I_z .

Если использовать математико – статистические методы при постановке задачи, эксперименте и при обработке полученных результатов, то существенно уменьшаются сроки решения задач, снижаются затраты на исследования и повышается качество полученных результатов.

Для численного моделирования применяли планирование полного факторного эксперимента методом «крутого восхождения» [136]. Определяли зависимость индекса задира I_z , критической нагрузки $P_{кр}$ и нагрузки сваривания $P_{св}$, диаметра пятна износа D_u от процентного содержания в ПСМ УК и ЦМ. В ПСМ добавляли в качестве дисперсной фазы литол, полагая, что его содержание в ПСМ не оказывает существенное влияние.

В качестве независимых переменных были выбраны: процентное содержание УК (X_1) и процентное содержание ЦМ (X_2). В качестве зависимых переменных, варьируемых на двух уровнях, рассматривали $P_{кр}$, $P_{св}$, I_z , D_u . Их значения и интервалы варьирования указаны в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Уровни факторов

Факторы	X_1 (УК)	X_2 (ЦМ)
Основной уровень (x_i)	12	70
Интервал варьирования (Δx_i)	8	10
Верхний уровень ($x_i = 1$)	20	80
Нижний уровень ($x_i = -1$)	4	60

Кодирование значения количественных факторов (x_i) связаны с натуральными (X_i) соотношениями:

$$x_1 = \frac{X_1 - 12}{8}; x_2 = \frac{X_2 - 70}{10} \quad x_1 = \frac{X_1 - 12}{8}; x_2 = \frac{X_2 - 70}{10}$$

(3.4)

Более полную информацию об изучаемых зависимостях получали, используя полный факторный эксперимент. При этом число опытов N находили количеством независимых факторов:

$$N = 2^k = 2^2 = 4 \quad (3.5)$$

После реализации полного факторного эксперимента математическую модель можно представить как:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (3.6)$$

где b_i – коэффициент регрессии.

Сформирована матрица планирования и результатов опытов (табл. 3.4) для расчёта коэффициентов этой модели.

Таблица 3.4 – Расширенная матрица плана 2^2 и результатов опытов

№ опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	y
1	+	+	+	+	y_1
2	+	–	+	–	y_2
3	+	+	–	–	y_3
4	+	–	–	+	y_4

Коэффициент регрессии рассчитывается по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{N} \quad b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{N}, \quad (3.7)$$

где $i = 0, 1, 2, 3, 4$.

Смазочную композицию получали путем тщательного перемешивания компонентов: порошка из УК, литола и ЦМ. Процентное содержание компонентов определяли по весу, с помощью аналитических весов.

Образцы – четыре шарика из стали ШХ15 диаметром 10 мм образуют пирамиду (рис. 3.4). В чашке с испытываемым смазочным материалом

находятся неподвижными три нижних шарика, верхний шарик закреплен в шпинделе, вращающемся с частотой 1460 ± 70 об/мин.

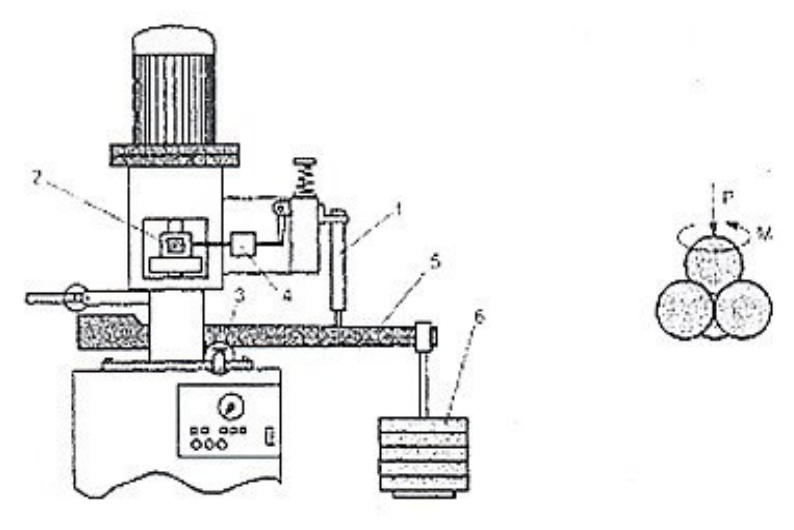


Рисунок 3.4 – Схема установки ЧМТ-1 (а); схема трения (б):

1, 4 – датчики перемещения и силы; 2 – узел трения; 5 – рычаг; 6 – грузы.

Каждый эксперимент повторяли по 3 раза и рассматривали средне-арифметические результаты, каждый раз на новой пробе испытуемого ПСМ и с новыми шариками.

Длительность работы ЧМТ при текущей нагрузке в процессе определения нагрузки сваривания, индекса задира и критической нагрузки составляла $10 \pm 0,2$ с., при определении показателя износа – $60 \pm 0,5$ мин.

Микроскоп с увеличением $\times 20$, имеющий отсчетную шкалу с ценой деления 0,01 мм использовался диаметр пятна износа шариков.

Индекс задира I_z вычисляется по формуле:

$$I_z = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (3.8)$$

где $\sum Q_i$ – сумма условных нагрузок от начальной нагрузки до ближайшей нагрузки, предшествующей нагрузке сваривания; n – число определений.

Условную нагрузку Q_i для каждой осевой нагрузки P_i вычисляли по формуле:

$$Q_i = P_i \frac{d_i}{d_{ui}}, \quad (3.9)$$

где P_i – исследуемая величина нагрузки; d_i – средний диаметр пятна износа нижних шариков, соответствующий нагрузке P_i ; d_{ui} – диаметр пятна зоны упругой деформации шариков по Герцу, соответствующий нагрузке P_i .

В табл. 3.5 приведены экспериментальные результаты, полученные на ЧМТ [137].

Таблица 3.5 – Результаты проведенных опытов

Состав смазок	$P_{кр}$, кН	$P_{св}$, кН	I_3 , кН	D_u , мм
20% УК; 80% ЦМ; 0% Л	1,0	4,22	89,57	0,60
4% УК; 80% ЦМ; 16% Л	1,33	2,5	69,79	0,62
20% УК; 60% ЦМ; 20% Л	1,06	5,0	94,55	0,64
4% УК; 60% ЦМ; 36% Л	0,89	2,66	62,47	0,64

Выполненные вычисления позволили получить следующие общие виды линейных уравнений регрессии:

– для $P_{кр}$:

$$y_1 = 1,07 - 0,04x_1 + 0,10x_2 - 0,13x_1x_2; \quad (3.10)$$

– для $P_{св}$:

$$y_2 = 3,60 + 1,02x_1 - 0,24x_2 - 0,16x_1x_2; \quad (3.11)$$

– для I_3 :

$$y_3 = 79,10 + 12,97x_1 + 0,59x_2 - 3,08x_1x_2; \quad (3.12)$$

– для D_u :

$$y_4 = 0,63 - 0,01x_1 - 0,02x_2 - 0,01x_1x_2; \quad (3.13)$$

В уравнениях (3.10) и (3.13) коэффициенты регрессии, из расчетов по методике [136], являются статистически незначимыми, т.е. в заданном интервале варьирования на величины D_u и $P_{кр}$ исследуемые факторы не оказывают существенного влияния. Все коэффициенты регрессии в уравнениях (3.11) и (3.12) являются статистически значимыми.

С помощью F – критерия Фишера [136] проверяли адекватность математических моделей (3.11) и (3.12). Установлено, что гипотеза об адекватности этих моделей при 5%-ном уровне значимости не отвергается.

Из уравнений (3.11) и (3.12) видно, что наиболее значимое влияние на $P_{св}$ и I_3 оказывает процентное содержание УК.

При этом на триботехнические характеристики процентное содержание в ПСМ ЦМ оказывает неоднозначное влияние: $P_{св}$ с повышением содержания ЦМ уменьшается (3.11), а I_z при этом возрастает (3.12). Это можно объяснить тем, что I_z вычисляется с учетом величины D_u (3.9), которая в рассмотренном интервале варьирования не зависит от исследуемых факторов.

Можно предположить, что из-за этого на I_z более существенное влияние оказывает совместное действие исследуемых факторов. Это видно из сопоставления коэффициентов в уравнениях (3.10) и (3.11): 0,16 и 3,08 – при произведении X_1X_2 . Причем, для I_z (3.11) этот коэффициент является значимым.

Известно [30], что $P_{св}$ в зависит от локальной прочности фрикционного контакта, т.е. от отношения $\tau_{пп}/p_{пп}$, где $\tau_{пп}$ – тангенциальная прочность адгезионных связей на срез при нормальных напряжениях на контакте $p_{пп}$, соответствующих пластической деформации на фрикционном контакте.

Происходит сваривание фрикционного контакта с образованием задира в условиях, когда отношение $\tau_{пп}/p_{пп} \geq 0,5$ [58, 66].

При исследовании ПСМ на ЧМТ происходит естественный разогрев зон трения за счет диссипации потерь энергии на трение, что формирует немонотонный характер зависимости отношения $\tau_{пп}/p_{пп}$ от температуры контакта (рис. 3.3), процентное содержание УК в ПСМ изменяет уровень величины этого отношения.

Следовательно, для оценки влияния различных модификаторов $P_{св}$ является наиболее информативной характеристикой.

Из уравнения (3.11) следует, что $P_{св}$ достигает максимальной величины в исследованном диапазоне изменяющихся параметров при значениях переменных $x_1 = 1$, а $x_2 = -1$, т.е.: УК $X_1 = 20\%$, ЦМ $X_2 = 60\%$, литола 20% . Такой состав ПСМ применяли в дальнейших исследованиях.

Таким образом, установлено, что наиболее значимое влияние на $P_{св}$ и I_z в исследованном диапазоне изменяющихся параметров оказывает процентное

содержание УК. D_u и $P_{кр}$ не зависят от содержания изучаемых компонентов в ПСМ.

3.3 Исследование химического состава и сравнение триботехнических характеристик ПСМ, модифицированных углеродным каркасом и дисульфидом молибдена

Известно [93, 94, 100, 101], что дисульфид молибдена широко применяется в ПСМ как антифрикционная, термостойкая добавка, существенно улучшающая триботехнические характеристики смазки, не повышающие работоспособность тяжело нагруженных трибосопряжений.

В этой связи представляет практический интерес сравнение антифрикционных свойств дисульфида молибдена (ДМ) и углеродного каркаса (УК) как добавок в одну и ту же дисперсионную среду, а исследование химического состава УК позволяет объяснить полученные результаты.

Методика проведения экспериментов по адгезионному взаимодействию пар трения с учётом ПСМ, давления и температуры подвижного контакта, а также исследования противоизносных и противозадирных свойств ПСМ на ЧМТ по ГОСТу 9490-75 изложены выше и в работе [138].

Смазочные композиции исследуемых ПСМ состояли из: 60% цилиндрического масла (ЦМ), 20% литола и 20% модифицирующих добавок. В ПСМ-УК добавляли УК, в ПСМ-ДМ – дисульфид молибдена.

Цилиндровое масло выбрано в качестве основы в связи с его хорошей способностью равномерно распределяться по площади трения и стойкостью против окисления кислородом воздуха при высоких температурах с образованием нагара [100]. Это масло не вызывает коррозию металлических поверхностей и сохраняет текучесть при низких температурах как указывалось выше, в исследуемых ПСМ литол используется в качестве

дисперсионной среды, которая представляет собой антифрикционную многоцелевую смазку, загущенную литиевым мылом 12 – гидроксистеариновой кислоты [100].

Исследование микроструктуры и химического состава углеродного каркаса выполняли на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490 LV.

Полученные экспериментальные результаты по противозадирным и противоизносным характеристикам испытываемых ПСМ и микрохиманализа УК приведены в табл. 3.6 и 3.7 соответственно.

Таблица 3.6 – Противозадирные и противоизносные характеристики смазочных материалов

Испытываемый смазочный материал	Триботехнические характеристики			
	$P_{кр}$, Н	$P_{св}$, Н	I_3 , Н	D_u , мм
ПСМ-УК	1060	5000	94,55	0,64
ПСМ-ДМ	940	4220	76,77	0,64

На рис. 3.5 – 3.7 и в табл. 3.8 показаны полученные зависимости показателей адгезионного взаимодействия от давления, температуры и смазочной среды. На рис. 3.8 приведено электронное изображение порошка УК.

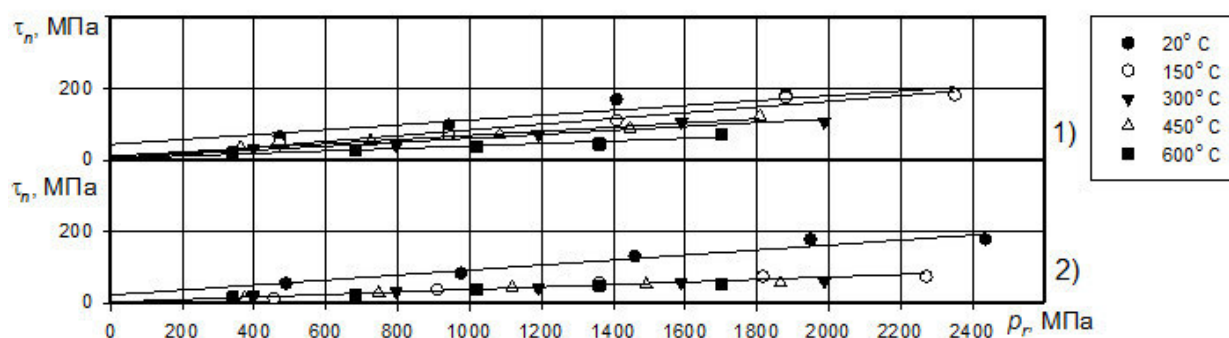


Рисунок 3.5 – Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта:

1 – 20% ДМ, 20% Л, 60% ЦМ; 2 – 20% УК, 20% Л, 60% ЦМ

Таблица 3.7 – Результат химического анализа углеродного каркаса

С	О	Al	Р	S	Cl	Zn
в весовых %						
84.67	4.77	1.47	0.27	0.24	8.19	0.39

Из таблицы 3.6 видно, что ПСМ-УК обеспечивает более благоприятные противозадирные триботехнические характеристики по сравнению с другим испытываемым ПСМ-ДМ на 13 – 26%. Величины противоизносной характеристики D_u у них практически одинаковые.

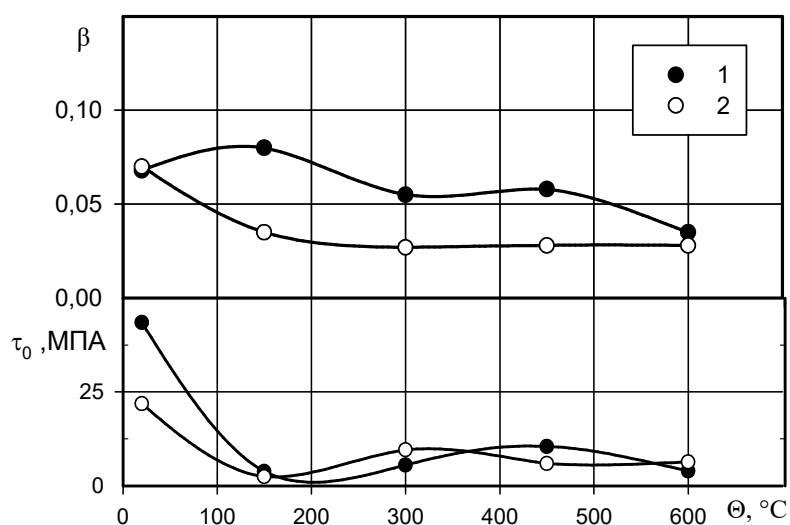


Рисунок 3.6 – Влияние температуры на характеристики адгезионного взаимодействия при исследовании ПСМ с: 1 – ДМ; 2 – УК

Таблица 3.8 – Триботехнические характеристики исследуемых ПСМ

Добавка в ПСМ	$\theta, ^\circ\text{C}$	$p_{rn}, \text{МПа}$	$\tau_{nn}, \text{МПа}$	τ_{nn} / p_{rn}	β	$\tau_o, \text{МПа}$
20% ДМ, 20% Л, 60% ЦМ	20	2351	203	0,086	0,068	43,48
	150	2351	192	0,082	0,080	3,83
	300	1988	114	0,057	0,055	5,52
	450	1808	116	0,064	0,058	10,46
	600	1702	64	0,038	0,035	3,97
20% УК, 20% Л, 60% ЦМ	20	2436	193	0,079	0,070	21,86
	150	2271	82	0,036	0,035	2,44
	300	1988	62	0,031	0,027	9,57
	450	1865	59	0,031	0,028	5,95
	600	1702	54	0,032	0,028	6,38

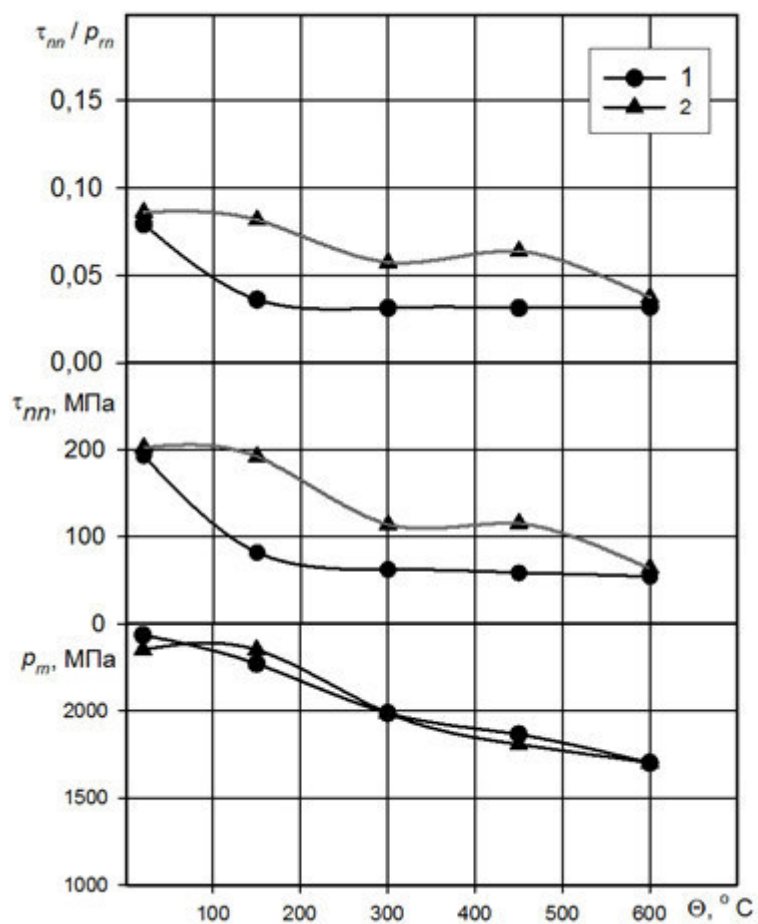


Рисунок 3.7 – Влияние температуры на триботехнические характеристики при использовании ПСМ с: 1 – УК, 2 – ДМ.

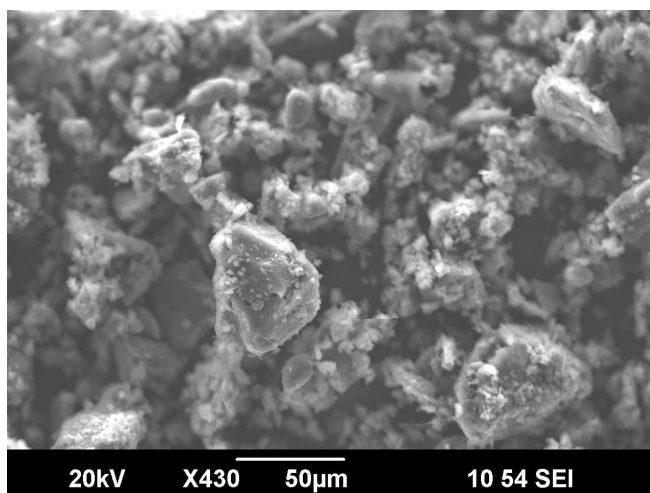


Рисунок 3.8 – Электронное изображение углеродного каркаса, выполненное на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490 LV

Из электронного изображения порошка УК, приведенного на рис. 3.8, и результатов микрохиманализа (см. табл. 3.7) видно, что размер частиц УК не превышает 50 мкм, а молекулы этих частиц содержат активные химические элементы – серу, фосфор, хлор, – которые, обычно входят в состав противозадирных присадок [100]. Можно предположить, что термическая деструкция активных компонентов углеродного каркаса, используемого в качестве комплексной добавки в ПСМ-УК, может существенно уменьшить в исследованном диапазоне температур до 600 °С величины прочности τ_m на срез адгезионных связей, молекулярной составляющей коэффициента трения (τ_m/p_m), в значительной мере влияющих на локальную прочность фрикционного контакта [53,58] и индекс совместимости трущихся поверхностей – коэффициента β (табл. 3.8), что приводит к увеличению противозадирных характеристик $P_{кр}$, $P_{св}$, I_z (табл. 3.6)

Следовательно, применение УК в качестве добавки взамен ДМ обеспечивает более благоприятные противозадирные и равные противоизносные характеристики ПСМ.

3.4 Сравнение триботехнических характеристик ПСМ, модифицированных естественным и искусственным углеродным каркасом

Смазка узлов трения любого назначения обеспечивает снижение трения сопряженных деталей, уменьшение износа и предотвращение из заедания. В современных машинах и механизмах существует много подвижных сопряжений, в которых в качестве смазочного материала рационально применить пластичную смазку (ПС) – густой мазеобразный продукт. Он прочно прилипает к рабочим поверхностям элементов узла трения и хорошо удерживается на них, не сбрасывается инерционными силами при их

движении, обеспечивая в тоже время полноценное смазывание трущихся поверхностей [93].

Эти достоинства ПС обусловлены их структурой и составом. ПС обычно рассматриваются как высокоструктурированные тиксотропные дисперсии твердого загущения в жидкой среде [139]. Иначе говоря, загуститель образует структурный каркас, который удерживает связанную с ним дисперсную среду.

Как правило, ПС состоят из трех компонентов – масла (дисперсионной среды), загустителя (дисперсионной фазы) и добавки (масло-нерастворимые присадки, твердые добавки и их композиции) – для повышения уровня функциональных свойств. Однако, если используется в качестве дисперсной среды высоковязкое масло, например, цилиндрическое масло, то, как показали исследования [138], ПС может функционировать без загустителя, т.е. такая ПС является углеводородной, в которой загустителем являются твердые углеводороды (например, парафины), находящиеся в масле.

Кроме того, в работе [138] показано, что применение углеродного каркаса (УК) в качестве добавки взамен дисульфида молибдена обеспечивает более благоприятные противозадирные и равные противоизносные характеристики ПС. Указано, что УК является побочным продуктом, получаемым при переработке нефти, содержит в связанном виде химические элементы, повышающие противозадирные и противоизносные свойства ПС (алюминий, серу, хлор, углерод и т.д.). При этом, остается неясным насколько важно, чтобы эти химические элементы находились в зоне трения в связанном состоянии, т.е. составляли некую композицию, комплекс (так называемый естественный углеродный каркас), а не как отдельные химические элементы.

Рассмотрим результаты исследования триботехнических характеристик ПС, модифицированных естественным углеродным каркасом (ЕУК) и искусственным углеродным каркасом – ИУК (составленным из набора

химических элементов и соединений), с учетом давления и температуры на контактных поверхностях [140].

Смазочные композиции исследуемых материалов состоят из 60% цилиндрического масла (ЦМ), 20% литола и 20% модифицированных добавок. В ПС (ЕУК) добавляют 20% углеродного каркаса; в ПС (ИУК) – 8% алюминий хлористый (ГОСТ3758-76), 1% серы, 91% уголь активированный. ЦМ выбрано в качестве основы в связи с ее хорошей способностью равномерно распределяться по площади трения и стойкостью против окисления кислородом воздуха при высоких температурах с образованием нагара [94]. Это масло не вызывает коррозию металлических поверхностей и сохраняет текучесть при низких температурах. В исследуемых ПС используется литол как антифрикционная многоцелевая составляющая, загущенная литиевым мылом 12 – гидроксистеариновой кислоты [100].

Полученные экспериментальные результаты по противозадирным и противоизносным характеристикам испытываемых ПС приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9 – Противозадирные и противоизносные характеристики смазочных материалов

Испытываемый смазочный материал	Триботехнические характеристики			
	$P_{кр}$, Н	$P_{св}$, Н	I_z , Н	D_u , мм
ПС (ЕУК)	1060	5000	94,55	0,64
ПС (ИУК)	940	3150	71,76	0,65

На рис. 3.9 приведены температурные зависимости предельных величин p_{rn} , τ_{nn} , τ_{nn}/p_{rn} , соответствующих пластическим деформациям на фрикционном контакте.

Из таблицы 3.9 видно, что ПС (ЕУК) обеспечивает более благоприятные противозадирные триботехнические характеристики по сравнению с другим испытываемым материалом ПС (ИУК) на 13 – 26%. Величины противоизносной характеристики D_u у них практически одинаковые.

Из рис. 3.9 видно, что до температуры контакта 350 – 400 °С ПС (ЕУК) обеспечивает существенно лучшие триботехнические характеристики по сравнению с ПС (ИУК).

Для объяснения полученных результатов рассмотрим более подробно совместное влияние температуры и давления на характеристики адгезионного взаимодействия при трении (рис. 3.10).

Как видно из рис. 3.10, в исследованном диапазоне температур пары трения подтвердили линейный характер зависимости:

$$\tau_{ni} = \tau_0 + \beta p_{ri}, \quad (3.14)$$

где τ_n – прочности адгезионных связей на срез; τ_0 – прочность адгезионных связей на срез при отсутствии контактного давления; β – коэффициент упрочнения адгезионных связей от давления p_r на контакте.

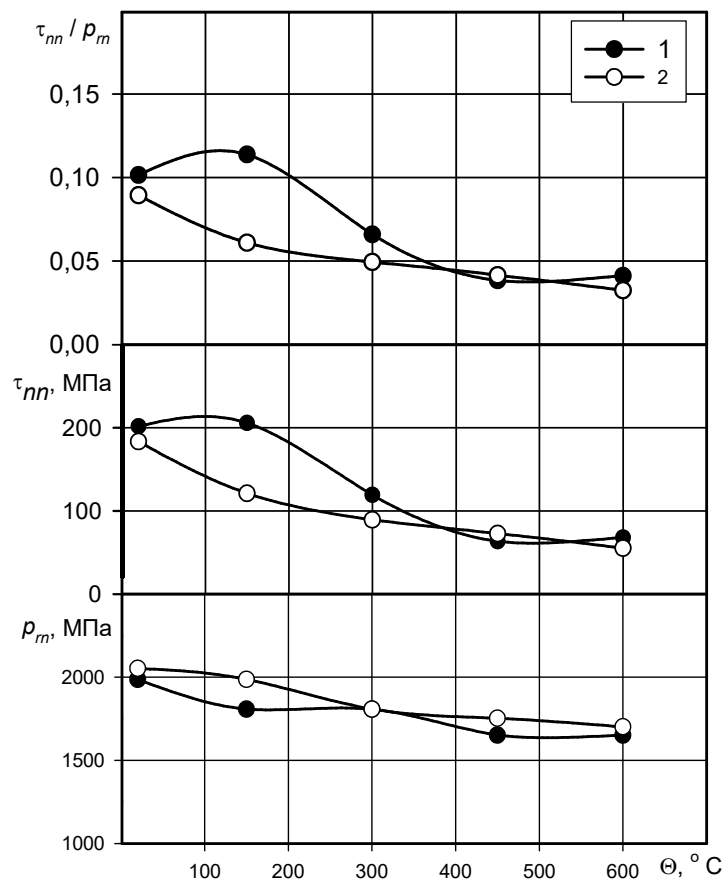


Рисунок 3.9 – Влияние температуры на триботехнические характеристики при использовании ПСМ с: 1 – ИУС; 2 – ЕУК.

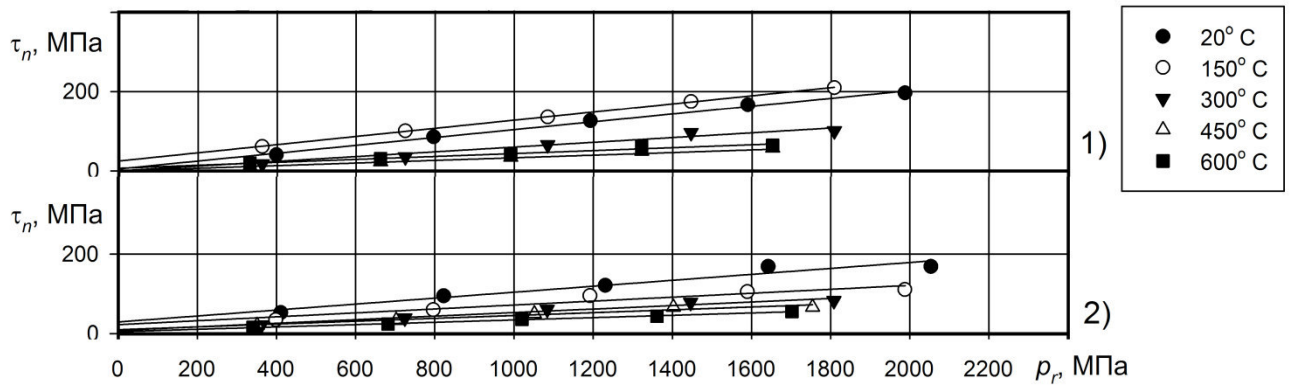


Рисунок 3.10 – Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей на различных температурах фрикционного контакта при использовании ПСМ с: 1 – ИУС; 2 – ЕУК

Температура контакта и состав ПСМ влияют на фрикционные параметры τ_0 и β (рис. 3.11), которые изменяют прочность τ_n и адгезионную составляющую коэффициента трения:

$$f_{ai} = \frac{\tau_{ni}}{p_{ri}} = \frac{\tau_0}{p_{ri}} + \beta \quad (3.15)$$

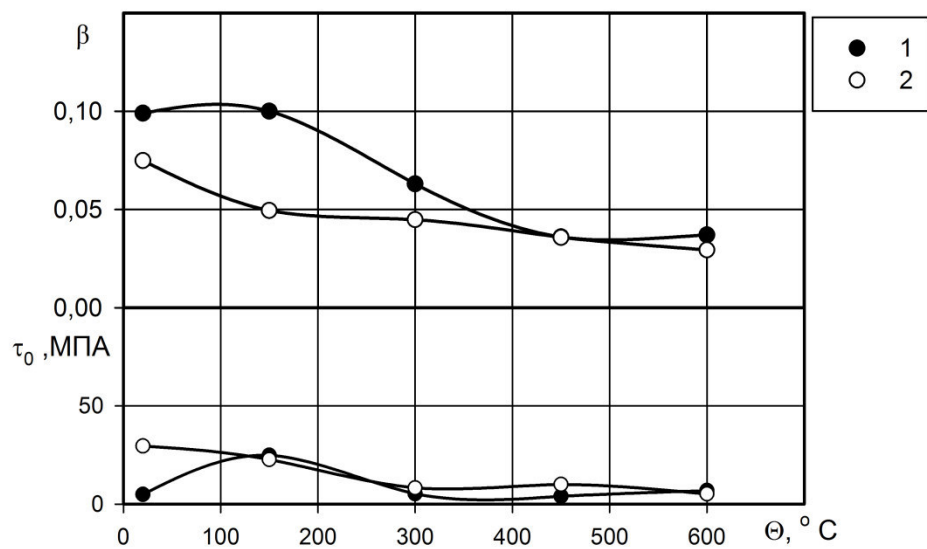


Рисунок 3.11 – Влияние температуры на величины τ_0 и β фрикционного контакта при использовании ПСМ с: 1 – ИУС; 2 – ЕУК

Как было показано выше, гидродинамическая аналогия устанавливает характер линейной зависимости τ_n от контактного давления с температурными зависимостями параметров:

$$\beta = \frac{C_1 \cdot \Delta A}{R\Theta} \quad (3.16)$$

$$\tau_0 = C_1 \cdot \left(1 + \frac{E_g}{R\Theta} \right), \quad (3.17)$$

где C_1 – константа; R – постоянная Больцмана; Θ – температура контакта; E_g – энергия активации вязкого течения фрикционного контакта; ΔA – приращение объема зоны контакта, связанное с необходимостью образования некоторого зазора для разрыва образовавшихся связей и зависящее от пластичности так называемого «третьего тела» [66] – зоны контакта.

Повышение температуры контакта приводит к изменению величины τ_0 (3.17), коэффициента упрочнения адгезионных связей β (3.16), а также – в условиях пластического контакта – предельного давления p_m (рис. 3.10), связанного с твердостью более мягкого материала из контактирующих тел фрикционной пары.

Из приведенных выражений видно, что давления p_r зависит не только от прочности адгезионных связей на срез, но и от пластичности «третьего тела» и энергии активации его вязкого течения, а также от температуры, оказывающей через изменение величины ΔA прямое и косвенное воздействие на рассматриваемые параметры.

Изложенное выше позволяет объяснить полученные результаты по адгезионному взаимодействию, приведенные на рис. 3.9 и 3.11:

- применение в качестве добавки ЕУК и ИУК практически не изменяет энергию активации вязкого течения «третьего тела» (на рис. 3.11 экспериментальные точки по τ_0 практически совпадают);
- при сравнительно невысоких температурах контакта (до 350 – 400 °С) добавка ИУК в ПС повышает пластичность «третьего тела», образовавшегося

в зоне контакта, что увеличивает параметр β (рис. 3.11), а также величины τ_{nn} и τ_{nn}/p_{rn} (рис. 3.9);

– при температурах 350 – 400 °С и выше в добавке ЕУК при трении, очевидно, происходит термическая деструкция активных компонентов углеродного каркаса, используемого в качестве комплексной добавки в ПС (ЕУК), в результате чего экспериментальные точки по β , τ_{nn} и τ_{nn}/p_{rn} для ПС (ЕУК) и ПС (ИУК) практически совпадают.

3.5 Влияние окисления озоном дисперсной среды на характеристики адгезионного взаимодействия при трении с учетом давления и температуры

Выше отмечалось [100], что окисление моторного масла в двигателях внутреннего сгорания приводит к образованию смол, нагара и разрушению присадок, присутствующих в нем, и как следствие – к снижению эксплуатационных свойств. В то же время, исследования [97] окисления нефтепродуктов (окислительное обессеривание), в том числе и масляных дистиллятов [98], показали, что при окислении нефтепродуктов происходит процесс превращения содержащихся в них сульфидов в сульфоксиды и в сульфоны – более термоустойчивые соединения.

В работах [135,140] установлено, что модификация пластичной смазки (ПС) углеродным каркасом (УК) (побочным продуктом, получаемым при переработке нефти), существенно улучшает противозадирные и противоизносные характеристики смазки. Углеродный каркас содержит в связанном виде химические элементы: углерод, серу, алюминий, хлор, цинк, которые составляют некоторую композицию, комплекс.

Рассмотрим результаты исследования влияния окисления озоном дисперсной среды ПС, модифицированной УК, на характеристики

адгезионного взаимодействия на фрикционном подвижном контакте (с учетом температуры и давления).

В качестве дисперсной среды ПС использовали компрессорное масло КС-19 из сернистой парафинистой нефти селективной очистки, это масло используется во многих областях промышленности, в том числе, химической и металлургической, а также на транспорте. По условиям работы масло КС-19 находится в контакте с нагретыми до высокой температуры деталями и служит уплотняющей средой для герметизации трибосопряжений. В соответствии с ГОСТ 9243-75 масло КС-19 имеет высокие термостабильность и вязкость. Дисперсионная фаза (загуститель) в испытуемых ПС отсутствовала. Окисление КС-19 проводили озоном в течение 30 минут при комнатной температуре. При этом кинематическая вязкость КС-19 существенно увеличилась: с 22 мм²/с до 82 мм²/с.

Исследовали три композиции пластичных смазок. Две композиции не содержали добавок, повышающих уровень функциональных свойств ПС: неокисленное компрессорное масло — КС-19(н) и окисленное компрессорное масло — КС-19(о). Дисперсионной средой для третьей композиции с добавкой 20 % углеродного каркаса служило масло КС-19(о).

На рис. 3.12 приведены температурные зависимости предельных величин p_m , τ_m и f_m , соответствующих пластическим деформациям на фрикционном контакте.

Из рис. 3.12 видно, что, начиная с температуры контакта $\Theta \approx 150^\circ \text{C}$, триботехнические характеристики ПС КС-19(н) существенно хуже по сравнению с ПС КС-19(о). Причем, это отличие увеличивается по мере повышения температуры Θ . Кроме того, из этого рисунка следует, что на триботехнические характеристики ПС с окисленной дисперсионной средой температура Θ оказывает незначительное влияние, а добавка УК существенно улучшает эти характеристики во всем исследованном диапазоне температур.

Для объяснения полученных результатов рассмотрим более подробно совместное влияние на характеристики адгезионного взаимодействия давления и температуры.

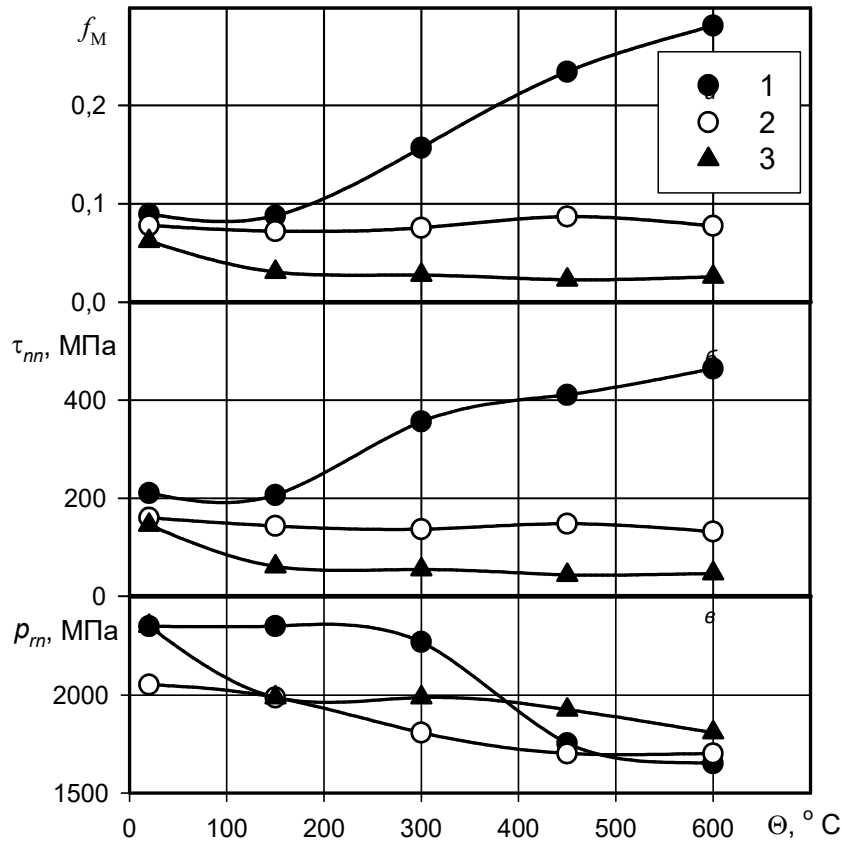


Рисунок 3.12 – Влияние температуры на триботехнические характеристики

$f_M(a)$, $\tau_{nn}(б)$ и $p_m(в)$ пары ВК8 — Ст. 45 при использовании ПС:

1 – КС-19(н); 2 – КС-19(о); 3 – КС-19(о) + УК

Как видно из рис. 3.13, биномиальная зависимость (3.15) соблюдается для исследованных пар трения. ПСМ и температура контакта влияют на фрикционные параметры τ_0 и β (рис. 3.14), которые изменяют прочность τ_{nn} и адгезионную составляющую коэффициента трения в соответствии с выражением (3.15).

Гидродинамическая аналогия устанавливает линейный характер зависимости τ_n от контактного давления p_r (3.14) с температурными зависимостями параметров: β (3.16) и τ_0 (3.17).

Повышение температуры контакта приводит к изменению величины τ_0 (3.17), коэффициента упрочнения адгезионных связей β (3.16), а также – в условиях пластического контакта – предельного давления p_{rn} и коэффициента f_m (3.15), связанного с твердостью более мягкого материала из контактирующих тел фрикционной пары.

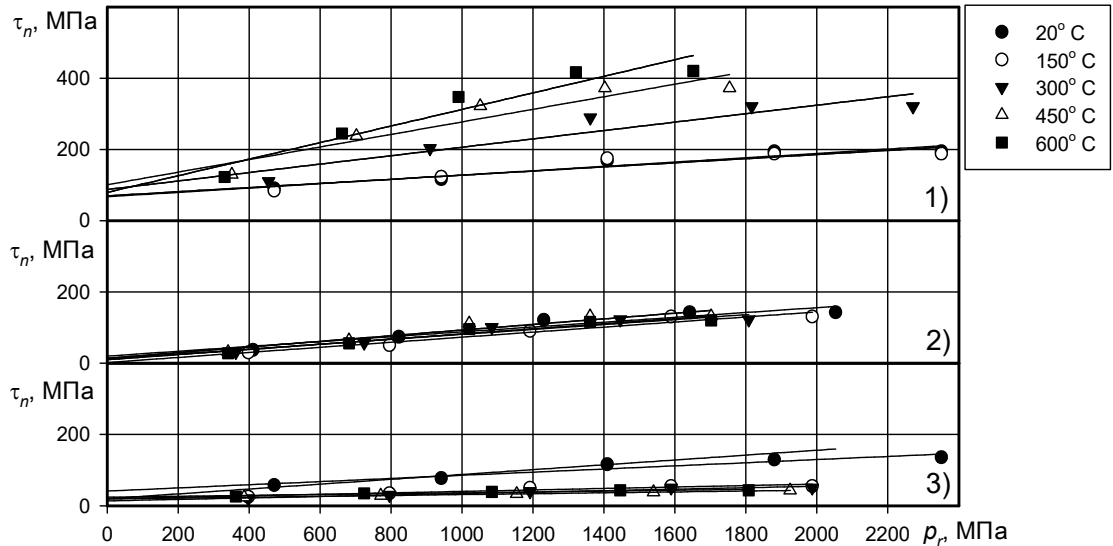


Рисунок 3.13 – Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей на срез при различных температурах фрикционного контакта при использовании ПС:

1 — КС-19(н); 2 — КС-19(о); 3 — КС-19(о) + УК

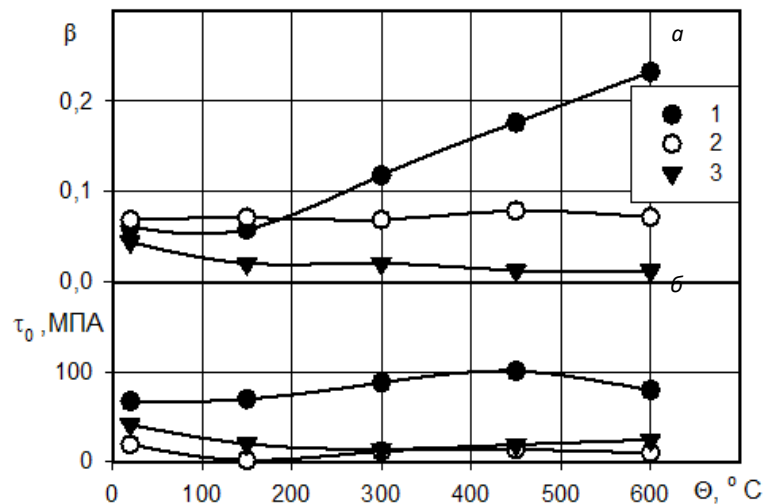


Рисунок 3.14 – Влияние температуры на величины τ_0 (a) и β (б) фрикционного контакта при использовании СМ:

1 — КС-19(н); 2 — КС-19(о); 3 — КС-19(о) + УК

Направления влияния прямо противоположное приведенным выше зависимостям: с повышением температуры Θ увеличивается пластичность «третьего тела» (ΔA) [66], т.е. увеличивается числитель в выражении (3.16), но увеличивается и значение $R \cdot \Theta$. Это определяет характер зависимости β (Θ) — рис. 3.14.

На основании изложенного можно объяснить полученные результаты по адгезионному взаимодействию, приведенные на рис. 3.12 и 3.14.

ПСМ КС-19(н) — не окисленная — сохраняет свои функциональные свойства до температуры $\Theta \approx 150^\circ \text{C}$, в дальнейшем термическая деструкция смазочного материала делает его применение неэффективным: возрастает пластичность «третьего тела» и фрикционный параметр β увеличивается (рис. 3.14), что повышает величины τ_{nn} и f_m . Окисление компрессорного масла КС-19 озоном, снижая пластичность «третьего тела», уменьшает параметр β и делает его практически независимым от температуры Θ контакта (кривые 2 и 3 на рис. 3.14) вплоть до 600°C . Применение добавки УК в ПС КС-19(о) еще в большей мере снижает пластичность «третьего тела» и уменьшает фрикционный параметр β , а также величины τ_{nn} и f_m (рис. 3.12). По-видимому, это связано с влиянием термоустойчивых сульфонов и сульфоксидов, образующихся в нефтяном масле при окислении озоном [99,100], а также активным действием содержащихся в УК химических элементов, повышающих противозадирные и противоизносные свойства ПС [135].

Кроме того, как видно из рис. 3.14, окисление масла КС-19 озоном и добавка УК снижают фрикционный параметр τ_0 , что согласно выражению (3.17) может быть связано со снижением энергии активации вязкого течения «третьего тела». Уменьшение параметра τ_0 согласно выражениям (3.14) и (3.15) способствует уменьшению величин τ_{nn} и f_m .

Таким образом, окисление компрессорного масла КС-19 озоном и активные компоненты углеродного каркаса, используемого в качестве

комплексной добавки, оказывают благоприятное влияние на характеристики адгезионного взаимодействия при трении вплоть до температуры 600° С на фрикционном контакте.

3.6 Исследование коэффициента трения скольжения

Коэффициент трения в соответствии с механико-молекулярной теорией трения [66] равен:

$$f = f_{\delta} + f_a, \quad (3.18)$$

где f_{δ} – деформационная составляющая коэффициента трения; f_a – молекулярная (адгезионная) составляющая коэффициента трения.

Величину деформационной составляющей можно вычислить по формуле [66]:

$$f_{\delta} = k \cdot p_c^m, \quad (3.19)$$

где k и m – параметры, зависящие от свойств контактирующих поверхностей, наличия смазки и пр.; p_c – контурное давление для множественного контакта, а для контакта единичной микронеровности $p_c = p_r$.

Увеличение нагрузки (давления) увеличивает f_{δ} коэффициента трения согласно выражению (3.19).

Как было показано выше, адгезионная составляющая f_a коэффициента трения зависит от фрикционных параметров τ_0 , β и давления.

Таким образом получается, что величина коэффициента f трения, равная:

$$f = k \cdot p_c^m + \frac{\tau_0}{p_r} + \beta. \quad (3.20)$$

Технологические и физико-механические свойства контактирующих поверхностей оказывают влияние на величину коэффициента трения, исходя из выражения (3.20). При этом, как было показано выше, от температуры контакта зависят фрикционные параметры τ_0 и β могут. Величина параметра τ_0 оказывает влияние на характер зависимости f от давления:

– f с увеличением давления увеличивается при $\tau_0 = 0$;

– может быть немонотонной зависимость f от давления при $\tau_0 \neq 0$.

Необходимо, помимо того, что сопоставление коэффициента f трения следует проводить при одинаковых значениях давления, также учитывать следующее: при сравнении ПСМ, может уменьшаться пьезокоэффициент β , хотя с другой стороны, увеличиваться параметр τ_0 . В результате адгезионная составляющая коэффициента трения, равная

$$f_a = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta,$$

может изменяться неоднозначно при одних и тех же значениях давления p_r . Кроме того, величина деформационной составляющей коэффициента f трения повышается в процессе трения, когда микронеровности более твердой поверхности внедряются в более мягкую поверхность, повышают [66].

Выполненные на трибометре «NANOVEA TRB» исследования подтвердили эти предположения. На рис. 3.15 – 3.18 приведены зависимости f от числа циклов N нагружения, результаты занесены в таблицу 3.10.

Таблица 3.10 – Средние значения коэффициента трения при исследовании различных ПСМ. Нагрузка 2 Н, 15 000 циклов нагружения

Смазочный материал	Средний коэффициент трения
Без смазки	0,323
60% КС19(ок) + 20% УК	0,215
60% КС19(ок) + 20% Л + 20% УК	0,118
60% ЦМ + 20% Л + 20% УК	0,146
60% ЦМ + 20% Л + 20% ДМ	0,128

Однако объективный анализ по коэффициенту f трения по этим данным выполнить практически невозможно, т.к. под действием постоянной нагрузки $P = 2$ Н в разных парах трения на контакте возникают разные давления (из-за изменения фактической площади касания, различия в физико-механических свойствах контактирующих материалов и ввиду износа).

Измеренные по окончании опытов по изнашиванию различных ПСМ диаметры пятна износа приведены в табл.3.11. Если принять равными

площадь касания и площадь износа, то для различных пар трения, как это следует из табл. 3.11, эта площадь может существенно изменяться, поэтому по данным табл.3.10 можно лишь установить некоторые тенденции влияния смазочной композиции ПСМ на коэффициент f трения.

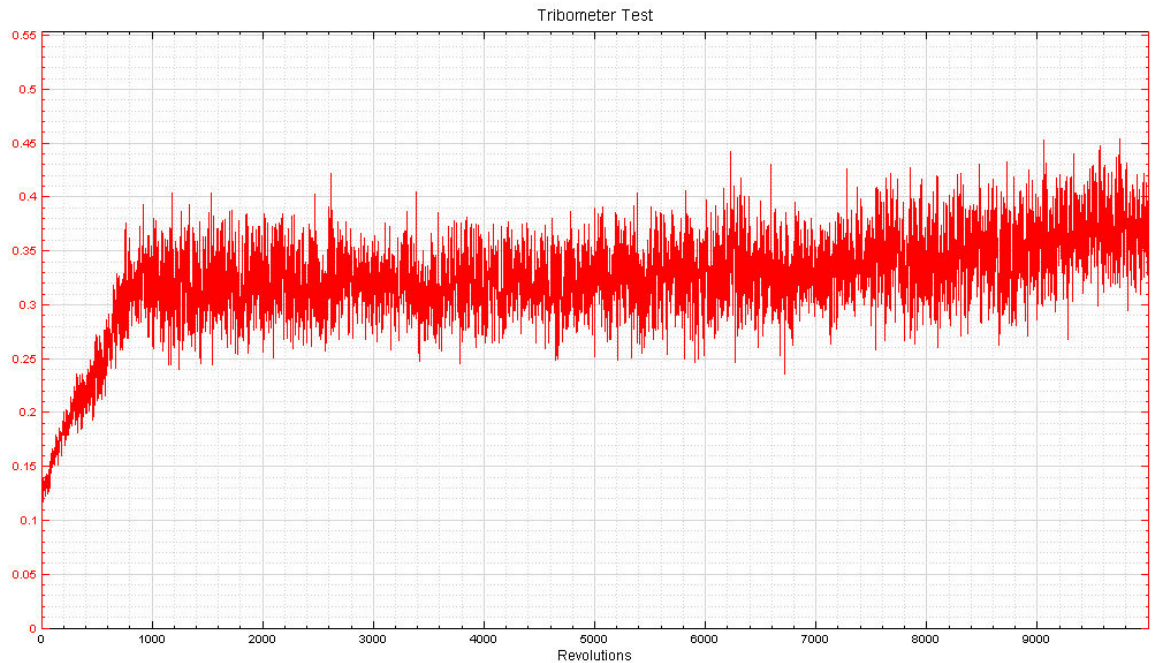


Рисунок 3.15 – Влияние износа на коэффициент трения
(трение всухую)

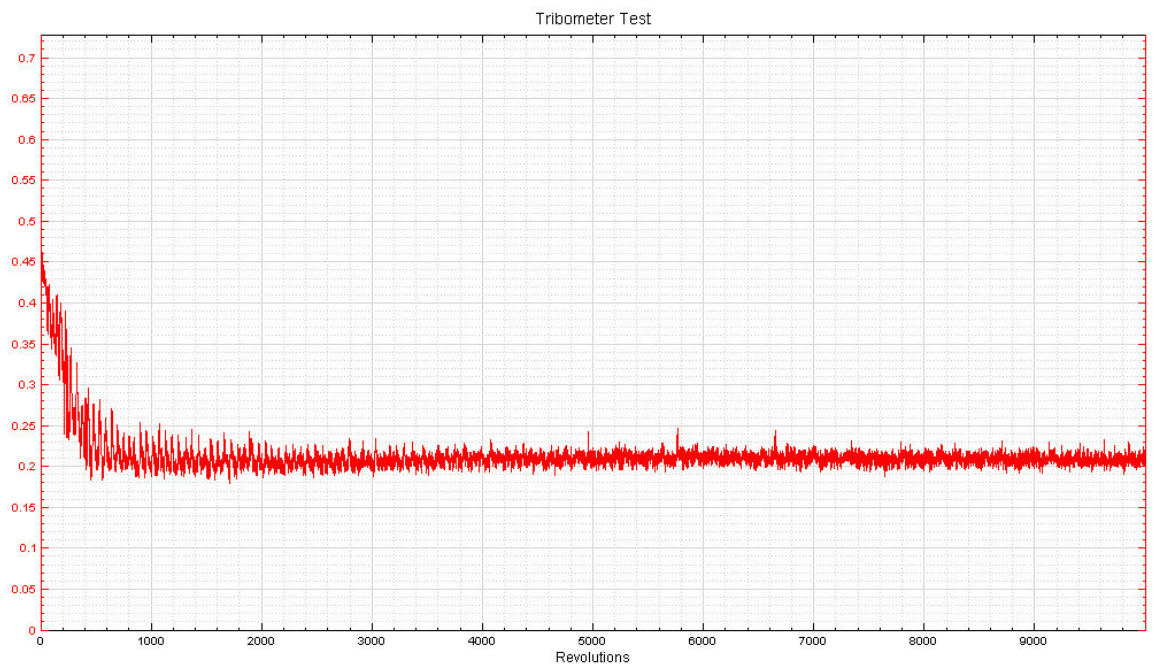


Рисунок 3.16 – Влияние износа на коэффициент трения
(ПСМ: КС19(ок) + 20% УК)

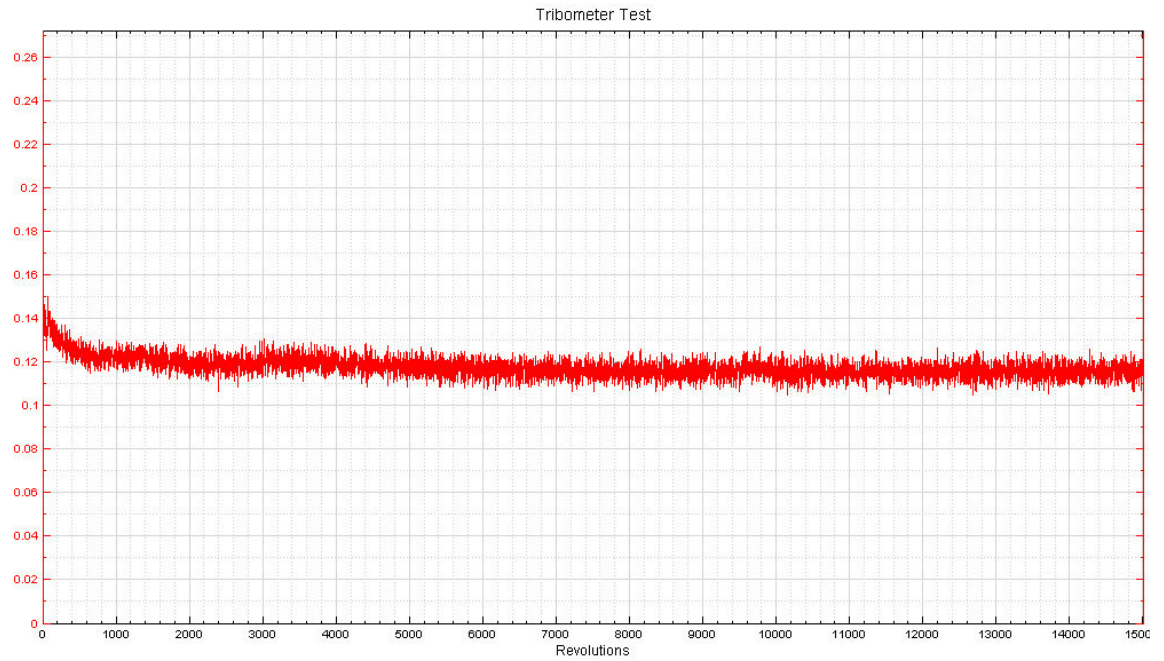


Рисунок 3.17 – Влияние износа на коэффициент трения
(ПСМ: КС19(ок) + 20% Л + 20% УК)

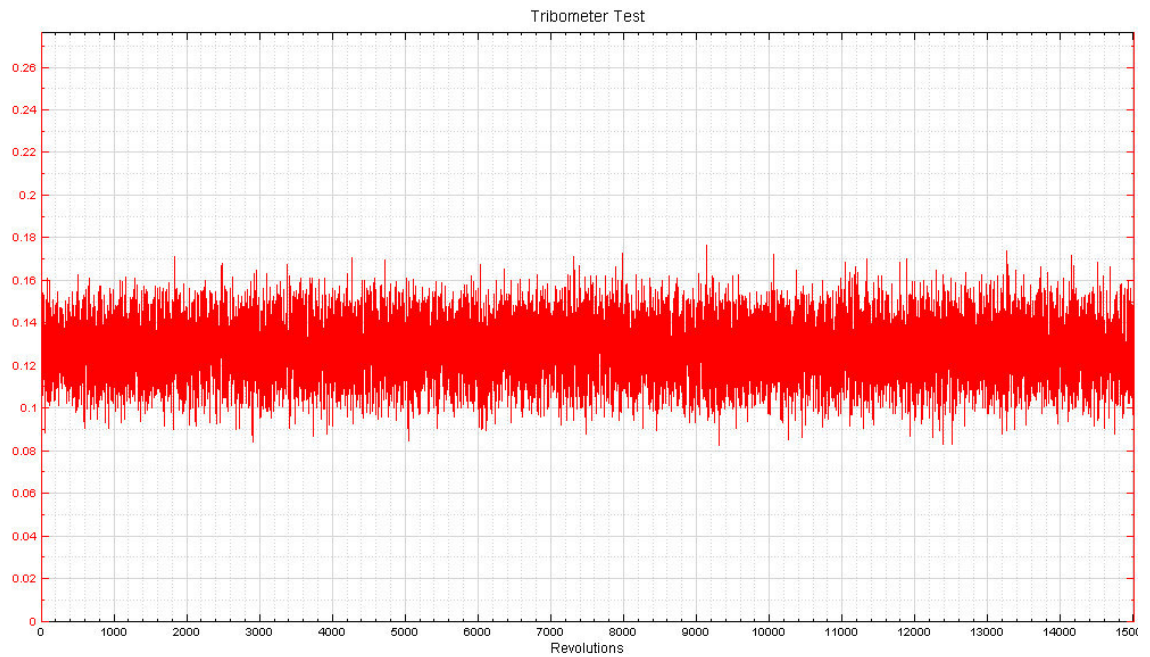


Рисунок 3.18 – Влияние износа на коэффициент трения
(ПСМ: 60% ЦМ + 20% Л + 20% ДМ)

Приведенные в табл.3.10 значения коэффициента f получены при сравнительно небольших значениях давления p_r , когда превалирует адгезионная f_a составляющая трения [58,66]. И прежде всего отношение $\tau_0 /$

p_r : если $\tau_0 \neq 0$, то при приближении p_r к нулю значение отношения τ_0 / p_r может стремиться к бесконечности. Поэтому при расчетах ТНТС полученные значения коэффициента f не могут быть использованы.

Таблица 3.11 – Результаты измерения диаметра пятна износа при инденторе после 300 м пути трения, при нагрузке 2 Н

Смазочный материал	Диаметр пятна износа, мкм
Без смазки	171
60% КС19(ок) + 20% УК	74
60% КС19(ок) + 20% Л + 20% УК	78
60% ЦМ + 20% Л + 20% УК	68
60% ЦМ + 20% Л + 20% ДМ	95

Для таких расчетов следует использовать значения молекулярной составляющей f_m коэффициента трения (при давлениях p_m , близких к пластическому контакту), полученные в экстремальных условиях нагружения.

3.7 Влияние смазочной композиции на износ при трении

Образцы для экспериментов аналогичные исследованиям адгезионного взаимодействия при трении. Интенсивность изнашивания, как отмечалось выше, оценивали величиной K , характеризующей изменение размера углубления поверхности трения в мкм, приходящееся на 1 цикл воздействия. Износ образцов оценивали по потере веса (с пересчётом на объём и линейный размер износа) после 15000 циклов воздействия под нагрузкой 2 Н. Исследования по изнашиванию образцов выполнили на одношариковом трибометре «NANOVEA TRB».

Для определения динамики изнашивания эксперименты с ПСМ КС19(ок) + 20 % УК выполнили при 5000, 10000, 15000 и 20000 циклах нагружения.

Полученные результаты представлены в таблице 3.12, а на рис. 3.19 показано изменение интенсивности изнашивания образцов в зависимости от числа циклов нагружения.

Таблица 3.12 – Интенсивность изнашивания образцов в различных смазочных средах

№	Смазочный материал	β (при $\theta = 150^\circ\text{C}$)	Интенсивность изнашивания $K \times 10^{-6}$, мкм/цикл
1	Без смазки	0,2	81,2
2	60% КС19(ок) + 20% УК	0,05	15,2
3	60% КС19(ок) + 20% Л + 20% УК	0,065	16,9
4	60% ЦМ + 20% Л + 20% УК	0,04	12,8
5	60% ЦМ + 20% Л + 20% ДМ	0,07	25

Из рис. 3.19 видно, что примерно при 15000 циклов нагружения интенсивность линейного изнашивания образцов стабилизируется, поэтому все испытания по изнашиванию выполнили при 15000 циклах нагружения.

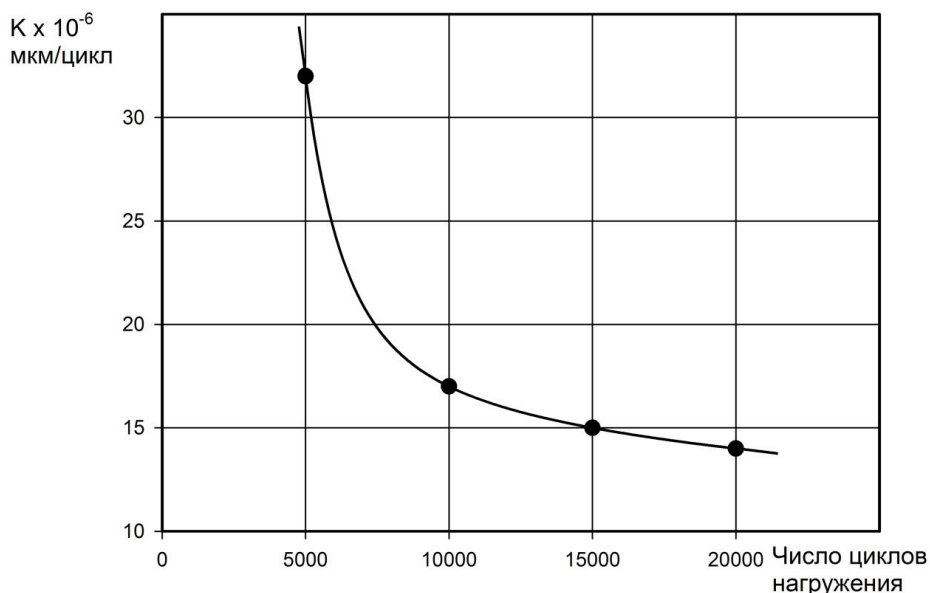
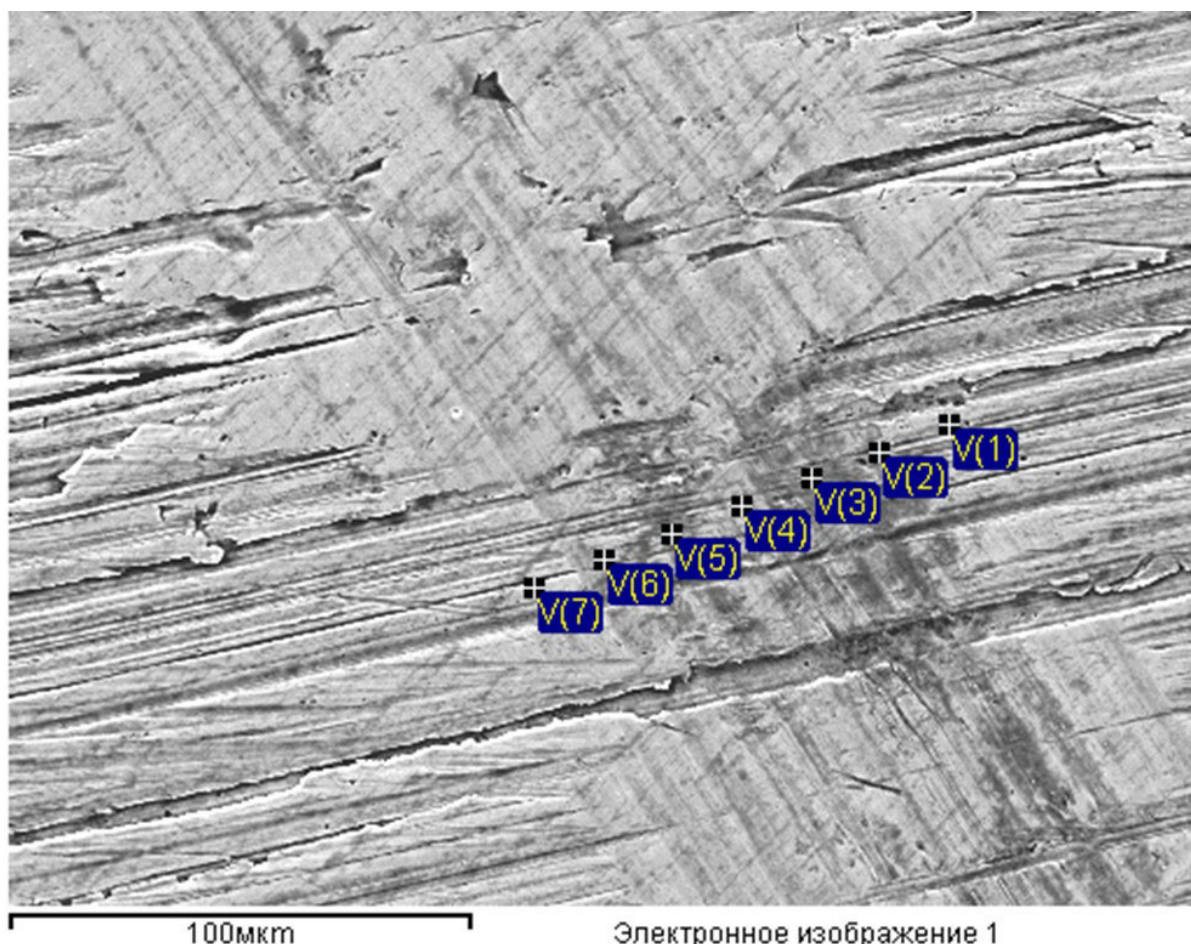


Рисунок 3.19 – Изменение интенсивности изнашивания в зависимости от числа циклов нагружения; КС19(ок) + 20%УК

Вид изношенной поверхности и ее микрохиманализ (рис. 3.20) позволяют предположить адгезионно-усталостный характер изнашивания

образцов из стали 45 при исследовании в качестве контртела инденторов из ВК8. Об этом свидетельствует наличие характерных вырывов на изношенных поверхностях и присутствие на них химических элементов, входящих в состав углеродного каркаса, являющегося модификатором ПСМ КС19(ок) + 20% УК.



Параметры обработки: Выполнен анализ всех элементов (Нормализован)

Спектр	В стат.	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Итог
V(1)	Да								0.77	99.23	100.00
V(2)	Да	1.00	0.37	0.80		0.35	0.43	0.40	0.70	95.95	100.00
V(3)	Да	0.79		0.88	0.34	0.36	0.41	0.34	0.97	96.44	100.00
V(4)	Да			0.40					0.88	98.72	100.00
V(5)	Да			0.38	0.07				0.66	98.89	100.00
V(6)	Да			0.38					0.68	98.94	100.00
V(7)	Да			0.35					0.74	98.91	100.00
Макс.		1.00	0.37	0.88	0.34	0.36	0.43	0.40	0.97	99.23	
Мин.		0.79	0.37	0.35	0.07	0.35	0.41	0.34	0.66	95.95	

Все результаты в весовых %

Рисунок 3.20 – Вид и микрохиманализ изношенной поверхности образца из стали 45 в паре с ВК8 (КС19ок + 20%УК)

Это предположение подтверждается данными, приведёнными в табл. 3.12 и на рис. 3.21, на котором показана функциональная связь интенсивности изнашивания образцов с величиной фрикционного параметра β (при температуре фрикционного контакта $\theta = 150$ °С – естественного разогрева при трении). Представленные на рис. 3.21 результаты являются прямым экспериментальным подтверждением преимущественного адгезионно-усталостного механизма изнашивания в парах трения из металлических материалов в присутствии и отсутствии смазки.

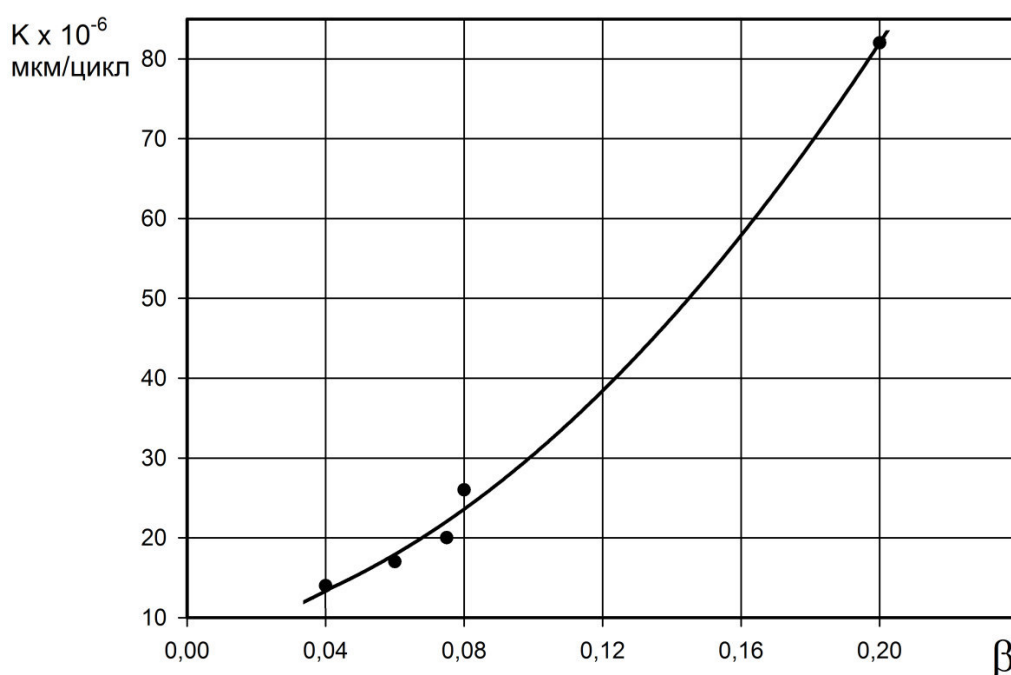


Рисунок 3.21 – Влияние адгезионного параметра β на изнашивание образцов при различных ПСМ и всухую

Это подтверждает главенствующую роль индекса совместимости трущихся поверхностей в формировании эксплуатационных свойств ПС ЭУТИ.

Выводы по главе 3

1. Применение углеродного каркаса в качестве модифицирующего компонента взамен графита и дисульфида молибдена обеспечивает более благоприятные противозадирные и противоизносные характеристики ПСМ.

2. Предложен процентный состав компонентов ПСМ, обеспечивающий наибольшую величину нагрузки сваривания: 20% УК, 20% литол и 60 % ЦМ.

3. Активные компоненты естественного углеродного каркаса (содержащие P, S, Cl, Zn, Al), используемого в качестве комплексной добавки в ПСМ, оказывает благоприятное влияние на характеристики адгезионного взаимодействия при трении благодаря низкой пластичности зоны фрикционного каркаса («третьего тела»). При температурах выше 350 -400 °С происходит термическая деструкция активных компонентов естественного УК, и триботехнические характеристики ПСМ с естественным и искусственным УК практически выравниваются.

4. Окисление ПСМ озоном и активные компоненты углеродного каркаса, используемого в качестве комплексной добавки, оказывают благоприятное влияние на характеристики адгезионного взаимодействия вплоть до температуры 600 °С на подвижном фрикционном контакте. Это связано с влиянием термоустойчивых сульфонов и сульфоксидов, образующихся в нефтяном масле при окислении озоном, которые снижают пластичность и энергию активации вязкого течения «третьего тела», что делает характеристики адгезионного взаимодействия практически независимыми от температуры контакта и повышает противозадирные и противоизносные свойства ПСМ.

5. Установлено, что наибольший вклад в величину коэффициента f трения может внести составляющая адгезионного взаимодействия τ_0/p_r : при уменьшении давления p_r величина τ_0/p_r увеличивается. Поэтому для анализа и расчёта тяжелонагруженных трибосопряжений следует использовать

молекулярную составляющую коэффициента трения, полученную при давлениях, близких к пластическому контакту.

6. Впервые экспериментально установлена функциональная связь линейной интенсивности изнашивания образцов с параметром β адгезионного взаимодействия при трении (индексом совместимости трущихся поверхностей) при различных смазках и при их отсутствии.

ГЛАВА 4. ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНДОПРОТЕЗОВ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА

4.1 Влияние материалов пары трения «головка – вкладыш», синовиальной жидкости на адгезионную составляющую трения в эндопротезах тазобедренного сустава

При современном развитии медицины и протезостроения основной лечебной терапией заболеваний крупных суставов является артропластика, обеспечивающая даже при тяжелых поражениях раннюю профессиональную, социальную и бытовую реинтеграцию [40,41]. Оптимизация трибологических пар является ключевой задачей этой хирургической технологии ввиду ограниченного срока службы и другими неотвратимыми осложнениями [42]. Специалисты считают, что важный фактор длительного функционирования ЭТБС есть оптимальные трибологические характеристики [121]. Следовательно, представляет практический и научный интерес сравнительная оценка, применяемых в ортопедической практике при артропластике, различных пар трения.

Ниже излагаются результаты модельного исследования 16 пар трения ЭТБС различных производителей, наиболее часто используемых в клинической практике при сухом трении и в условиях биологической среды. Исследование проводили на адгезиометре [126], по методике указанной во 2 главе, при ступенчатом изменении осевой нагрузки P до 8,68 кН на узел трения (рис. 4.1).

Данные исследования выполнены на моделях образцов (чашек – вкладышей эндопротезов), так как представляет научный и практический интерес изучение зависимости прочности τ_n адгезионных связей на срез от давления p_r – вплоть до пластического фрикционного контакта p_m . В стендовых испытаниях для этого потребуются весьма большие нагрузки. При этом технически трудно определить фактическую площадь касания.

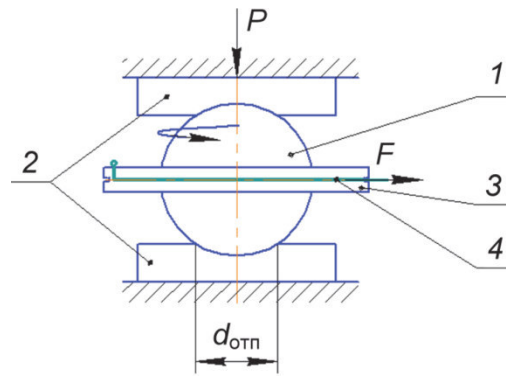


Рисунок 4.1 – Схема работы экспериментальной установки:

1 – индентор; 2 – образцы вкладыша; 3 – диск; 4 – фиксатор для индентора на диске

Так для различных пар трения получены зависимости τ_n от p_r в условиях присутствия/отсутствия биологической среды, что позволило определить величину (и ее изменение) коэффициента f_m .

На рисунке 4.2. в качестве примера показано, что увеличение контактного давления p_r приводило к повышению (прямолинейно с пьезокоэффициентом β , равным углу подъема линии $\tau_n=f(p_r)$ прочности τ_n адгезионных связей. τ_0 получено экстраполяцией линии $\tau_n=f(p_r)$ на нулевое значение p_r .

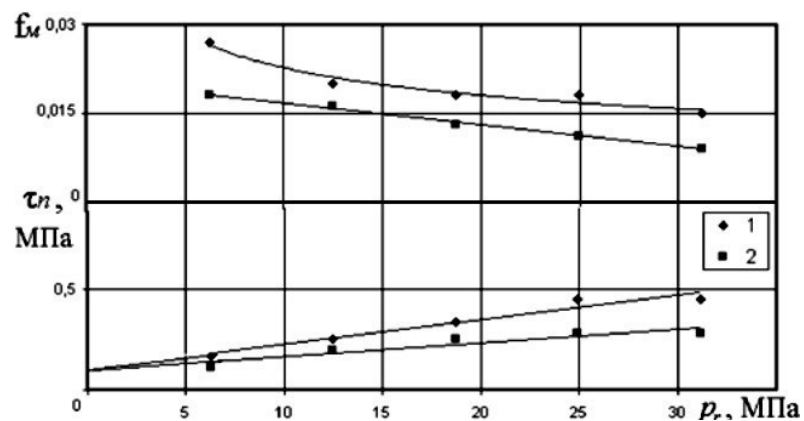


Рисунок 4.2 – Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей и молекулярную составляющую коэффициента трения фрикционного контакта индентора из алюминиевой керамики ($d = 28$ мм) и образцов из полиэтилена:

1 – сухое трение; 2 – смазка – биологическая среда

Изнашивание твердых тел возрастает с увеличением значения τ_n [58]. Следовательно, пьезокоэффициент β отражает степень влияния давления на изменение изнашивания деталей ТНТС. Из рисунка 4.2 видно, что для пары трения биологическая среда уменьшает степень влияния контактного давления на износ, уменьшает прочность τ_n адгезионных связей и, как следствие, снижая изнашивание элементов трибосопряжения.

Молекулярная составляющая коэффициента трения равна:

$$f_m = \frac{\tau_n}{p_{rn}} = \frac{\tau_0}{p_{rn}} + \beta. \quad (4.1)$$

Согласно выражению (4.1) величина f_m зависит не только от пьезокоэффициента β и давления p_r , но и от значения τ_0 .

Полученные результаты экспериментов представлены в таблице 4.1, где τ_m и f_m приведены при максимальном давлении p_{rn} .

Сравнение у различных образцов материалов трибологических характеристик, выявило, что коэффициент f_m трения уменьшается при повышении нагрузки, а прочность адгезионных связей увеличивается. Величины τ_n и f_m уменьшаются в условиях биологической среды за исключением пар «металл-металл», «керамика-металл», где наблюдался увеличенный коэффициент трения в условиях биологической среды (табл. 4.1). Эти результаты объясняются тем, что появление дополнительных металлических связей и химическое сродство повышают адгезионную составляющую коэффициента трения [58]. Также происходит пластификация зоны контакта благодаря синовиальной жидкости.

В среде синовиальной жидкости пары с наименьшим коэффициентом f_m трения обеспечивают наименьший коэффициент β и их прочность τ_n адгезионных связей (соответственно 0,006 ... 0,008 и 0,2 МПа). Это свидетельствует о том, что данные ЭТБС меньше подвержены влиянию внешней нагрузки и более износостойки.

Таблица 4.1 – Трибологические характеристики различных пар трения при максимальной осевой нагрузке

Индентор	Образцы	Смазка	p_m , МПа	τ_m , МПа	f_m	β	τ_o , МПа
Металлический ($d = 28$ мм)	Полиэтилен 1	Сухое трение	31,2	0,9	0,029	0,023	0,18
		Смазка – б.с.	31,2	0,7	0,022	0,018	0,12
	Полиэтилен 2	Сухое трение	31,2	0,7	0,022	0,022	0,00
		Смазка – б.с.	31,2	0,5	0,017	0,012	0,16
	Полиэтилен 3	Сухое трение	31,2	0,8	0,026	0,026	0,00
		Смазка – б.с.	31,2	0,7	0,021	0,019	0,08
	Полиэтилен 4	Сухое трение	31,2	0,8	0,026	0,026	0,00
		Смазка – б.с.	31,2	0,5	0,017	0,015	0,08
	Металлические	Сухое трение	2387,5	146,6	0,061	0,051	24,3
		Смазка – б.с.	1729,3	407,7	0,236	0,218	31,2
Алюминиевая керамика ($d = 28$ мм)	Полиэтилен 1	Сухое трение	31,2	0,5	0,015	0,012	0,10
		Смазка – б.с.	31,2	0,3	0,010	0,007	0,10
	Полиэтилен 2	Сухое трение	31,2	0,7	0,022	0,022	0,00
		Смазка – б.с.	31,2	0,5	0,015	0,012	0,08
	Полиэтилен 3	Сухое трение	31,2	0,8	0,026	0,026	0,00
		Смазка – б.с.	31,2	0,6	0,020	0,020	0,00
	Полиэтилен 4	Сухое трение	31,2	0,8	0,025	0,025	0,00
		Смазка – б.с.	31,2	0,4	0,012	0,008	0,14
	Металлические	Сухое трение	2066	415,3	0,201	0,201	0,00
		Смазка – б.с.	1658	500,0	0,302	0,177	206
Оксиниум ($d = 32$ мм)	Полиэтилен 5	Сухое трение	23,9	0,5	0,022	0,022	0,00
		Смазка – б.с.	23,9	0,2	0,009	0,006	0,08
	Полиэтилен 6	Сухое трение	23,9	0,7	0,030	0,025	0,12
		Смазка – б.с.	23,9	0,5	0,023	0,012	0,26
Алюминиевая керамика ($d = 32$ мм)	Полиэтилен 5	Сухое трение	23,9	0,4	0,015	0,014	0,02
		Смазка – б.с.	23,9	0,3	0,010	0,008	0,07
	Полиэтилен 6	Сухое трение	23,9	0,7	0,028	0,021	0,17
		Смазка – б.с.	23,9	0,5	0,022	0,016	0,16
Циркониевая керамика ($d = 32$ мм)	Полиэтилен 5	Сухое трение	23,9	0,5	0,022	0,022	0,00
		Смазка – б.с.	23,9	0,4	0,018	0,017	0,01
	Полиэтилен 6	Сухое трение	23,9	0,6	0,025	0,014	0,25
		Смазка – б.с.	23,9	0,5	0,021	0,014	0,16

Выполненные исследования адгезионного взаимодействия выявили некоторые закономерности между различными парами трения ЭТБС: минимальным был коэффициент трения в условиях синовиальной жидкости и увеличивался при сухом трении в образцах с полиэтиленовым вкладышем; с металлическим вкладышем максимальных величин достигал коэффициент трения в условиях синовиальной жидкости и при сухом трении уменьшался.

Головки диаметром 32 мм являются наиболее предпочтительными (по трибологическим показателям), т.к. адгезионное взаимодействие кинематического узла уменьшается.

Следовательно, помимо медицинских показателей выбора ЭТБС (анатомия ТБС, пол, возраст, вес и др.) необходимо учитывать трибологические свойства ПС ЭТБС. Изучение показателей адгезионного взаимодействия элементов кинематической пары «головка – вкладыш» – новый фактор увеличения износостойкости (срока службы).

4.2 Характеристики адгезионного взаимодействия различных пар трения, которые используются при артропластике тазобедренного сустава (результаты стендовых испытаний)

Проведено исследование [142, 143], при сухом трении и в условиях биологической среды – синовиальной жидкости, следующих наиболее распространенных пар трения ЭТБС:

- головка и вкладыш из керамики (АКер) с содержанием двуокси алюминия 80 % и циркония (порядка 17 %);
- головка и вкладыш с содержанием кобальта, молибдена и хрома (Мет);
- головка из циркониевой керамики (ЦКер);
- головка с циркониевым покрытием (Окс);
- головка ЭТБС с покрытием из нитрида титана (НТит);
- вкладыш из полиэтилена поперечно-связанного (Пол).

Исследовано 10 трибологических пар диаметром 28, 32 и 36 мм в следующих сочетаниях материалов: «Мет - Мет», «Мет - Пол», «АКер - АКер», «АКер - Пол», «ЦКер - АКер», «ЦКер - Пол», «Окс - АКер», «Окс - Пол», «НТит - АКер», «НТит - Пол».

Локальную микротвердость компонентов эндопротезов по Виккерсу (*HV*) оценивали с помощью приставки МНТ-10 на микроскопе «Axiovert-100A» («Carl Zeiss», Германия). Получены следующие значения микротвердости: Пол - 47...74 МПа, Окс - 3340 МПа, Мет - 4232 МПа, НТит - 6453 МПа, АКер - 19456 МПа, ЦКер - 26146 МПа. Сферичность компонентов эндопротезов определяли на координатно-измерительной машине «Contura-G2». Получены следующие отклонения данного показателя: от 0,001 до 0,005 мм во всех образцах. Оценку рельефа поверхности осуществляли с использованием 3D-лазерной сканирующей микроскопии на микроскопе «LSM-Exciter» («Carl Zeiss», Германия). Установлено, что RSa у исследованных образцов варьировало на микроуровне от 0,4 до 0,5 мкм с латеральным разрешением < 1 мкм (0,4...1 мкм).

В соответствии с механико-молекулярной теорией [66] силу и коэффициент трения рассматривают как сумму деформационной и адгезионной составляющих на элементарных пятнах фрикционного контакта. При этом под адгезионной составляющей понимают все виды межатомного и межмолекулярного взаимодействия [58]. Известно, что деформационная составляющая трения связана в основном с шероховатостью контактирующих поверхностей и давлением [93,95]. В эндопротезах применяются пары трения («головка - вкладыш») с весьма малой высотой микронеровностей трущихся поверхностей. При трении вращения в таких парах деформационной составляющей можно пренебречь [94], а силу и коэффициент трения связать главным образом с адгезионной составляющей. Кроме того, интенсивность адгезионно-усталостного изнашивания (именно такой вид изнашивания априори характерен для изнашивания пары «головка - вкладыш» эндопротеза) функционально определяется параметрами адгезионного взаимодействия при трении [58]. Поэтому сравнение эндопротезов тазобедренного сустава в рассматриваемой работе выполнено по показателям адгезионной составляющей трения.

На модернизированной четырехшариковой машине трения ЧМТ-1 проводили стендовые испытания (ГОСТ-12997-84) по схеме, приведенной на рис. 4.3.

Фактическую площадь касания S_{ϕ} головки со вкладышем определяли путем использования метода красок.

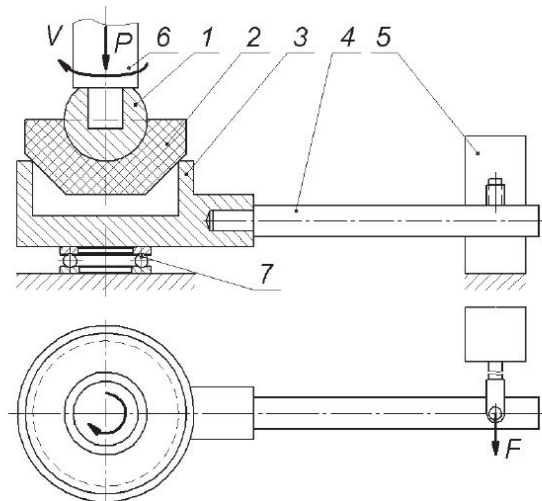


Рисунок 4.3 – Схема работы ЧМТ-1 при исследовании ЭТБС

Исследования показали, что для всех пар ЭТБС прочность τ_n на срез адгезионных связей возрастает с повышением давления p_r на подвижном фрикционном контакте. Для «мягких» и «твердых» пар трения степень влияния p_r на τ_n разная (рис. 4.4).

В парах трения с вкладышем из Пол происходило уменьшение коэффициента f_a при увеличении давления и нагрузки в отличие от «твердых» пар (рис. 4.5). Лучшими показателями оказались пары «ЦКер - АКер», «Окс - АКер» и «АКер - АКер» в диапазоне 500...4000 Н.

Наименьшую величину f_a согласно оценке средней величины f_a во всем диапазоне нагрузки для ЭТБС с различным диаметром головки обеспечивают пары «ЦКер - АКер», «АКер - АКер» (рис. 4.6 и 4.7).

При нагрузке 4000...6300 Н, что соответствует быстрой ходьбе, показатели трения большинства образцов выравниваются, кроме пар «НТит - АКер», «Мет - Мет», «НТит - Пол». Величина f_a при максимальных нагрузках

(8000...10000 Н) у пар «АКер - Пол», «Окс - Пол», «ЦКер - Пол», «Мет - Пол», «ЦКер - АКер» была значительно ниже, чем у других пар.

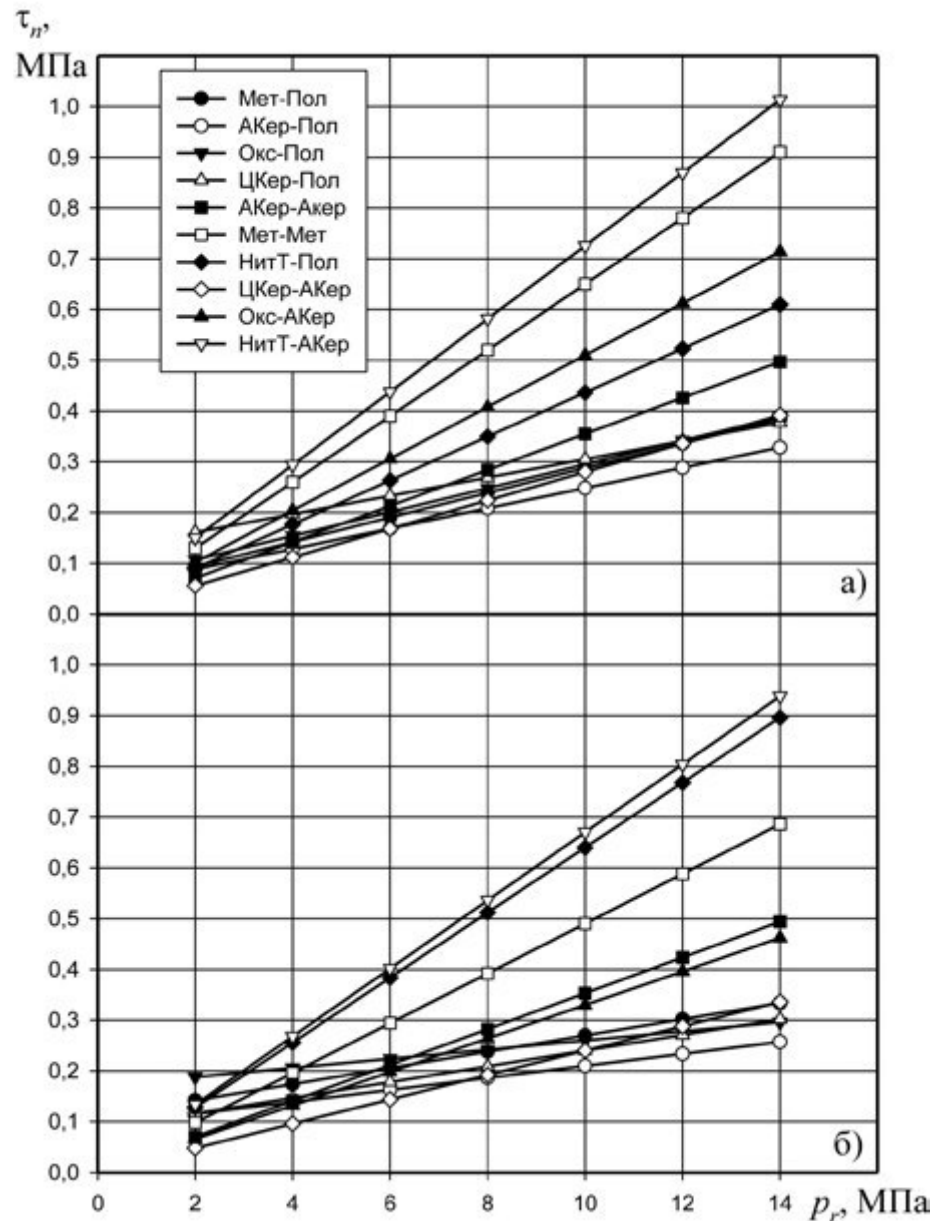


Рисунок 4.4 – Зависимость прочности адгезионных связей на срез τ_n кинематических узлов эндопротезов с диаметром головки 28 мм при сухом трении (а) и в условиях смазки биологической средой (б) от давления p_r

Интересно, что сравнение «мягких» и «твердых» пар выявило наименьшую зависимость трибологических характеристик от СЖ в «твердых» парах, (особенно в диапазоне 500...4000 Н).

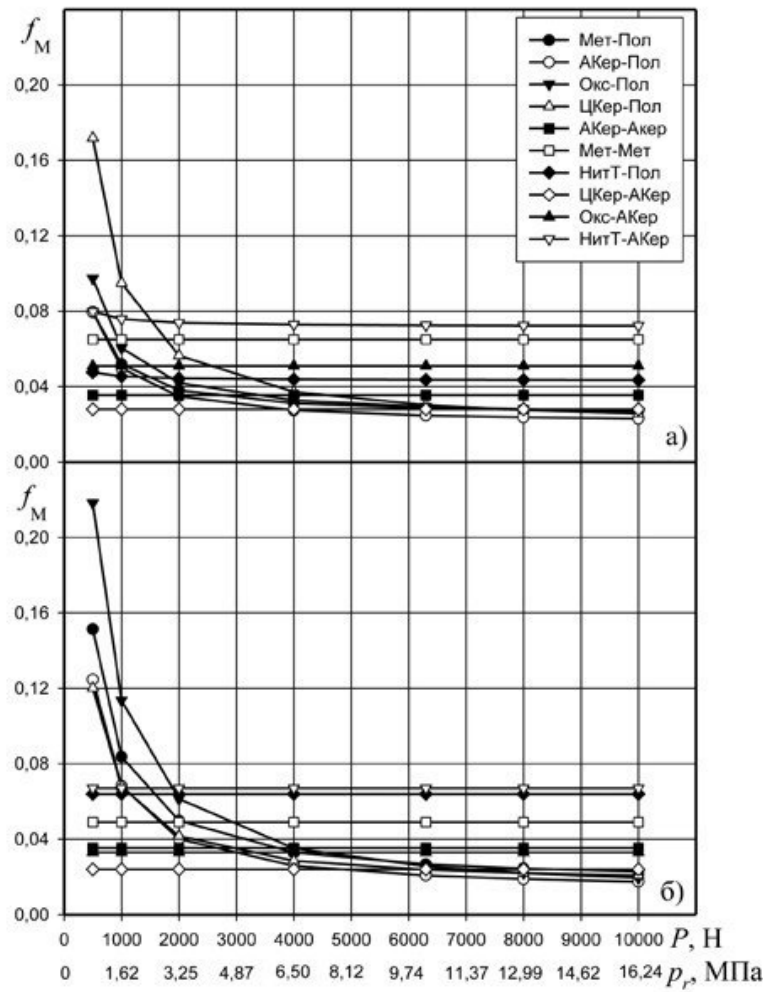


Рисунок 4.5 – Адгезионная составляющая коэффициента трения f_a трибологических пар эндопротезов с диаметром головки 28 мм при сухом трении (а) и в условиях смазки биологической средой (б) в зависимости от нагрузки P и давления p_r

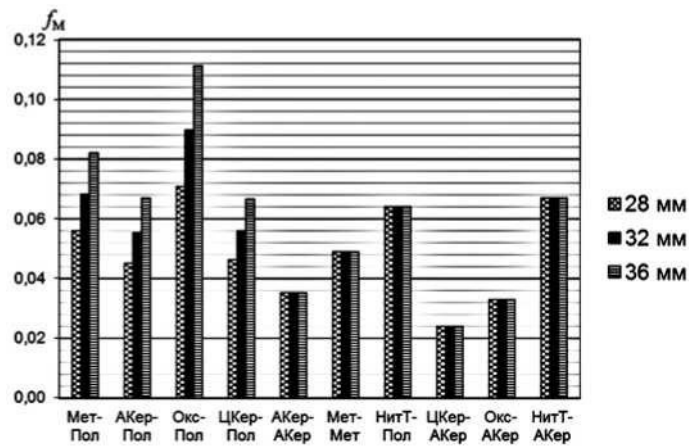


Рисунок 4.6 – Среднее значение адгезионной составляющей коэффициента трения в диапазоне нагрузки 500...10000 Н для различных пар трения в условиях сухого трения

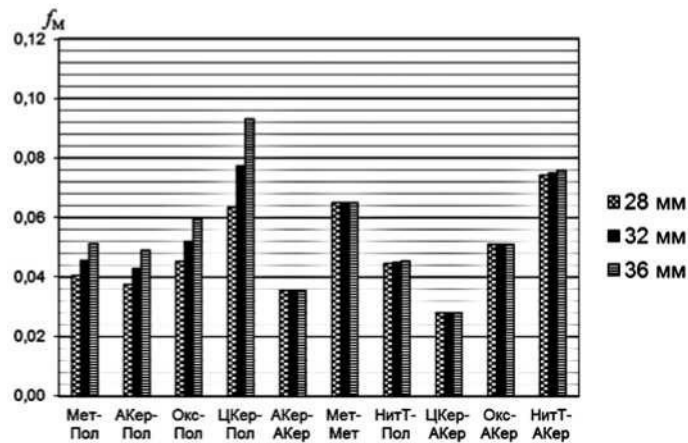


Рисунок 4.7 – Среднее значение адгезионной составляющей коэффициента трения в диапазоне 500...10000 Н для пар трения в условиях биологической среды

Сравнительный анализ изучаемых пар трения в зависимости от величины нагрузок выявил определенные закономерности: при легких и умеренных нагрузках (500 – 4000 Н), соответствующих статичному положению и ходьбе в медленном и среднем темпе наиболее оптимальные трибологические характеристики были в парах трения «АКер-АКер», «ЦКер-АКер». В диапазоне от 4000 до 6300 Н, соответствующих быстрой ходьбе, адгезионная составляющая коэффициента трения во многих трибологических парах выравнивается с последующим улучшением показателей в парах трения: «АКер-Пол», «ЦКер – Пол», «Окс – Пол», которые продемонстрировали наименьшую прочность адгезионных связей при максимальных нагрузках (8000 – 10000 Н). При анализе всего диапазона нагрузок наилучшие трибологические характеристики были выявлены в парах трения «ЦКер-АКер», «АКер-АКер».

4.3 Сравнение триботехнических характеристик различных эндопротезов и тазобедренных суставов кролика

Ниже приведены экспериментальные результаты по определению и анализу адгезионной составляющей трения различных эндопротезов, используемых при артропластике тазобедренного сустава, модели тазобедренных суставов кролика в норме и при экспериментальном моделировании остеоартроза [144].

Эксперименты проведены на 9 лабораторных кроликах породы шиншилла женского пола, средний возраст которых составил 95 дней, средняя масса – 3,2 кг в соответствии с «Правила проведения работ с использованием экспериментальных животных» (Приказ МЗ СССР № 742 от 13.11.84).

Для моделирования посттравматического остеоартроза тазобедренного сустава у 5 животных под эфирным наркозом обнажали область проксимального отдела бедренной кости с одной стороны и наносили повреждение в трех точках тазобедренного сустава с помощью спицы Киршнера диаметром 2 мм, проведенной трансартикулярно. Через 6 мес осуществляли выделение тазобедренных суставов для изучения их трибологических свойств, из них было 5 образцов с моделью остеоартроза и 9 интактных сегментов. Умерщвление животных производили путем эвтаназии с применением глубокого наркоза.

Методика и результаты исследования трибологических характеристик различных эндопротезов изложены в п. 4.2 диссертации.

Анализ трибологических характеристик ТБС кролика показал повышение прочности τ_n адгезионных связей на срез и коэффициент f_a в образцах с остеоартрозом без СЖ (рис. 4.8). Имеется зависимость данных показателей от давления и нагрузки, а также некоторое уменьшение f_a и повышение τ_n с увеличением нагрузки P и давления p_r , так как при увеличении давления возрастает прочность адгезионных связей.

Сопоставление данных, приведенных на рис. 4.4 и 4.8, показывает, что значения адгезионной составляющей кинематических узлов из исследованных пар трения не достигали уровня интактного сегмента, что свидетельствует об ограниченных возможностях искусственных суставов.

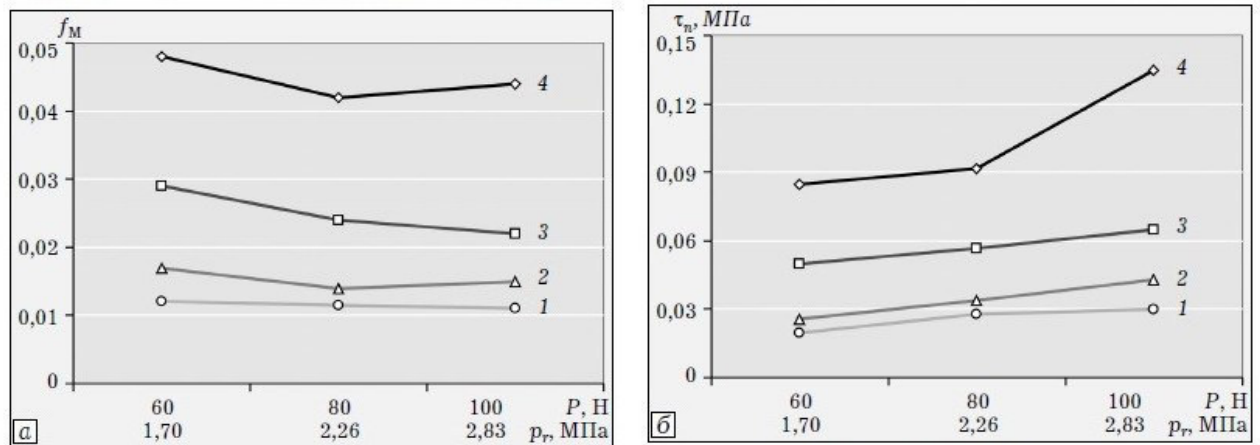


Рисунок 4.8 – Зависимость адгезионной составляющей коэффициента трения f_a (а) и прочности адгезионных связей на срез τ_n (б) тазобедренного сустава кролика от нагрузки P и давления p_r : 1 – здоровый сустав в условиях биологической среды; 2 – здоровый сустав в условиях сухого трения; 3 – модель остеоартроза в условиях биологической среды; 4 – модель остеоартроза в условиях сухого трения

Исследование адгезионных свойств тазобедренного сустава в норме и при остеоартрозе раскрывает новые аспекты деструктивно-дистрофических поражений. В эксперименте с моделированием остеоартроза на кроликах зарегистрировано значительное повышение адгезионной составляющей коэффициента трения, что является одним из ключевых звеньев патогенеза декомпенсации кинематических свойств тазобедренного сустава [121].

Сравнение коэффициента f_a ТБС кролика с кинематической парой «ЦКер – АКер» показали наименьший коэффициент трения среди ЭТБС при давлении от 1,7 до 2,83 МПа. Адгезионная составляющая коэффициента трения ТБС кролика была в 2 – 2,18 раза меньше, чем у ЭТБС. Показатель образца с моделью остеоартроза ТБС кролика сравним с ЭТБС в условиях СЖ (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Зависимость адгезионной составляющей f_a коэффициента трения от давления в ТБС кролика и паре «ЦКер – АКер»

Пары трения и вид смазки	f_a в зависимости от p_r		
	1,7 МПа	2,26 МПа	2,83 МПа
Здоровый сустав, смазка – биол.среда	0,012	0,011	0,011
Здоровый сустав, сухое трение	0,017	0,015	0,015
Остеоартроз, смазка – биол.среда	0,029	0,024	0,022
Остеоартроз, сухое трение	0,048	0,041	0,044
ЦКер-АКер, смазка – биол.среда	0,024	0,024	0,024
ЦКер-АКер, сухое трение	0,028	0,028	0,028

Следовательно, при деструктивно-дистрофических заболеваниях ТБС ухудшение трибологических характеристик является ключевым звеном разрушения сустава. На лабораторных животных с моделью остеоартроза показывается прямая связь адгезионных свойств от стадии и глубины процесса поражения суставов.

1.1 Зависимость износа эндопротезов от показателей адгезионного взаимодействия пар трения

В работе [125] выполнен анализ среднестатистических отдаленных результатов эндопротезирования тазобедренного сустава (с учётом различий конструкций эндопротезов) и при этом установлены скорости $V_{\text{изн.}}$ изнашивания эндопротезов, имплантированных в живой организм, которые приведены в табл. 4.3 и представлены на рис. 4.9.

В этой же таблице приведены среднестатистические данные, полученные в наших исследованиях адгезионного взаимодействия соответствующих пар трения, в том числе, данные по коэффициенту β упрочнения адгезионных связей, который, как было показано выше, в значительной мере отражает индекс C совместимости трущихся поверхностей.

Таблица 4.3 – Среднестатистические результаты исследования изнашивания и адгезионного взаимодействия пары трения в эндопротезах

Материал пары трения «головка – вкладыш»	Скорость изнашивания $V_{\text{изн}}$, мм/год [125]	τ_{nn} , МПа	β
Металл – полимер	0,2	0,5	0,1
Керамика – полимер	0,1	0,4	0,06
Металл – металл	0,05	0,37	0,044
Керамика – керамика	0,025	0,32	0,022

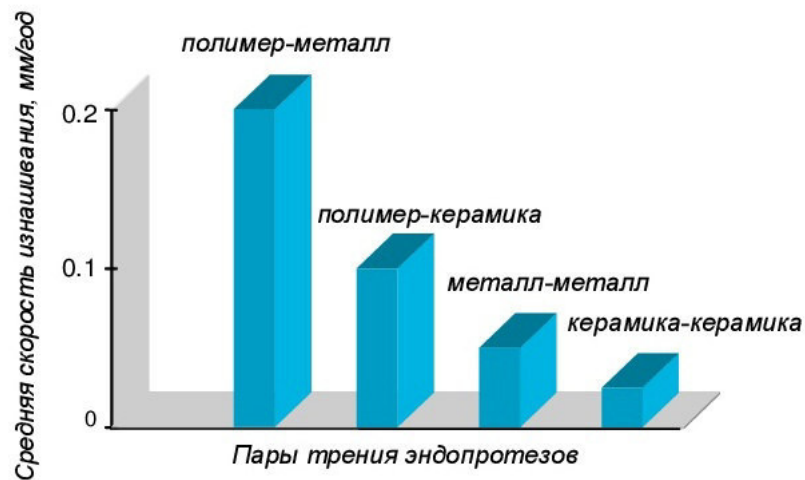


Рисунок 4.9 – Средняя скорость изнашивания *in vivo* эндопротеза тазобедренного сустава с различными парами трения [125]

В ранее выполненных исследованиях по трибологии пар трения в эндопротезах [124, 125] высказывались предположения об адгезионно-усталостном характере их изнашивания. Чтобы проверить это предположение, на рис. 4.10 в логарифмических координатах представлена зависимость скорости изнашивания $V_{\text{изн}}$ различных пар трения в эндопротезах от параметра β . Из рисунка 4.10 видно, что эта зависимость может быть описана степенной функцией:

$$V_{\text{изн}} = 5 \cdot \beta^{1,4}, \text{ мм/год.} \quad (4.2)$$

Полученную математическую модель проверили на адекватность. Расчётное значение F-критерия Фишера определяет по формуле [136]:

$$F^{\text{расч}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2} \quad (4.3)$$

где $S_{\text{неад}}^2$ – дисперсия неадекватности (приняли $S_{\text{неад}}^2 = 0,05$), S_y – дисперсия опыта. F – критерий Фишера, представляет собой отношение дисперсии неадекватности к дисперсии опыта и отвечает на вопрос, во сколько раз модель предсказывает хуже по сравнению с опытом. Расчётное значение критерия Фишера $F^{\text{расч}} = 0,796$, а $F^{\text{табл}} = 2,16$ (при уровне значимости $\alpha = 0,05$). Поскольку $F^{\text{расч}} < F^{\text{табл}}$ гипотеза адекватности модели при 5%-ном уровне значимости не отвергается (4.2).

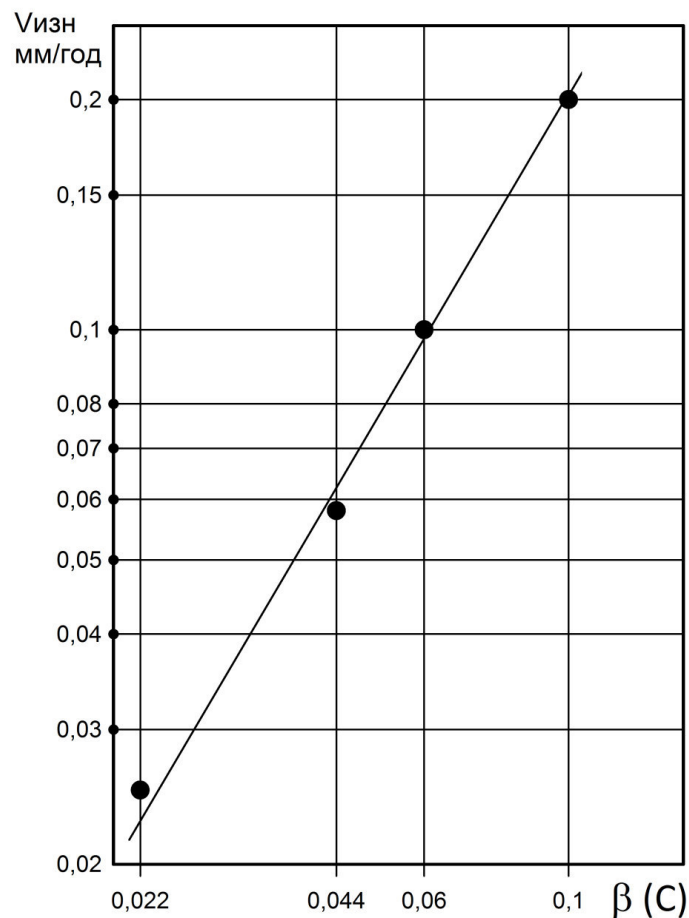


Рисунок 4.10 – Зависимость скорости изнашивания различных эндопротезов от адгезионного параметра β (индекса совместимости трущихся поверхностей)

Приведённая формула (4.2) доказывает основную роль адгезионных процессов в износе пар трения в эндопротезах тазобедренного сустава. В

теоретических исследованиях [145] проф. Ю.Н. Васильевым отмечено наличие фрикционной связи между $V_{\text{изн}}$ и коэффициентом β , а экспериментальное подтверждение получило данной работе.

Зависимости (4.2) позволяют при проектировании (выборе материалов ЭТБС) прогнозировать их надежность и работоспособность. Для этого достаточно иметь информационную базу данных по коэффициенту β для различных пар трения, применяемых в эндопротезах ТБС.

Выводы по главе 4

1. Исследование адгезионной составляющей трения на моделях эндопротезов позволило определить влияние контактирующих материалов на нагрузочную способность фрикционного контакта, оценить адгезионную (молекулярную) составляющую f_m коэффициента трения и индекс совместимости трущихся поверхностей, сравнить его значение со значением коэффициента β , указывающего степень влияния давления на прочность τ_n на срез адгезионных связей. Установлено, что индекс совместимости C в основном отражает значение f_m и в первом приближении (с ошибкой не более 10 %) можно принять равным коэффициенту β .

2. Установлено, что в образцах с полиэтиловым вкладышем значение f_m минимально в условиях биологической среды и увеличивается при сухом трении. При металлическом вкладыше биологическая среда повышает значение f_m , что можно объяснить повышением пластичности «третьего тела» (зоны фрикционного контакта) из-за поверхностной активности плазмы крови. Увеличение давления приводит к увеличению прочности адгезионных связей на срез во всех испытуемых парах трения и снижению адгезионной составляющей коэффициента трения.

3. Стендовые испытания различных эндопротезов позволили выявить определённые закономерности: при легких и умеренных нагрузках (500...4000 Н) наиболее оптимальные трибологические характеристики были

в парах трения «АКер-АКер», «ЦКер-АКер». В диапазоне от 4000 до 6300 Н, соответствующих быстрой ходьбе, адгезионная составляющая коэффициента трения во многих трибологических парах выравнивалась с последующим улучшением показателей в парах трения «АКер-Пол», «ЦКер - Пол», «Окс - Пол», которые продемонстрировали наименьшую прочность адгезионных связей при максимальных нагрузках (8000...10000 Н). При анализе всего диапазона нагрузок наилучшие трибологические характеристики были выявлены в парах трения «ЦКер-АКер», «АКер-АКер».

4. Сравнение коэффициента f_a ТБС кролика с парой трения «ЦКер-АКер», продемонстрировавшей наименьший коэффициент трения при одинаковом давлении. В 2 – 2.18 раза больше значение коэффициента ЭТБС, чем у ТБС кролика (с моделью остеоартроза ТБС при СЖ).

5. Впервые экспериментально полученная функциональная зависимость (4.2) скорости изнашивания эндопротезов от триботехнического параметра β адгезионного взаимодействия является прямым доказательством адгезионного – усталостного механизма изнашивания пар трения в имплантированных эндопротезах ТБС и позволяет уже на стадии выбора материалов пары трения эндопротезов прогнозировать их работоспособность и надежность с учетом веса, возраста и подвижности пациента.

ГЛАВА 5. ОБОБЩЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

5.1 Обобщения по улучшению триботехнических характеристик ПСМ, использующихся в подвижных тяжелонагруженных трибосопряжениях

Во 2-ой главе диссертации, используя методы неравновесной термодинамики, была предложена формула (2.17):

$$f = \frac{\lambda \cdot (\text{grad } T)}{p_r \cdot V},$$

которая выражает зависимость коэффициента f трения в подвижных трибосопряжениях с подогревом от коэффициента λ теплопроводности, давления p_r , скорости скольжения V и перепада температур $\text{grad } T$. Следует при этом подчеркнуть, что эта формула получена в условиях трения, когда смазочный материал не является охлаждающей средой, а выступает лишь в роли проводника тепла. И в этой роли, оказывается, чем выше теплопроводность композиции смазочного материала, тем выше коэффициент трения.

На рис. 5.1 приведены данные, заимствованные из работы [146], которые по существу подтвердили зависимость (2.17): коэффициент теплопроводности графита $\lambda = 0,350$ ккал/см.сек.град., а полимеров АМС-1, АМС-3, АФ-ЭТ и АФ-ЭТС коэффициент λ изменяется от 0,1 до 0,33 ккал/см.сек.град. Аналогичные результаты получены и описаны в работе [73] при использовании высокотемпературных твёрдых смазочных покрытий.

Наши исследования, результаты которых представлены на рис. 3.3 и 3.7, тоже по-существу подтверждают выражение (2.17) уже в экстремально тяжёлых условиях нагружения (при давлениях, близких к твердости по Бринеллю): использование графита (имеющего теплопроводность около 280 Вт/м·К) в качестве добавки в ПСМ, повышает адгезионную составляющую

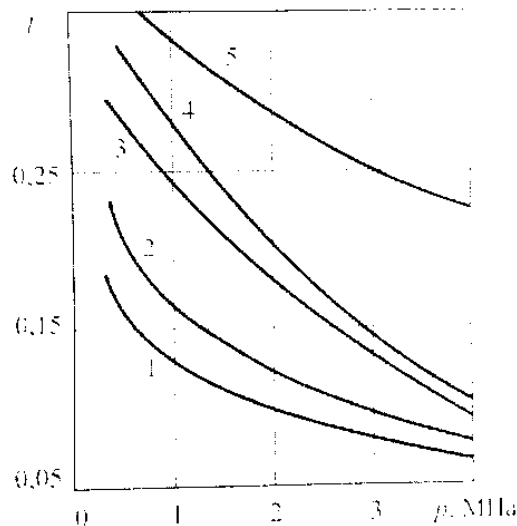


Рисунок 5.1 – Зависимость коэффициента трения от давления при трении без смазки по стали 45 ($V = 1$ м/с) для материалов [146]: 1 – АМС-1; 2 – АМС-3; 3 – АФ-ЭТ; 4 – АФ-ЭТС; 5 – графит АГ-1500-СО5

коэффициента трения по сравнению с дисульфидом молибдена (имеющего теплопроводность 142 Вт/м·К). Можно предположить, что углеродный каркас, в состав которого помимо углерода входят цинк, фосфор и другие химические элементы с низкой теплопроводностью, может иметь теплопроводность ещё более низкую, чем дисульфид молибдена. Именно поэтому, по нашему мнению, использование ПСМ углеродного каркаса в качестве модификатора понижает величину коэффициента f_m (табл. 5.1 и рис. 5.2).

С другой стороны, как было показано выше, величина f_m адгезионной составляющей коэффициента трения зависит от пластичности «третьего тела», формируемого на фактической площади касания при трении и энергии его вязкого течения и определяется в основном коэффициентом β упрочнения адгезионных связей (близким по величине к индексу совместимости трущихся поверхностей). На этом основании можно предположить, что уменьшая за счёт модификаторов величину коэффициента f_m , можно не только уменьшить энергозатраты на трение в экспериментальных условиях трения, но и получить наименьший износ трибосопряжения.

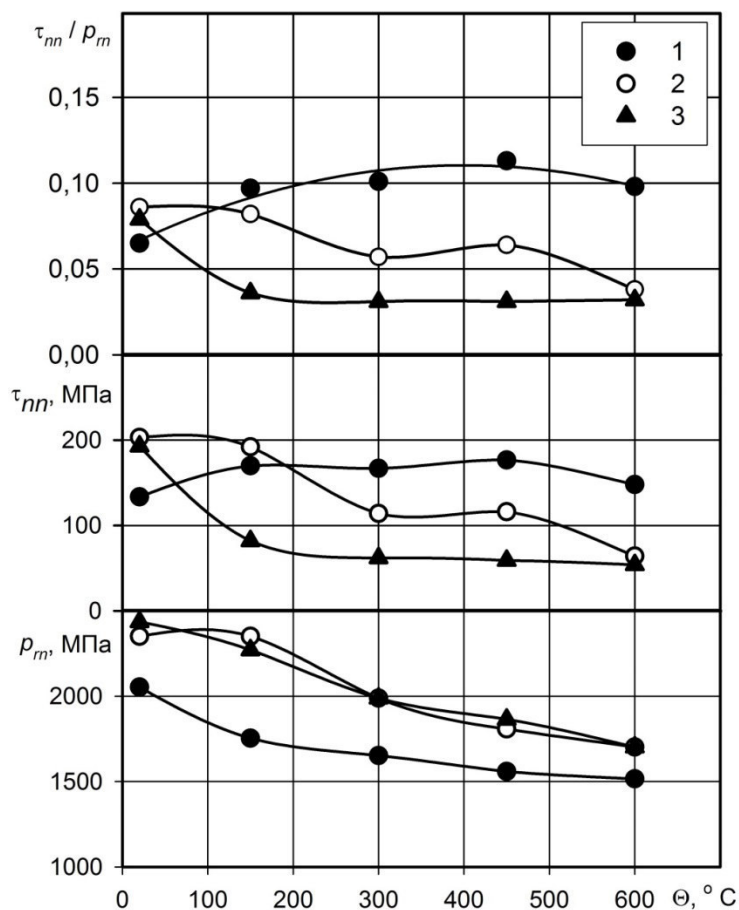


Рисунок 5.2 – Влияние температуры на триботехнические характеристики при использовании ПСМ, модифицированного:

1 – ПСМ-Г; 2 – ПСМ-ДМ; 3 – ПСМ-УК

Эту гипотезу подтвердил совместный регрессионный анализ результатов исследования адгезионного взаимодействия при трении (п. 3.1, 3.3) и изнашивания образцов (п. 3.7). В логарифмических координатах представлена зависимость (рис. 5.3) интенсивности изнашивания образцов от коэффициента упрочнения β адгезионных связей при трении в различных ПСМ, которая описывается степенной функцией:

$$K = 7 \cdot 10^{-4} \beta^{1,3} \quad (5.1)$$

Таблица 5.1– Триботехнические характеристики исследуемых ПСМ

Состав ПСМ	$\theta, ^{\circ}\text{C}$	$p_{rn}, \text{МПа}$	$\tau_{nn}, \text{МПа}$	τ_{nn} / p_{rn}	β	$\tau_o, \text{МПа}$
------------	----------------------------	----------------------	-------------------------	----------------------	---------	----------------------

20% Г, 20% Л, 60% ЦМ	20	2053	133	0,065	0,043	46
	150	1754	170	0,097	0,082	26
	300	1652	167	0,101	0,078	39
	450	1559	177	0,113	0,088	40
	600	1516	148	0,098	0,077	32
20% ДМ, 20% Л, 60% ЦМ	20	2351	203	0,086	0,068	43,48
	150	2351	192	0,082	0,080	3,83
	300	1988	114	0,057	0,055	5,52
	450	1808	116	0,064	0,058	10,46
	600	1702	64	0,038	0,035	3,97
20% УК, 20% Л, 60% ЦМ	20	2436	193	0,079	0,070	21,86
	150	2271	82	0,036	0,035	2,44
	300	1988	62	0,031	0,027	9,57
	450	1865	59	0,031	0,028	5,95
	600	1702	54	0,032	0,028	6,38

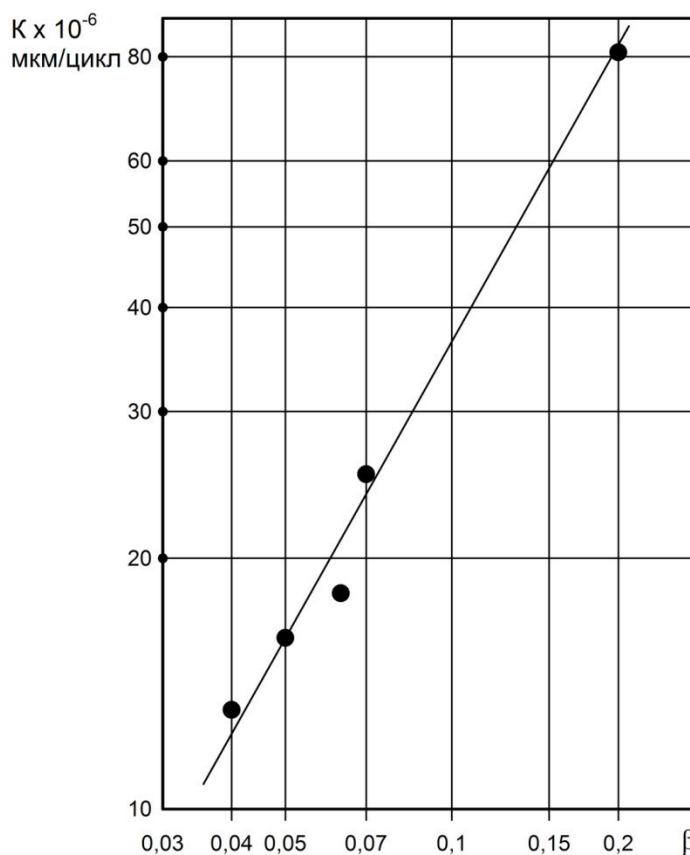


Рисунок 5.3 – Зависимость интенсивности изнашивания образцов от коэффициента β упрочнения адгезионных связей при трении в различных ПСМ

Гипотезу об адекватности математической модели (5.1) проверили по критерию Фишера: при 5%-ом уровне значимости она не отвергается. Здесь параметр β соответствует температуре фрикционного контакта $\theta \approx 150$ °С.

Таким образом, применяя в качестве добавок в ПСМ вещества с низкой теплопроводностью, можно повысить эксплуатационные свойства тяжело нагруженных трибосопряжений не только по энергетическим затратам, но по их износостойкости.

5.2 Исследование с помощью 3D – лазерной микроскопии постимплантационных изменений компонентов эндопротезов тазобедренного сустава

Представленные ниже результаты исследования [147] являются по существу апробацией тех выводов и рекомендаций, которые были сделаны на основании данных 4-ой главы диссертации.

Лазерная сканирующая микроскопия применялась для исследования деформационного рельефа поверхности (ДРП) областей сопряжения элементов эндопротеза ТБС при износе. Исследованы интактные эндопротезы ТБС и компоненты кинематических узлов искусственных суставов, удаленные в сроки более 10 лет после имплантации.

Измерения вкладышей и головок ЭТБС показали, что отклонение размеров находился в пределах 0,001–0,005 мм и не зависит от материала кинематической пары. Измерения сферичности головок ЭТБС из CoCrMo в паре с Пол после имплантации показали уменьшение размеров до 0,104 мм.

Размеры головок в зоне износа ЭТБС из CoCrMo в паре с CoCrMo уменьшились до 0,031 мм (рис. 5.4). Уменьшение размеров внутренней поверхности вкладышей – 0,078 мм (рис. 5.5).

Более равномерное, в отличие от других материалов, происходило уменьшение размеров керамических ЭТБС в паре трения с Пол было 0,014 мм (рис. 5.7).

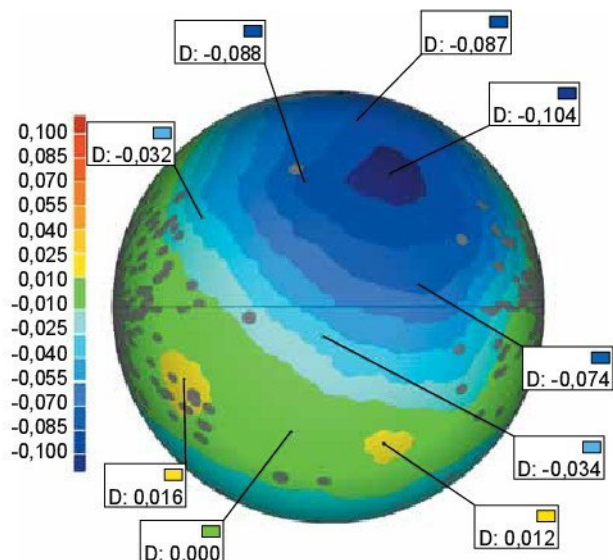


Рисунок 5.4 – Сферичность головки ЭТБС (CoCrMo–Пол)
через 13 лет после имплантации ($d \sim 28$ мм)

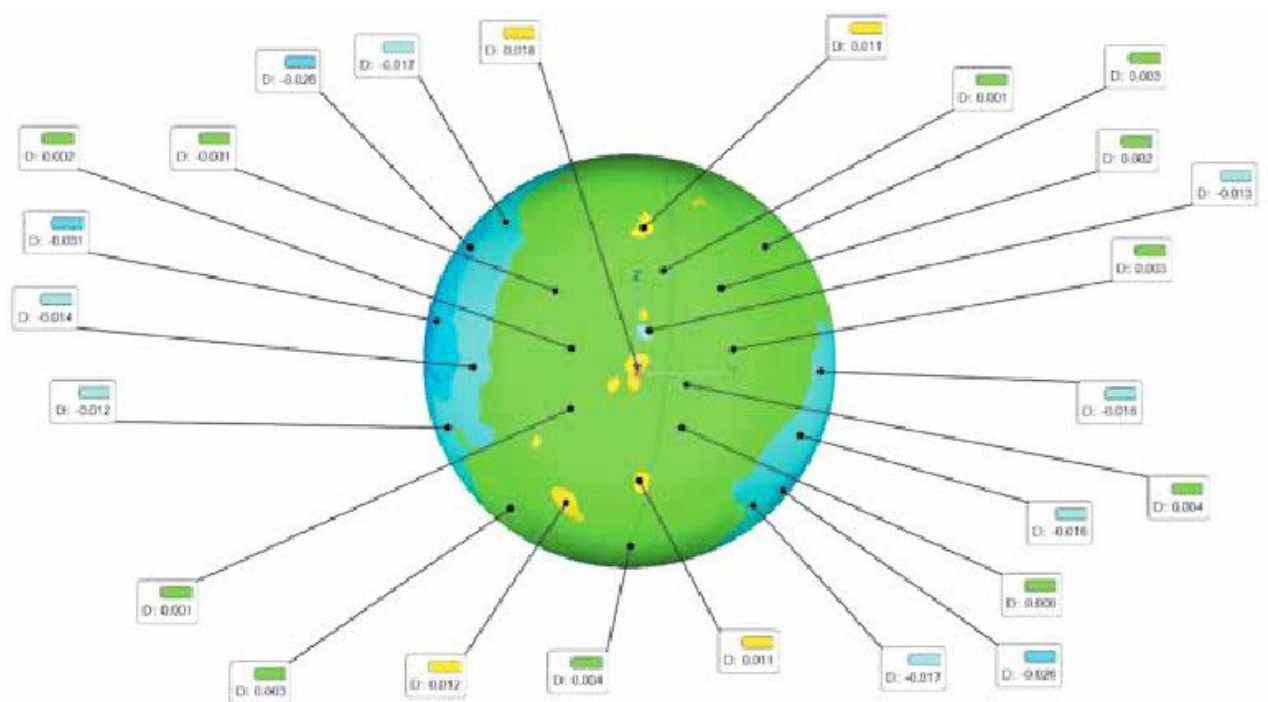


Рисунок 5.5 – Сферичность головки ЭТБС (CoCrMo–CoCrMo)
через 15 лет после имплантации ($d \sim 54$ мм)

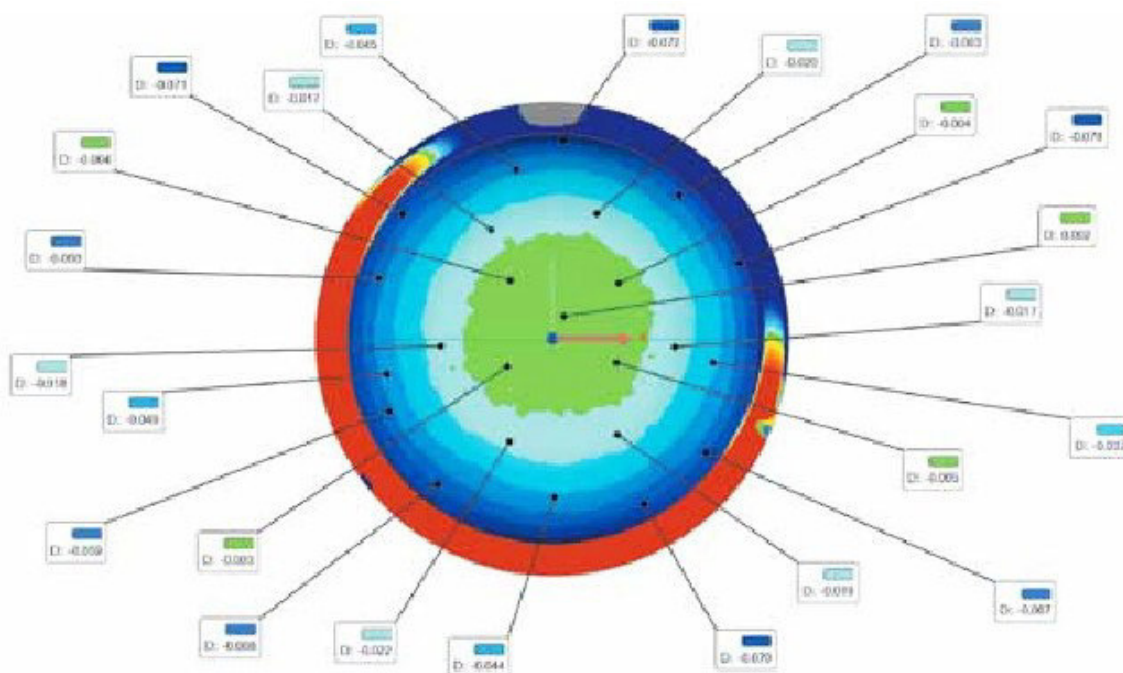


Рисунок 5.6 – Сферичность вкладыша ЭТБС (CoCrMo–CoCrMo) через 15 лет после имплантации (внутренний $d \sim 54$ мм)

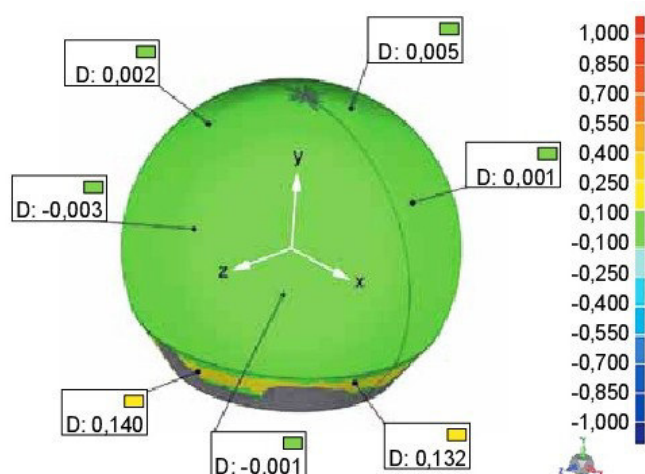


Рисунок 5.7 – Сферичность головки ЭТБС (Керамика – Пол) через 17 лет после имплантации ($d \sim 28$ мм)

Исследования показали значительное уменьшение размеров вкладышей из полиэтилена (до 1,96 мм), которое определялось визуально. Выявлена основная зона износа в верхней части головки и вкладыша (соответствующая вертикальной оси нагрузки). Состояние поверхности в этой зоне вкладыша в отдаленные сроки после артропластики приближалось к катастрофическому износу (рис. 5.8).

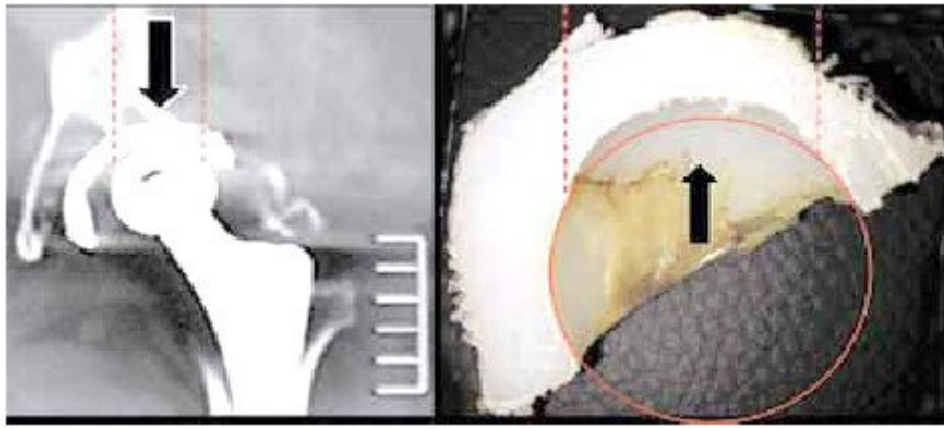


Рисунок 5.8 – Вид износа полиэтиленового вкладыша ($d \sim 28$ мм) через 17 лет после артропластики в паре с головкой Biolox forte

Шероховатость intactных головок ЭТБС находилась в пределах 0,2 ... 0,4 мкм.

Исследования показали, что показатели неровности рельефа поверхностей компонентов эндопротезов после имплантации отличались. Отклонения по RS_a достигали 14,1 мкм у CoCrMo–CoCrMo (табл. 5.2). Во 2-й зоне RS_a отклонялось до 8,5 мкм, в 3-й зоне изменения были минимальными. Максимальные значения данного показателя выявлялись в паре трения CoCrMo–CoCrMo всех уровней. Изменения деформационного рельефа поверхности головок эндопротезов в трибологических парах CoCrMo–Пол, Biolox forte–Пол были сопоставимы между собой.

При оценке рельефа поверхностей головок эндопротезов в паре трения CoCrMo–CoCrMo выявлены глубокие изменения рельефа поверхности с косвенными признаками коррозии и формированием «раковин» (рис. 5.9). В других изученных трибологических парах подобных явлений не выявлено.

Следует при этом заметить, что последний результат для пары CoCrMo–CoCrMo был предсказан ранее на основании результатов исследования на моделях адгезионного взаимодействия пар трения, изложенных в п. 4.1 диссертации и приведённых в табл. 4.1. Отмечалось, что при металлических головке и вкладыше биологическая среда повышает значение f_m (индекса

совместимости), что свидетельствует о повышении пластичности «третьего тела» (зона фрикционного контакта) из-за наличия в синовиальной жидкости поверхностно-активных веществ.

Таблица 5.2 - Показатели RS_a компонентов эндопротезов ТБС после имплантации, мкм

Компоненты эндопротезов	Мезо	Микро	Нано-уровень
Пара трения CoCrMo–Пол			
Головка (зона 1)	$5,6 \pm 0,7$	$0,8 \pm 0,3$	$0,3 \pm 0,1$
Головка (зона 2)	$5,2 \pm 1,4$	$1,2 \pm 0,6$	$0,1 \pm 0,05$
Головка (зона 3)	$3,4 \pm 0,7$	$0,3 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,07$
Пара трения Biolox forte–Пол			
Головка (зона 1)	$4,6 \pm 0,8$	$0,5 \pm 0,3$	$0,3 \pm 0,04$
Головка (зона 2)	$5,3 \pm 0,5$	$0,3 \pm 0,2$	$0,1 \pm 0,07$
Головка (зона 3)	$4,1 \pm 0,4$	$0,6 \pm 0,3$	$0,1 \pm 0,04$
Пара трения CoCrMo–CoCrMo			
Головка (зона 1)	$14,1 \pm 4,2$	$0,8 \pm 0,3$	$0,3 \pm 0,1$
Головка (зона 2)	$6,6 \pm 0,4$	$0,4 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,04$
Головка (зона 3)	$4,3 \pm 0,3$	$0,4 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,08$
Вертлужный компонент CoCrMo (зона 2)	$8,5 \pm 0,6$	$1,0 \pm 0,3$	$0,1 \pm 0,07$

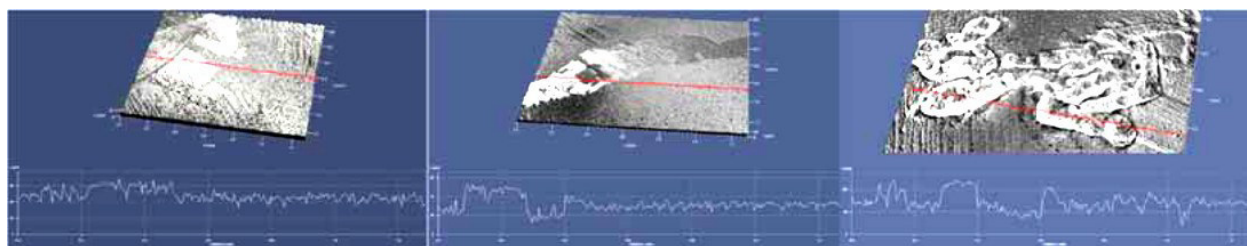


Рисунок 5.9 – Рельеф зоны поверхности преимущественного износа головок эндопротеза на мезоуровне (05^x), 3D-лазерная сканирующая микроскопия: а) головка – CoCrMo, пара трения CoCrMo–Пол; б) головка – керамика Biolox forte, пара трения Biolox forte–Пол; в) головка – CoCrMo, пара трения CoCrMo–CoCrMo

В таблице 5.3. для сравнения приведены данные по износу эндопротезов ТБС, полученные из расчётов по формуле (4.2), и фактических измерений через 13-17 лет после имплантации.

Если учесть, что расчетный износ определен по формуле (4.2), полученной по среднестатистическим данным, а фактические значения износа сопряжения «головка-вкладыш» получены в рассматриваемых конкретных случаях, то следует признать эти результаты вполне сопоставимыми, близким.

Таблица 5.3 – Сопоставление средних расчетных и фактических данных по износу сопряжения «головка – вкладыш» имплантированных эндопротезов

Пара трения	Расчетный износ сопряжения, мм	Фактический износ сопряжения, мм
CoCrMo–Пол	2,47	2,06
CoCrMo–CoCrMo	0,74	0,67
Biolog delta–Biolog delta	0,34	0,28

С помощью лазерной сканирующей микроскопии выполнен оптико-структурный анализ пары трения «головка – вкладыш», который позволил установить закономерности износа деталей эндопротезов ТБС из разных материалов. Изменения размеров головки и вкладыша были неравномерными: с формированием зоны наиболее интенсивного износа.

В процессе работы эндопротеза тазобедренного сустава появляется приоритетная точка опоры, в которой происходит наибольший износ, что приводит к изменению биомеханики пораженного сегмента.

Поэтому знание диапазона эксплуатационных и трибологических свойств подвижных узлов эндопротеза позволяет сделать обоснованный выбор технологии артропластики.

5.3 Информационная база данных по триботехническим характеристикам и совместимости трущихся поверхностей

На кафедре ОКМиМ УГАТУ разработана информационная база данных по триботехническим и технологическим характеристикам в машиностроении (ИБД ТТХ) [148], которая позволяет пользователю (конструктору, технологу, врачу) определить численные значения триботехнических и технологических характеристик заданной пары контактирующих материалов. При этом можно:

- пополнить базу данных;
- выполнить расчет триботехнических показателей для выбранной пары контактирующих материалов;
- оформить отчет.

Данные по триботехническим характеристикам ПСМ, модифицированного углеродным каркасом, а также по адгезионному взаимодействию пар трения эндопротезов ТБС, полученные в данной диссертационной работы, дополнили соответствующие справочники ИБД ТТХ.

5.3.1. Описание справочников

ИБД ТТХ имеет машинные классификаторы (справочники), представляющие собой систематизированный свод наименований объектов классификации, признаков классификации и/или классификационных группировок и их обозначений.

В ИБД ТТХ используются 2 основные группы локальных справочников:

- справочники наименований, которые имеют вспомогательное значение в процессе поиска необходимой информации и используются при оформлении выходных таблиц и отчетов (табл. 5.4);

–справочники триботехнических и технологических характеристик, которые разыскивает пользователь (табл. 5.5).

Таблица 5.4 – Наименования справочников

№	Наименование справочника	Ключи поиска
1	Наименования групп материалов	Код группы, наименование материала
2	Способы обработки	Код способа обработки; наименование способа обработки
3	Смазки	Код смазки; наименование смазки
4	Триботехнические данные	Предельное давление; предельная прочность адгезионных связей на срез; коэффициент упрочнения адгезионных связей; температура предела совместимости, характерная температура

При работе в режиме конструктора – технолога данные из справочников извлекаются без демонстрации кодов.

Таблица 5.5 – Справочник триботехнических и технологических характеристик

№	Наименование справочника	Ключи поиска
1	Справочник триботехнических характеристик, используемых в расчетах при механообработке (оптимальные, характерные температуры)	Код группы материала; код материала инструмента; код группы обрабатываемого материала; код обрабатываемого материала; смазка
2	Справочник триботехнических характеристик материалов, используемых в расчетах трибосопряжений	Код группы материала; код более твердого материала пары трения; код более мягкого материала; способ обработки; смазка; температура контакта

При работе в режиме администратора система ведения справочников позволяет вводить новые записи, корректировать и удалять старые. Все материалы в справочнике разбиты на группы по характерным признакам.

При работе в режиме конструктора – технолога после выбора пользователем пары контактирующих материалов, условий работы и смазки выполнение расчетов перечисленных триботехнических показателей производится автоматически. Заданное давление p_r автоматически сопоставляется с предельным нормальным давлением p_{rn} (которое должно быть больше заданной величины).

5.3.2. Описание подсистем, входящих в ИБД ТТХ

В ИБД ТТХ предусмотрены несколько режимов (рис. 5.10). С помощью режима «Администратора базы» можно ввести новые записи, вводить поправки или удалять устаревшие данные: по материалам, условиям работы, смазкам и триботехническим характеристикам (рис. 5.11).

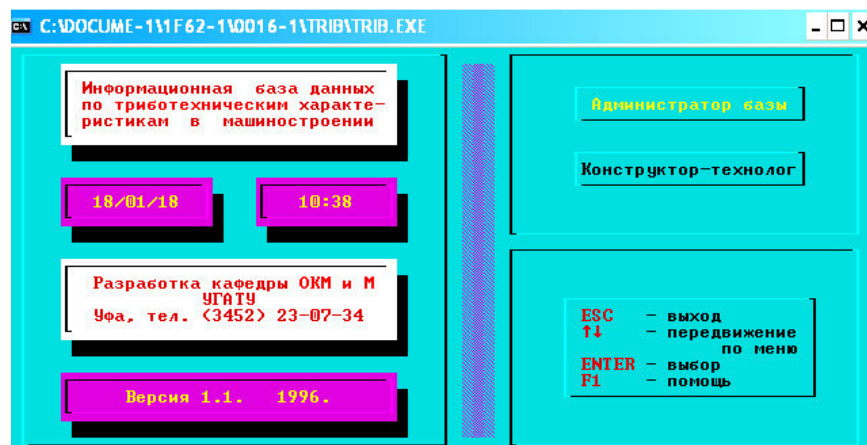


Рисунок 5.10 – Главное меню ИБД ТТХ

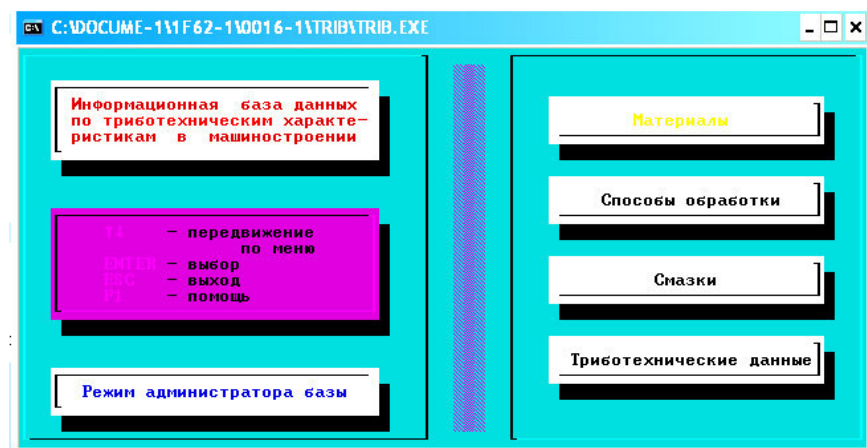


Рисунок 5.11 – Модули подсистемы «Администратор базы»

В раздел «Материалы» вводится справочник материалов контактирующих тел. Все материалы разбиты на группы и конкретные марки материалов (рис. 5.12).

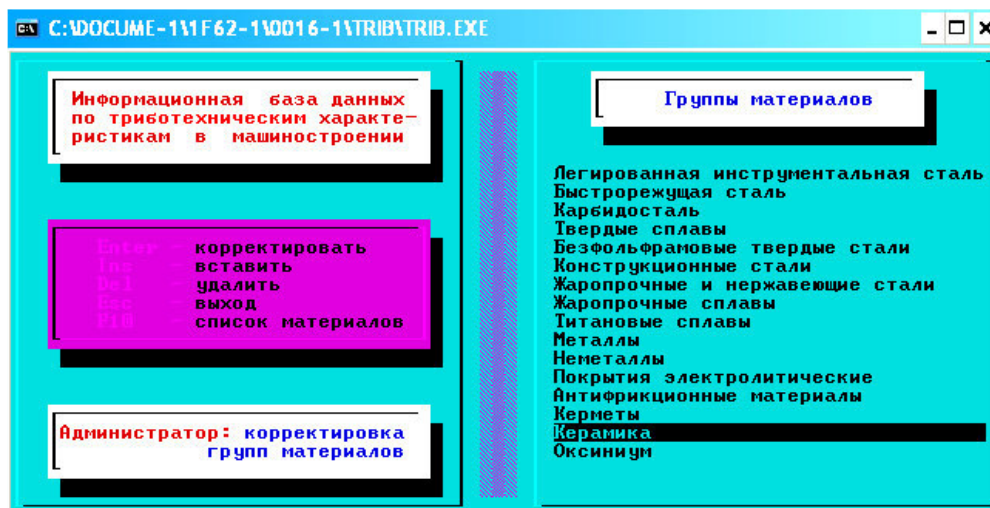


Рисунок 5.12 – Корректировка групп материалов

В раздел «Способ обработки» вводится справочник перечня наименований методов обработки (рис. 5.13). Способы обработки указываются без детализации параметров обработки.

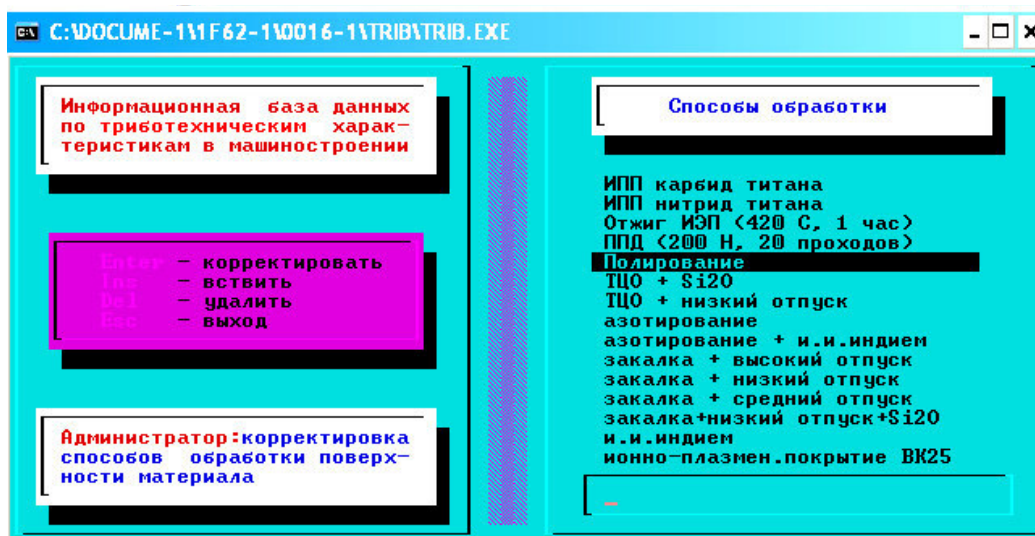


Рисунок 5.13 – Библиотека способов обработки ИБД ТТХ

В раздел «Смазка» вводится справочник наименований смазок (рис. 5.14).

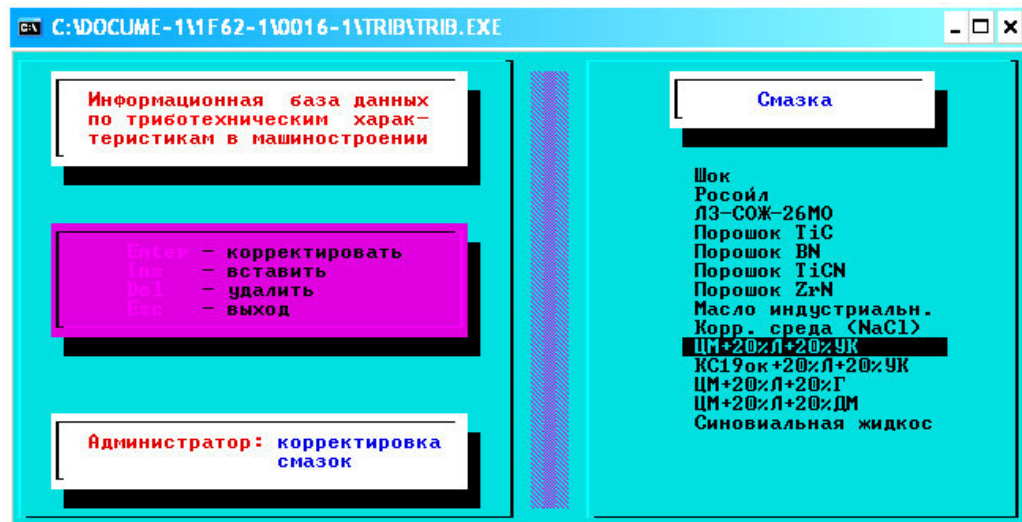


Рисунок 5.14 – Виды смазок в ИБД ТТХ

В раздел «Триботехнические и технологические данные» вводятся сведения о триботехнических показателях каждой конкретной пары контактирующих тел (рис. 5.15).



Рисунок 5.15 – Запись триботехнических характеристик в ИБД ТТХ

Известно, что величина многих триботехнических показателей зависит не только от вышеперечисленных параметров, но и от температуры контакта, поэтому пользователь должен уточнить температуру контакта.

При работе в режиме «Конструктора – технолога» пользователь получает следующую информацию по триботехническим характеристикам.

Для получения необходимой информации пользователь в окне (рис. 5.10) выбирает режим «Конструктор – технолог», выбирает интересующую его пару контактирующих материалов (рис. 5.16), уточняет способ их обработки, указывает смазку (или ее отсутствие), указывает температуру контакта и интересующее его нормальное давление.

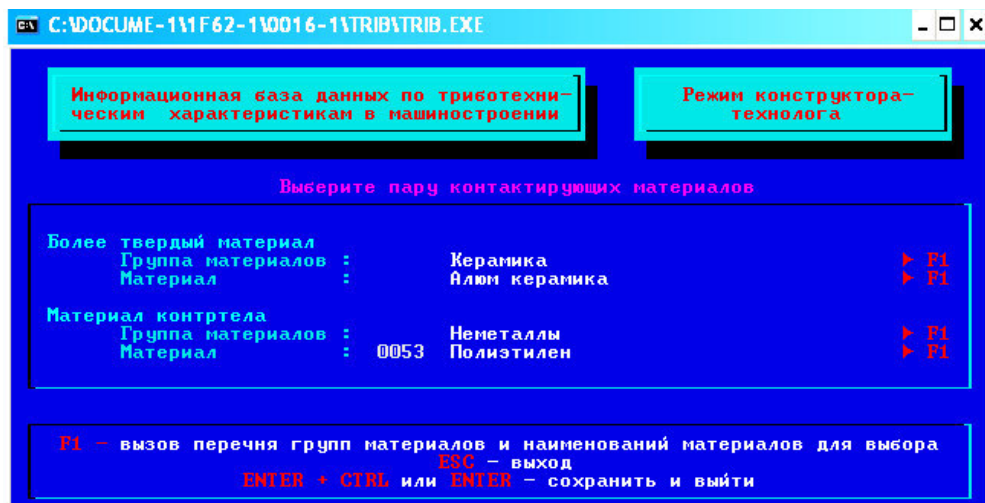


Рисунок 5.16 – Режим конструктора – технолога в ИБД ТТХ

Пользователь получает информацию о пьезокоэффициенте β ; прочности τ_n на срез адгезионных связей и др. (рис. 5.17).

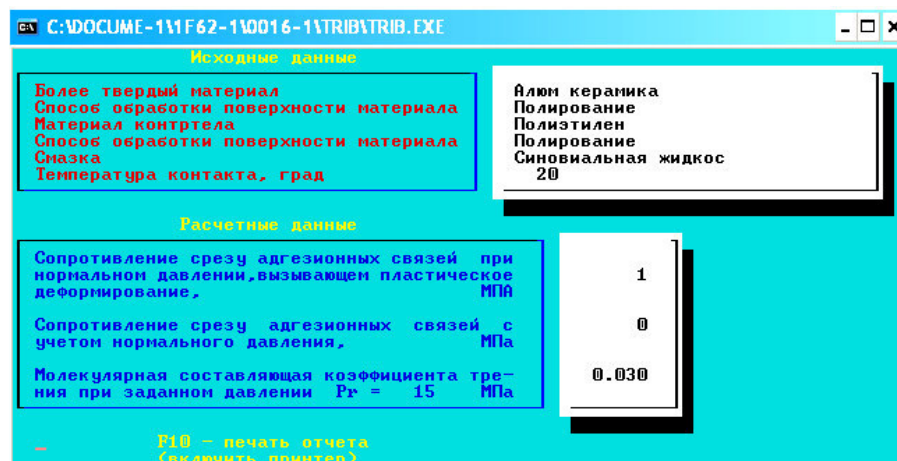


Рисунок 5.17 – Расчетные данные в ИБД ТТХ

Пополнение ИБД ТТХ результатами исследований адгезионного взаимодействия пар трения эндопротезов ТБС, а также подвижных тяжелогруженных трибосопряжений со смазкой, модифицированной УК, позволят уже на стадии конструирования узлов трения и выбора технологии артропластики прогнозировать с учётом формул (4.2) и (5.1) эксплуатационную долговечность этих узлов по износостойкости.

Выводы по 5 главе

1. Установлено, что применение в качестве добавок в ПСМ веществ с низкой теплопроводностью, позволяет повысить эксплуатационные свойства высокотемпературных трибосопряжений не только по энергетическим затратам, но и по их износостойкости. Из всех исследованных модифицирующих ПСМ добавок наиболее высокие показания по триботехническим характеристикам обеспечивает углеродный каркас.
2. Экспериментально установлено, что износ функционально зависит от пьезокоэффициента β и описывается функцией:

$$K = C \cdot \beta^m$$

Для исследованной пары трения при применении различных ПС $C = 7 \cdot 10^{-4}$, $m = 1,3$. Наибольшую износостойкость при температуре $\theta = 150^\circ\text{C}$ обеспечивает применение ПСМ на основе цилиндрического масла, модифицированного 20% литола и 20% углеродного каркаса.

3. Сопоставление расчётных по формуле (4.2) значений износа различных пар трения эндопротезов ТБС и фактических износов после 13 – 17 лет имплантирования показало их удовлетворительное совпадение. Знания диапазона эксплуатационных качеств и трибологических свойств подвижных узлов эндопротеза позволяет сделать обоснованный выбор технологии артропластики.

4. Проведённые теоретические и экспериментальные исследования триботехнических характеристик ПС ЭУТИ (на примере выбора добавок в ПСМ для высокотемпературных трибоузлов и выбора материалов пары

трения в эндопротезах ТБС) показали, что определяющим фактором в повышении эксплуатационных свойств этих сопряжений являются показатели адгезионного взаимодействия и, в первую очередь, коэффициент β упрочнения адгезионных связей (играющий, по существу, роль индекса совместимости трущихся поверхностей).

5. Пополнение ИБД ТТХ результатами исследований адгезионного взаимодействия пар трения эндопротезов ТБС, а также подвижных тяжело нагруженных трибосопряжений со смазкой, модифицированной УК, позволят уже на стадии конструирования узлов трения и выбора технологии артропластики прогнозировать с учётом формул (4.2) и (5.1) эксплуатационную долговечность этих узлов по износостойкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы и выводы

1. Предложена и апробирована методология выбора добавок в ПСМ для высокотемпературных узлов трения и выбора материалов пары трения в ЭТБС на основе использования гидродинамической аналогии.

2. Показано, что добавка УК в ПСМ существенно уменьшает (до 2-х раз) изнашивание в трибоузлах за счет снижения показателей адгезионного взаимодействия.

3. Применение углеродного каркаса в качестве добавки взамен графита и дисульфида молибдена обеспечивает улучшение в 1,3 раза противозадирных и противоизносных характеристик ПСМ. Предложена следующая композиция ПСМ: 20% УК, 20% литол и 60 % ЦМ, - обеспечивающая наибольшую величину нагрузки сваривания. Приоритет этого технического решения подтвержден патентом РФ.

4. Окисление дисперсной среды ПСМ озоном и активные элементы углеродного каркаса (P, S, Cl, Zn, Al), используемого в качестве комплексной добавки, оказывают благоприятное влияние на характеристики адгезионного взаимодействия вплоть до температуры 600 °С на подвижном фрикционном контакте.

5. Установлено, что индекс C совместимости трущихся поверхностей соответствует значению молекулярной составляющей f_m коэффициента трения и с ошибкой не более 10% равен коэффициенту β упрочнения адгезионных связей.

6. Выявлено, что в эндопротезах при легких и умеренных нагрузках (500...4000 Н) наиболее благоприятные трибологические характеристики имеют пары трения «АКер-АКер», «ЦКер-АКер». В диапазоне от 4000 до 6300 Н, соответствующих быстрой ходьбе, практически все исследованные пары трения имеют одинаковые показатели адгезионного взаимодействия. Пары трения «АКер-Пол», «ЦКер - Пол», «Окс - Пол» имеют наименьшую прочность адгезионных связей при максимальных нагрузках (8000...10000 Н).

Наилучшие трибологические характеристики во всем исследованном диапазоне нагрузок были выявлены в парах трения «ЦКер-АКер», «АКер-АКер», в которых скорость изнашивания уменьшается до 8 раз.

7. Показано, что при одинаковом давлении p_r от 1,7 до 2,83 МПа, значения f_a ТБС кролика в 2 – 2,18 раза меньше, чем у искусственного кинематического узла. Данный показатель в искусственной паре трения сравним лишь с показателем образца с моделью остеоартроза ТБС кролика в условиях биологической среды.

8. Экспериментально установлено, что интенсивность изнашивания в тяжелонагруженных трибосопряжениях и скорость изнашивания в эндопротезах ТБС, зависят от коэффициента β упрочнения адгезионных связей в виде степенных функций. Эти функции позволяют уже на стадии выбора материалов (конструкционных или ПСМ) прогнозировать работоспособность и надежность узлов трения.

9. Установлено, что определяющим фактором в повышении износостойкости подвижных сопряжений являются показатели адгезионного взаимодействия и, в первую очередь, коэффициент β упрочнения адгезионных связей (играющий, по существу, роль индекса совместимости трущихся поверхностей).

10. Дополненная результатами данного исследования ИБД ТТХ позволяет пользователю оперативно получить интересующую информацию по показателям адгезионного взаимодействия (p_m ; $\tau_{\text{пл}}$; β ; τ_0) с учетом материалов контактирующих поверхностей, способа их обработки, температуры и давления на фрикционном контакте, а также смазочного материала.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Предложенная композиция ПСМ с углеродным каркасом в качестве добавки может использоваться как смазка не только в тяжелонагруженных

подшипниковых опор осей тележек обжига кирпича и валков прокатных станов, но и в шарнирах, винтовых, цепных и зубчатых (тихоходных) передачах, а также для уменьшения фреттинг – изнашивания (шлицевых соединений, хвостовиков лопаток и т.п.).

Разработанная методика выбора материалов пары трения в ЭТБС может использоваться для решения аналогичных задач в эндопротезах коленного, локтевого и плечевого суставов человека.

В связи с широким использованием в технике новых нетокопроводных материалов необходимо продолжить работы по совершенствованию методики исследования влияния температуры на характеристики адгезионного взаимодействия при трении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котелевский, Ю.М. Современные конструкции трубопроводной арматуры для нефти и газа. Справочное пособие / Ю.М. Котелевский, Г.В. Мамонтов, Л.Н. Кисман и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., Недра, 1976. – 497 с.
2. Черноштан, В.И. Трубопроводная арматура ТЭС: Справочное пособие / В.И. Черноштан, В.А. Кузнецов. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 368 с.
3. Новиков, В.Т. Основы проектирования и оборудование предприятий органического синтеза. Часть 1. Трубопроводная арматура: Учебное пособие / В.Т. Новиков. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. – 292 с.
4. ГОСТ 55509-2013 Арматура трубопроводная. Металлы, применяемые в арматуростроении. Основные требования к выбору материалов – Введен 2014 – 02 – 01. – Москва. Стандартинформ, 2014. – 70 с.
5. Гуревич, Д.Ф. Трубопроводная арматура: Справочное пособие / Д.Ф. Гуревич. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1981. – 268с.
6. Артемов, А.В. Разработка и производство узлов запорной арматуры из технической керамики / А.В. Артемов // Арматуростроение. – 2012. – № 6(81). – С.66 – 68.
7. Мамлеев, Р.Ф. Износостойкие керметы на основе карбида титана – материал для затворов трубопроводной арматуры и других высокоресурсных изделий / Р.Ф. Мамлеев // Арматуростроение – 2014 – № 6 (93) – С. 47 – 52.
8. Камалетдинова, Р.Р. Износ трибосопряжений из керамико-металлического материала на основе карбида титана/Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер, Р.Ф. Мамлеев, С.В. Чертовских, Р.М. Киреев // Трение и износ. – 2016. – Т.37. №2 – С.214 – 218.

9. Камалетдинова, Р.Р. Применение керметов в запорной арматуре с учетом их триботехнических характеристик / Р.Р. Камалетдинова, Руст.Ф. Мамлеев, Раф.Ф. Мамлеев, Л.Ш. Шустер // Машиностроение и инженерное образование. – 2016. – № 1 – С. 12 – 21.
10. Камалетдинова, Р.Р. Влияние свойств материала деталей трибосопряжений на их изнашивание / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер// Вестник машиностроения. – 2016. – № 7 – С.50 – 52.
11. Михайлов, А.К. Компрессорные машины: уч.пособие для вузов /А.К. Михайлов, В.П. Ворошилов – М.: Энергоатом, 1989. – 298 с.
12. Воронежский, А.В. Современные компрессорные станции: справочное пособие / А.В. Воронежский. – М.: Премиум инжиниринг, 2009 – 445 с.
13. Райзман, И.А. Жидкостнокольцевые вакуумные насосы и компрессоры/ И.А. Райзман. – Казань: КАН, 1995 г. – 285 с.
14. Вахнин, М.П. Производство силикатного кирпича: учебник / Вахнин М.П., А.А. Анищенко. – М.: Высшая школа, 1989. – 200 с.
15. Кашкаев, И.С. Производство керамического кирпича: учебник / И.С. Кашкаев, Е.Ш. Шейнман. – М.: Высшая школа, 1983. – 223 с.
16. Зейфман, М.И. Изготовление силикатного кирпича и силикатных ячеистых материалов / М.И. Зейфман – М.: Стройиздат, 1990. – 184 с.
17. Эшби, М. Ф. Конструкционные материалы: учеб. пособие / М.Ф. Эшби, Д. Джонс ; пер. 3-го англ. изд. под ред. С.Л. Башенова. – М.: Интеллект, 2010. – 672 с.
18. Галимов, Э. Р. Материалы приборостроения : учеб. пособие для вузов / Э. Р. Галимов, А. С. Маминов, А. Г. Аблясова. – М.: КолосС, 2010. – 284 с.
19. Болтон, У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты: карманный справочник. / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 320 с.

20. Реслер, И. Механическое поведение конструкционных материалов : учебное пособие. пер. с нем. С. Л. Баженова./ И. Реслер, Х. Хардерс, М. Бекер. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 504 с.
21. Пожидаева, С.П. Основы производства. Материаловедение и производство металлов / С. П. Пожидаева. – М.: Академия, 2010. – 192 с.
22. Попов А.Н. Основы материаловедения: учеб. пособие / А.Н. Попов, В.П. Казаченко. – Минск: Издательский дом Гревцова, 2010. – 176 с.
23. Зоткин, В.Е. Методология выбора материалов и упрочняющих технологий в машиностроении: учебник / В.Е. Зоткин. - 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ИД ФОРУМ: ИНФРА-М, 2011. – 320 с.
24. Схиртладзе, А.Г. Технологические процессы в машиностроении: учебник / А.Г. Схиртладзе, С.Г. Ярушин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2010. – 524 с.
25. Овсеенко, А.Н. Формообразование и режущие инструменты: учебное пособие / А. Н. Овсеенко, Д. Н. Клауч, С. В. Кирсанов, Ю.В. Максимов – М.: Форум, 2010. – 415 с.
26. Гречишников, В. А. Проектирование режущих инструментов: учебное пособие для вузов / В. А. Гречишников, С. Н. Григорьев, И. А. Коротков, А. Г. Схиртладзе. - Старый Оскол: ТНТ, 2010 – 388 с.
27. Кожевников, Д.В. Резание материалов: учебник / Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов. – М.: Машиностроение, 2007. – 304 с.
28. Плошкин, В.В. Материаловедение: учеб.пособие / В.В. Плошкин – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2013 – 463 с.
29. Григорьев, С.Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента / С.Н. Григорьев, В.П. Табаков, М.А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 378 с.
30. Шустер, Л.Ш. Покрытия и смазки в высокотемпературных сопряжениях и металлообработке / Л.Ш. Шустер, Н.К. Криони, В.Ю. Шолом, М.Ш. Мигранов. – М.: Машиностроение, 2008. – 318 с.

31. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
32. Асланян, И.Р. Трибологические характеристики электролитических покрытий в различных условиях трения и изнашивания / И.Р. Асланян, Н.К. Криони, Л.Ш. Шустер. – М.: Машиностроение, 2013. – 243 с.
33. Гоцеридзе, Р.М. Процессы формообразования и инструменты: учебник / Р.М. Гоцеридзе. – 3-е изд. испр. и доп. – М.: Академия, 2010 – 427 с.
34. Григорьев, С.Н. Обеспечение качества деталей при обработке резанием в автоматизированных производствах: учебник / С.Н. Григорьев, А.Р. Маслов, А.Г. Схиртладзе. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 412 с.
35. Горохов, В.А. Материалы и их технологии: в 2-х ч.: учебник/ В.А. Горохов, Н.В. Беляков, А.Г. Схиртладзе. – Минск: Новые знания, 2014. – 533 с.
36. Балла, О.М. Инструментообеспечение современных станков с ЧПУ / О.М. Балла – М.: Лань, 2017 – 200 с.
37. Смирнов, В.К. Калибровка прокатных валков: уч.пособие/ В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Иналович – 2-е изд. перераб и доп. – М.: Теплотехника, 2010. – 490 с.
38. Иванов, И.И. Основы теории обработки металлов давлением: учебник для вузов / И.И. Иванов [и др.]. - М.: Форум: Инфра-М, 2011. - 144с.
39. Богодухов, С.И. Технологические процессы в машиностроении: учебник / С.И. Богодухов, Е.В. Бондаренко, А.Г. Схиртладзе, Р.М. Сулейманов – Старый Оскол: ТНТ, 2012 – 624 с.
40. Николаенко, В.И. Эндопротезирование тазобедренного сустава / В.И. Николаенко, Б.П. Буряченко, Д.В. Давыдов, М.В. Николаенко – М.: Медицина, 2009. – 356 с.
41. Загородский, Н.В. Эндопротезирование тазобедренного сустава. Основы и практика. / Н.В. Загородский. – М: ГЭОТАР-Медиа, 2012. – 752 с.

42. Тахимов, Р.М. Основы эндопротезирования тазобедренного сустава: учеб.пособие/ Р.М. Тахимов, В.М. Шаповалов, В.А. Аверкиев. – СПб, 2008. – 271 с.
43. Ночовная, Е.В. Металлические материалы для эндопротезирования/ Н.А. Ночовная, Е.В. Черемушникова, В.Г. Анташев – М.: ВНИИАМ, 2014 – 72 с.
44. Adhesive wear behaviour of carbide composites and tool steels / H. Annuka, H. Klaasen, J. Kübarsepp, V. Suvi // 4th International DAAAM conference “Industrial engineering – innovation as competitive edge for SME”. – PP. 167–168.
45. Behaviour of TiC-base cermets in different wear conditions / Jakob Kübarsepp*, Heinrich Klaasen, Jüri Pirso // Wear 249 (2001). – PP. 229–234.
46. Characterization of TiC-FeCrMn cermets produced by powder metallurgy method / Märt Kolnes, Jakob Kübarsepp, Lauri Kollo, Mart Viljus // Materials science (Medžiagotyra) (2015) volume 21, №3. – PP. 353 – 357.
47. Friction and dry sliding wear behavior of cermets / Juri Pirso, Mart Viljus, Sergei Letunovits // Wear 260 (2006) – PP. 815-824.
48. Microstructure and erosive wear in ceramic based composites / Irina Hussainova // Wear 258 (2005) – PP. 357-365.
49. The sliding wear of TiC and Ti(C,N) cermets prepared with a stoichiometric Ni₃Al binder / Tyler L. Stewart, Kevin P. Plucknett // Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Applied Science – PP. 54–93.
50. Adaptive nanocomposite coating with a titanium nitride diffusion barrier mask for high-temperature tribological application / C. Muratore, J.J. Hu, A.A. Voevodin // Thin Solid Films 515 (2007) – PP. 3638-3643.
51. Tribological properties of hybrid composites containing two carbide phases / A. Dolata – Grosz, J. Wieczorek // Archives of materials science and engineering (2007) volume 28, Issue 3. – PP. 149-155.

52. Tribology of ceramics and composites: a materials science perspective / Bikramjit Basu, Mutjan Kalin. – Published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey – 522p.

53. Буше, Н.А. Совместимость трущихся поверхностей / Н.А. Буше, В.В. Копытько. М.: Наука, 1981. – 128 с.

54. Камалетдинова, Р.Р. Износ трибосопряжений из керамико-металлического материала на основе карбида титана / Р. Р. Камалетдинова, Л. Ш. Шустер, Руст.Ф. Мамлеев, С. В. Чертовских, Р. М. Киреев // Трение и износ. – 2016. – Т. 37. № 2 – С. 214–218.

55. Камалетдинова, Р.Р. Применение керметов в запорной арматуре с учетом их триботехнических характеристик / Р.Р. Камалетдинова, Руст.Ф. Мамлеев, Раф.Ф. Мамлеев, Л.Ш. Шустер // Машиностроение и инженерное образование. – 2016. – № 1. – С. 12–21.

56. Камалетдинова Р.Р. Влияние свойств материала деталей трибосопряжений на их изнашивание / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер // Вестник машиностроения. – 2016. – № 7 – С. 50–52.

57. Камалетдинова, Р.Р. Металлографические исследования изнашивания материалов, используемых в шаровых кранах / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер // Вестник УГАТУ. – 2016. – Т. 20, № 2(72) – С. 61–65.

58. Шустер, Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел / Л.Ш. Шустер. – Уфа: Гилем, 1999. – 198 с.

59. Словарь – справочник по трению, износу и смазке деталей машин / Е.Л. Шведков и др. – Киев: Наукова думка, 1979. – 188 с.

60. Крагельский, И.В. Трение и износ элементов в вакууме / И.В. Крагельский, И.М. Любарский, А.А. Гусяков, Г.И. Трояновская, В.Ф. Удовенко – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.

61. Силин, А.А. Методы оценки влияния окружающей среды на процессы внешнего трения и износ / А.А. Силин // Научные принципы и

новые методы испытания материалов для узлов трения. – М.: Наука, 1972. – с. 28 – 31.

62. Иванов Е.Н. Трение и износ элементов вакуумных волновых передач / Е.Н. Иванов, Ю.А. Константинов, Е.С. Панфилова, А.И. Шихов // Modern high Technologies, №2, 2015 – с. 68 – 72.

63. Васин, В.А. Системы приводов для работы в сверхчистой вакуумной технологической среде / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов // Приводная техника. – М. – 2011 - №1 – с. 37 – 38.

64. Васин, В.А. Методы проектирования приводов и функциональных устройств вакуумного модульного оборудования / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов // Приводная техника. – М. – 2011. - №3 – с. 23 – 33.

65. Сученинов, П.А. Разработка и исследование композиционных материалов для уплотнений воздушных поршневых компрессоров /П.А. Сученинов, Н.А. Адаменко // Вестник ВолгГТУ, 2008. - №4. – с. 66 – 69.

66. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

67. Костецкий, Б.И. Механико-химические процессы при граничном трении / Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бернадский. – М.: Наука, 1972. – 170 с.

68. Костецкий, Б.И. Фундаментальные основы поверхностной прочности материалов при трении / Б.И. Костецкий. – Киев: Знание, 1980. – 26 с.

69. Дроздов, Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

70. Современная трибология. Итоги и перспективы / Э.Д. Браун и др.; отв.ред. К.В. Фролов. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. – 480 с.

71. Ковалев, Е.П. Твердосмазочные покрытия для машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях (обзор) / Е.П. Ковалев,

М.Б. Игнатъев, А.П. Семенов и др. // Трение и износ. 2004 Т.25, № 3 – с. 316 – 331.

72. Криони, Н.К. Оптимизация работы высокотемпературных подшипников скольжения с твердыми смазочными покрытиями по триботехническим параметрам / Н.К. Криони. – М.: Машиностроение, 2004. – 164 с.

73. Криони, Н.К. Влияние высоких температур на процесс внешнего трения в паре скольжения «твердое смазочное покрытие – твердое тело» / Н.К. Криони, Л.Ш. Шустер // Приводная техника. – 2004. - № 1 – с. 50 – 57.

74. Семенов, А.П. Схватывание металлов и методы его предотвращения при трении / А.П. Семенов // Трение и износ. – 1980 – Т1. № 2 – с. 236 – 246.

75. Михин, Н.М. Внешнее трение твердых тел / Н.М. Михин. – М.: Наука, 1977. – 230 с.

76. Криони, Н.К. Совместимость при трении в условиях прессования титановых сплавов / Н.К. Криони, Л.Ш. Шустер // Трение и износ. – 1993. – Т. XIV, №5 – с. 914 – 921.

77. А.с. № 3910289 (СССР) Способ оценки совместимости трущихся поверхностей / Л.Ш. Шустер, В.С. Новиков, Ю.М. Павленко, В.М. Кихлин // Б.И. – 1987. - № 33

78. Постнов, В.В. Термодинамика и технология нестационарной обработки металлов резанием / В.В. Постнов, В.Л. Юрьев – М.: Машиностроение, 2009. – 268 с.

79. Постнов, В.В. Технологическое обеспечение мехатронных станочных систем: уч.пособие / В.В. Постнов и др. – 2-е изд.- М.: Машиностроение, 2014 – 139 с.

80. Мигранов, М.Ш. Интенсификация процессов металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении / М.Ш. Мигранов, Л.Ш. Шустер – М.: Машиностроение, 2005. – 202 с.

81. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М.: Мир, 2002 – 461 с.
82. Захаров, С.М. Об оценке совместимости трибосистем по различным показателям и методам (к 100 – летию со дня рождения Н.А. Буше) / С.М. Захаров, И.Г. Горячева // Вестник ВНИИЖТ. – Т.75 - №5. – 2016 – с. 263 – 270.
83. Гершман, И.С. Описание процессов трибосистем и разработка износостойких материалов с использованием неравновесной термодинамики и теории самоорганизации / И.С. Гершман, П.Ю. Перетягин, А.Е. Миронов, Е.И. Гершман// Вестник ВНИИЖТ – Т.75 - № 5 – 2016 – с. 278 – 282 с.
84. Шустер, Л.Ш. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом / Л.Ш. Шустер – М.: Машиностроение, 1988. – 96 с.
85. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
86. Иванова, В.С. Структурная приспособляемость при трении как процесс самоорганизации / В.С. Иванова, Н.А. Буше, И.С. Гершман // Трение и износ. – 1997 – Т.18 № 1 – с. 74 – 79.
87. Гершман, И.С. Разработка износостойких материалов с помощью методов неравновесной термодинамики на примере скользящих контактов: докт.дис. – М.: ВНИИЖТ, 2006
88. Семенов, А.Б. Диссипативные процессы и структурные изменения материала диска в трибосистеме алюмоматричный композит – контртело / А.Б. Семенов, Е.В. Игнатова // Технология металлов. – 2006. - №3. – с. 26 – 33
89. Хайнике, Г. Трибохимия / Г. Хайнике. – М.: Мир, 1987. – 582 с.
90. Shuster, L.Sh. and other. Self-Organization During Friction. Advanced Surface-Engineered Materials and Systems Design / edited by German S. Fox-Rabinovich, George E. Totten. – Taylor & Francis, 2006. – 458 p.

91. Криони, Н.К. Термодинамические аспекты работы трибосистемы с твердыми смазочными покрытиями/ Н.К. Криони, Л.Ш. Шустер // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. - №2 – с. 11 – 12
92. Шустер, Л.Ш. Исследования в области высокотемпературной триботехники и использование в авиастроении / Л.Ш. Шустер // Полет. УГАТУ 70 лет. – 2002 – с. 83 – 86 с.
93. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник / Э.Д. Браун и др., под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Центр «Наука и техника», 1995 – 778 с.
94. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе и др.; под общей ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
95. Справочник по триботехнике / Под ред. М.Хебды и А.В. Чичинадзе – М.: Машиностроение, 1989 – 400 с.
96. Большаков, Г.Ф. Сераорганические соединения нефти / Г.Ф. Большаков. – Новосибирск: Наука, 1986. – 203 с.
97. Караулова Е.Н. Об окислении сульфидов перекисью водорода / Е.Н. Каракулова, Г.Д. Гальперин // Химия и технология топлив и масел. – 1956 - №9 – с. 39 – 44.
98. Старкова, Н.Н. Поверхностно-активные вещества при очистке масляных дистиллятов N – метилпирролидом / Н.Н. Старкова, В.Г. Рябов, В.М. Шуведов, В.И. Кузьмин, Ш.М. Юнусов // Химия и технология топлив и масел. – 1997. - №3 – с. 20 – 21
99. Шарипов, А.Х. Получение концентратов сульфоксидов и сульфонов из нефтяного сырья (обзор) / А.Х. Шарипов // Нефтехимия. – 1988. – Т88 №6 – с. 723 – 735
100. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник. / Под ред. В.М. Школьников. - М.: Химия, 1989. - 432 с.
101. Матвеевский, Р.М. Смазочные материалы: антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: справочник / Р.М.

Матвеевский, В.Л. Лашхи. И.А. Буяновский и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.

102. Шустер, Л.Ш. Антифрикционный высокотемпературный смазочный материал, образующий защитное покрытие / Л.Ш. Шустер, Р.Г. Нигматуллин, С.В. Чертовских и др. // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т.13 - № 4(3) – с. 28 – 35.

103. Караулова, Е.Н. Новый способ получения и выделения сульфоксидов (перхлоратно-эмульсионное окисление сульфидов) / Е.Н. Караулова, Г.Д. Гальперин, Т.А. Бардина // Докл. АН СССР, 1967. – Т.173 - №1 – с. 104 – 106.

104. А.с. 631515 Способ получения сульфоксидов / А.М. Машкина, Г.В. Варнакова, Л.М. Загрицкая и др. // Б.И. 1978. - № 41

105. Бондаренко, М.Ф. Получение концентратов сульфидов из дистиллятов нефти экстракцией органическими растворителями / М.Ф. Бондаренко, М.А. Пайс, З.И. Абрамович // Нефтехимия. – 1977. – Т.16 - №6. – с. 904 – 909

106. Антонова, Т.В. Превращения нефтяных компонентов при озонлизе: автореф. канд. дисс. – Томск: ИХН СО РАН, 1999 – 24 с.

107. Химическая энциклопедия/ Н.С. Зефилов и др. // Большая химическая энциклопедия. – М.: Наука, 1998. – Т.5 (Триптофан-Ятрохимия). – 783 с.

108. Емаев И.И. Исследование трибологических характеристик смазочных материалов, модифицированных углеродным каркасом / И.И. Емаев, Н.К. Криони, Р.Г. Нигматуллин, Л.Ш. Шустер // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий - Межвузовский научный сборник – Уфа, 2015. С. 135-139.

109. Лапай Л., Маркушевский Я., Рыбак Т., Бритько А. А., Аносов В. С., Веруш-Козловска М. Анализ износа пары трения “керамика-керамика”

эндопротеза тазобедренного сустава // Трение и износ. — 2013 (34), № 1, 43—49

110. Nakahara I., Nakamura N., Nishii T., Miki H., et al. Minimum Five-Year Follow-Up Wear Measurement of Longevity Highly Cross-Linked Polyethylene Cup Against Cobalt-Chromium or Zirconia Heads // J. Arthroplasty. — 2010, no. 8, 1182—1187

111. Шубняков И. И., Тихилов Р. М., Гончаров М. Ю., Карпучин А. С. и др. Достоинства и недостатки современных пар трения эндопротезов тазобедренного сустава (обзор иностранной литературы) // Травматология и ортопедия России. — 2010, № 3, 147—158

112. Mutimer J., Devane P. A., Adams K., and Horne J. G. Highly Crosslinked Polyethylene Reduces Wear in Total Hip Arthroplasty at 5 Years // Clin. Orthop. Relat. Res. — 2010, no. 468, 3228—3233

113. Доценко, А.И. Основы триботехники: учебник / А.И. Доценко, И.А. Буяновский. — М.: Инфа-М. — 2014

114. Zichner L.P., Willert H.G. Comparison of alumina polyethylene and metal-polyethylene in clinical trials // Clin. Orthop. — 1992. — Vol. 282. — P. 86–94.

115. Загородний Н.В., Ильин А.А., Карпов В.Н., Надеждин А.М., Скворцова С.В., Сергеев С.В., Плющев А.А., Гаврюшенко Н.С. Титановые сплавы в эндопротезировании тазобедренного сустава // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. — 2000. — № 2. — С. 73–75.

116. Фокин В.А. Пары трения для тотальных эндопротезов тазобедренного сустава и проблема износа // Margo Anterior. — 2000. — № 4. — С. 1–4.

117. RM – чашка металл/металл // Margo Anterior. — 2000. — № 4. — С.5.

118. Кадолич Ж.В. Физическое модифицирование сопряжений полимер–металл для повышения их износостойкости на основе моделирования биофизических свойств естественных суставов. — Дис. канд. тех. наук. — Гомель, 2002.

119. Cooper J.R., Dowson D., Fisher J. Macroscopic and microscopic wear mechanisms in ultra-high molecular weight polyethylene // *Wear*. – 1993. – Vol. 162–164. – P. 378–384.
120. Blomer W. Design aspects of modular inlay fixation // In: *Performance of the wear couple BIOLOX forte in hip arthroplasty*. – Proc. 2-nd Symp. on Ceramic Wear Couple, Stuttgart. – Verlag, 1997. – P. 95–104.
121. Корж, А.А. Справочник по травматологии и ортопедии / А.А. Корж, Е.П. Меженина, А.Г. Печерский, В. Г. Рынденко. – Киев: Здоров'я, 1980. – с. 216.
122. Knoll J. Analyse von druckverteilung und schmierfilmbildung im kunstlichen huftgelenk // *Schmiertechnik und Tribologie*. – 1978. – Vol. 25. – № 2. – P. 43–46.
123. Жидкие кристаллы в технике и медицине / С.Ф. Ермаков, В.Г. Родненков, Е.Д. Белоеенко, Б.И. Купчинов. – Мн. ООО "Асар", М.: ООО "Черо", 2002. – 412 с.
124. Hall R.M., Unsworth A., Wroblewski B.M., Burgess I.C. Frictional characterization of explanted Charnley hip prostheses // *Wear*. – 1994. – Vol. 175. – P. 159–166.
125. Streicher R.M. Tribologie künstlicher gelenke // In: *Endoprothetik* / Ed. by E.W. Morscher/ – Berlin-Springer, 1995. – P. 38–53.
126. Шустер, Л.Ш. Прибор для исследования адгезионного взаимодействия / Л.Ш. Шустер, М.Ш. Мигранов // Патент на полезную модель № 34249. – от 27.11.2003
127. Гленсдорф, П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации / П. Гленсдорф, И. Пригожин – М.: Мир, 1973. – 280 с.
128. Дискуссия на тему роли смазки при пластической обработке // Пер. с японского № 313/1354 Отдел переводов торгово-промышленной палаты Казахской ССР. – Алма-Ата. – 1987. – 15 с.

129. Дерягин, Б.В. Что такое трение? / Б.В. Дерягин – М.: Издательство АН СССР, 1963 – 230 с.
130. Ахмаров, А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахмаров. – М.: Физматгиз, 1963 – 472 с.
131. Самсонов, Г.В. Электронная локализация в твердом теле / Г.В. Самсонов, И.Ф. Прядко, Л.Ф. Прядко. – М.: Наука, 1976. – 339 с.
132. Бурыкина, А.Л. К вопросу о механизме адгезионного взаимодействия металлов и металлоподобных соединений / А.Л. Бурыкина, П.В. Самсонов // Машиностроение, 1970. - № 3 – с. 45 – 48
133. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность: учебник / Д.Н. Гаркунов, 4-е изд. доп. и перераб. – М.: Изд-во МСХА, 2001 – 616 с.
134. Регель, В.В. Кинетическая природа прочности / В.В. Регель, А.И. Слуцкая // Физика сегодня и завтра. – Л.: Наука, 1973. – с. 90 – 175
135. Емаев, И.И. Влияние модификации смазочных материалов углеродным каркасом на их трибологические характеристики / И.И. Емаев, В.И. Зубер, Н.К. Криони, Р.Г. Нигматуллин, Л.Ш. Шустер // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – № 9. – с. 25-27.
136. Славутский, Л.А. Основы регистрации данных и планирования экспериментов: уч.пособие / Л.А. Славутский. – Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 2006 – 200 с.
137. Емаев, И.И. Регрессионный анализ влияния углеродного каркаса на трибологические характеристики смазочного материала / И.И. Емаев, Н.К. Криони, В.И. Семенов, С.В. Чертовских, Л.Ш. Шустер // Вестник УГАТУ – 2016. – Т.20 №3 – С. 7 – 11.
138. Емаев, И.И. Вопросы модификации пластичных смазочных материалов углеродным каркасом / И.И. Емаев, Н.К. Криони, В.И. Зубер, Р.Г. Нигматуллин // Кузнечного – штамповое производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 4. – С. 39 – 42.
139. Фукс, И.Г. Состав, свойства и применение пластичных смазок / И.Г. Фукс, С.Б. Шибряев – М.: ГАНГ им. Губкина, 1992. – 157 с.

140. Емаев, И.И. Исследование влияния температуры и давления на трибологические характеристики пластичной смазки, модифицированной углеродным каркасом / Емаев И.И., Криони Н.К., Нигматуллин Р.Г., Шустер Л.Ш. // Сборник науч. трудов Симпозиума «Современные инженерные проблемы базовых отраслей промышленности» Международного научно-технического Форума «Первые международные Косыгинские чтения ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» - М., 2017. – С. 42 - 46

141. Минасов, Б.Ш. Сравнительные характеристики различных пар трения, используемых при артропластике тазобедренного сустава / Б.Ш. Минасов, Л.Ш. Шустер, Р.Р. Якупов, И.Р. Асланян, С.В. Чертовских, Т.Б. Минасов, И.И. Емаев // Гений ортопедии. – 2014. – № 3. – С. 49-52.

142. Якупов, Р.Р. Исследование адгезионной составляющей трения в эндопротезах тазобедренного сустава / Р.Р. Якупов, Б.Ш. Минасов, И.И. Емаев и др. // Медицинская техника. – 2017. – №4. – С. 31-33

143. Якупов, Р.Р. Выбор технологии артропластики тазобедренного сустава с учетом трибологических характеристик эндопротезов / Р.Р. Якупов, Л.Ш. Шустер, К.Х. Сироджов, С.В. Чертовских, К.К. Каримов, И.И. Емаев, А.А. Коршунов, А.Р. Трубин, Т.Э. Хаиров // Уральский медицинский журнал. – 2015. – № 2 (125). – С. 141-147.

144. Минасов, Б.Ш. Сравнительное исследование адгезионной составляющей трения в эндопротезах тазобедренного сустава / Б.Ш. Минасов, Р.Р. Якупов, Л.Ш. Шустер, С.В. Чертовских, И.И. Емаев, Г.Н. Филимонов, А.А. Коршунов, Т.Э. Хаиров // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. – 2016. – № 1. – С. 71 – 75.

145. Васильев, Ю.Н. Структурно-энергетическая теория трения твердых тел/ Ю.Н. Васильев, В.А. Фуголь // Трение и износ – 1997. – Т18 - №2 – с. 155 – 156

146. Вейлер, С.Я. Действие смазок при обработке металлов давлением/ С.Я. Вейлер, В.И. Лихтман. – М.: Изд-во АН СССР, 1960 – 230 с.

147. Якупов Р.Р. Анализ постимплантационных изменений компонентов эндопротезов тазобедренного сустава на основе 3D-лазерной микроскопии / Р.Р. Якупов, Б.Ш. Минасов, А.В. Сисанбаев, Т.Э. Хаиров, К.Х. Сироджов, К.К. Каримов, И.И. Емаев // Лазерная медицина. – 2016 – Т.20, вып. 2 – С. 49 – 54

148. Шустер, Л.Ш. Информационная база данных по триботехническим характеристикам в машиностроении/ Л.Ш. Шустер, М.Ш. Мигранов, Н.К. Криони // Свидетельство об официальной регистрации базы данных № 2004620214 от 31.08.2004 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Батырская ул., д. 39/2, г. Уфа, Республика Башкортостан, РФ, 450106.
Телефон/факс: (347) 255-44-30. E-mail: bsmp22@mail.ru

№
На № 12 от « 16 » 02 2018 г.

АКТ

О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

для практического использования в ГБУЗ РБ БСМП г. Уфа результатов диссертационной работы И.И. Емаева на тему: «Повышение эксплуатационных свойств подвижных сопряжений, работающих в особых условиях трения».

Настоящим актом подтверждается, что в ГБУЗ РБ БСМП г. Уфа приняты к использованию следующие результаты диссертационной работы И.И.Емаева:

- рекомендации по выбору материалов пары трения «головка-вкладыш» в эндопротезах тазобедренного сустава;
- информационную базу данных по триботехническим и технологическим характеристикам имплантатов.

Указанные результаты диссертационной работы позволяют уже на стадии выбора материалов пары трения эндопротезов при их имплантации прогнозировать работоспособность с учетом веса, возраста и двигательной активности пациента.

Зам.гл.врача по хирургии

ГБУЗ РБ БСМП г. Уфа

Зав. отделением травматологии и ортопедии



А.Р. Камалов

Р.Н. Рахматуллин

УТВЕРЖДАЮ

Главный технолог АО «УППО»



Христофоров В.Н.
«19» января 2018 г.

АКТ

практического использования в АО «УППО» результатов
диссертационной работы И.И. Емаева на тему:
«Повышение эксплуатационных свойств подвижных сопряжений,
работающих в особых условиях трения»

Настоящим актом подтверждается, что в АО «УППО» приняты к
использованию следующие результаты диссертационной работы И.И.
Емаева:

— смазочная композиция, состоящая из 60% цилиндрического масла, 20%
литола и 20% углеродного каркаса для применения в качестве
компрессорной смазки.

Как показали предварительные испытания, применение указанной
композиции смазочного материала взамен масла КС-19 с мыльным
загустителем повысило на 20-30% срок службы смазки.

Заместитель главного технолога
по специальным процессам

Мисюкова М.С.

УТВЕРЖДАЮ
Главный технолог ПАО «ОДК-УМПО»

Селезнёв А.С.
«19» января 2018 г.



АКТ

практического использования в ПАО «ОДК – УМПО» результатов
диссертационной работы И.И. Емаева на тему:
«Повышение эксплуатационных свойств подвижных сопряжений,
работающих в особых условиях трения»

Настоящим актом подтверждается, что в ПАО «ОДК-УМПО» приняты
к использованию следующие результаты диссертационной работы И.И.
Емаева:

– информационная база данных по триботехническим и
технологическим характеристикам (ИБТ ТТХ).

ИБТ ТТХ дает оперативную информацию о температуре порога
совместимости трущихся поверхностей и характерной (оптимальной)
температуре в зоне контакта инструмента с обрабатываемой заготовкой.

Информация о температуре порога совместимости позволяет избегать
задир в подвижных высокотемпературных трибосопряжениях, а данные о
характерной температуре – оптимизировать режимы механообработки по
износу инструмента.

Заместитель главного технолога

ПАО «ОДК – УМПО»

Махмутов М.Т.

Проректор по УМР
БФУ ВО «УГАТУ»

Проректор
ФГБОУ ВО «
Чистич

2018

об использовании результатов диссертационной работы И.И. Емаева на тему: «Повышение эксплуатационных свойств подвижных сопряжений, работающих в особых условиях трения» в ученом процессе УГАТУ

- на кафедре «Основы конструирования механизмов и машин» (ОКМиМ) при изучении курса «Детали машин и основы конструирования» - Методология исследования адгезионного взаимодействия и оценка совместимости трущихся поверхностей с учетом температуры, давления и окружающей среды;

- на кафедре «Технология машиностроения» (ТМ) при изучении курса «Технология машиностроения» - Информационная база данных по триботехническим и технологическим характеристикам (ИБТ ТТХ) для расчета оптимальных (по износостойкости инструмента) режимов резания жаропрочных авиационных материалов на операциях механообработки.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "A. J. H. S.", written over the bottom portion of the typed name.

М.Ш. Мигранов

Р.М. Янбухтин