

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»

На правах рукописи



Медведева Виктория Валерьевна

**ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСИСТЕНТНЫХ
СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ
ГИДРОСИЛИКАТОВ МАГНИЯ**

Специальность 05.02.04 – Трение и износ в машинах

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., проф., Скотникова Маргарита Александровна

Санкт-Петербург – 2017

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	9
ГЛАВА 1 СТРУКТУРА, СОСТАВ И СВОЙСТВА КОНСИСТЕНТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	9
1.1 Условия функционирования и требования, предъявляемые к консистентным смазочным материалам	9
1.2 Структура и вязкость консистентных смазочных материалов.....	21
1.3 Дисперсные добавки как модификаторы трения в консистентных смазочных материалах	26
1.4 Перспективы применения гидросиликатов магния как модификаторов трения	34
1.5 Выводы по главе.....	39
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	40
ГЛАВА 2 ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ	40
2.1 Свойства выбранных консистентных смазочных материалов	40
2.2 Дисперсные добавки	42
2.3 Используемые методы исследований.....	46
2.3.1 Перемешивание консистентных смазочных материалов.....	46
2.3.2 Определение температуры каплепадения.....	47
2.3.3 Определение коррозионной стойкости.....	48
2.3.4 Профилометрические исследования	49
2.3.5 Стандартный метод оценки триботехнических характеристик	51
2.3.6 Микроскопические исследования	52
2.3.3 Исследование реологических свойств	54
2.3.4 Химический анализ дисперсных добавок.....	56
2.3.5 Устройство для испытания смазочных материалов в подшипниках качения.	58
2.4 Выводы по главе	62
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ ГИДРОСИЛИКАТОВ МАГНИЯ	63
3.1 Оценка триботехнических свойств консистентных смазочных материалов, модифицированных дисперсными добавками гидросиликатов магния.....	63

3.1.1 Влияние концентрации и размера дисперсных частиц на триботехнические характеристики	63
3.1.2 Влияние состава модификатора на противоизносные свойства КСМ	70
3.1.3 Смеси для оценки влияния состава гидросиликатов на противоизносные свойства Литол-24	73
3.1.4 Исследование эффективности консистентного смазочного материала, содержащего дисперсные добавки гидросиликатов магния в подшипнике качения	74
3.2 Структура консистентного смазочного материала.....	80
3.3 Реологические свойства модифицированных консистентных смазочных материалов	81
3.5 Выводы по главе.....	91
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ЗАЩИТНЫХ ПЛЕНОК, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ГИДРОСИЛИКАТАМИ МАГНИЯ	92
4.1 Формирование тонких пленок на поверхностях трибосорязаний	92
4.2 Энергетические аспекты работы консистентного смазочного материала с дисперсными добавками.....	99
4.3 Модель вязкости дисперсной системы по Т. Ри и Г. Эйрингу.....	102
4.4 Молекулярное взаимодействие гидросиликатов магния с поверхностью металла	107
4.5 Влияние температуры на формирование и разрушение защитных пленок, образованных гидросиликатами магния.....	112
4.6 Влияние дисперсных частиц гидросиликата магния в составе консистентного смазочного материала на коэффициент трения.....	115
4.7 Практическое применение гидросиликатов магния в составе консистентных смазочных материалов.....	118
4.8 Выводы по главе.....	125
Заключение	126
Список литературы	128
Приложения	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Эффективность смазочного материала (СМ) зависит от множества факторов, которые в совокупности определяют характер влияния СМ на износ и трение смазываемых поверхностей. Эти факторы зависят от свойств, качеств СМ и трущихся поверхностей, в том числе от их изменений в процессе эксплуатации, а так же от характера взаимодействия между компонентами СМ, трущимися поверхностями и покрывающими их окисными (и другими) плёнками. Еще один важный фактор, влияющий на смазочную композицию - скорости, нагрузки, температуры и другие параметры режима трения.

Основная проблема в настоящее время заключается в уменьшении долговечности смазываемых узлов трения в результате уменьшения несущей способности смазочного слоя в условиях увеличения нагрузок и скоростей в современных машинах. Разработано много полярно-активных и химически активных веществ для повышения несущей способности смазочного слоя, однако они зачастую подвергаются десорбции и приводят к коррозионно-механическим разрушениям поверхностей трения, поэтому еще одним решением данной проблемы стало целенаправленное введение антифрикционных, противоизносных и восстанавливающих дисперсных компонентов.

Сейчас сложилась ситуация, что ремонтные предприятия, обслуживающие подвижной состав (например, ГУП «Горэлектротранс») ранее использовавшие импортные консистентные смазочные материалы (КСМ), с целью экономии средств переходят на смазочные материалы отечественного производства. В следствие возникает необходимость в качественном КСМ, который позволит увеличивать интервалы технического обслуживания и сократить затраты на эксплуатационные расходы.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросами создания и исследования триботехнических свойств СМ, модифицированных дисперсными добавками занималось большое количество

отечественных исследователей: Л.И. Погодаев, В.В. Зуев, Д.М. Телух, А.В. Дунаев, В.И. Ревнивцев и зарубежных фирм Германии, Китая, Америки. Первоначально такие СМ применялись только для ремонта трибосопряжений. Сейчас представляет интерес применение дисперсных добавок в СМ, которые изначально будут эффективно работать в узлах трения при тяжелых условиях нагружения, обеспечивая высокие противоизносные и энергосберегающие свойства.

За большой промежуток времени выполнено значительное количество теоретических и практических исследований по оценке работоспособности гидросиликатов магния, а именно серпентинитов, в различных трибоузлах. Однако, применение всех этих разработок ограничивается особыми требованиями к выбору исходных материалов в качестве модификаторов трения, так как они сильно зависят от месторождения и примесей.

Наиболее перспективным является выбор дисперсных добавок, родственных серпентинитам и относящимся к тому же классу гидросиликатов магния и имеющие более высокую степень химической чистоты, а значит и стабильность свойств.

Объект исследования. КСМ, содержащие дисперсные частицы гидросиликатов магния.

Предмет исследования. Основные трибологические характеристики КСМ модифицированных гидросиликатами магния.

Цель и задачи исследования.

В виду недостаточности исследований влияния дисперсных частиц гидросиликата магния на триботехнические свойства КСМ, используемых в большом количестве узлов трения **целью данной работы** было: повышение триботехнических характеристик консистентного смазочного материала, работающего в трибоузлах, за счет введения дисперсных частиц гидросиликатов магния.

Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи**:

1. провести анализ влияния дисперсных частиц различных материалов на противоизносные свойства КСМ;

2. произвести подбор оптимального размера и концентрации частиц гидросиликата магния в КСМ для рабочих поверхностей узлов трения;
3. разработать оптимальный компонентный состав дисперсных фаз в КСМ;
4. исследовать влияние дисперсных частиц гидросиликатов магния на реологические, физико-химические и трибологические свойства КСМ;
5. разработать устройство для испытания КСМ в подшипниках качения;
6. оценить влияние структуры смазочного материала на его триботехнические характеристики;
7. установить связь между реологическим поведением смазочного материала и его энергетическими характеристиками;
8. на основании полученных экспериментальных результатов предложить модель последовательного формирования защитных слоёв гидросиликатами магния.

Научная новизна.

1. Предложены модели взаимодействия дисперсных частиц гидросиликатов магния с загустителем базового КСМ и контактирующими поверхностями.
2. Обнаружены вторичные структуры в виде локальных стекловидных плёнок на поверхности в зоне фрикционного контакта.
3. Установлены возможные механизмы противоизносного действия гидросиликатов магния в составе КСМ
4. Показана связь структурного состава КСМ с различным содержанием дисперсных частиц гидросиликатов магния.
5. Установлена связь долей сечения с энергетическими взаимодействиями структурных элементов КСМ.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработана и реализована конструкция оснастки для стандартной машины трения с возможностью определения момента и температуры в зоне трения при работе подшипника качения.
2. Создан и экспериментально обоснован метод диагностики КСМ на модифицированной машине трения

3. Разработаны рекомендации по использованию КСМ, содержащих дисперсные частицы гидросиликатов магния для применения в узлах трения.
4. Результаты используются в учебном процессе в СПбПУ Петра Великого, ИММиТ, кафедра МиОК в лекционных спецкурсах, лабораторных практикумах, при выполнении курсовых и дипломных работ.
5. Предложен и протестирован КСМ в ступичных подшипниках подвижного состава ГУП «Горэлектротранс»

Методы исследования. В работе использованы стандартные отечественные и зарубежные методы исследований, специальные физико-химические исследования и методики, лабораторные и натурные испытания, а именно:

1. Методы триботехнических испытаний СМ.
2. Математическое моделирование.
3. Оптические- и электронномикроскопические исследования
4. Методы рентгеновской дифрактографии.
5. Ротационная вискозиметрия.
6. Натурное испытание ступичных подшипников.
7. Профилометрические исследования.
8. Исследования поверхностной энергии

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод определения оценки эффективности КСМ в подшипниках качения.
2. Зависимость возникновения удельной силы трения, как касательного напряжения в зоне контакта трущихся поверхностей в среде КСМ с учетом возникновения защитного слоя, образованного гидросиликатами магния;
3. Связь структурных элементов КСМ с теорией устойчивости дисперсных систем совместное с теорией Т. Ри и Г. Эйринга
4. Результаты оценки триботехнической эффективности составов КСМ с дисперсными частицами гидросиликатов магния.
5. Рекомендации по применению КСМ с дисперсными добавками в трибоузлах.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные результаты и положения настоящей работы являются обоснованными и достоверными, поскольку обеспечивается согласование экспериментальных данных с основными теоретическими положениями и литературными источниками. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается применением регламентированных стандартов, методик и оборудования.

Материалы по теме диссертации докладывались на Международных научно-практических конференциях, совещаниях, семинарах: Городской семинар по механике ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, 2017; XLIII, XLIV, XLV - Неделя науки СПбПУ Петра Великого (г. Санкт-Петербург, 2014, 2016, 2017), Международная конференция «Современное машиностроение: Наука и образование MMESE-2016» (г. Санкт-Петербург, 2016); Международная конференция «Doctoral School of Energy and Geotechnology II» (г. Пярну, Эстония, 2015); Международная конференция «BALTMATTRIB 2015» (г. Таллинн, Эстония, 2015); Международная конференция «BALTTTRIB 2015» (г. Каунас, Литва).

Публикации. Материалы диссертации изложены в 14 печатных работах, из которых 10 работ опубликовано в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 из них входят в базу Scopus, а также 1 монография в соавторстве, 1 свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ.

Диссертационная работа была поддержана и выполнена автором в рамках Гранта по Госзаданию Департамента науки и технологий Минобрнауки России № 11.1972.2014/К (2014-2016) и в рамках Гранта 11.5832.2017/БЧ по Госзаданию на тему: «Влияние диффузионного поверхностного легирования и последующего деформационного упрочнения на трибологические свойства инструмента для обработки лопаток паровых турбин».

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

ГЛАВА 1 СТРУКТУРА, СОСТАВ И СВОЙСТВА КОНСИСТЕНТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Консистентные смазочные материалы (КСМ) – особый вид смазочных материалов, представляющий собой коллоидную систему, состоящей из дисперсной среды (базовое масло), дисперсной фазы (загустителя) и наполнителя (присадки и дисперсные добавки). Основное назначение КСМ – снижение трения в трибосопряжении, а также обеспечение отвода тепла в области контакта трущихся поверхностей.

К КСМ предъявляется ряд важных требований, заключающийся в способности разделять трущиеся поверхности, обеспечивать коррозионную стойкость, гарантированно удерживаться на поверхности под воздействием агрессивных сред, обладать высокими антифрикционными свойствами и главное сохранять эти свойства длительное время. Соответствие КСМ этим требованиям будет обеспечивать существенное увеличение срока службы узла трения. Работоспособность КСМ определяется комплексом характеристик: вязкостью, рабочей температурой, природы дисперсной среды и типом дисперсных фаз. Для работы КСМ в узлах трения должно обеспечиваться оптимальное сочетание характеристик под определённые условия эксплуатации.

1.1 Условия функционирования и требования, предъявляемые к консистентным смазочным материалам

Консистентные смазки набиваются в полости трибоузлов и замена СМ производится только во время техобслуживания. Консистентные смазочные материалы предназначены для смазывания подшипников качения различных типов, шарниров, рычажных, кулачково-эксцентрикковых систем и др.

К ряду основных требований к КСМ относятся:

- Обеспечивать оптимальные условия трения и снижать износ трущихся деталей;
- Защищать детали от коррозии и агрессивного воздействия внешней среды;
- Обеспечивать уплотнение в зазорах между сопряженными деталями;
- Предотвращать задиры и заедания трущихся поверхностей;
- Выполнять роль электроизоляционного материала;
- Снижать шумы и вибрации в трибоузле, т.о. защитить поверхности от ударных нагрузок;
- Работать в широком диапазоне температур, нагрузок и скоростей перемещения.

Смазочных материалов одновременно выполняющих все перечисленные функции практически не существует. Подбор необходимого КСМ осуществляют под определенные условия применения, поэтому для обеспечения надежной работы узла в приоритете лишь две или три функции из всего перечня.

Работоспособность консистентного смазочного материала определяется не только эксплуатационными условиями самого СМ (температуры, нагрузки, окружающая среда), но и характером движения трибоузла, работающего с КСМ (постоянное или переменное перемещение, остановки).

Свойства КСМ обычно оценивают при помощи четырех видов показателей. Поведение смазок в объеме характеризуют показателями объемно-механических свойств, в приповерхностном слое – показателями граничных свойств, а изменения в свойствах КСМ, протекающих во времени под воздействием внешних факторов – показателями стабильности. В соответствие установленному составу смазки и отсутствие в них нежелательных продуктов (примесей). Вклад того или иного показателя в свойства смазок при эксплуатации определяется составом со своим комплексом свойств и условиями применения смазочного материала. [2]

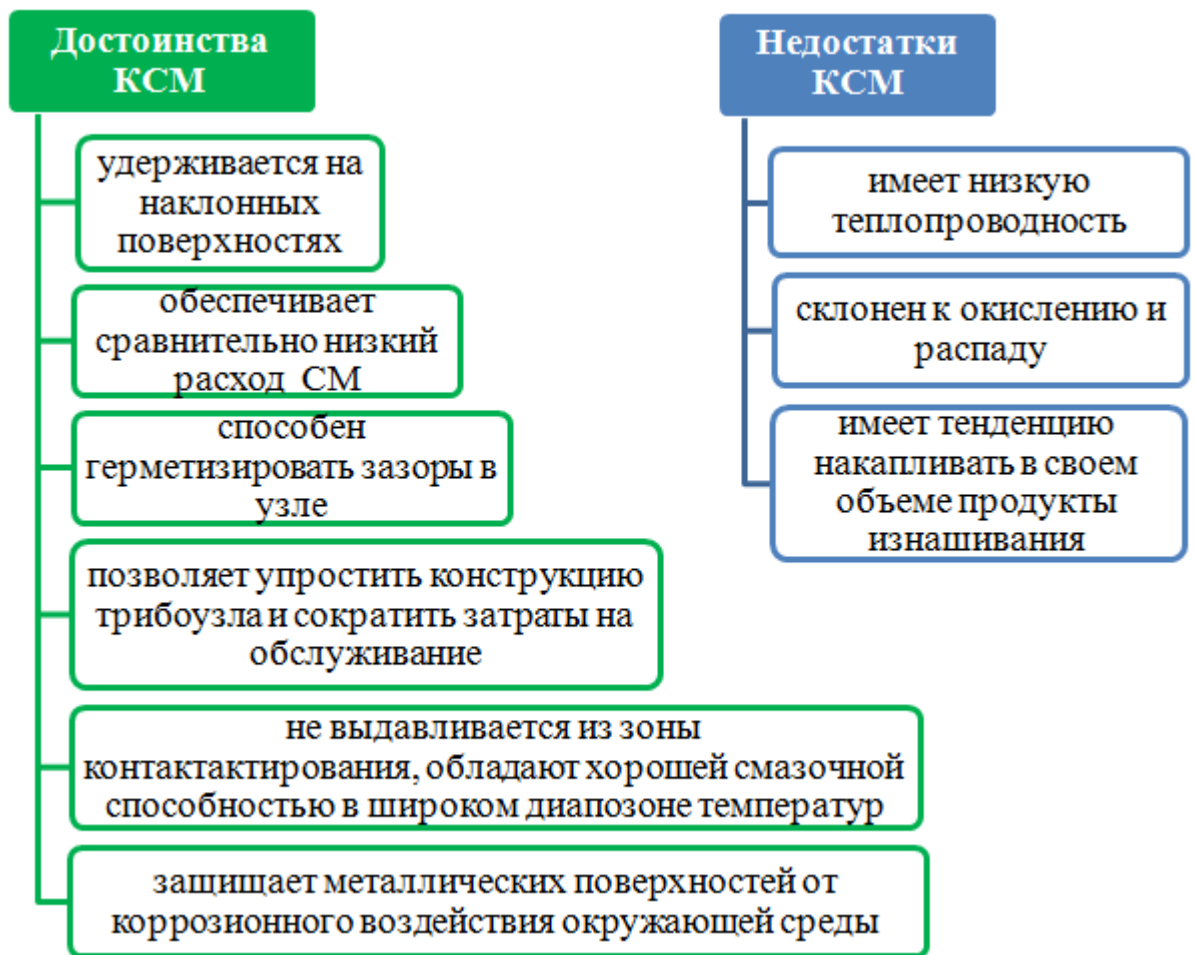


Рис. 1.1 Достоинства и недостатки консистентных смазочных материалов

КСМ относят к вязкопластичным системам. Объемные и механические свойства вязкопластичных систем зависят от суммы реологических показателей, определяющих упругие, прочностные и вязкостные свойства. Состояние структуры и величина взаимодействия между ее структурными элементами определяют поведение КСМ в объеме на различных этапах деформирования и связь между упругими, прочностными и вязкостными свойствами.[3]

Для всесторонней оценки качеств КСМ необходимо принимать во внимание достаточно большое количество эксплуатационных характеристик. К основным характеристикам определяющим эксплуатационные свойства КСМ относят: водостойкость, предел прочности, вязкость, температуру каплепадения, механическую стабильность, коллоидную стабильность и др.

Пределом прочности на сдвиг (ГОСТ 7143-73 [4]) смазочного материала называют то минимальное удельное напряжение, при котором происходит

разрушение структурного каркаса смазки в результате сдвига одного её слоя относительно другого. Этот показатель определяет способность смазочного материала удерживаться на поверхностях трибосопряжения, сопротивляться сбросу с подвижных деталей под воздействием сил инерции, не стекать и не сползать. Поскольку предел прочности с ростом скорости увеличивается, его рекомендуют определять при скоростях деформации ниже $6 \cdot 10^{-6} \text{с}^{-1}$, при которых от условий нагружения он практически не зависит. Согласно ГОСТ 7143-73 измеряется угловая деформация, по которой определяется предел прочности (в Па):

$$\tau_n = k \cdot \gamma = \frac{C \cdot \gamma}{2 \cdot \pi \cdot R_v^2 \cdot (h + \frac{R_v}{3})} \quad (1.1)$$

где k – постоянная прибора; γ – максимальный угол поворота (град); C – постоянная пружины (Н·м/град); R_v – радиус внутреннего цилиндра (м); h – высота внутреннего цилиндра (м).

Существует большое количество методов определения предела прочности на сдвиг, которые описываются в литературе [5-7], т.к. условия деформирования в различных приборах не одинаково, то предел прочности одних и тех же смазок, измеренных на разных приборах, как правило не совпадает по величине и в большинстве случаев невозможен пересчет.

Вязкость (ГОСТ 26581-85 [8], ГОСТ 7163-84 [9]). Характеризует поведение КСМ в узлах трения, когда смазка приобретает свойства жидкости. Представляет собой сумму показателей, которая характеризует сопротивление КСМ течению в потоке, т.е. энергию, расходуемую на преодоление внутреннего трения. Т.к. внутреннее трение КСМ не константно, оно выражается функциональной зависимостью градиента скорости сдвига от напряжения сдвига в заданном интервале измерения. В случае определения вязкости на ротационном вискозиметре (по ГОСТ 26581-85) расчетная формула имеет вид:

$$\mu = \frac{\tau}{D} = \frac{5 \cdot K \cdot \alpha}{D \cdot v} \quad (1.2)$$

где μ - Эффективную вязкость (Па·с); τ - напряжение сдвига (Па); D - скорректированный градиент скорости деформации (с^{-1}); ν - частота тока сети при определении (Гц); α - значение относительного угла вращения на блоке измерения, деления шкалы; K - постоянная измерительного устройства по паспорту; 5 - коэффициент перевода константы измерительного устройства в единицы системы СИ.

При определении в капиллярных вискозиметрах (по ГОСТ 7163-84) эффективная вязкость определяется по формуле:

$$\mu = \frac{\tau}{D} = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot Q \cdot l} \quad (1.3)$$

где R – радиус капилляра (см); Q – расход смазки за единицу времени; l – длина капилляра (см); Δp – давление (Па).

Механическая стабильность (ГОСТ 19295-73 [10]) – интегральная характеристика их устойчивости к механическому воздействию в тех или иных эксплуатационных или приближенных к ним условиях, когда изотермический режим не поддерживается. Механическая стабильность является функцией тиксотропных свойств КСМ. Обычно ее оценивают по изменению показателей объемно-механических свойств смазок при их разрушении и восстановлении. Основной недостаток методов оценки механической стабильности – физическая неопределенность условий разрушения КСМ и отсутствие физического смысла у показателя пенетрации [11]. Объективным критерием механической стабильности КСМ может служить только предел прочности.

Согласно ГОСТ 19295-73 механическая стабильность оценивается на приборе, называемый тиксометром, который осуществляет разрушение КСМ при температуре 20°C и градиенте скорости 6000 с^{-1} в течение 100 с или иного времени. Восстановление смазки определяют через заданные интервалы времени, а критерием служит индекс разрушения K_p и индекс восстановления K_6 .

$$K_p = \frac{\sigma_u - \sigma_p}{\sigma_u} \cdot 100 \quad (1.4)$$

$$K_s = \frac{\sigma_s - \sigma_p}{\sigma_p} \cdot 100 \quad (1.5)$$

где $\sigma_{и}$ – предел прочности на разрыв исходной, σ_p – разрушенной, $\sigma_{в}$ – восстановленной смазки.

Температура каплепадения (ГОСТ 6793-74 [12]). Характеристика, которая приближенно позволяет судить о верхнем температурном пределе работоспособности СМ. Заключается в замере температуры, когда смазка из консистентного состояния переходит в жидкое, и отделяется первая капля из отверстия прибора при стандартных условиях испытания. Однако стоит отметить, что данный показатель не полностью характеризует действительную температуру, до которой смазка сохраняет работоспособность. Зачастую СМ может работать и при большей температуре, чем температура каплепадения. Это происходит, когда КСМ при нагревании выделяет жидкую фазу, но сам при этом остается пластичным, или когда смазка может быть жидкой при температуре более низкой, чем установленная температуры каплепадения [13].

Коллоидная стабильность (ГОСТ 7142-74 [14]) - способность КСМ удерживать жидкую фазу и не расслаиваться является показателем агрегативной устойчивости смазок как коллоидных систем. Коллоидная стабильность, как и предел прочности, характеризует загущающую эффективность загустителя в дисперсионной среде, его совместимость с ней и другими компонентами смазок.

Углеводородные смазочные материалы обладают наибольшей коллоидной стабильностью. По составу это плотные однородные сплавы минеральных масел с распределенными твердыми углеводородами в виде тонких мономолекулярных слоев. Менее стабильны смазочные материалы, загущенные мылами, так как их структурный каркас обладает меньшей плотностью, а кристаллическая решетка способна уместать меньшие объемы масла, чем кристаллическая решетка углеводородов.

Увеличить коллоидную стабильность смазочных материалов можно за счет введения дополнительных загустителей, модифицирующих структуру смазок. Однако повышение температуры, которое всегда приводит к снижению

вязкости дисперсионной среды, не обязательно интенсифицирует процесс отделения масла из мыльных смазок. Это связано с тем, что мыла при этом могут переходить в новые фазовые состояния с лучшей загущающей способностью.

Химическая стабильность (ГОСТ 5734-76 [15]). Нарушение состава и свойств смазки может происходить в результате окисления. Химически стабильными считают смазки, у которых эксплуатационные свойства остаются в пределах нормы в течение всего срока службы. При окислении возрастает кислотность и, как следствие, коррозионность КСМ, а также уплотнение (редко – разжижение).

Химическая стабильность КСМ определяется их составом: жидкая основа должна быть химически стабильной. Загустители влияют на стабильность в меньшей степени. Она зависит от металлов, входящих в соединения мыльного загустителя и увеличивается по следующему ряду: $\text{Li} \rightarrow \text{Na} \rightarrow \text{Ca} \rightarrow \text{Mg} \rightarrow \text{Ba} \rightarrow \text{K} \rightarrow \text{Al}$.

Наибольшая стабильность характерна смазочным материалам на основе синтетических загустителей. Углеводородные и мыльные смазки по химической стабильности примерно равноценны. Наличие таких примесей в составе КСМ, как органических кислот, глицерина, влаги, щелочей уменьшают химическую стабильность и увеличивают скорость окисления смазочного материала [16].

Водостойкость (ГОСТ ISO 11009-2013 [17]). Водостойкость зависит от двух параметров: первый – способность СМ не растворяться в воде, не смываться водой со смазываемых поверхностей и не вымываться из трибоузлов; второй – степень впитываемости влаги (гигроскопичности) и изменения комплекса свойств из-за действия попавшей в смазочный материал влаги.

Для всех типов КСМ растворимость в воде является недопустимой и зависит от вида применяемого загустителя. Практически все виды загустителей в воде не растворимы, за исключением некоторых мыл по ряду уменьшения растворимости: $\text{K} \rightarrow \text{Na} \rightarrow \text{Li} \rightarrow \text{Mg} \rightarrow \text{Ca} \rightarrow \text{Hg} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{Al}$. Наибольшее

влияние на уменьшение растворимости оказывает длина цепочки карбоновых кислот, использующихся для получения мыла. Из-за очень высокой растворимости смазочных материалов на калиевых и натриевых загустителях такие виды смазочных материалов используются очень ограниченно. Смываемость смазки с поверхности трения зависит от адгезионных свойств с металлами [16].

Гигроскопичность, то есть поглощение воды может быть вызвано не только контактом смазки с водой, но с влажностью из воздуха. Однозначно говорить о вредности гигроскопичности нельзя. Поглощение воды смазочным материалом ухудшает его эксплуатационные свойства, однако такое действие повышает консервационное действие смазки, так как вода не достигает поверхностей металла. Высокой гигроскопичностью обладают комплексные кальциевые смазки (кСа-смазки), при влажности более 60%. В большинстве случаев гигроскопичность смазки обратимый процесс. К насыщению влагой из воздуха склонны и Na-смазки. Такое явление возможно при негерметичности узлов трения или тары для хранения. Наибольшей гигроскопичностью обладают кальциевые смазочные материалы, наименьшей – литиевые и углеводородные КСМ [2].

Испаряемость (ГОСТ 9566-74 [18]) КСМ наблюдается при их длительном использовании, особенно при нанесении тонким слоем, а также при повышенной температуре. Испаряемость смазочного материала повышается в вакууме. На испаряемость влияет фракционный состав дисперсионной среды (масла). При испарении масла КСМ растрескивается, на поверхности слоя смазки появляются корочки. Сильное испарение приводит к образованию сухих остатков мыл на поверхности металла. В целом испарение ведет к уплотнению смазок и ухудшению их вязкостно-температурных характеристик, особенно при низких температурах [19]. Испаряемость смазочных материалов практически не зависит от технологии получения и состава.

Термоупрочнение (ГОСТ 7143-73 [20].) для КСМ имеет негативное влияние, так как это вызывает увеличение предела прочности и, как следствие, ухудшение доступа смазки в зону трения. Термоупрочнение определяется

изменением сил взаимодействия между частицами загустителя, составом базового масла и наличия поверхностно-активных веществ. Изменение сил взаимодействия между частицами загустителя мыльных смазок определяется полярностью и поляризуемостью молекул. Термоупрочнение тем интенсивнее, чем ниже полярность и выше поляризуемость молекул загустителя. Наибольшей склонностью к термоупрочнению обладают смазочные материалы на Na-мылах, а наименьшей - Li-мылах [21].

Микробиологическая стойкость (ГОСТ 9.082-77 [22]). Некоторые компоненты КСМ могут быть пищей для бактерий, развитие которых приводит к частичному разрушению или изменениям в коллоидной структуре смазочного материала. Для предупреждения вредного действия бактерий в некоторые смазки в качестве биоцидов вводятся соли бензойной кислоты, салицилового фенола и их производные, а также металлические соединения ртути и олова. Бактерицидными свойствами обладают также некоторые ингибиторы окисления и коррозии [23].

Радиационная стойкость - показатель стабильности смазок при воздействии излучений высоких энергий. Высокоэнергетическое действие излучения или бомбардирование частицами высокой энергии приводит к разрушению связей между агрегатами загустителя, разрушению волокон, коллоидной структуры и связанным с этим отрицательным изменениям свойств. В результате радиолиза образуются свободные радикалы, вырывающиеся ингибиторами окисления, а это вызывает интенсивное снижение концентрации ингибитора.

Радиоактивность приводит к активизации процессов окисления и полимеризации. В результате полимеризации растет вязкость масла и уменьшается пенетрация смазки. В начальной фазе облучения пенетрация возрастает в результате отрицательного его воздействия на каркас загустителя. После длительного воздействия излучения пенетрация уменьшается из-за изменений в масле, приводящих к увеличению его вязкости. При продолжительном воздействии и больших дозах излучения пластичная смазка твердеет. Высокую радиационную стойкость имеют КСМ, в которых в качестве

дисперсионной фазы использованы ароматические масла, имеющие кольцевую структуру. Хорошей радиоактивной стойкостью обладают полифениловые и силиконовые масла [24].

Противоизносные, противозадирные (триботехнические) свойства проявляются в способности КСМ предупреждать все виды изнашивания и предотвращать заедание трущихся деталей.

КСМ обеспечивают более высокие противоизносные свойства, чем жидкие масла, на основе которых они изготовлены. Это объясняется рядом причин. Прежде всего, необходимо учитывать противоизносную способность загустителей, являющихся в большинстве своем эффективными поверхностно-активными веществами и наполнители.

Высокая сложность и комплексность физических, химических и механических процессов, происходящих при трении, не позволяет критериально определить эффективность смазочного материала, как по антифрикционным, так и по противоизносным свойствам.

Основные параметры, по которым оценивается смазочная способность КСМ: коэффициент трения, износ, критическая нормальная нагрузка, индекса задира и температура разрушения смазочной пленки. Для оценки этих параметров используют машины трения с различными видами контактирования трибосопряжения. По типу узла трения различают машины шариковые, с цилиндрами, скрещающимися или трущимися о плоские образцы, со скольжением ползуна по диску, возвратно-поступательные и т. п. Наибольшее распространение получили машины трения с узлом, который представляет собой пирамиду из четырех шаров, имеются также двух- и пятишариковые машины [25].

Исследования масел, которые являются компонентами консистентных смазок, показали [25], что при граничном трении уменьшение трения и износа зависит не от вязкости этих масел, а от их смазочной способности, зависящей от адсорбции молекул различной полярности на поверхностях трения и образования граничных пленок, стойких к воздействию контактных нагрузок.

Установлено, что неполярные среды, такие как минеральные масла, адсорбируют на поверхности металла первичную моно-пленку из органических кислот и спиртов, при этом полярные группы располагаются к металлу, а внешняя поверхность пленки образуется метильными группами углеводородных радикалов адсорбированных молекул [26]. Далее мономолекулярный слой достраивается наслоением бимолекулярными димерами поверхностно-активных веществ. В зависимости от условий трения толщина граничной смазочной пленки может состоять от нескольких до 400...500 молекулярных слоев и достигать толщины около 1 мкм. Такие пленки обладают анизотропностью механических свойств, которая вызванна силами взаимодействия активных групп молекул с поверхностью металла значительно больше сил взаимодействия в плоскостях, образуемых метильными группами молекул соседних слоев. Неполярные молекулы углеводородов также ориентируются и адсорбируются под действием силового поля металла, но образуют непрочные моно-пленки, которые легко разрушаются из-за слабой связи соседних молекул. Молекулы полярных и неполярных веществ могут формировать пленки смешанного строения обладающих неустойчивостью [1].

Жирные кислоты или их эфиры, соединения, содержащие серу, хлор или фосфор могут образовывать химические сорбционные пленки на поверхности металла. Смазочные материалы, загущенные мылами, образованных жирными кислотами или их эфирами, имеющие низкую температуру плавления, не могут работать в тяжело нагруженных узлах трения, выделяющих большое количество тепла. В тяжелых условиях нагружения трибоузла наиболее эффективны смазочные материалы, образующие пленки сульфидов, хлоридов, фосфатов и других элементов, обладающих противозадирными свойствами [27].

В условиях граничного трения некоторые окисные пленки, формирующиеся на металле в результате доступа кислорода из атмосферы или из смазочного материала, повышают противоизносные свойства. Эти пленки имеют меньшую по сравнению с чистым металлом механическую прочность и меньшую температуру плавления. Модифицирование поверхностей трения в

процессе работы приводит к снижению их шероховатости и сопровождается более равномерным распределением нагрузки в контакте, при этом возможно также и образование маслами сплошной пленки. Модифицирование поверхности трения всегда вызывает уменьшение силы трения, но не всегда снижает износ. Так, химическое взаимодействие активных соединений с металлом в условиях граничного трения может приводить к несколько большему изнашиванию поверхностей, особенно в период приработки [1].

При выборе соединений определяющих образование защитных поверхностных пленок, необходимо искать компромисс между их противоизносной и противозадирной эффективностью. При этом создается оптимальная микрогеометрия поверхностей трения снижающая вероятность повышенного износа, заедания и сваривания поверхностей трения.

1.2 Структура и вязкость консистентных смазочные материалов

КСМ представляет собой коллоидную систему, содержащую структурированную дисперсную фазу (в виде загустителя) и дисперсную среду (масло). Возможные составляющие компоненты, определяющие свойства КСМ, представлены на рис. 1.2.

Для формирования структуры КСМ загуститель не должен образовывать ни раствора в масле, ни коллоидной дисперсии, а должен содержаться в виде дисперсной фазы с особым структурным каркасом. Самыми распространенными загустителями являются мыла на основе металлов. Загущающее действие и функциональные свойства таких мыл зависят от анионной и катионной части молекулы, определяющей взаимодействие в малополярной масляной среде. Малополярность среды обуславливает высокую чувствительность структурообразования к различным воздействиям. Смазки, приготовленные на полярных средах (на основе синтетических масел) более стойки к внешним воздействиям.



Рис. 1.2 Компоненты консистентных смазок

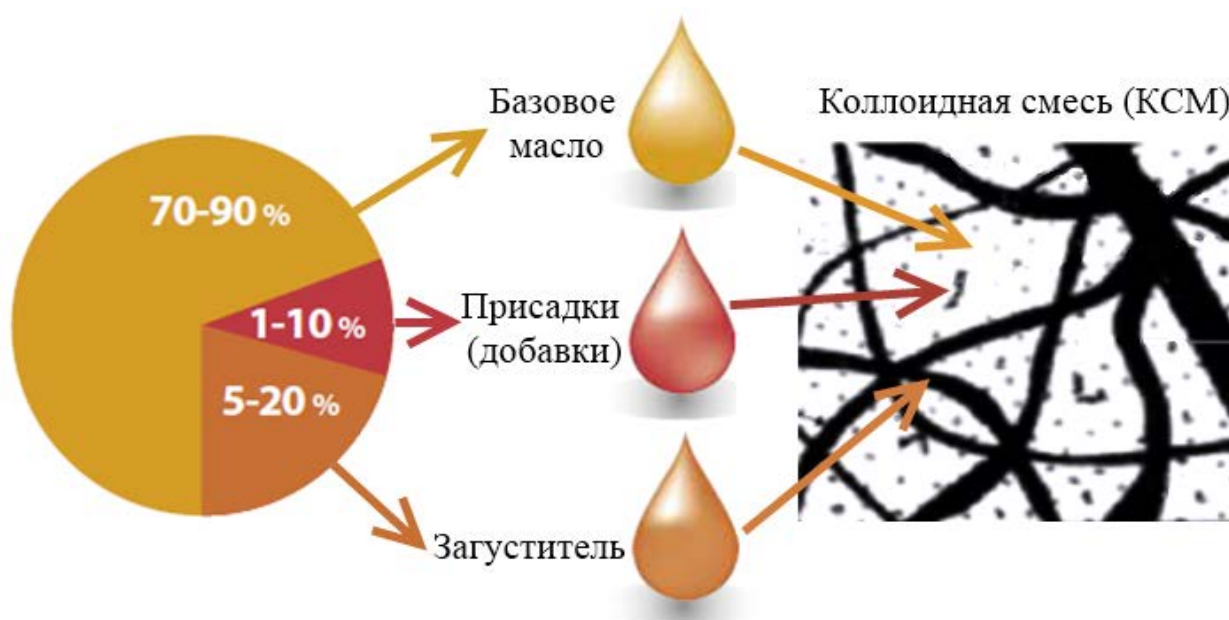


Рис. 1.3 Схема структурного каркаса КСМ

Связи в КСМ могут проявляться различными способами: 1 -силами молекулярного притяжения между загустителем и полярными компонентами, так же может быть экстрагирована за счет растворителя; 2 - капиллярными силами; 3 - механической окклюзией. Чем тоньше микрокристаллическая сетка, т.е. чем больше отношение поверхности к объему мыльных кристаллов, тем сильнее загущающий эффект.

В зависимости от структуры КСМ меняется механизм смазывания. В случае малого содержания загущающих мыл, смазывание определяется маслом,

а мыло способствует повышению несущей способности. Для достаточно твердых смазочных материалов, содержащих большое количество мыльных загустителей смазывающая способность зависит от степени слоисторешетчатой структурой мицеллий. В смазках средней консистенции, таких как для подшипников качения, и масло и мыло снижают трение и износ. Загуститель представляет собой резервуар, постепенно выделяющий масло. Если подшипник качения не снабжается выделяющимся маслом из КСМ, наступает «масляное голодание», которое приводит к преждевременному выходу подшипника из строя. Если же разрушается кристаллическая решетка загустителя, то это тоже приводит к быстрому прекращению подачи масла из резервуара мыльного загустителя. Мыльные загустители определяют способность смазочного материала к адгезии и коэффициент трения.[28]

КСМ могут иметь длинные, средние или короткие волокнистые структуры, которые связаны с микроструктурами загустителей. Индивидуальные системы загустителей отличаются по форме частиц. Натриевые мыла охарактеризуются наличием решетки из длинных волокон со многими точками контакта и длиной до 0,1 мм. Основные размеры микроструктуры загустителей представлены в сводной таблице 1.2.

Из экспериментальных данных [29, 30] известно, что поведение КСМ в узле трения и ее свойства тесно связаны со структурой загустителя. Разделение двух основных компонентов КСМ может привести к вытеканию из смазки масла, что в результате перестанет обеспечивать смазывание, а оставшийся загуститель может склеить узел трения данного устройства.

Таблица 1.2. Микроструктура загустителей [28]

Загуститель	Средний диаметр × длина 10^{-12}м	Внешний вид	
		микроскопический	макроскопический
Натриевые мыла	1×100	Длинные волокна	Длинные волокна, тягучие
	$0,15 \times 1,5$	Короткие волокна, короткие нити	Короткие волокна, гладкие
Литиевые мыла	$0,2 \times 25$	Длинные волокна	Средние волокна
	$0,2 \times 2$	Короткие волокна	Короткие волокна
Кальциевые мыла	$0,1 \times 1$	Тонкие нити, короткие кольца	Короткие волокна, гладкие
Алюминиевые мыла	0,1	Сферические	Короткие волокна, гладкие
Органофильные бентониты	$0,1 \times 0,5$	Пластиночки, структура типа карточный домик	Короткие волокна, гладкие

На рис. 1.4 Представлены типовые схемы структур КСМ с различными загустителями.

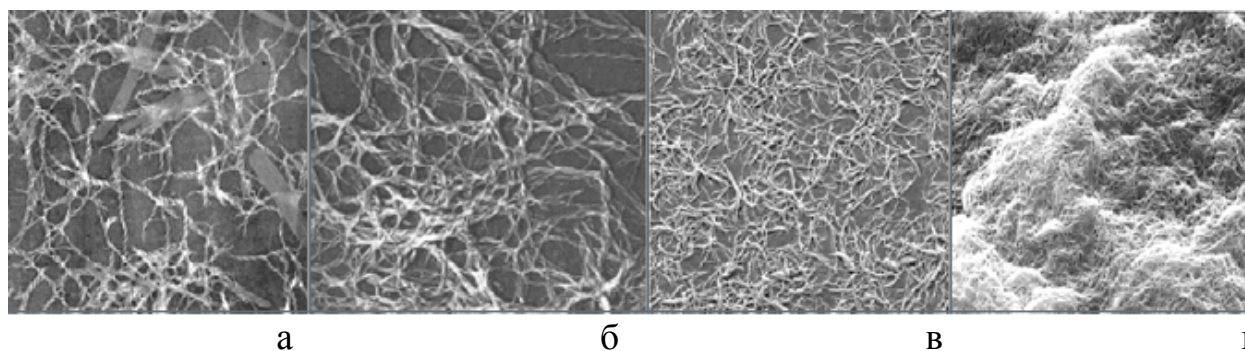


Рис. 1.4 Структура консистентных смазок с загустителем. [31]

а – кальциевое мыло; б – литиевое мыло; в – литиевый загуститель;
г – литиевый комплекс.

Увеличение температуры выше температуры плавления компонентов КСМ приводит к расплавлению смазки и ее вытеканию из узла трения. Механические воздействия вызывают срезание волокон загустителя, их фрагментацию, разделение агрегатов, образующих пространственную структуру, раскручиванию волокон и т.п. Как следствие, изменяется вязкость, предел текучести, пенетрация и другие свойства, связанные со структурой [31].

Известны многие работы [32-39], где исследуется связь между структурой и вязкостью дисперсных систем. В основе теории реологии вязкопластичных веществ лежит мнение Ф.Н. Шведова, что структура существует там, где

вязкость изменяется с изменением скорости сдвига, а так же представление П.А. Ребиндера о снижении вязкости в результате постепенного разрушения структуры системы [32].

Существует большое множество реологических моделей [33], описывающих течение различных систем и консистентных в том числе. К ним относятся уравнения Шульмана [34], Освальда [35], Кэссона [36], Гершеля-Балкли [37], Ри-Эйринга [38], Бингама [39]. Необходимо правильно выбрать адекватное реологическое уравнение среди множества, которое должно давать хорошую аппроксимацию эксперимента в широком диапазоне скоростей сдвига, включать минимальное количество независимых постоянных параметров, обладающих реальным физическим смыслом.

Одна из самых распространенных реологических моделей, представляющих поведение консистентных материалов под воздействием внешней нагрузки и используемая в рамках данной работы, модель Ю.Бингама (рис. 1.5 б) [39] в виде линейного уравнения, аппроксимирующего отдельный участок полной реологической кривой по П.А. Ребиндеру (рис.1.5а) [32]:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.6)$$

где μ - вязкость материала, $\dot{\gamma}$ - скорость сдвига.

Этот участок соответствует начальному этапу течения консистентного материала, в котором по достижении определенного предельного напряжения τ_0 (называемого в реологии консистентных материалов пределом текучести) начинается течение.

Необходимо отметить, что полная реологическая кривая описывает постепенный переход от твердого состояния системы к текучему состоянию. На каждом участке этой кривой предполагается свой механизм течения. Аппроксимация этих участков прямыми линиями является полезным приближением, но нуждается в обосновании с помощью реологической модели.

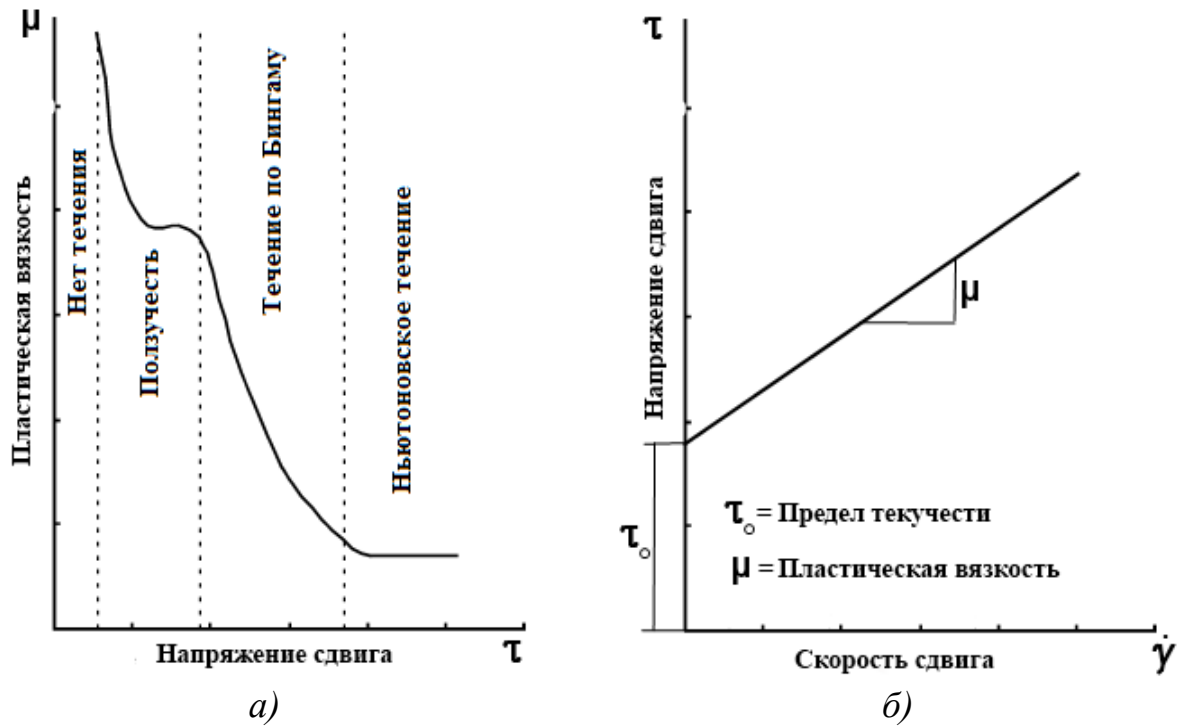


Рис. 1.5 а) полная реологическая кривая по П.А. Ребиндеру;
б) теоретическая кривая по Ю. Бингаму

Обоснованием реологических уравнений КСМ являются микрореологические модели, которые связывают реологические свойства с характером движения дисперсных частиц загустителя или добавок в вязкой жидкости, силами притяжения и отталкивания, гидродинамическим взаимодействием между частицами.

Не смотря на обилие реологических уравнений, серьезное теоретическое обоснование имеют немногие модели, но и они могут работать на ограниченном круге систем. По сей день подбор наилучшей аппроксимирующей экспериментальные данные и описывающей микрореологию системы реологической модели остается важной проблемой.

1.3 Дисперсные добавки как модификаторы трения в консистентных смазочных материалах

Для улучшения свойств КСМ в них вводят 0,001—5% (иногда выше) так называемых присадок. Присадки могут быть отнесены к группе молекулярно-мицеллярных добавок, эффективность действия которых, помимо природы,

зависит от концентрации, условий производства и применения КСМ. Присадки существенно улучшают многие характеристики смазочных материалов, прежде всего окислительную стабильность, термостойкость, защитные, противоизносные свойства и т. д.

Большинство присадок — это поверхностно-активные вещества (ПАВ). В мыльных смазках основным ПАВ является само мыло, химическое строение и полярность молекул которого определяют объемные и поверхностные свойства. Поэтому для эффективного действия поверхностная активность присадок на металле должна быть выше, чем у загустителя. Особенность действия присадок в смазочных материалах состоит также в том, что в объеме смазки и на границе с твердым телом возможно взаимодействие различных ПАВ (синергетическое или антагонистическое) [11].

Существует несколько типов присадок к КСМ: антиокислительные, антикоррозионные, противоизносные, противозадирные, деактиваторы металлов, антирадиационные. Все они достаточно похожи на присадки к жидким маслам. Более специфическими являются присадки, повышающие водостойкость и устраняющие термоупрочнение смазок. Можно назвать и другие присадки: уменьшающие пенообразование, повышающие адгезию к металлам, улучшающие коллоидную стабильность и др.

Антиокислительные присадки. Повышение требований, предъявляемых к смазочным материалам, и прежде всего повышение рабочих температур, нормальных нагрузок и сроков эксплуатации трибоузлов вызывает необходимость увеличения стабильности смазочных материалов к окислению. Окисление смазок значительно ухудшает их физико-химические и эксплуатационные свойства. Смазочные материалы на основе мыл быстрее окисляются чем масла, на основе которых они изготовлены. Это объясняется тем, что мыла катализируют окисление, скорость которого зависит от типа и валентности катиона мыл. Мыла одновалентных металлов обладают большей каталитической активностью по сравнению с мылами поливалентных металлов [40].

КСМ представляют сложную коллоидную систему, стабильность к окислению которой, помимо внешних условий, определяется типом и концентрацией загустителя, составом дисперсионной среды и содержащихся в ней поверхностно-активных веществ, а также технологией приготовления. Стабильность КСМ к окислению можно повысить, подбирая соответствующий состав сырья и оптимальный режим технологии приготовления. Однако не всегда удается получить смазочные материалы с достаточно высокой стабильностью к окислению при жестких режимах эксплуатации. Наиболее эффективный способ предотвращения окисления КСМ — введение в них антиокислителей.

Консистентные смазки должны обеспечивать работоспособность различных узлов трения в широком диапазоне температур и контактных нагрузок, практически не изменяя свои свойства в течение всего периода эксплуатации трибоузлов и при их хранении. Из-за окисления КСМ изменяет свою прочность и вязкость, понижая коллоидную и механическую стабильность. Высокие температуры при окислении могут сопровождаться повышенным испарением базового масла, что приводит к высыханию КСМ.

При длительном хранении литиевой смазки за счет накопления в ней продуктов окисления уменьшается прочность смазочной пленки. Значительно ухудшаются противоизносные свойства этих смазок с увеличением температуры испытания, определяющей глубину их окисления. [41]

Противозадирные и противоизносные присадки. Основное назначение КСМ состоит в уменьшении трения и износа движущихся частей машин и механизмов, предотвращении задира контактных поверхностей.

Первое место по объему производства и применения среди консистентных смазок занимают антифрикционные СМ.

Основной положительный момент смазочного действия присадок в СМ - образование на поверхности металла граничного слоя с особыми свойствами или снижения твердости поверхности за счет адсорбции. Химические превращения играют существенную роль на поверхностях трения.

Как трение, так и износ металлических поверхностей сопровождаются многими физическими явлениями и в металле, и в самом смазочном материале. Смазочная способность КСМ является сложной функцией их структуры, состава и физико-химических свойств. Каркас смазки (пространственная коагуляционная структура) со своими характерными объемно-механическими свойствами, а также присутствие в них разнообразных ПАВ дает основание полагать, что их смазочные свойства связаны с объемным, адсорбционным и хемосорбционным действиями [42].

На практике часто случается, что улучшая одни характеристики КСМ путем применения тех или иных присадок, могут существенно ухудшаться другие свойства смазочного материала. Например, некоторые противозадирные присадки размягчают смазочный материал, уменьшая его предел прочности. С другой стороны, известны присадки, которые усиливают эффективность одна другой.

Соединения, содержащие хлор, серу, фосфор используют в качестве противоизносных и противозадирных присадок [43]. Однако весомую конкуренцию данным присадкам в промышленности составили твердые дисперсные добавки (наполнители), такие как графит и дисульфид молибдена. Положительное действие таких добавок заключается в том, что они обладают не только высокой смазочной способностью, но и не вызывают побочных отрицательных эффектов, взаимодействуя с другими компонентами смазочного материала [44].

Так же улучшает смазочную способность КСМ введение в них высокодисперсных порошков кристаллических веществ со слоистой структурой: графита, серпентинита, дисульфида и диселенида молибдена, диселенидов вольфрама и ниобия, нитрида бора и т. д. Большинство из этих веществ нередко используются и самостоятельно в качестве твердой смазки. Заполняя микронеровности на поверхности твердых тел, порошки со слоистой структурой под влиянием деформаций образуют на них ориентированные пленки, которые выдерживают большие нагрузки по нормали к

кристаллическим поверхностям и легко деформируются в направлении сдвига [1].

Наполнители представляют собой разновидность дисперсных добавок, практически нерастворимых в дисперсионной среде и образующие в смазочных материалах отдельную фазу с размером частиц значительно большими, чем частицы загустителя. Наполнители относят к коллоидно-суспензионным добавкам, которым характерно неизменность размеров частиц во всем интервале температур получения и эксплуатации смазки. Им свойственно не только нерастворимость в смазочном материале, но так же и меньшая степень дисперсности. Основные свойства, определяющие их применяемость — дисперсность и поверхностные свойства частиц. Главное свойство наполнителей заключается в том, что увеличение концентрации дисперсных частиц в смазочных материалах не сопровождается резкими изменениями объемных свойств. [41]

Эффект от использования дисперсных добавок определяется составом смазки, свойствами загустителя и дисперсионной средой. Свойства наполненных смазок определяются характером взаимодействия наполнителя с остальными компонентами КСМ. Поэтому помимо состава смазочного материала важным является природа, концентрация, размер частиц наполнителя и способ его введения. Изменение структуры и свойств СМ при совместном использовании наполнителей и присадок определяется их взаимодействием с загустителями и дисперсионной средой и действием присадок ПАВ на твердые дисперсные частицы. Возможности улучшения свойств смазок при помощи наполнителей разнообразны: варьирование состава, свойств и концентрации добавок, комплексное использование наполнителей в сочетании друг с другом и с присадками.



Рис. 1.6. Классификация наполнителей

Основные требования качества твердых порошкообразных наполнителей, наряду с их смазочной способностью и коррозионными свойствами, сводятся к степени:

- адгезии к металлической поверхности и хорошее смачивание дисперсионной средой;
- чистоты продукта (98,5—99,5 %) и полное отсутствие абразивных примесей;
- дисперсности частиц и узкий фракционный состав;
- химической, гидролитической и термической стабильности.

С открытием отечественными учеными Д.Н. Гаркуновым, В.И. Крагельским, В.Г. Шимановским и В.Н. Лозовским эффекта избирательного переноса при трении, которое легло в основу безразборного восстановления изнашивающихся поверхностей трения в процессе работы машины.[45] Сущность такого процесса заключается в следующем. При работе узла трения на трибопарах возникает нагрузка, а на отдельных участках «сверх нагрузка», которая вызывает выделение избыточной энергии приводящая к изнашиванию. При введении в зону повышенного износа специального дисперсного материала энергия разрушения превращается в энергию восстановления следов износа по ходу работы трибоузла [27, 46].

Таковыми специальными материалами, известными в настоящее время являются: металлоплакирующие, металлизанты и реметаллизанты, кондиционеры и рекондиционеры, модификаторы и металлокерамические специальные составы (ремонтно-восстановительные составы-РВС) [47-50].

Открытие эффекта безызносности вызвало новое объяснение явлений, происходящих при трении и развития новых методов в решении задач триботехники. Изначально трение рассматривалось как процесс разрушения, однако этот процесс является не односторонним и может характеризоваться как разрушительным, так и восстановительным действием. При определенных условиях, при возникновении совокупности физических или химических явлений, для открытых трибосистем, которые обмениваются с внешней средой энергией и веществом, могут возникать эволюционные стационарно неравновесные системы с высокой степенью организации.

Открытие избирательного переноса стало предпосылкой к созданию смазочных материалов с содержанием цветных металлов, которые могут вызвать окислительно-восстановительные реакции на начальном этапе работы трибоузла и уменьшить свою интенсивность в установившемся режиме, а так же быть источником выделения необходимых материалов для изменения поверхностного слоя.

Металлоплакирующие наполнители - это дисперсные добавки, применяемые в КСМ для повышения триботехнических свойств, которое представляется собой высокодисперсные порошки плакирующих металлов или сплавов и их смесей, способные обеспечивать процессы автокомпенсации износа в подвижных трибосопряжениях машин и механизмов.

Металлоплакирующие СМ различают по составу, учитывая природу плакирующего элемента, химическому строению и по назначению. Еще в начале XX века использовали плакирующий компонент в виде амальгамы меди и свинца в составе КСМ. С тех пор в состав КСМ вводилось множество металлоплакирующих компонентов в виде различных металлов, сплавов и химических соединений. В настоящее время установлено, что плакирующие металлы Cu, Sn, Pb, Al, Zn, Au, Ag, Cd и их сплавы, например, латунь и бронза,

а также сверхпластичные сплавы типа Розе, Вуда, полуда, баббиты и т.д. существенно повышают триботехнические характеристики КСМ, увеличивая нагрузочные пределы, уменьшая износ и коэффициент трения в разы за счет реализации эффекта безызносности, зависящего от внешних условий (давление, скорость, температура). Принцип действия этого эффекта заключается в том, что входящий в состав КСМ металл при определенных внешних условиях сформирует защитную металлическую пленку на поверхности трибоконтакта. [48]

Свойствами таких защитных металлических пленок можно управлять с помощью состава и свойств исходных дисперсных порошков таким образом, чтобы они сочетали одновременно комплекс требуемых свойств, например, сверхпластичность с износостойкостью или другие контролируемые параметры. Таким образом, металлоплакирующие добавки в составе КСМ являются одним из средств улучшения триботехнических характеристик.

Полимерные и углеродные дисперсные добавки. В настоящее время в качестве дисперсных наполнителей в КСМ используют синтетические порошкообразные политетрафторэтилены (PTFE), дитиофосфаты и дитиокарбаматы молибдена. Несмотря на довольно высокую стоимость, PTFE является наиболее распространенным полимерным наполнителем смазочных материалов, который создает на контактирующих поверхностях фторопластовое или тефлоновое покрытие, приводящее к резкому уменьшению коэффициента трения, износу и устраняет дефекты поверхности. [51]

Еще одним конкурентоспособным наполнителем КСМ могут выступать высокомолекулярные полиолефиновые дисперсные частицы, например гидроксиды и дифосфаты некоторых щелочноземельных металлов, сульфид висмута, гексагональный нитрид бора и сульфид олова, улучшающие противозадирные и противоизносные свойства базового смазочного материала.

В качестве модификатора трения так же используются наноматериалы органических дендримеров и их металлсодержащие разновидности. Весьма перспективным представляется применение фуллеренов в смазочных материалах, принцип действия которых реализуется за счет подвижности слоев

фуллеренов между слоями графита, что, в свою очередь, может способствовать созданию смазки с нулевым трением. [52, 53] Допускается и использование графенов, представляющих собой одиночный слой атомов углерода, соединенных sp^2 связями. Другими примерами твердых веществ, перспективными для применения в качестве наноматериалов в составе смазочных материалов, являются полиимиды, заполненные фуллеренами, обладающие высоким противоизносным потенциалом; а также композиты на основе нанотрубок и эпоксисоединений для пассивного демпфирования вибраций.

1.4 Перспективы применения гидросиликатов магния как модификаторов трения

При всем разнообразии дисперсных добавок, используемых для повышения триботехнических характеристик КСМ, полученные искусственным путем, особый интерес представляют природные минералы. При относительно низкой стоимости, они обладают уникальными триботехническими свойствами. Примерами таких минералов могут служить талькит, серпентинит, графит и молибденит. В трибопарах при граничном трении в присутствии этих минералов на поверхностях трения образуются защитные пленки с особой структурой. Образованные пленки выравнивают неровности профиля поверхностей пар трения и противодействуют прямому контакту трущихся поверхностей. Подобные природные минеральные дисперсные добавки, использующиеся в СМ, обычно называют в «геомодификаторами трения». [54,55]

Рассмотрим известные гипотезы механизма работы природных минералов на основе слоистых гидросиликатов:

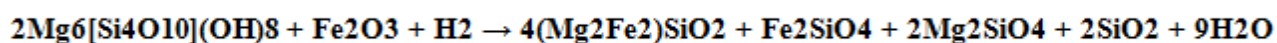
- Одна из первых теорий, объясняющая повышение износостойких свойств СМ – напрессовывание или наклепывание дисперсных частиц гидросиликатов на поверхностях трения и главный фактор возникновения защитных пленок - механическое давление;

- Вторая теория рассматривает совокупного действия двух процессов: температуры и давления. Данные процессы описываются в микрометаллургии и ионной диффузии. В данной теории считается, что деформация выступов профиля поверхностей приводит к локальным повышениям температуры (вспышкам) и в присутствии гидросиликатов происходят микрометаллургические и диффузионные процессы трибосреды в поверхностях трибопары. Так же во время трения образуются новые соединения, которые наполняют впадины профиля поверхности, уменьшая шероховатость и увеличивая толщину поверхностей трения;
- Теория В.В. Зуева [56] о двухстадийном процессе механико-термической и химической деструкции дисперсных частиц гидросиликатов магния, которая учитывает вклад водорода в восстановлении разрушенных связей октаэдрических соединений кремния с кислородом, а также реакций замещения в гидросиликате атомов магния железом и одновременно протекающей адгезией новых соединений на поверхностях трибопары с возможной диффузией магния в них;
- Теория возникновения остекловывания поверхностей трения, которое происходит за счет образования железо-магниевого стекловидного тела, родственного к железу. Этим стекловидным телам характерны высокие физико-механические характеристики: повышенная твердость, ограниченная проводимость тока, теплостойкость и оптические свойства. Однако в этой теории не учитываются факторы, которые могли бы объяснить маслофильность образованной поверхности;
- Теория, которая предполагает подобие процессу избирательного переноса действия гидросиликатов магния в зоне трения. Данная теория наиболее подвергается критике по причине несопоставимости физико-химических механизмов действующих в зоне трения в присутствии гидросиликатов (в условиях щелочной среды смазки) и в паре сталь – медь (в условиях кислой среды глицерина), где наиболее эффективно реализуется эффект избирательного переноса;

- Теория вспомогательного действия лакообразования в результате высокотемпературных процессов на границе смазки, приводящая к насыщению залакованных трущихся поверхностей добавками, находящимся в СМ. В результате термодеструкции на в поверхностях трибоузла откладываются тяжелые углеводородные фракции, приводящие к образованию пленок – лаков. Предполагается, что это сопутствующий процесс, происходящий независимо от добавок гидросиликатов;
- Теория изоморфизма, базирующаяся на предположении, что в составах родственные элементы замещают друг друга (примером может служить изовалентный изоморфизм иона Mg^{2+} к двухвалентному иону Fe^{2+} , имеющие близкие по размеру атомы). При этом возможен переход ионов магния из разрушенной структуры гидросиликата в железосодержащую поверхность трибопары. Изоморфизм важен, но не достаточен для образования защитного покрытия.
- Теория Л.И. Погодаева и Д.М. Телуха [57-58] рассматривает последовательность разных процессов. В первую очередь уделяется внимание химическому составу гидросиликатов, их стабильности и постоянству свойств. Согласно исследованиям в рамках данной теории, наиболее предпочтительная для повышения триботехнических характеристик полиморфная разновидность серпентинита – лизардит. В лизардите наблюдается деформация кристаллической решетки, приводящая к анизотропии свойств кристалла. Этот минерал имеют структуру, где внутренние слои имеют слабую связь между атомами, а наружные атомные плоскости имеют сильные ковалентные связи, что создает возможность сдвига внутренних слоев относительно неподвижных наружных, связанных с металлическими поверхностями трибосопряжения. Согласно Д.М. Телух, магний и вода, входящие в состав гидросиликата, участвуют в ионном обмене и на поверхностях трения образуются гидратированные слои с гидрофильной прослойкой.

Следующий процесс, который учитывает данная теория, связан с механическим действием поверхностей трения на гидросиликат (серпентинит),

приводящий к измельчению дисперсных частиц до оптимального размера и выделению свободной энергии, а также агломерированию более мелких частиц с поглощением энергии. В процессе трения частицы минералов шаржируют поверхности трибосопряжений, освобождают их от окисных пленок и модифицируют профиль поверхности трения. Модификация поверхности идет по двум путям: механическое изменение профиля поверхности за счет заполнения неровностей минералом и химическое воздействие в условиях выделения тепла и присутствия катализаторов, ускоряются ионно-обменные реакции, атомы магния в гидросиликате замещаются атомами железа, а металлическая поверхность насыщается атомами магния по следующей химической реакции:



Далее, по этой реакции происходит спекание дисперсных частиц под действием давления и нагрева от трения с образованием антифрикционного покрытия.

- Теория предполагающая возникновение покрытий не металлокерамических, а углеродно-кластерных алмазоподобных. Для возникновения таких покрытий необходимо выполнение условия высокоэнергетического воздействия на исходный материал [59]. Образование таких покрытий при граничном или смешанном виде трения в смазочной среде возможно в высокотемпературной трибоплазме [60].

Объединяя все представленные теории можно сформировать совокупность основных этапов работы добавок гидросиликата в трибоузле:

Первый этап - мягкое абразивное действие на поверхности трения исходными дисперсными частицами гидросиликатов и, как следствие, удаление окисных пленок и возникновение ювенильных поверхностей.

Второй этап – физико-механическое и химическое разрушение частиц гидросиликатов с образованием пленок из силикатов и ионов магния. Необходимым условием на данном этапе является измельчение дисперсных частиц гидросиликата до оптимального размера внутри трибосопряжения с выделением свободной энергии и воды.

Третий этап - термохимические реакции обусловленные взаимодействием между появившимися ювенильными поверхностями металла и СМ, содержащего дисперсные добавки гидросиликата.

Условиями описанных этапов являются наличие: высокой локальной температуры и высокого удельного давления в зоне трения, относительно высокая твердость исходных компонентов гидросиликатов или продуктов образующихся в результате физико-химических процессов при трении.

Представленные выше теории формирования защитных покрытий на основе гидросиликатов магния в СМ последовательно дополняют и по существу представлены в своей исторической последовательности возникновения. В начале применения составов на основе гидросиликатов учитывались один или несколько существенных факторов на основании личных предпочтений авторов, а с увеличением количества таких теорий появились предпосылки для объединения этих факторов, углубивших понимание действия дисперсных частиц гидросиликатов, как триботехнических составов, внесенных в зону контакта поверхностей в присутствии третьего тела – СМ. Однако большинство этих теорий не учитывают изменения совокупности свойств (структура, вязкость, предел сдвига и т.п.) самого СМ, как комплексного эффекта от применения дисперсных добавок гидросиликатов в трибоузле.

1.5 Выводы по главе

Анализ результатов проведённого литературного обзора позволяет сделать следующие выводы:

- произведен анализ комплекса триботехнических характеристик, предъявляемых к КСМ, работающих в узлах трения;
- рассмотрено влияние структуры и состава КСМ на триботехнические характеристики;
- показана взаимосвязь между структурой, вязкостью и реологическими свойствами КСМ;
- на основании обзора научных источников информации выявлен опыт применения КСМ с дисперсными модификаторами для уменьшения износа и потерь на трение в трибоузлах;
- рассмотрены основные теории формирования защитных покрытий на поверхностях трения, образующихся в результате применения СМ, содержащие дисперсные частицы гидросиликатов магния;
- определена общая цель и поставлены задачи исследований влияния КСМ, содержащих дисперсные частицы гидросиликатов магния на триботехнические характеристики узлов трения.

ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ГЛАВА 2 ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ

2.1 Свойства выбранных консистентных смазочных материалов

В качестве базового консистентного смазочного материала (для исследования триботехнических свойств добавок на основе гидросиликата магния) выбрана многоцелевая антифрикционная водостойкая смазка Литол-24 (ГОСТ 21150-87), получаемая загущением нефтяных масел (вязкостью 60-75 мм²/с) литиевым мылом 12-оксистеариновой кислоты. Литол-24 представляет собой вязкую светло-желтую однородную мазь.

Основания выбора:

1. Широкая применяемость в технике;
2. Сохраняет консистенцию и смазочную способность при высоких и низких температурах;
3. Прочно удерживается на смазываемых поверхностях;
4. Изготавливается на основе высококачественного минерального масла (И-40) и загустителей на основе литиевого мыла;
5. Обладает высокой коллоидной, химической и механической стабильностью.
6. Отсутствие противозадирных и противоизносных присадок

На основании анализа рынка Литол-24 было отобрано три типичных производителя КСМ: «Газпром», «ОйлРайт», «ARGO», сравнительные физико-химические характеристики, которых представлены в табл. 2.1

В соответствии с приведенной таблицей физико-химических характеристик базового КСМ Литол-24 отбирались образцы производителей с наибольшими и наименьшими триботехническими показателями: «Газпром» и «ARGO». Для осуществления входного контроля показателей отобранных смазочных материалов проводились контрольные испытания на машине трения ЧШМ-3,2 по ГОСТ 9490-75 [61]. Результаты контрольных испытаний представлены в табл. 2.2

Таблица 2.1 Заявленные характеристики Литол-24

Технические характеристики	ГОСТ 21150-87 [62]	Газпром [63]	ОйлРайт [64]	ARGO [65]
Диапазон рабочих температур, °С	-40...120	-40...120	-40...120	-40...120
Пенетрация при 25 °С с перемешиванием, мм ⁻¹	220-250	240	220-260	220-250
Температура каплепадения, °С, не ниже	185	194	185	185
Коллоидная стабильность, %, выделенного масла, не более	12	11	12	12
Нагрузка сваривания (Р _с), Н	1410	1410	1410	1981
Предел прочности, Па: При 20 °С При 80 °С	500-1000 200	745 235	500-1000 200	500-1000 200
Критическая нагрузка (Р _к), Н	630	630	630	617
Индекс задира (Из), Н	28	28,2	28	27
Вязкость эффективная при 0 °С, Па·с	280	221	280	280

Таблица 2.2 Характеристики Литол-24 по испытаниям

Технические характеристики	Газпром	ОйлРайт	ARGO
Нагрузка сваривания (Р _с), Н	1410	1380	1580
Критическая нагрузка (Р _к), Н	1000	1260	1260
Индекс задира (Из), Н	28,8	28,2	33,4

Как можно видеть из табл. 2.2 технические характеристики не в полной мере соответствуют заявленным табл. 2.1

Так же проводились испытания на способность восстанавливать структурный каркас КСМ после экстремального теплового воздействия. Испытание заключалось в нагревании образца СМ до температуры каплепадения (~200°С) с последующим охлаждением и анализом образовавшейся структуры. Результаты наблюдения таких структур представлены на рис.2.1.

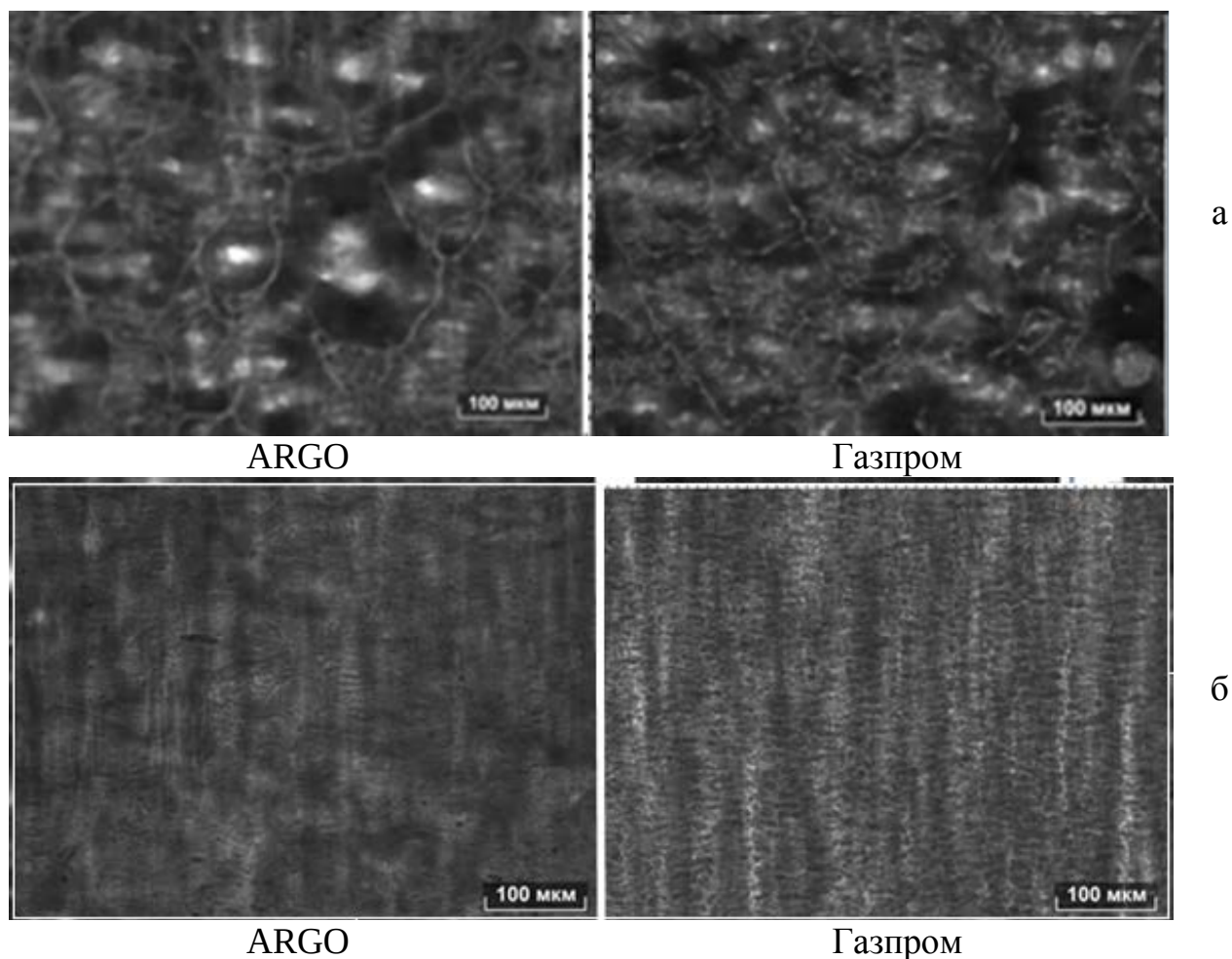


Рис. 2.1 Фотографии структурных каркасов до (а) и после (б) теплового воздействия на КСМ.

По результатам данного испытания наблюдалась деградация структуры у обоих КСМ с частичным восстановлением структурных каркасов и консистентного состояния у СМ «ARGO». Когда как СМ «Газпром» полностью потерял способность к восстановлению консистентного состояния.

На основании проведенного анализа производителей товарных смазок выбран наиболее удовлетворяющий по соотношению цена – комплекс технических характеристик смазочный материал Литол-24 фирмы «ARGO».

2.2 Дисперсные добавки

Выбор дисперсных добавок (модификаторов трения) для консистентного смазочного материала основан на литературном обзоре, представленном в первой главе данной работы. В качестве такого дисперсного модификатора в данной работе выберем минералы группы гидросиликатов магния.

Способ получения необходимого помола реализуется путем использования поэтапного дробления и измельчения минерала. Горную породу через вибрационный питатель подают в щековые дробилки для первичного дробления, сразу после крупного дробления направляют в роторные дробилки или конусные дробилки для мелкого дробления, а затем для эффективного сверхтонкого измельчения материалов применяют шаровую или вибрационную мельницу. Для удаления рудных минералов и нежелательных примесей магнетитовая порода подвергается магнитной сепарации. Измельченный материал проходит обработку воздушным сепаратором, где разделяется на готовый продукт и грубую фракцию, возвращаемую на доизмельчение.

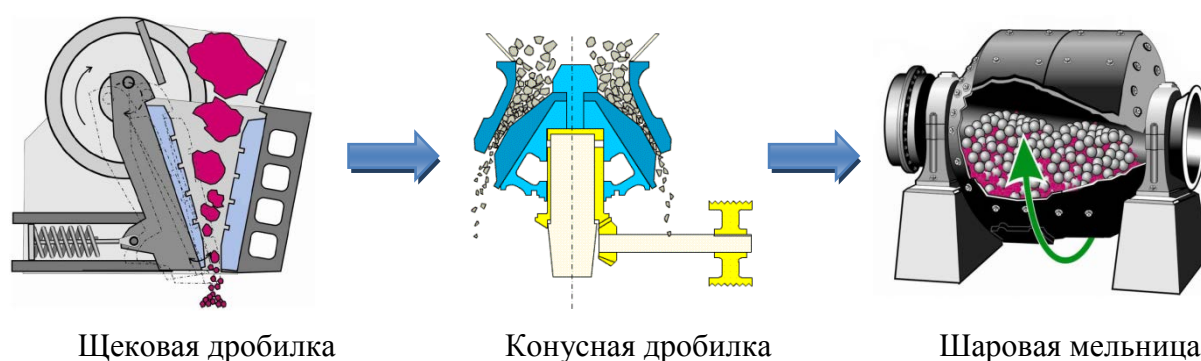
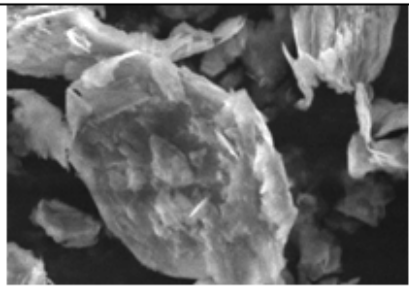
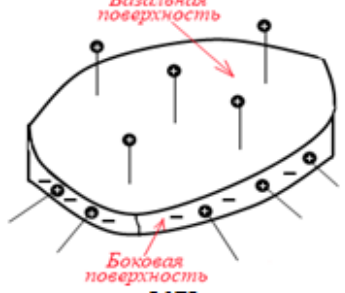
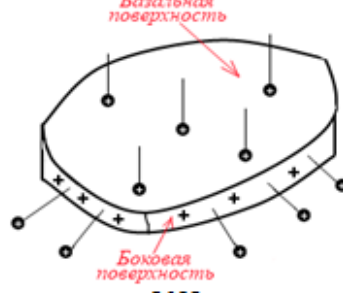
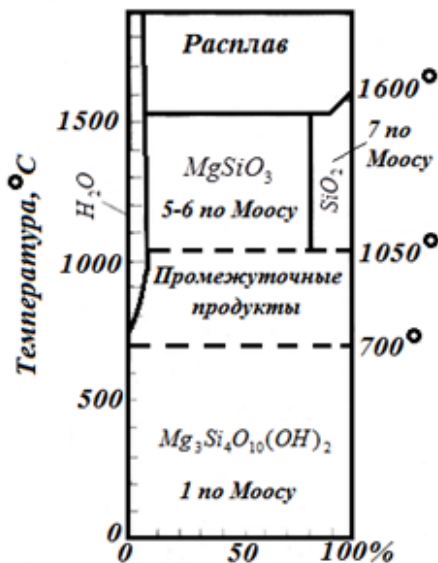
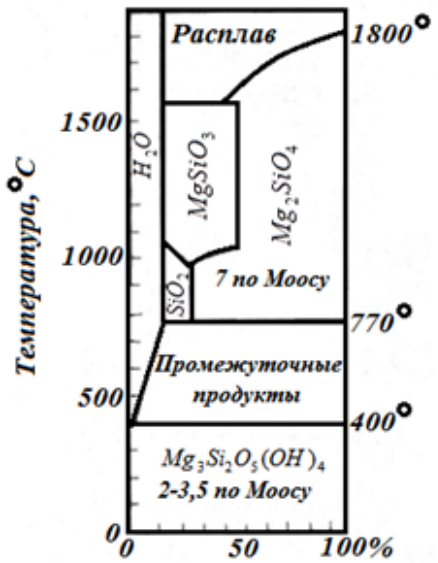


Рис. 2.2 Этапы измельчения горной породы

В таблице 2.3 приведены сравнительные характеристики использованных в данной работе двух типов гидросиликатов магния: серпентинит и талькит.

Концентрации частиц модификаторов в выбранные базовом смазочном материале Литол-24 составляют: 0,5%; 1%; 5%; 10% и 20% по массе. Размер дисперсных частиц: 100-200нм; 1 – 5 мкм; 10 – 15 мкм; 30 -35 мкм.

Таблица 2.3 Характеристики гидросиликатов магния

Параметр	Талькит	Серпентинит
Класс	силикаты	силикаты
Хим. формула	$Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$	$Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$
Примерный хим. состав [66]	MgO	MgO
	31,7%	43%
	SiO ₂	SiO ₂
	63,5%	44,1%
	H ₂ O	H ₂ O
	4,8%	12,9%
	Примеси: FeO	Примеси: FeO,
	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ , NiO,
	NiO	Fe ₂ O ₃
	2-5%	5,68%
	<2%	
	<0,1%	
Плотность, г/см ²	2,7-2,8	2,6
Твердость (по Моосу)	1	2,5-3,5
Структура	слоистая	слоистая
		
Маслоемкость, г/100г	20-24	30-35
Модель адсорбции на поверхности частицы гидросиликата магния	 [67]	 [68]
Зависимости фазового состава от температуры с обозначением твёрдости по Моосу в нормальных условиях [69]		
Первичные продукты термического разложения	метасиликат магния и свободный кремнезём	форстерит, метасиликат магния и кремнезём

Для оценки наибольшей эффективности применения дисперсных частиц в консистентном смазочном материале были проведены серии испытаний с дисперсными добавками разных видов и с разным процентным содержанием на машине трения ЧШМ-3,2 по ГОСТ 9490-78.

На рис. 2.3 представлен график зависимости размера пятна износа стального шара ШХ15 от концентрации дисперсного наполнителя различного состава (медь, дисульфид молибдена, диоксид циркония, цинк, серпентинит и талькит) в базовом смазочном материале Литол-24.

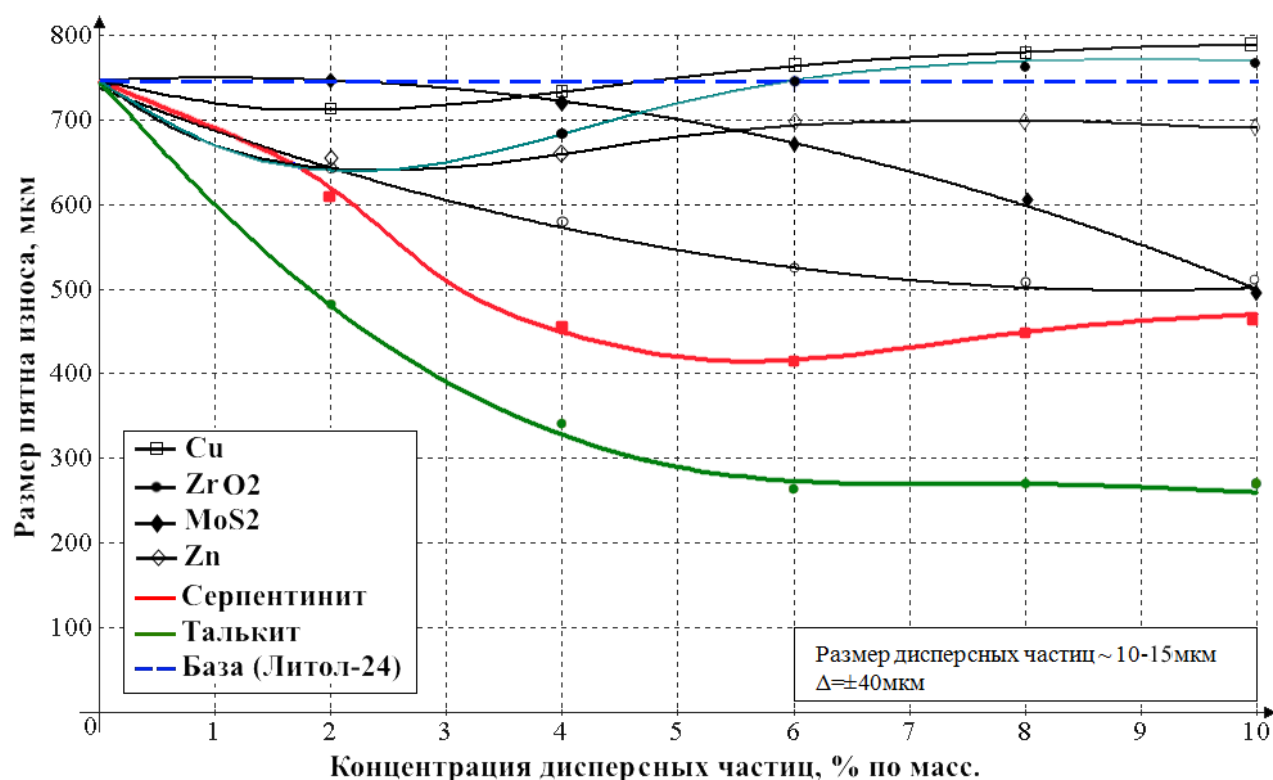


Рис. 2.3 Влияние содержания дисперсных частиц различных материалов в Литол-24 на его противоизносные свойства.

Полученные экспериментальные данные подтверждают улучшение противоизносных свойств смазочного материала путем введения дисперсных частиц гидросиликатов магния, которые показывают улучшение триботехнических характеристик даже при малых концентрациях в базовом смазочном материале. На основании данных результатов, предпочтение в дальнейших исследованиях было отдано данному виду модификаторов трения.

2.3 Используемые методы исследований

2.3.1 Перемешивание консистентных смазочных материалов

Для перемешивания и механического воздействия на исследуемые смазочные материалы с последующим исследованием реологического поведения структурных составляющих смазочного материала использовался воркер (перемешиватель).

Воркер – прибор для интенсивного многократного воздействия на смазочный материал с целью изменения состояния консистентного смазочного материала, которые эквивалентны начальному периоду эксплуатации смазочного материала в условиях реальной работы трибосопряжения. Исследование образцов смазочных материалов, не подвергавшихся механическому воздействию, как правило, не даёт информации о реальной консистенции смазки в условиях применения. Исследование образцов, после перемешивания воркером, как правило, предпочтительнее и более информативно для проверки свойств КСМ.

В рамках данной работы использовался ручной перемешиватель (воркер) смазочного материала (см. рис. 2.4). Прибор состоит из одной стальной мешалки смазки ручным рычажным механизмом, смонтированным на жёсткой стальной базе.



Рис. 2.4 Ручной перемешиватель консистентных смазочных материалов (Воркер).

2.3.2 Определение температуры каплепадения

Известно, что консистентные смазочные материалы с увеличением температуры начинают размягчаться с соответствующим уменьшением упругих свойств. Данный процесс сравнительно медленный, а различные консистентные смазочные материалы не имеют определенной температуры плавления. Теплостойкость таких материалов определяется по температуре каплепадения, то есть по такой минимальной температуре при нагреве, при которой образуется первая капля и под действием силы тяжести, вытекает из тестового сосуда. Определение температуры каплепадения осуществлялось на аппарате SYP4110-I, представленном на рис. 2.5, в диапазоне рабочих температур, заявленных производителями смазочных материалов.

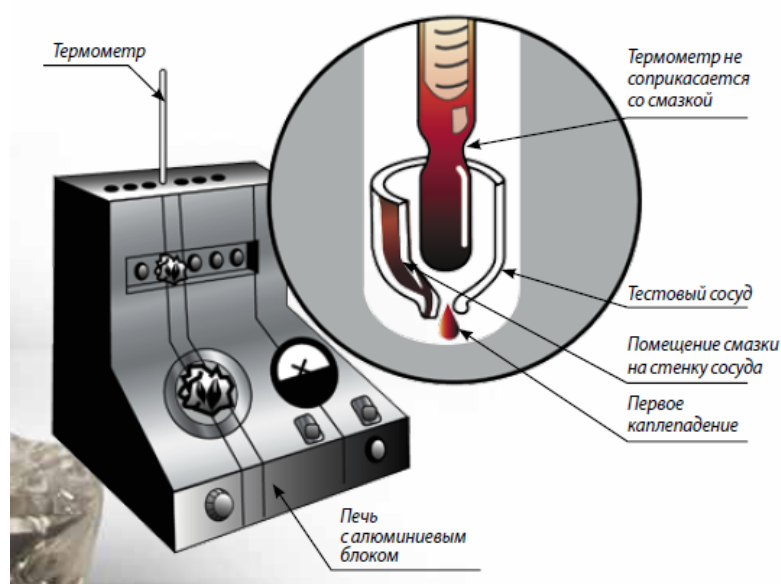


Рис. 2.5 Прибор для определения температуры каплепадения SYP4110-I.

Данный аппарат позволяет определить температуру каплепадения по ГОСТ 6793-74 [12] с требуемой точностью. Технические характеристики прибора для определения температуры каплепадения SYP4110-I представлены в таблице 2.4.

Пробы смазочного материала помещались в специальные пробирки, затем опускались в контейнер прибора. Контейнер нагревался с определенной скоростью. Температура, при которой происходит падение первой капли

консистентного смазочного материала в жидком состоянии или смазка вытягивается в длину на 1.3...1.4 см, принимают за температуру каплепадения.

Таблица 2.4 Технические характеристики прибора для определения температуры каплепадения SYP4110-I

Количество одновременно испытываемых образцов		до 6 шт.
Диапазон определения температуры каплепадения		+20...+400 °C
Скорость повышения температуры		соответствует требованиям ГОСТ 6793-74
Погрешность цифрового измерителя температуры, не более, в диапазоне температур	+20...+150 °C	±1,0 °C
	+150...+400 °C	±1,5 °C
Дискретность вывода на дисплей зафиксированной температуры каплепадения		1 °C
Габаритные размеры аппарата; масса		380×250×180 мм; 8,5 кг

2.3.3 Определение коррозионной стойкости

Исследования коррозионной стойкости консистентных смазочных материалов проводились по ГОСТ 32335-2013 (ASTM D 4048-10) [70]. Сущность метода заключается в том, что очищенную медную пластину погружают в чашу с тестируемым консистентным смазочным материалом и нагревают в термостате (паровой бане) при заданной температуре $(100 \pm 1)^\circ\text{C}$, в течение установленного периода времени $(24 \text{ ч} \pm 5 \text{ мин})$. После нагревания пластину вынимают, промывают и сравнивают с эталонами коррозии медных пластинок, представленных на рис. 2.6.

Коррозионное действие тестируемого образца смазки определяют по соответствию внешнего вида пластины с одной из полосок эталона коррозии медной пластинки. При невозможности точно установить соответствие конкретной пластине эталону, образец оценивается по эталону с большей степенью коррозии поверхности.

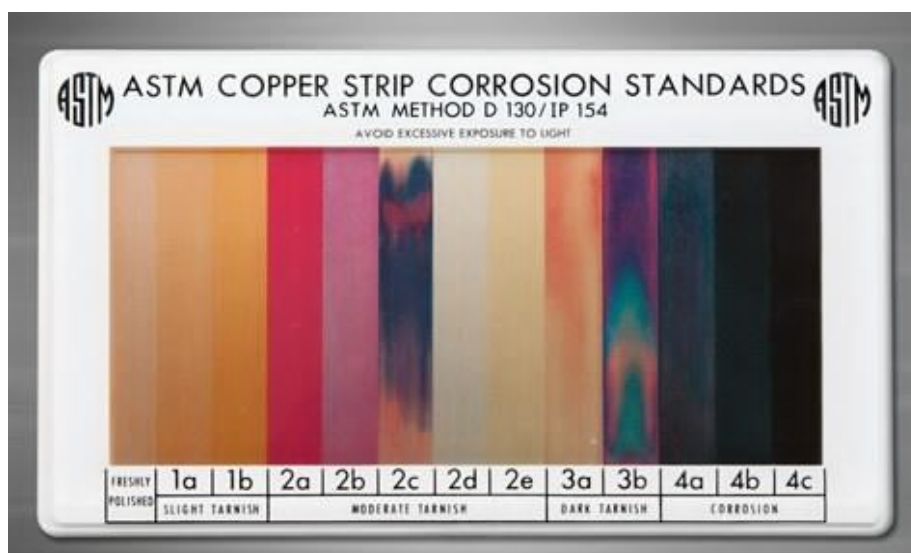


Рис. 2.6 Эталонные полосы коррозии медной пластинки.

Данный метод позволяет определить агрессивность компонентов консистентного смазочного материала к материалам трибопары, работающей в условиях смазки. Наиболее характерным примером такой трибопары является подшипник качения, возникновение коррозии в котором приведет к его преждевременному выходу из строя.

2.3.4 Профилометрические исследования

Для количественной оценки уровня неровности профиля поверхности трения подшипника качения, работающего с исследуемым смазочным материалом, проведены профилометрические измерения по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [71]. Характеристикой микрогеометрии поверхности трения, показывающей динамику изнашивания в зависимости от параметров (нагрузки, скорости скольжения, температуры и т. д.) является шероховатость.

Для оценки шероховатости поверхности использовался портативный прибор Mahr MARSURF PS (см. рис. 2.7). Действие этого прибора основано на методе ощупывания неровностей профиля исследуемой поверхности твердосплавной иглой (щупом) и преобразования этих механических перемещений щупа в электрический сигнал, пропорциональный этим перемещениям, который обрабатывается в процессоре прибора. Данные

обработанные процессором прибора передаются на персональный компьютер для дальнейшей обработки информации о профиле.



Рис. 2.7 Прибор для измерения шероховатости Mahr MARSURF PS1

Таблица 2.5 Технические характеристики Mahr MARSURF PS1

Измеряемые параметры шероховатости	Ra, Rq, Rz (соотв. Ry (JIS)), Rz (JIS), Rmax, Rp, Rp (ASME), Rpm (ASME), Rpk, Rk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, Rt, R3z, RPe, Rmr (соотв. tp (JIS, ASME)), RSm, R, Ar, Rx
Принцип измерения	контактный
Диапазоны измерений по параметру Rz, мкм	От 0 до 350; От 0 до 180; От 0 до 90
Разрешение профиля, нм	32; 16; 8
Отсечка шага 1с, мм 1s, мкм	0,25; 0,8; 2,5 2,5; 8
Длина трассы ошупывания L, мм	1,75; 5,6; 17,5
Длина оценки 1с, мм	1,25; 4,0; 12,5
Число базовых длин в длине оценки	от 1 до 5
Радиус шупа, мкм	2
Фильтры	Фазокорректированный (фильтр Гаусса) по ИСО 11562 (ГОСТ 8.652-2009); RC-фильтр по ИСО 3274 (ГОСТ 19300-93)
Измерительное усилие, мН	0,7
Предел допускаемой основной относительной погрешности по параметру Ra, %	10
Габаритные размеры, мм	140x50x70

2.3.5 Стандартный метод оценки триботехнических характеристик

Определение основных триботехнических характеристик базового смазочного материала и модифицированного дисперсными добавками, осуществлялись на четырехшариковой машине трения ЧШМ – 3,2 (см. рис. 2.8) в соответствии с ГОСТ 9490 – 75 в условиях трения скольжения.

Схема испытательного узла ЧШМ представляет собой пирамиду из четырех контактирующих друг с другом стальных шаров, нижних три из которых застопорены в чаше вместе с образцом смазки, верхний шар закреплен в цанговом зажиме, который одновременно прижимается по нормали и вращается. [72].

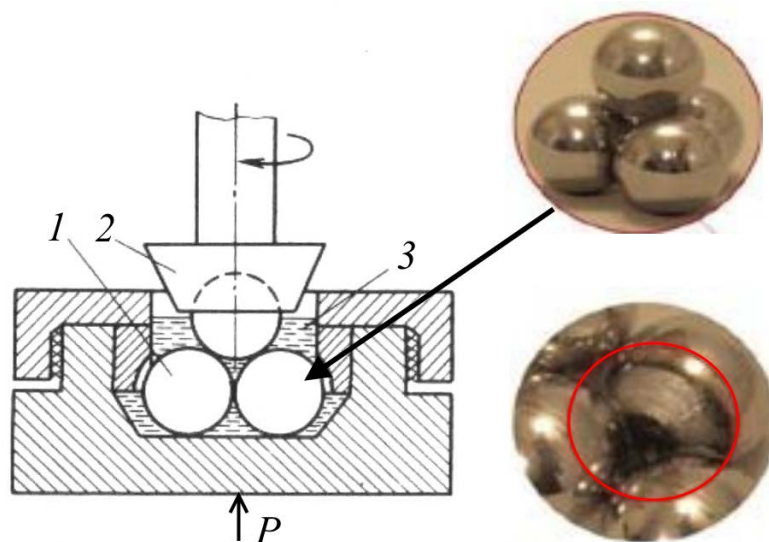


Рис. 2.8 Рабочий узел четырехшариковой машины трения: 1- шарик; 2- вращающийся шпиндель; 3 - испытываемый смазочный материал.

Осевая нагрузка может прикладываться в широком диапазоне значений ($130 \text{ Н} \leq P \leq 10000 \text{ Н}$), а частота вращения шпинделя фиксированная и составляет 430 мин^{-1} . Пару трения в данной схеме образуют шарики от подшипников из стали ШХ15 диаметром 12,7 мм.

Исследование консистентных смазочных материалов в исходном состоянии и модифицированных дисперсными частицами проводили согласно алгоритму:

- 1) определение противозадирных свойств – по индексу задира $И_3$;

2) определение предельной нагрузочной способности – по нагрузке сваривания P_c ;

3) определение противоизносных свойств по показателю износа D_{II} .

2.3.6 Микроскопические исследования

Оптические микроскопические исследования и определение микротвёрдости проводились на автоматическом микротвердомере Future Tech FM-300 (см. рис. 2.9).



Рис. 2.9 Автоматический микротвердомер Future Tech FM-300

Прибор Future Tech FM-300 позволяет проводить измерения микротвердости по методу Виккерса или Кнупа (вдавливания в испытуемый материал алмазного наконечника с квадратным основанием или четырехгранной пирамиды).

Для построения панорамных изображений и выполнения анализа распределения структурных составляющих каркасов исследуемых консистентных смазочных материалов с добавками на основе гидросиликатов магния и без использовалось программное обеспечение Thixomet PRO.

Технические характеристики микротвердомера Future Tech FM-300 представлены в таблице 2.6

Таблица 2.6 Технические характеристики Future Tech FM-300

Переключение турели	автоматическое / ручное
Контроль процесса нагрузки	автоматический (нагрузка, выдержка, снятие нагрузки)
Скорость нагрузки	50 мкм/сек.
Индентор	по Виккерсу по Кнупу
Точность	согласно JIS B-7734 /B-7725, ASTM E-384, ISO /DIS 6507-2, ГОСТ 9450
ХУ-столик	перемещение ХУ 25мм (опция: цифровой микрометр)
Нагрузки (гс.)	5/10/25/50/100/200/300/500/1000 (2000)
Объективы	10х/50х (опция: 5х, 20х, 40, 100х)
Окуляры	10х (опция: 15х)
Макс. глубина образца	115 мм
Макс. высота образца	95 мм
Габариты, вес	Ш186 X Д450 X В504 (мм), 40кг

Регистрация и обработка микроизображений поверхностей подшипников качения, пятен износа стальных шаров после испытаний на машине трения ЧШМ-3,2 проводились с помощью металлографического микровизора μ Vizo-Met-221 (см. рис. 2.10)

Рис. 2.10 Микровизор металлографический инвертированный μ Vizo-Met-221

μ Vizo-Met-221 позволяет проводить на экране дисплея наблюдение увеличенного изображения объекта в светлом и темном поле, поляризованном свете и методом дифференциально-интерференционного контраста. Технические характеристики данного прибора представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 Технические характеристики μ Vizo-Met-221

Линейное увеличение, крат - в режиме цифрового увеличения «x1» - в режиме цифрового увеличения «x2»	50, 100, 200, 500, 1000 100, 200, 400, 1000, 2000
Комплект сменных объективов планахроматов с увеличенными рабочими расстояниями (р.р., мм)	5\0,12 (7,2); 10\0,20 (9,1); 20\0,35 (6,1); 50\0,60 (2,4); 100\0,75 (1,3)
Наибольшее линейное поле зрения в плоскости объекта, мм	2,6 x 1,9; диагональ 3,3 мм
Источник света	Светодиод белого свечения 2Вт
Цена деления - шкал, мм - нониусов, мм	1,0 0,1
Видеоматрица	3,2 Мпкс
Монитор высокого разрешения	ЖК 6,5"; VGA; 1024x768
Программное обеспечение	Определение площадей, линейных и угловых размеров, подсчет зерен. Наложение на изображение объекта изображения перекрестия, шкал; окружностей, масштабного отрезка. Анализ микроструктуры металлов и сплавов методом сравнения с эталонными шкалами. Создание пользователем собственных альбомов с эталонными или произвольными изображениями.
Регулируемые параметры	Яркость, контрастность, резкость, объемность, цветопередача, режим черно-белого изображения
Габаритные размеры, мм; масса, кг	330x350x265; 10

2.3.3 Исследование реологических свойств

В рамках данного исследования реологические характеристики консистентных смазочных материалов, модифицированных дисперсными добавками на основе гидросиликатов магния определялись по ГОСТ 26581-85 [8] на ротационном вискозиметре Brookfield DV2T (см. рис. 2.11).



Рис. 2.11 Ротационный вискозиметр Brookfield DV2T

Ротационный вискозиметр предназначен для измерения сопротивления жидкости к истечению при заданной скорости сдвига. Работа вискозиметра Brookfield DV2T основана на вращении шпинделя, погруженного в образец смазочного материала, закрепленного на калиброванном упругом элементе. Замедление шпинделя, вызванное вязкостью смазочного материала, замеряется по отклонению упругого элемента. Отклонение упругого элемента преобразовывается в электрический сигнал ротационным преобразователем. Диапазон измеряемой вязкости DV2T зависит от скорости вращения шпинделя, от его размеров и формы. Основные характеристики вискозиметра Brookfield DV2T определяются точностью $\pm 1.0\%$ в зависимости от выбранного диапазона, воспроизводимость при правильном выборе диапазонов измерений $\pm 0.2\%$.

Для управления и сбора данных на компьютер используется программное обеспечение - Rheocalc. Rheocalc позволяет обрабатывать реологические данные в автоматическом режиме, накладывать несколько графиков друг на друга, рассчитывать математические модели. Поддерживаемые математические модели: Bingham, Casson, Casson NCA/CMA, Power Law, IPC Paste, Herschel-Bulkley, Thix Index.

В данном исследовании для сбора данных и анализа реологии КСМ использовалась математическая модель Bingham, сущность которой описана в литературном обзоре первой главы диссертационной работы.

2.3.4 Химический анализ дисперсных добавок

Химический состав исходных порошковых материалов гидросиликатов магния определялся с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance (см. рис. 2.12). Метод рентгеновской дифракции позволяет идентифицировать фазы кристаллитов и проводить их количественный анализ.

Принцип действия дифрактометра основан на дифракции рентгеновских лучей от атомных плоскостей кристаллической решетки исследуемого вещества. Дифракция рентгеновских лучей соответствует закону Бреггу-Брентано. (см. рис. 2.13).



Рис. 2.12 Рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Advance

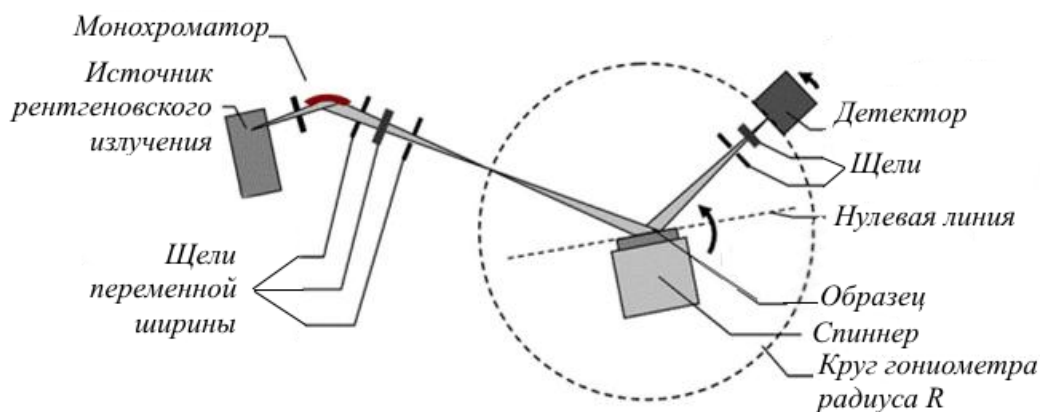


Рис. 2.13 Геометрия тета - 2 тета по Бреггу-Брентано

Дифрактометр включает в себя рентгеновскую головку с анодами из меди, кобальта, хрома, молибдена, железа, вольфрама, титана или серебра, гониометра, блоков детектирования и системы управления, сбора и обработки данных. Дифрактометр Bruker D8 Advance выполнен в виде единого модуля, который подключается к управляющему компьютеру.

Таблица 2.8 Технические характеристики Bruker D8 Advance

Геометрия съемки	9 / 9 или 9 / 29
Диапазон измерения углов дифракции 2θ .., °	от 20 до 130
Вращение образца по оси φ . °	свободное вращение
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений параметров кристаллической решетки: а, нм с, нм	$\pm 0,0001$ $\pm 0,001$
Материалы анода рентгеновской трубки	Cu / Co / Cr / Mo / Fe / Ag / W / Ti
Интерфейсы	USB, LAN
Потребляемая мощность без учета дополнительных блоков, кВт А, не более	6.5
Электропитание осуществляется от сети переменного тока: Напряжение, В Частота, Гц	220 $\pm$ 10 или 380 $\pm$ 10 50
Масса без учета дополнительных блоков, кг, не более	770
Габаритные размеры (В x Ш x Г), мм, не более	1868 x 1300 x 1135
Условия эксплуатации: - температура окружающего воздуха, °C	от +15 до +25

Анализ исходных дисперсных частиц гидросиликатов магния выполнен на дифрактометре D8 Advance с вертикальным гониометром Θ - Θ , фокусировкой по Бреггу-Брентано, на β -фильтрованном $\text{CuK}\alpha$ -излучении ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$, Ni-фильтр), с вращением образца (30 об/мин) в плоскости держателя, регистрацией дифракционной картины высокоскоростным детектором LynxEye (угол захвата $3,2^\circ$) фирмы Bruker, в диапазоне углов $2\Theta=8-$

120°, с шагом сканирования 0,02° и временем накопления 113 с/шаг. Режимы работы трубки $U=40$ кВ, $I=40$ мА.

Для первичной обработки рентгенограммы (удаления фона) и определения фазового состава использовалось программное обеспечение DiffracPlus EVA (компания Bruker AXS) и порошковая база данных JCPDS PDF-2.

Полученные с помощью данного метода исследования дифрактограммы представляют собой распределения пиков определенной формы и интенсивности в зависимости от энергии характеристического излучения конкретной фазы.

2.3.5 Устройство для испытания смазочных материалов в подшипниках качения

Испытания на машинах трения носят условный характер, так как не моделируют ни одного реального случая работы узла. К тому же результаты испытания одного и того же смазочного материала на различных машинах трения не всегда сопоставимы. Нельзя также считать безукоризненными и используемые в них критерии. Так, P_c (нагрузка сваривания) относится к области нагрузок, при которых прочность приповерхностного слоя металла на десятичный порядок ниже исходной, и, следовательно, этот показатель не имеет отношения к смазочным свойствам масел и смазок, а I_3 (индекс задира) вообще не имеет физического смысла. Только P_k (критическая нагрузка) характеризует прочность смазочной пленки, поскольку разделяет области умеренного и повышенного износа. Тем не менее, такие испытания позволяют сравнить смазочные свойства испытуемых и эталонных материалов в стандартных условиях испытания и оценить влияние на них состава, а также в некоторой степени прогнозировать поведение смазочного материала в условиях эксплуатации.

Основной недостаток исследований на машине трения ЧШМ (ГОСТ 9490-75) заключается в том, что такая схема представляет возможность

испытывать только трение скольжения, когда в реальном узле трения, в таком как подшипник качения, преимущественно возникает трение качения в сочетании с трением скольжения между сепаратором и телами качения.

Задачей предлагаемого устройства (см. рис. 2.14) является повышение точности оценки эффективности смазочного материала в подшипниках качения за счет приближения условий испытаний к эксплуатационным.

Для решения задачи предложено устройство для испытания смазочных материалов подшипников качения. Конструкция устройства включает в себя стандартную чашу машины трения, в которой помещен образец - подшипник, удерживаемый кольцом - оправкой. Нормальная нагрузка на испытываемый образец - подшипник передается через нажимную оправку, совмещенную с цапгой шпинделя посредством переходного шара с отверстием и винтом с гайкой.

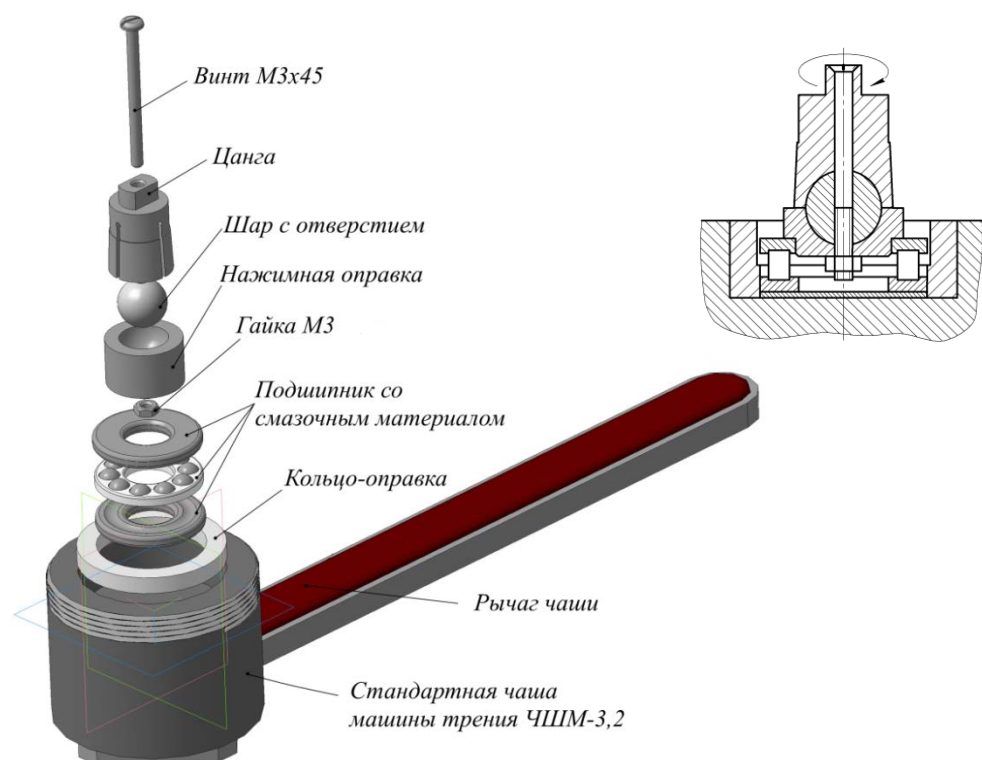


Рис. 2.14 Конструкция разработанной оснастки

Данная конструкция позволяет передавать нормальную нагрузку от стандартного механизма нагружения машины трения на испытываемый образец - подшипник, в качестве которого может быть шариковый, роликовый или игольчатый упорный подшипник.

Конструкция оснастки включает в себя стандартную чашу, в который помещен испытательный образец – подшипник, удерживаемый кольцом-оправкой. Нажимная оправка совмещена с цангой посредством шара с отверстием и винтом с гайкой.

В качестве образца для испытаний можно использовать подшипники шариковые 8102 (51102), игольчатые АХК 1528 и роликовые 9102 (81102) (см. рис. 2.15) из-за соответствия своих габаритных характеристик под стандартную испытательную чашу ЧШМ-3,2 и динамической грузоподъемности сопоставимой с максимальной нагрузкой развиваемой машиной трения.

Таблица 2.9 Технические характеристики подшипников

Параметр	Роликовые 9102 (81102)	Шариковые 8102 (51102)	Игольчатые АХК 1528
Диаметр отверстия тугого кольца, мм	15	15	15
Наружный диаметр свободного кольца, мм	28	28	28
Наружный диаметр тугого кольца, мм	28	28	28
Диаметр отверстия свободного кольца, мм	16	15,3	15,3
Высота подшипника, мм	9	9	4
Радиус монтажной фаски подшипника, мм	0,5	0,5	0,5
Динамическая грузоподъемность, Н	10400	9360	10400
Статическая грузоподъемность, Н	24500	13300	37500
Предельная частота вращения, при пластичном смазочном материале, об/мин	-	6300	3200
Предельная частота вращения, при жидком смазочном материале, об/мин	-	8500	4300



Рис. 2.15 Фотографии образцов – подшипников для испытаний смазочных материалов

Сбор данных в ходе испытания выполняется по следующему алгоритму: на машине трения выставляется требуемая нормальная нагрузка, которая приложена к образцу – подшипнику с испытуемым смазочным материалом; рычаг чаши 3 (см. рис. 2.16) соединяется тягой 2 с тензометрическим измерителем усилия 1; интерфейсные кабели термодатчика 5 и тензометрического измерителя усилия 1 соединяются с блоком сбора информации (АЦП) 6, далее приводится в действие механизм нагружения и включается электропривод вращения верхней нажимной оправки.

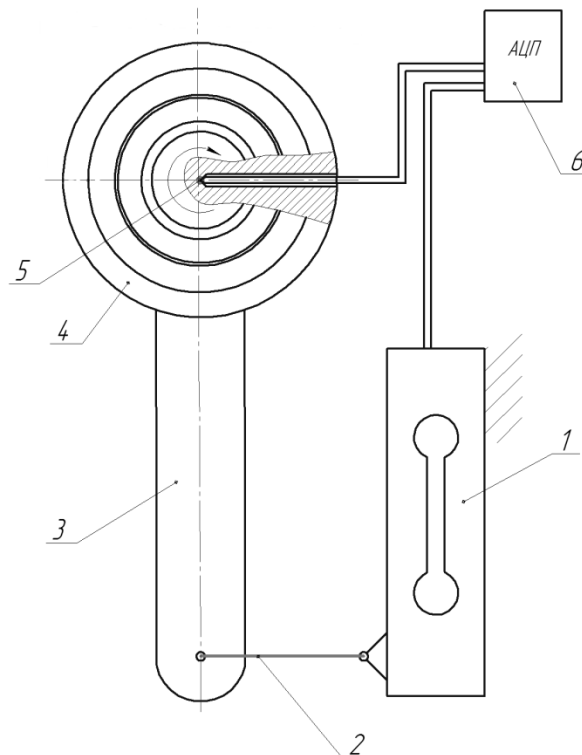


Рис. 2. 16 Компоновочная схема испытательного узла (вид сверху)

1- тензометрический измеритель усилия; 2 - тяга; 3 - рычаг чаши; 4 - стандартная чаша машины трения; 5 - термодатчик; 6 - блок сбора информации (аналогово-цифровой преобразователь(АЦП)).

2.4 Выводы по главе

В процессе разработки методики и алгоритма исследования влияния дисперсных частиц гидросиликатов магнезия на триботехнические характеристики консистентного смазочного материала выполнено:

- осуществлён выбор базового смазочных материалов (Литол-24);
- на основании предварительных исследований выполнено сравнение противоизносных свойств различных наполнителей;
- выбраны дисперсные наполнители на основе гидросиликатов магнезия (талькит и серпентинит);
- выбрано лабораторное оборудование для реализации исследований;
- разработана оснастка и методика испытаний КСМ при трении качении для роликовых, шариковых и игольчатых подшипников.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ ГИДРОСИЛИКАТОВ МАГНИЯ

Экспериментальные исследования влияния дисперсных добавок на основе гидросиликатов магния на триботехнические свойства консистентного смазочного материала осуществлялись в следующей последовательности:

1. Определялись противоизносные и противозадирные свойства КСМ, модифицированных дисперсными добавками талькита и серпентинита.
2. Определялось влияние КСМ с добавками гидросиликатов магния на трение и износ в подшипниках качения.
3. Определялось влияние дисперсного наполнителя на структуру и реологические свойства КСМ.
4. Оценивалось влияние фазового состава дисперсного наполнителя в составе КСМ на коррозионную стойкость и температуру каплепадения.

3.1 Оценка триботехнических свойств консистентных смазочных материалов, модифицированных дисперсными добавками гидросиликатов магния

3.1.1 Влияние концентрации и размера дисперсных частиц на триботехнические характеристики

Известно множество работ, посвященных исследованию влияния дисперсных частиц на триботехнические характеристики СМ [73-76]. В зависимости от природы дисперсного наполнителя и его размера частиц авторы указывают оптимальную концентрацию добавок в диапазоне от 1-30% по массе.

К триботехническим характеристикам смазочных материалов, согласно ГОСТ 30858-2003 [77] «Обеспечение износостойкости изделий. Триботехнические требования и показатели» относят:

- совместимость смазочных материалов - способность двух или нескольких смазочных материалов смешиваться между собой без ухудшения их эксплуатационных свойств и стабильности при хранении;
- консистенцию смазочного материала - способность пластичных смазочных материалов оказывать сопротивление деформации при внешнем воздействии;
- вязкость, определяющую возможность жидкого, полужидкого и полутвердого веществ оказывать сопротивление при трении;
- способность смазочного материала снижать износ и силу трения независимо от его вязкости.

Наиболее важным из перечисленных характеристик является способность СМ снижать износ (противоизносные свойства). Одним из основных факторов, влияющих на противоизносные свойства КСМ, является дисперсность и концентрация гидросиликатов. Для обоснования выбора оптимального размера и концентрации дисперсного наполнителя на основе гидросиликата магния в составе КСМ в данной работе были выполнены испытания противоизносных свойств и противозадирных свойств, несущей и предельной нагрузочной способности.

Определение противоизносных и противозадирных свойств, несущей и предельной нагрузочной способности КСМ осуществлялось на машине трения ЧШМ-3,2 (по методике, приведённой в разделе 2.3.5 данной работы).

Размеры и концентрации частиц модификаторов трения на основе гидросиликатов магния в исследуемых КСМ были выбраны в следующем диапазоне значений:

- 1) ряд размеров частиц: 0.1-0.2 мкм, 1мкм, 10мкм, 30мкм;
- 2) ряд концентраций частиц: 0.5%, 1%, 5%, 10% по масс.

По результатам триботехнических испытаний на машине трения ЧШМ-3,2 образцов СМ, модифицированных гидросиликатами магния различной концентрации и дисперсности, получены зависимости размера пятна износа (рис. 3.1) от концентрации дисперсного гидросиликата магния (рис.3.2).

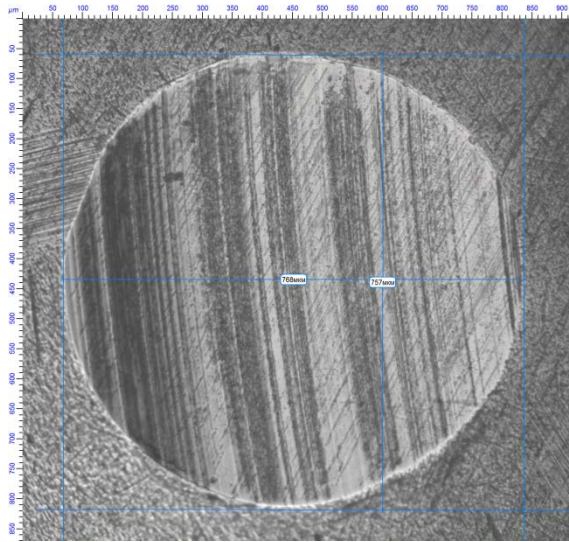


Рис. 3.1 Фотография пятна износа образца «шар»

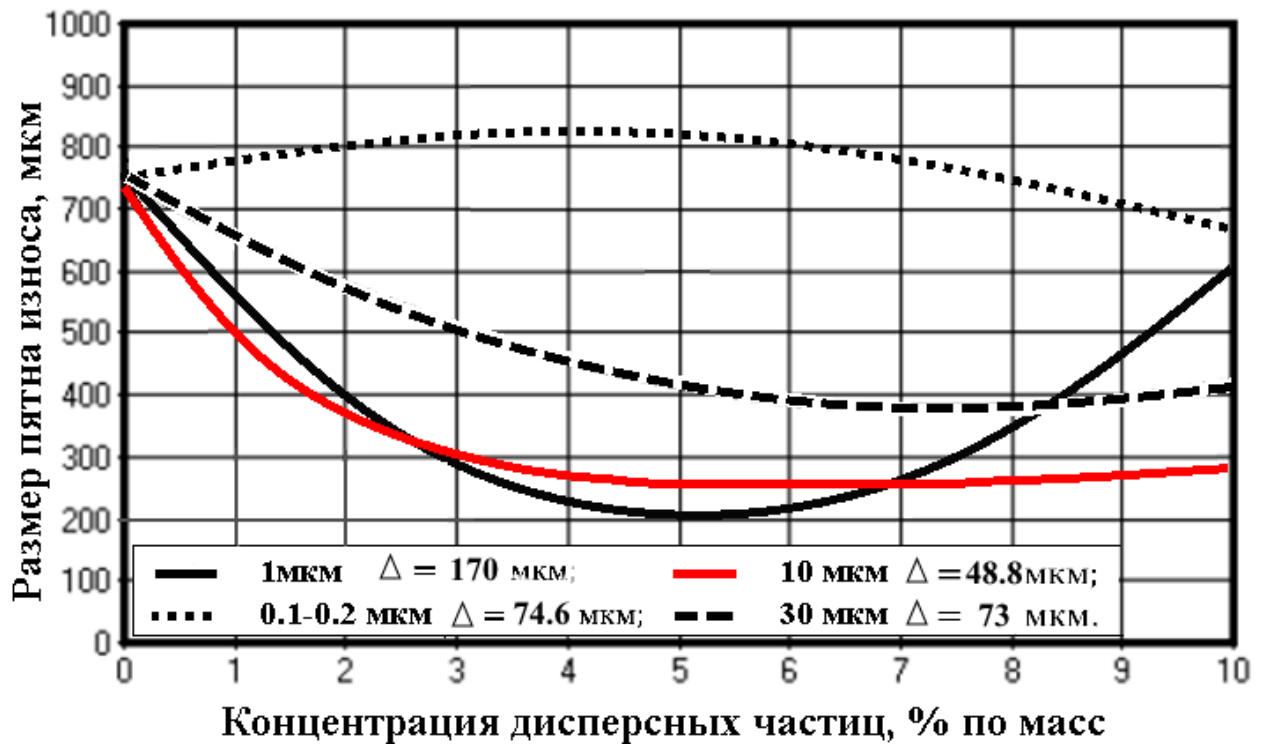


Рис.3.2 Влияние размера частиц модификатора на противоизносные свойства КСМ (Литол-24)

Для повышения достоверности полученных результатов эксперимента для каждой точки концентрации испытание проводилось не менее трех раз. На основе полученных зависимостей износа от концентрации производился расчет коэффициента вариации и доверительного интервала полученных значений по формулам, представленным ниже [78].

Среднеквадратичное отклонение:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n}} \quad (3.1)$$

где X – отдельные значения, $\bar{X}$ – среднее арифметическое по выборке, n – число выборок.

Коэффициент вариации:

$$V = \frac{s}{\bar{X}} \quad (3.2)$$

Абсолютная погрешность:

$$\Delta = s \cdot t \quad (3.3)$$

где t – коэффициент Стьюдента, учитывающий конечное число измерений n .

Результаты расчетов вероятностных показателей эксперимента сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 Вероятностные показатели эксперимента по определению износостойкости.

Параметр	0.1-0.2мкм	1мкм	10мкм	30мкм
S, мкм	35	79.8	22.9	34.3
V, %	4.4	37	8.9	8.7
Δ, мкм	74.6	170	48.8	73

Размеры и концентрации частиц гидросиликата оказывают существенное влияние на противоизносные свойства КСМ. Частицы размером 1 и 10 мкм начинают проявлять свои противоизносные свойства уже при малых концентрациях в КСМ, достигая оптимума при концентрации $\approx 5\%$ по массе.

Частицы размером 30 мкм имеют характер зависимости износостойкости от концентрации дисперсных частиц подобно частицам размером 10 мкм, однако, оптимальная концентрация в составе КСМ достигается в районе 7% масс. Величина износостойкости при данном размере частиц ниже, чем при 1 и 10 мкм.

Частицы ультродисперсного наполнителя (0.1-0.2 мкм) имеют отрицательную динамику по противоизносным свойствам. С увеличением

концентрации увеличивается износ, достигая своего максимального значения при концентрации $\approx 4\%$ масс, с последующим незначительным уменьшением.

Гидросиликат магния дисперсностью 10 мкм в широком диапазоне концентраций проявляется стабильность свойств, а при дисперсности 1 мкм противоизносная эффективность определяется узким диапазоном концентрации, следовательно, даже небольшое отклонение от процентного содержания приводит к ухудшению триботехнических характеристик.

Из таблицы 3.1 видно, что наибольший коэффициент вариации наблюдается у экспериментальных данных для КСМ, содержащего дисперсные частицы гидросиликата магния размером 1 мкм. Как известно, что, значение коэффициента вариации более 33% характеризует неоднородный процесс [78]. Вероятно, это связано с тем, что процентное содержание дисперсного модификатора в зоне трения может меняться во время работы трибоузла, что может быть причиной такого большого коэффициента вариации.

Приведенные на рис. 3.2 зависимости размера пятна износа ($d_{из}$) можно описать системой из двух уравнений, вида:

$$d_{из} = \begin{cases} k_1 \cdot C^{n_1}, \text{ при } C \geq C_{кр}; \\ k_2 \cdot C^{-n_2}, \text{ при } C \leq C_{кр}. \end{cases} \quad (3.4)$$

где k_1 , n_1 , k_2 , n_2 – коэффициенты, учитывающие кривизну зависимости размера дисперсных частиц от концентрации до критического значения концентрации ($C_{кр}$) и после, соответственно.

Таким образом, полученные результаты подтверждают гипотезу [79], в которой предполагают, что мелкие частицы геомодификатора с оптимальным размером 5-10 мкм в трибопарах измельчаются до 2 мкм, что соответствует оптимальной шероховатости поверхности и максимальной износостойкости сопряжения. С уменьшением размера частиц наполнителя увеличивается удельная поверхность и соответственно возрастает роль поверхностных явлений. В связи с этим частицы меньшего размера образуются конгломераты больших размеров и повреждают сопряженные поверхности пары трения.

Одной из самых распространённых причин преждевременного износа служат задиры. В подшипниках задиры могут возникать на поверхностях бортов и торцах роликов, на дорожках качения или посадочных поверхностях. Сильный задрин может вызвать значительные повреждения и обернуться преждевременной заменой подшипника.[80, 81]

Показателем, характеризующим способность смазки снижать вероятность образования задиров на металле в результате рабочего трения, является индекс задира. Индекс задира вычисляется на четырёхшариковой машине трения в результате оценки степени износа шариков от момента начальной нагрузки до нагрузки сваривания, характеризующей верхний предел работы смазки. Все показатели нормируются ГОСТом 9490-75.

Индекс задира (I_z), Н (кгс) рассчитывают по сумме условных нагрузок, согласно формуле:

$$I_z = \frac{\sum Q_i}{n} \quad (3.5)$$

где $\sum Q_i$ - сумма условных нагрузок по ряду 1 от начальной нагрузки до ближайшей нагрузки, предшествующей нагрузке сваривания; n - число определений по ряду 1.

Условную нагрузку (Q_i), Н (кгс), для каждой осевой нагрузки по ряду 1 вычисляют по формуле:

$$Q_i = P_i \cdot \frac{d_{\Gamma i}}{d_{\Pi i}} \quad (3.6)$$

где P_i - осевая нагрузка, Н (кгс), по ряду 1; $d_{\Gamma i}$ - диаметр зоны упругой деформации шариков по Герцу, мм, при нагрузке P_i , Н (кгс); $d_{\Pi i}$ - средний диаметр пятен износа нижних шариков, мм, при нагрузке P_i , Н (кгс).

Результаты расчета индекса задира для гидросиликата магния с разными концентрациями и размерами дисперсных частиц в КСМ представлены на рис. 3.3.

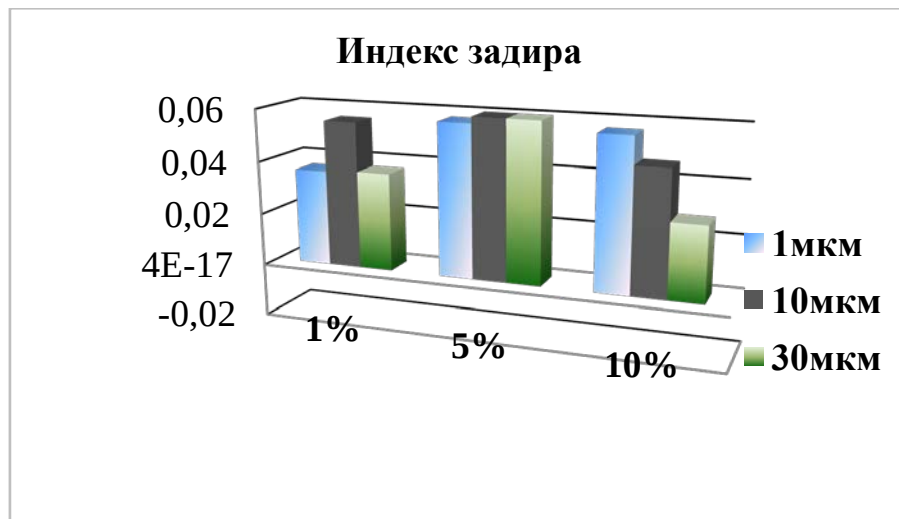


Рис.3.3 Индекс задира для КСМ с гидросиликатом магния разной дисперсности

Нагрузка сваривания, характеризующая предельную работоспособность СМ, определяется как наименьшая нагрузка, при которой произошла автоматическая остановка машины трения при достижении предельного момента трения (1180 ± 25) Н·см [$(120,0 \pm 2,5)$ кгс·см] или сваривание шариков. Для смазочных материалов, у которых сваривание не наблюдается и момент трения ниже предельного, за нагрузку сваривания принимают нагрузку, при которой образуется пятно износа средним диаметром 3 мм и более.[61]

Результаты оценки нагрузки сваривания для КСМ, содержащих гидросиликаты различной концентрации и дисперсности частиц представлены на рис.3.4

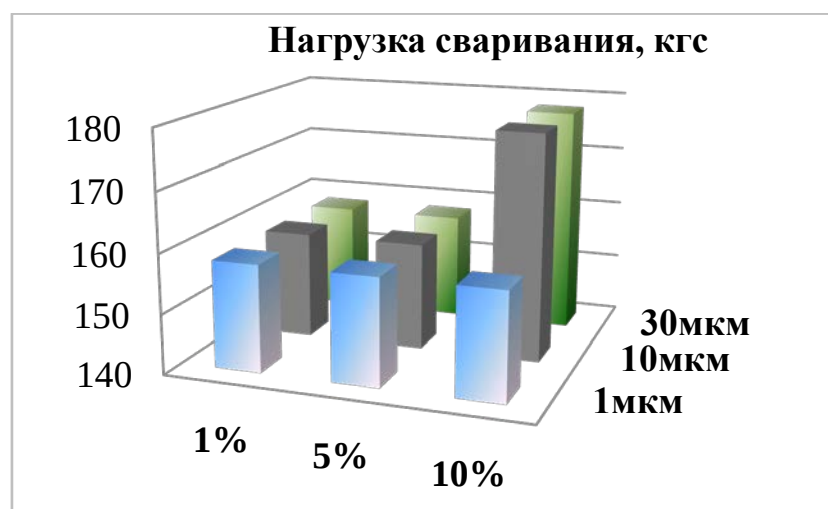


Рис.3.4 Нагрузка сваривания для КСМ с гидросиликатом магния разной дисперсности

На основании литературного обзора и полученных результатов для дальнейших исследований выбираем гидросиликаты магния дисперсностью 10 мкм и концентрации в составе КСМ (Литол-24) 5% по массе.

3.1.2 Влияние состава модификатора на противоизносные свойства КСМ

Для оценки химического состава выбранного класса модификатора трения был проведен фазовый анализ гидросиликатов магния. На рис. 3.5 представлен результат рентгенографических исследований фазового состава исходных дисперсных минералов.

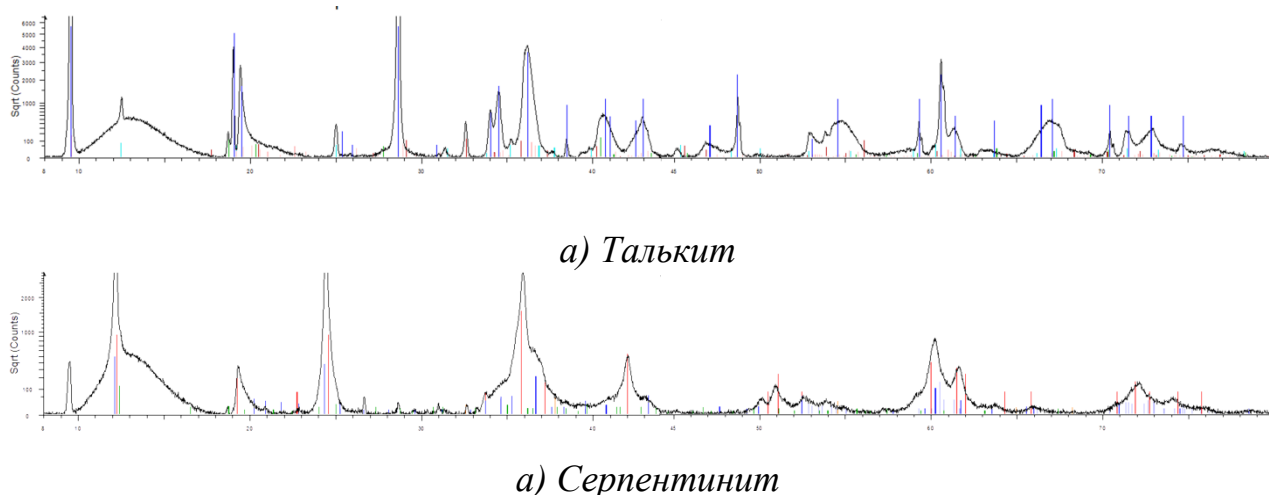


Рис. 3.5 Рентгенограммы порошков гидросиликатов магния

На основе анализа рентгенограмм на рис.3.5 составлена объединенная рентгенограмма фазового состава с выделенными рефлексами пиков, свойственным двум родственным гидросиликатам (см. рис. 3.6).

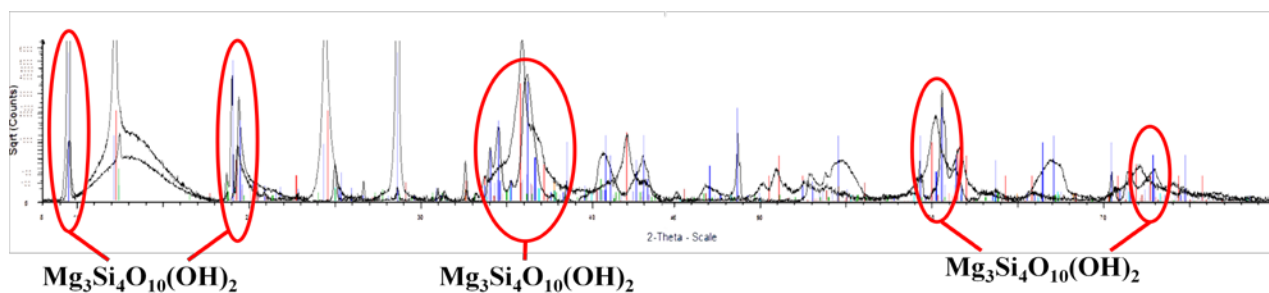


Рис. 3.6 Объединенная рентгенограмма фазового состава серпентинита и талькита

Так установлено, что выбранный серпентинит содержит в себе лизардит, тальк, оксид кальция и тетрагидроксоалюминат кальция. В состав талькита входят: тальк, гидроксид алюминия, клинохлор и андродит гидрированный. В таблице 3.2 представлены результаты процентного содержания фаз в исследуемых гидросиликатах магния.

Таблица 3.2 Содержание фазовых составляющих в исследуемых образцах гидросиликатов

Фазовые составляющие	%
$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	11,1
$(\text{Mg},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	62,6
$(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	19,5
$\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	4,9
CaO	1,6

Серпентинит

Фазовые составляющие	%
$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	95,6
$\text{Mg}_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	1,2
$\text{Al}(\text{OH})_3$	1,7
$\text{Ca}(\text{Fe}_{0,87}\text{Al}_{0,13})_2(\text{SiO}_4)_{1,65}(\text{OH})_{5,4}$	1,5

Талькит

Фазовый состав гидросиликатов определяет их морфологические особенности. Как видно из микрофотографий дисперсных частиц (см. рис. 3.7), талькит имеет листовые и чешуйчатые бесцветные с характерной прозрачностью агрегаты; дисперсные частицы серпентинита имеют характерный стеклянный блеск, пластинчатую форму с ровными надломами.



Рис. 3.7 Микрофотографии морфологических особенностей дисперсных частиц гидросиликатов магния (x400).

Для оценки противоизносных свойств в зависимости от химического состава были выполнены испытания на ЧШМ – 3,2 с размером дисперсных частиц 10 мкм. На рис. 3.8 представлены сравнительные результаты противоизносных свойств двух характерных родственных представителей класса гидросиликатов магния: талькиты и серпентиниты.

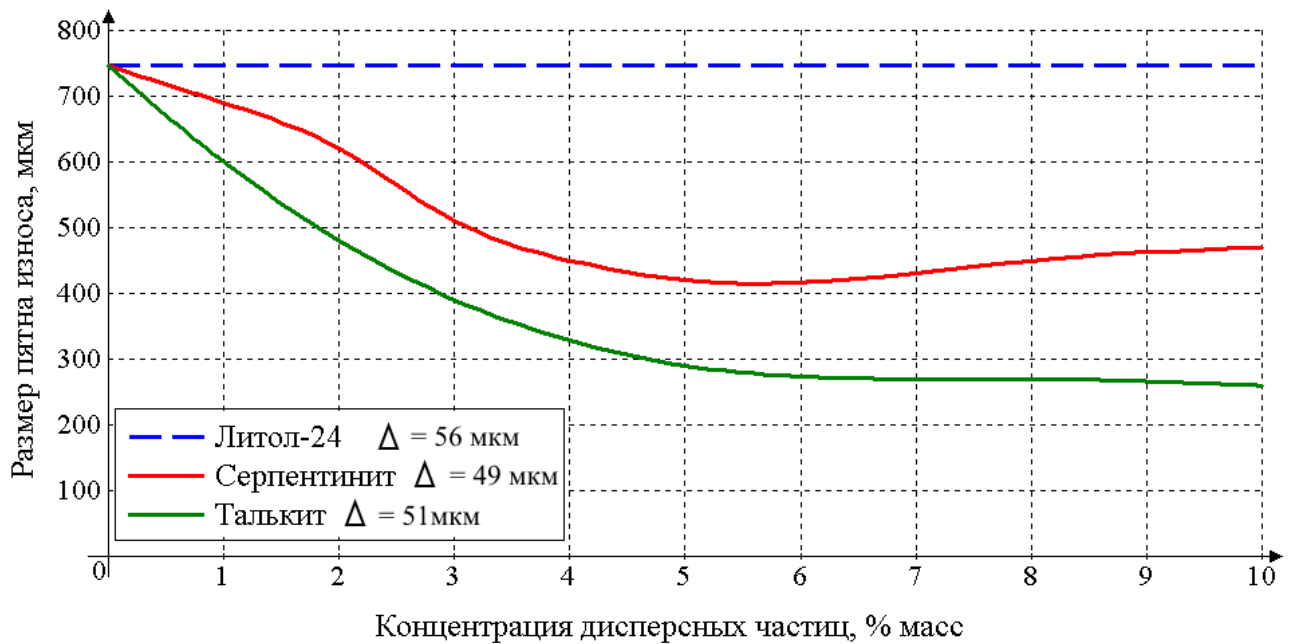


Рис.3.8 Влияние состава модификатора на противоизносные свойства КСМ (Литол-24)

С ростом концентрации добавки гидросиликата наблюдается резкое снижение размера пятна износа 1-6% по масс. Это свидетельствует об улучшении противоизносных свойств КСМ. Дальнейшее увеличение концентрации добавки с 6 до 10% не оказывает существенного влияния на величину размера пятна износа. Что хорошо согласуется с результатами исследований других авторов [73,76].

Результаты расчета индекса задира для различных гидросиликатов магния концентрацией 5% по масс. в КСМ представлены на рис. 3.9.

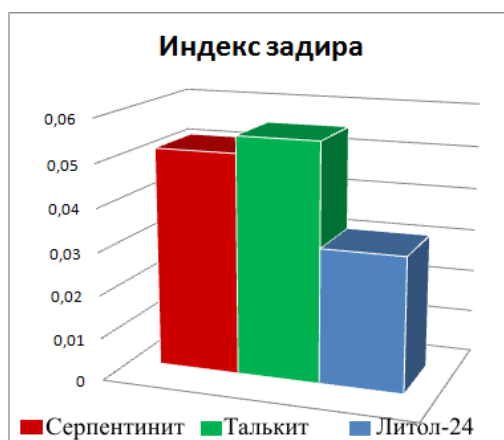


Рис. 3.9 Индекс задира КСМ с добавками

Наблюдается положительное влияние добавки на основе гидросиликатов магния. Оба наполнителя увеличивают индекс задира и повышают противоизносные свойства КСМ по сравнению с базовым смазочным материалом Литол-24 почти в 2 раза.

3.1.3 Смеси для оценки влияния состава гидросиликатов на противоизносные свойства Литол-24

Мономинералы в качестве модификаторов используются в чистом виде крайне редко, по причине высокой цены на очистку исходных пород. Для оценки влияния разных составляющих гидросиликатов были созданы различные смеси родственных гидросиликатов (серпентиниты и талькиты).

Результаты испытаний противоизносных свойств КСМ с добавкой 5% по массе смеси частиц талькита и серпентинита в различных пропорциях показаны на рис. 3.10.

Из построенного графика видно, что при приращении концентрации талькита в смеси до $\approx 45\%$ по массе происходит рост пятна износа шариков и при данном соотношении концентраций (45/55) достигает максимального значения. В итоге максимальный износ при использовании КСМ со смесью превышает износ при использовании КСМ только с серпентинитом на $\approx 20\%$. При увеличении концентрации талькита $\approx 45\%$ износ начинает снижаться. Обнаружено, что в случае соотношения талькита и серпентинита в смеси (58/42)% диаметр пятна износа аналогичен КСМ со 100% серпентинита. С дальнейшим приращением концентрации талькита в смеси происходит резкое снижение износа до концентрации талькита в смеси $\approx 70\%$, после чего износ снижается, но в меньшей степени и достигает своего минимального значения при использовании 100% талькита в смеси.

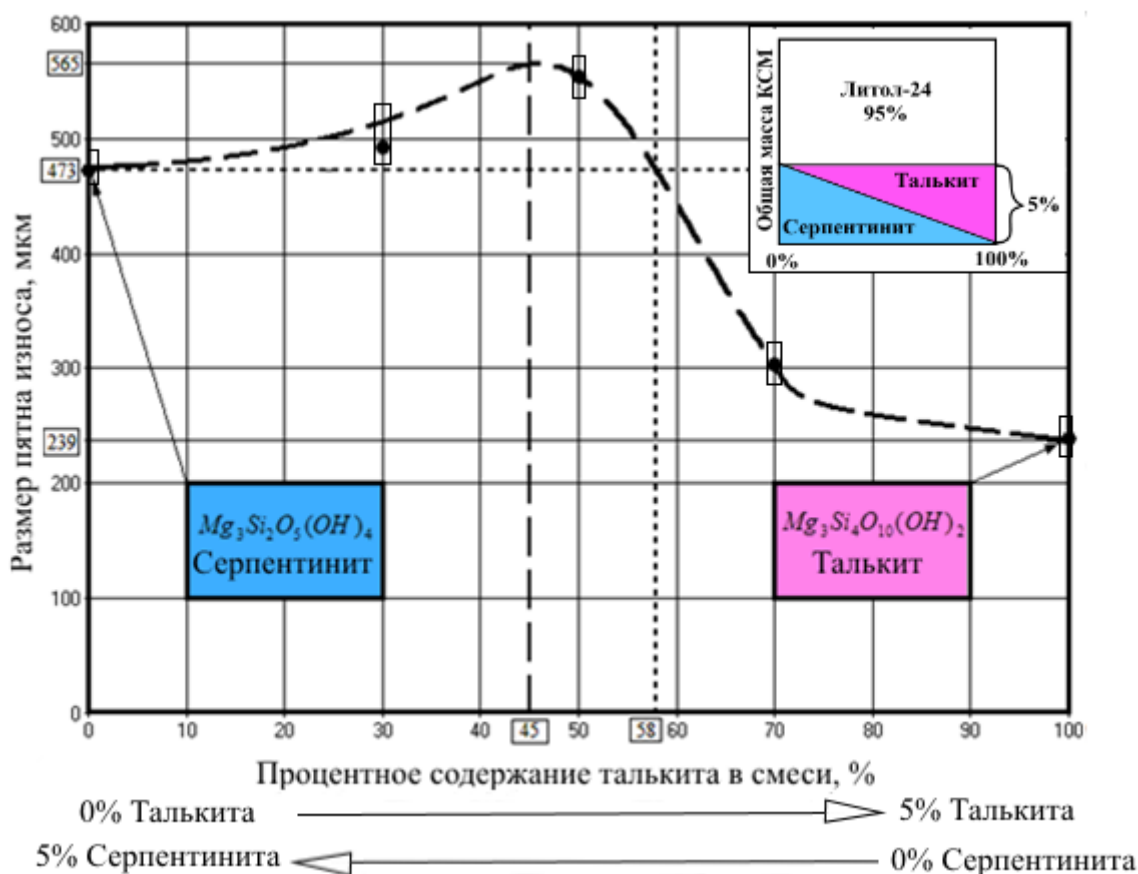


Рис.3.10 График зависимости диаметра пятна износа от процентного содержания талькита в смеси «талькит-серпентинит»

При различных пропорциональных соотношениях гидросиликатов магния в смеси наблюдается положительное противоизносное действие в составе КСМ. Однако, наиболее эффективным является использование гидросиликатов магния класса талькитов. Можно предположить, что данное поведение смесей гидросиликатов обусловлено разным комплексным механизмом противоизносного действия и при приблизительно равном соотношении наблюдается максимальная конкуренция этих двух механизмов действия, приводящая к уменьшению износостойких свойств.[82, 83]

3.1.4 Исследование эффективности консистентного смазочного материала, содержащего дисперсные добавки гидросиликатов магния в подшипнике качения

Для испытаний на несущую способность и противозадирные свойства пластичного смазочного материала используется машины трения ЧШМ-3,2. Четырехшариковая машина трения (ГОСТ 9490-75) предоставляет возможность

испытаний только трения скольжения, когда в реальном узле трения, например, в подшипнике качения, преимущественно возникает трение качения в сочетании с трением скольжения между сепаратором и телами качения. В рамках данной работы была разработана оснастка для проведения испытаний соответствующих реальному виду трения в подшипниках качения (см. п. 2.3.5). Продолжительность каждого испытания составила 60 минут, нагрузка – 1002 кгс.

Также до и после испытания проводились измерения профилей шероховатости поверхностей роликовых подшипников с помощью профилометра Mahr MARSURF PS1 (см. п. 2.3.4). Типовые примеры профиля поверхности до и после испытания КСМ с дисперсными частицами представлены на рис. 3.11., а сводные параметры результатов анализа таких профилограмм представлены на рис. 3.13.



Рис. 3.11 Характерные профилограммы до (а) и после (б) испытания КСМ с дисперсными частицами гидросиликата магния

Важной характеристикой поверхности является график смятия профиля (кривая Аббота) рис. 3.12. Она образуется путем регистрации составляющих элементов профиля по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [71] в зависимости от обработки резанием и модификации профиля поверхности в результате контактного взаимодействия трущихся поверхностей.

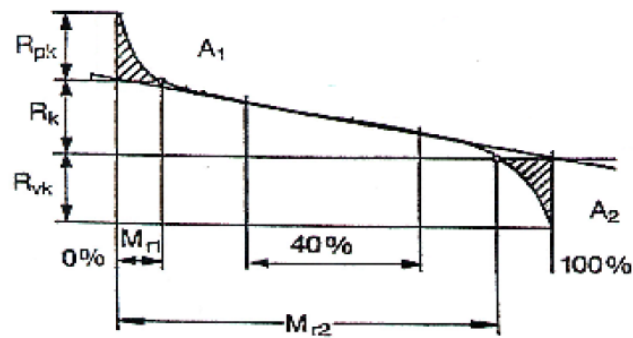


Рис.3.12 График смятия профиля (кривая Аббота)

где R_a – среднее арифметическое отклонение; R_t – общая высота профиля; R_z – максимальная высота профиля; R_p – максимальная длина профиля; R_v – максимальная глубина впадины; M_{r1} и M_{r2} (в %) определяют точки пересечения кривой Аббота с верхней и нижней границами сердцевины шероховатости профиля.

Для оценки маслосодержащих свойств поверхности используется параметр объема канавок V_o . Оценка этого параметра производится по формуле [84] :

$$V_o = \frac{R_v \cdot (100 - M_{r2})}{200} \quad (3.7)$$

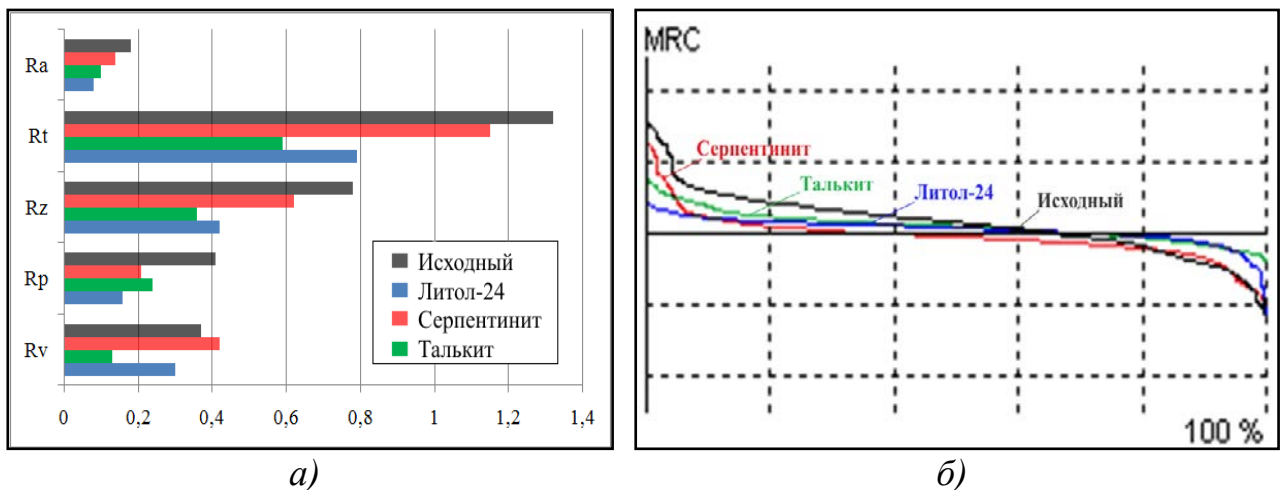


Рис.3.13 Параметры профиля поверхности (а) и график смятия профиля (кривая Аббота) (б)

На основе анализа профиля поверхности видно, что у КСМ с дисперсными добавками талькита уменьшились показатели впадин и вершин, что может быть причиной заполнения микронеровностей частицами талькита. В случае использования КСМ с дисперсным серпентинитом размеры впадин

увеличились значительно, что может быть обусловлено шаржирующим действием частиц серпентинита.

На рис.3.14 и рис.3.15 представлены результаты испытаний на роликовом подшипнике КСМ с 5% масс гидросиликатов магния дисперсностью 10мкм.

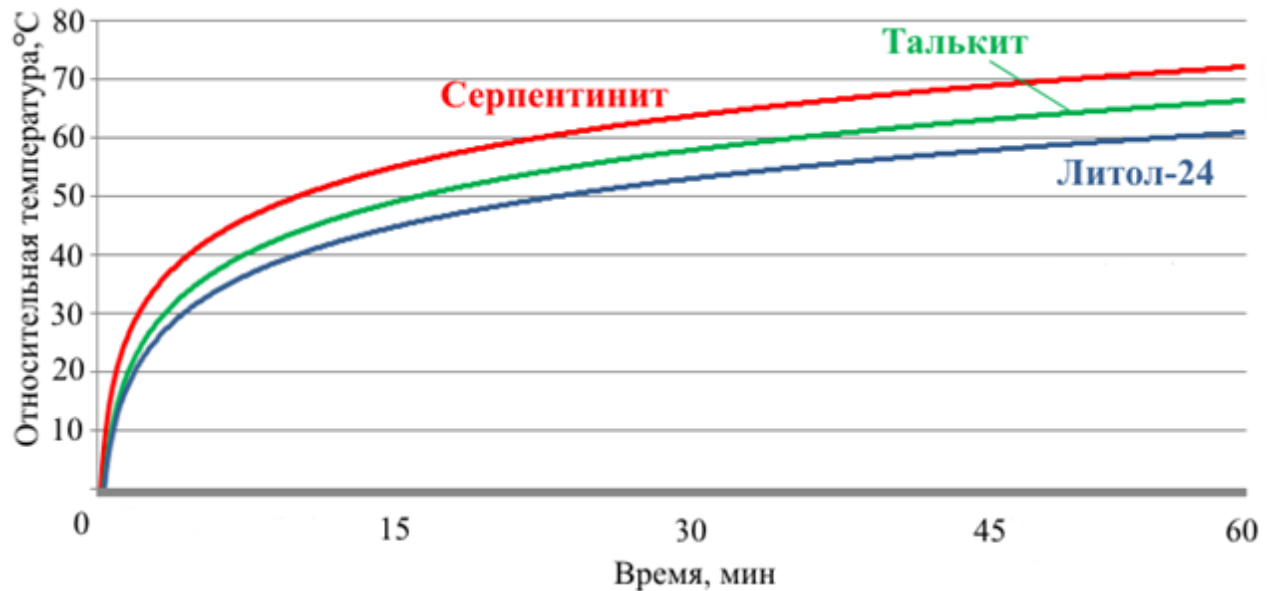


Рис.3.14 Сводная диаграмма изменения температуры в подшипнике с испытуемым КСМ

Рост температуры трущихся поверхностей вызывает повышение химической активности металлов. Происходит более интенсивное их окисление и образование пленок окислов, замедляющих развитие процесса схватывания [80] и наблюдается снижение момента трения.

Из проведенного исследования видно, что при добавлении гидросиликатов магния в КСМ момент трения уменьшается с повышением температуры смазочного материала в процессе трения. Аналогичный результат был получен в работе [81], когда проводились исследования с шариковыми подшипниками на машине трения, где сочетались качение и скольжение и таким образом воспроизводились условия работы зубчатых передач.

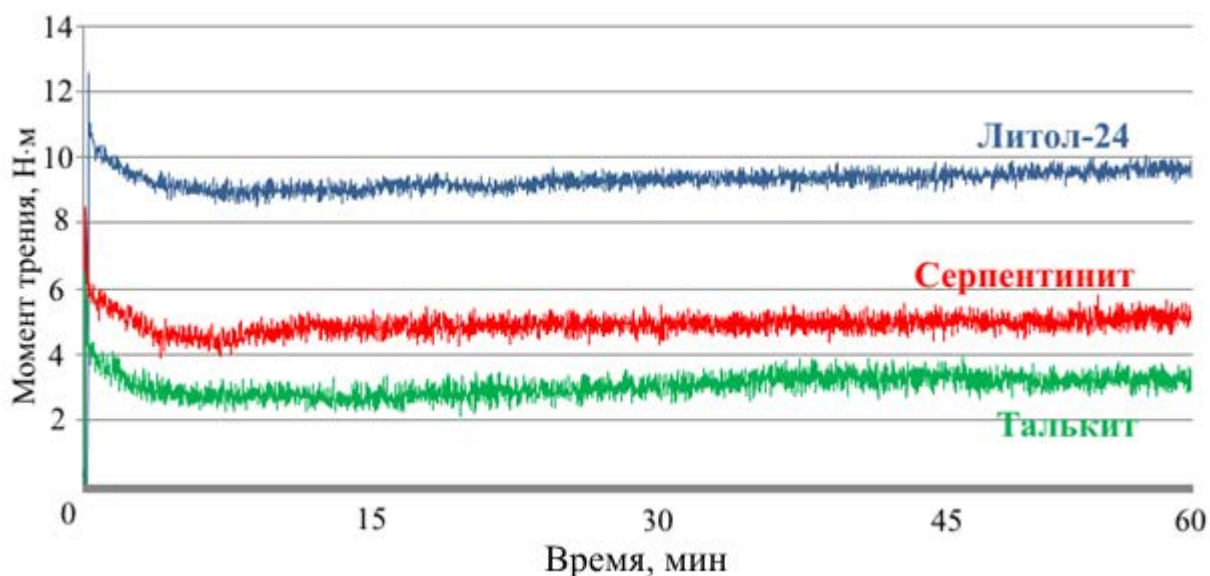


Рис.3.15 Сводная диаграмма изменения момента трения в подшипнике с испытываемым КСМ

На сводных диаграммах видно, что КСМ, содержащий дисперсные добавки гидросиликатов магния концентрацией 5% по масс. и дисперсностью 10мкм, показывает наименьший момент трения (рис. 3.14) с незначительным увеличением температур относительно базового СМ Литол-24 (рис. 3.15).

Энергетические потери в подшипниках складываются в основном из потерь на трение, возникающих вследствие проскальзывания в местах контакта тел качения с кольцами и сепаратором и механических потерь в смазочном материале. Переходя в теплоту, эти потери вызывают повышение температуры подшипниковых узлов. Они не являются постоянными во времени и определяются конструкцией подшипника, режимами его работы и смазки. Мощность, расходуемая на преодоление трения в подшипнике определяется по формуле [85]:

$$P_{\text{тр}} = 0,10477 \cdot T_{\text{тр}} \cdot n \quad (3.8)$$

где $T_{\text{тр}}$ - момент трения; n - частота вращения.

При подстановке данных из эксперимента получим значение мощности для подшипников, работающих с различными испытываемыми КСМ, результаты представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Мощность, расходуемая на преодоление трения в подшипнике

КСМ	Мощность, $P_{тр}$ (Вт)
Литол-24	1529,6
Литол-24 + 5% серпентинит	917,8
Литол-24+ 5% талькит	611,9

В рамках данной работы особый интерес представляет составляющая момента трения, обусловленная потерями в смазочном материале:

$$T_{см} = 0,979 \cdot 10^{-10} \cdot f_{см} \cdot (\nu \cdot n)^{2/3} \cdot D_{pw}^3 \quad (3.9)$$

где ν - кинематическая вязкость смазочного материала; D_{pw} - диаметр окружности, проходящей по центрам тел качения; $f_{см}$ - коэффициент, зависящий от типа подшипника и способа смазывания (для роликового подшипника $f_{см}=3$).

Таким образом, при использовании КСМ с серпентинитом мощность, затрачиваемая на преодоление трения в подшипнике качения по сравнению с базовым КСМ меньше на ~ 40%, а КСМ с талькитом на ~ 60%.

Произведя расчет момента трения подшипника качения для каждого КСМ, получим, что КСМ, содержащий дисперсные добавки серпентинита и талькита снижают момент трения на 11% и 17% относительно базового смазочного материала, соответственно.

Так же следует отметить, что момент страгивания (соответствующий максимальному усилию сопротивления движению трущихся поверхностей, обусловленному совокупностью сил необходимых на разрушение структурных каркасов КСМ, силе трения поверхностей без смазочной пленки, приработки неровностей поверхностей и т.д.) у КСМ, модифицированных дисперсными добавками, значительно меньше, чем у базового смазочного материала. Данное явление вероятно можно объяснить изменением структуры СМ. Для обоснования этого предположения, необходимо исследовать структурные изменения в СМ при введении дисперсных добавок и выявить характерные особенности взаимосвязи реологических и эксплуатационных свойств.

3.2 Структура консистентного смазочного материала

На основании анализа фотографий структурных каркасов (рис.3.16), полученных с оптического микроскопа, можно отметить, что базовый КСМ имеет самые большие ячейки структурного каркаса с тонкими границами загустителя. При добавлении дисперсного наполнителя наблюдается уменьшение размеров ячеек, и увеличение границ их раздела, представляющих мелкоячеистую структуру загустителя и базового масла. Однако, в зависимости от типа дисперсного наполнителя (гидросиликата магния) мелкоячеистая структура имеет различие, заключающееся в размере и количестве ячеек. Данное наблюдение соответствует концентрации дисперсных частиц в количестве 5% масс.

С дальнейшим увеличением концентрации дисперсного наполнителя наблюдается тенденция к уменьшению размеров структурных каркасов вне зависимости от типа наполнителя и при концентрации ~20%масс. признаков различия структурных каркасов не выявляется. При данной концентрации превалирует мелкоячеистая плотная структура, состоящая из малых объемов базового масла, оконтурованных широкими прослойками загустителя.

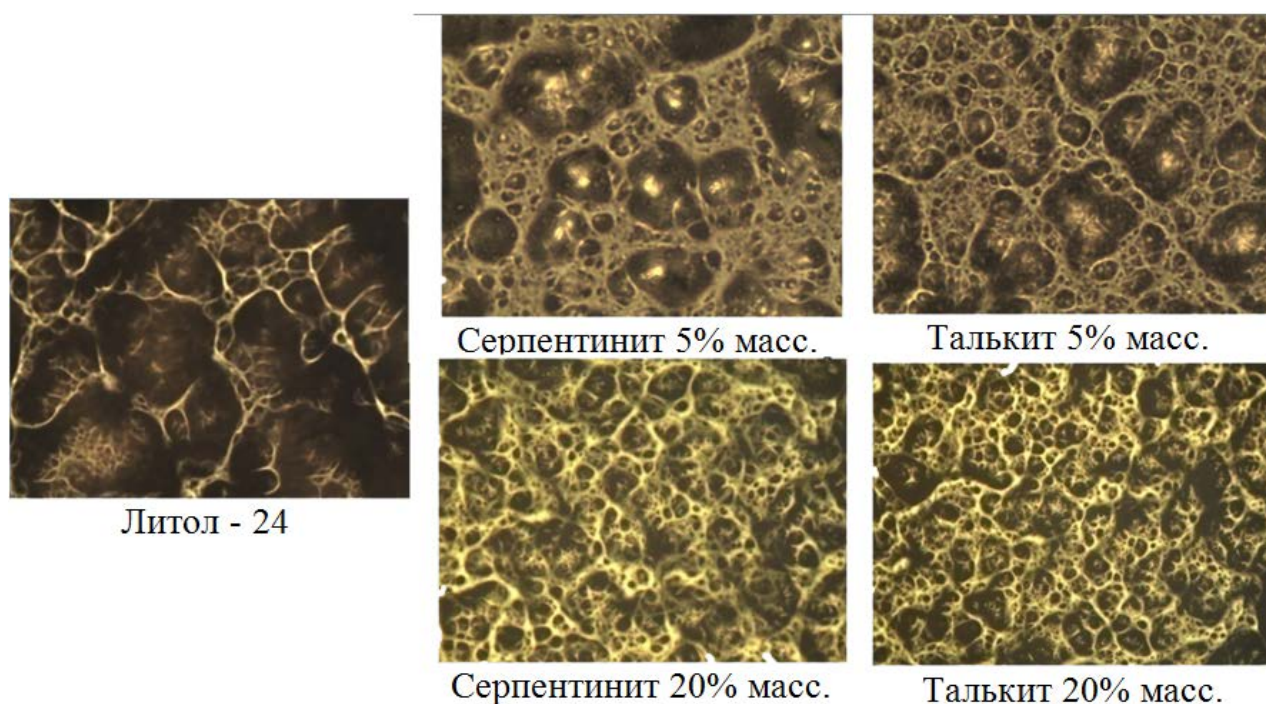


Рис. 3.16 Изменение структуры консистентного смазочного материала в зависимости от концентрации дисперсных частиц

На основании фотографий структурных каркасов, полученных с оптического микроскопа, выполнен анализ изображений с помощью программного анализатора Thixomet, определено распределение структурных составляющих каркаса КСМ определены средние размеры ячеек каркасов. Результаты измерений представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 Средний размер единичной ячейки структурного каркаса КСМ

Средний размер ячейки каркаса КСМ, мкм						
Литол-24	Серп.5%	Серп.10%	Серп.20%	Тальк5%	Тальк10%	Тальк20%
631	418	270	150	360	268	147

При повышении концентрации дисперсных частиц свыше известного порога (в нашем случае около 20% масс и выше) дисперсный наполнитель будет выступать в качестве загустителя, тем самым ухудшая триботехнические характеристики КСМ.

При введении дисперсных добавок в КСМ происходит перераспределение структурных связей и изменение структурных каркасов. В некоторых случаях это может привести к разрыву связей и дроблению первичных структурных элементов. Это вызывает изменение прочностных свойств смазочного материала и, соответственно, механической стабильности.

3.3 Реологические свойства модифицированных консистентных смазочных материалов

3.3.1 Вязкость и предел текучести КСМ

В рамках данной работы экспериментально установлено воздействие дисперсного наполнителя на основе гидросиликатов магния (серпентинит и талькит) на структурный каркас смазочного материала и изменение вязкости при динамическом воздействии. На основании ранее проведенных исследований [86, 87] было установлено, что противоизносные свойства проявляются наиболее эффективно в КСМ при введении добавок на основе гидросиликатов магния при размере дисперсных частиц 10-15мкм и

концентрации около 5%. Для данных составов проведены реологические исследования на ротационном вязкозиметре Brookfield DV2T.

Результаты исследования вязкости базового КСМ и КСМ с дисперсными добавками гидросиликатов магния представлены на рис.3.17.

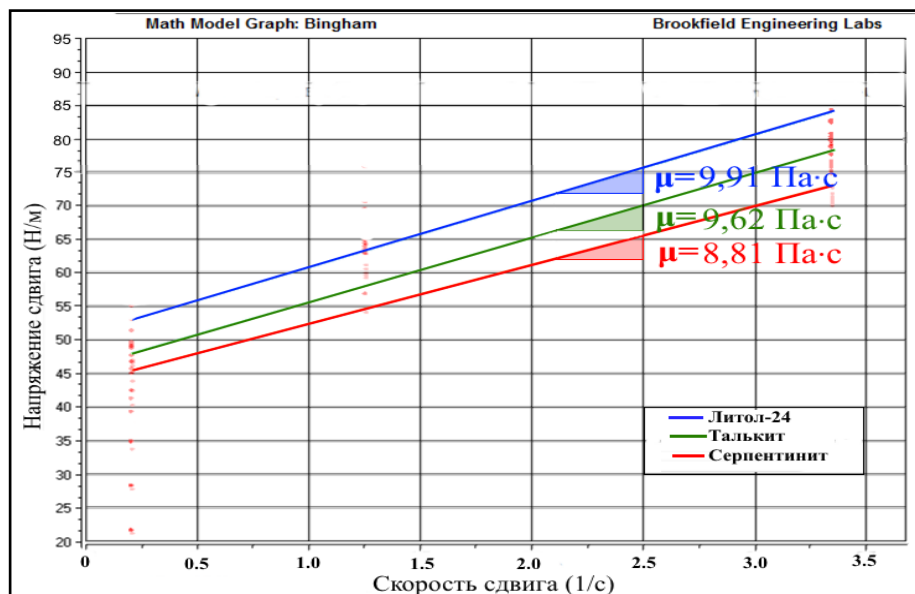


Рис. 3.17 Сводный график мат.модели Бингама для базового КСМ и с 5% по масс. добавками гидросиликатов магния

На рис. 3.17 наблюдается уменьшение вязкости при введении в Литол-24 дисперсных добавок на основе талькита и серпентинита на 3% и 11% соответственно. Так же следует отметить понижение величины предела текучести для КСМ с дисперсными добавками гидросиликатов магния.

Можно предположить, что по мере роста напряжения сдвига, дисперсные частицы гидросиликатов ориентируются перпендикулярно поверхности трения. Движение частиц в потоке смазочного материала становится упорядоченным, что ведет к уменьшению вязкости.

Далее проводились исследования динамики изменения вязкости от концентрации дисперсного наполнителя в диапазоне от 0 до 20%. На основании полученных данных построены зависимости вязкости Литол-24 от концентрации дисперсного наполнителя (рис.3.18) и от скорости сдвигового воздействия (рис. 3.19).

Следует отметить, что зависимость вязкости от концентрации имеет характерный перегиб, соответствующий концентрации 5% по массе, что

хорошо согласуется с литературными источниками, описывающими положительное влияние данной концентрации на триботехнические характеристики в консистентных смазочных материалах [86 - 89]. Можно предположить, что данная концентрация является оптимальным соотношением для взаимодействия частиц загустителя с частицами наполнителя.

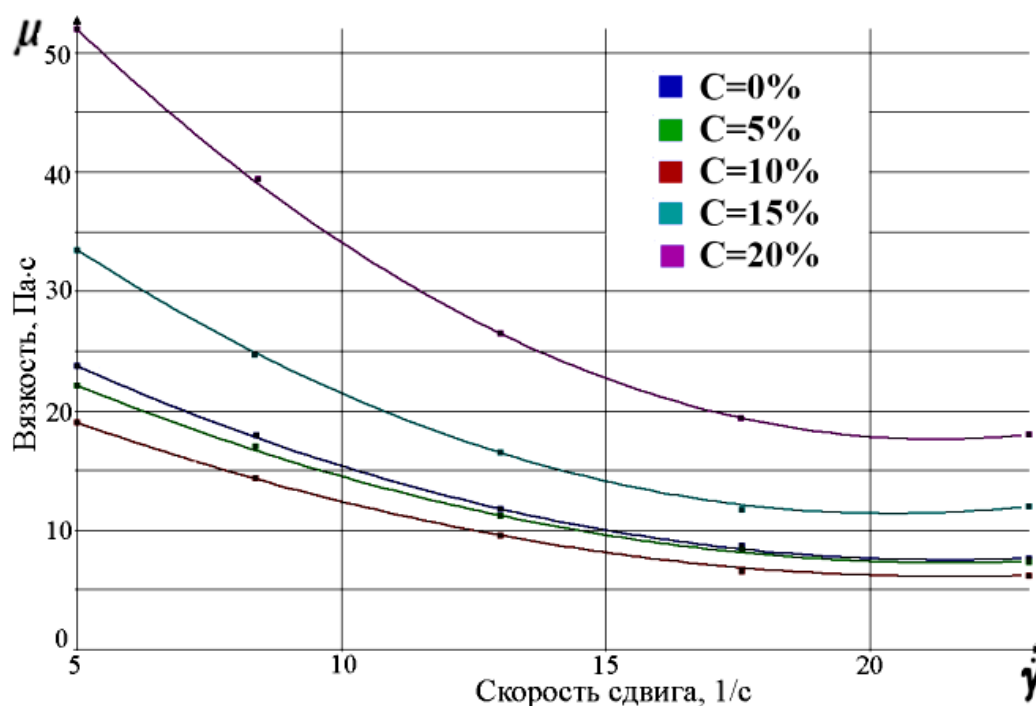


Рис.3.18 Зависимость вязкости Литол-24 от скорости сдвига

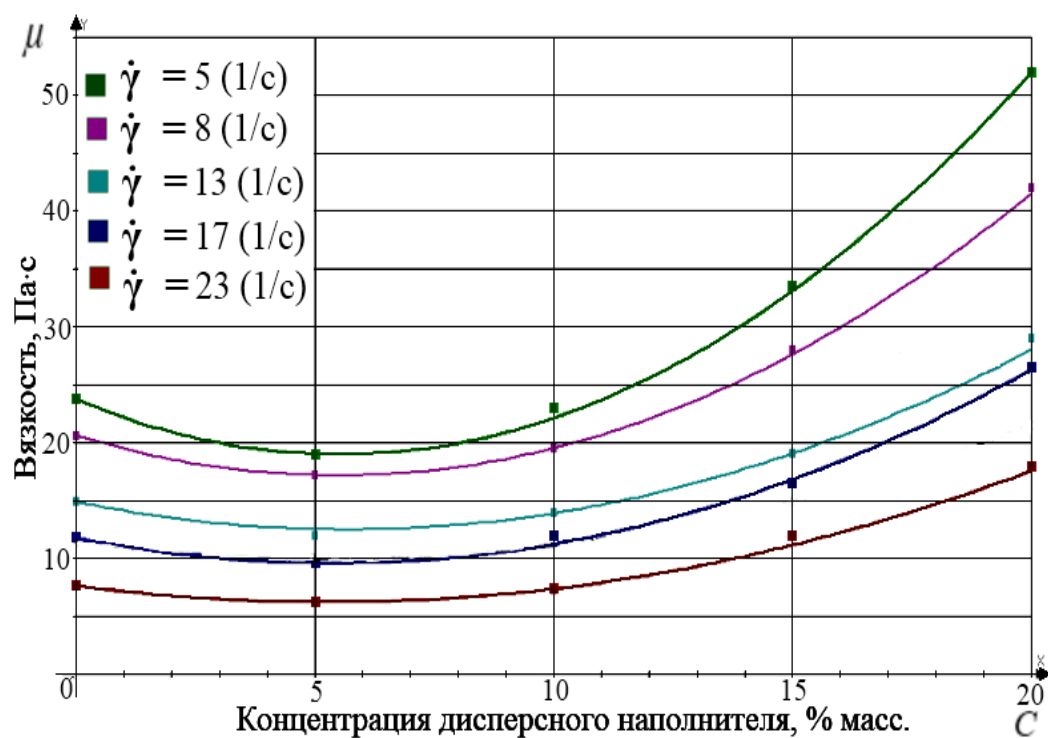


Рис.3.19 Зависимость вязкости Литол-24 от концентрации частиц

На основании этих экспериментальных данных были составлены аппроксимационные уравнения полиномов вязкости от скорости воздействия ($\dot{\gamma}$) и от концентрации (C).

Для вязкости КСМ от скорости воздействия:

$$\begin{aligned}\mu_1(\dot{\gamma}) &= 0.06 \cdot \dot{\gamma}^2 - 2.57 \cdot \dot{\gamma} + 35.13 \\ \mu_2(\dot{\gamma}) &= 0.047 \cdot \dot{\gamma}^2 - 2.03 \cdot \dot{\gamma} + 27.99 \\ \mu_3(\dot{\gamma}) &= 0.054 \cdot \dot{\gamma}^2 - 2.34 \cdot \dot{\gamma} + 32.49\end{aligned}\quad (3.10)$$

Для вязкости КСМ от концентрации дисперсной добавки:

$$\begin{aligned}\mu_1(C) &:= 0.162 \cdot C^2 - 1.861 \cdot C + 23.76 \\ \mu_2(C) &:= 0.08 \cdot C^2 - 0.87 \cdot C + 11.8 \\ \mu_3(C) &:= 0.05 \cdot C^2 - 0.47 \cdot C + 7.64\end{aligned}\quad (3.11)$$

Для наглядности результаты зависимости вязкости от концентрации и скорости сдвига можно представить в виде трехмерной поверхности (рис.3.20), описываемой параметрическим уравнением (3.12).

$$\mu = \mu_1(C) \cdot \mu_1(\dot{\gamma}) + \mu_2(C) \cdot \mu_2(\dot{\gamma}) + \mu_3(C) \cdot \mu_3(\dot{\gamma}) \quad (3.12)$$

Частным случаем решения уравнения (3.12) является матрица значений результатов вязкости W (3.13), полученная для серии точек значений скорости сдвига и концентрации дисперсной добавки. Такую матрицу значений удобно использовать в дальнейших расчетах.

$$W = \begin{pmatrix} 23.76 & 19.02 & 22.14 & 33.5 & 52 \\ 11.8 & 9.56 & 11.23 & 16.5 & 26.5 \\ 7.64 & 6.19 & 7.36 & 12.0 & 18.0 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Для n значений аппроксимационных кривых вязкости от концентрации и скорости сдвига в общем виде можно представить уравнением вида:

$$\mu = \sum_{n=1}^n \mu_n(C) \cdot \mu_n(\dot{\gamma}) \quad (3.14)$$

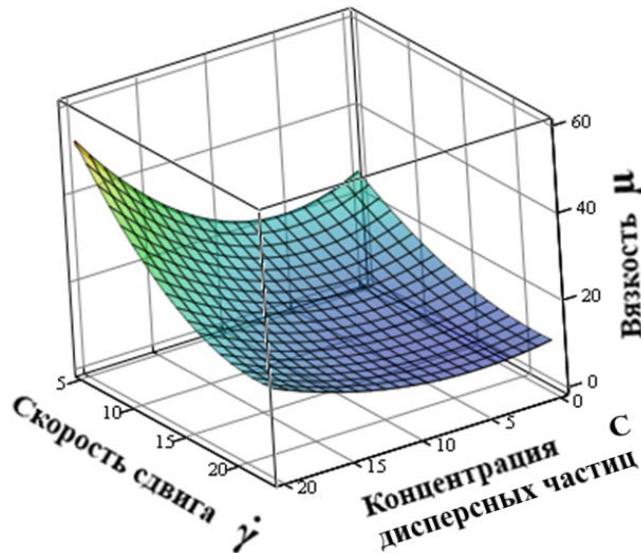


Рис.3.20 Зависимость вязкости КСМ от скорости сдвига и концентрации дисперсных частиц

Существует общая закономерность, что для всех КСМ есть такая минимальная вязкость, которая будет достигаться при определенной скорости сдвига за счет структурных изменений СМ. Такие (оптимальные с точки зрения триботехнических характеристик) структурные изменения можно обеспечить оптимизацией концентрации дисперсных добавок в КСМ.

3.3.2 Тиксотропные свойства консистентного смазочного материала

Одна из особенностей консистентных смазочных материалов – тиксотропность, то есть способность дисперсной системы к самопроизвольному восстановлению механически разрушенных структурных связей между частицами загустителя. Тиксотропные свойства зависят не только от химического состава и физических свойств жидкого масла и загустителя, входящих в состав КСМ, но и от природы и набора свойств дисперсных добавок (физико-химические и поверхностно-энергетические свойства), а также от подводимой и отводимой энергии к системе. [90]

С помощью серии испытаний КСМ на ротационном вискозиметре через фиксированные промежутки времени, после механического воздействия, производились измерения вязкости до её полного восстановления, соответствующего исходному значению. Далее полученные результаты

вязкости, обрабатывались в программном обеспечении Rheocalc T, с применением математической модели Bingham.

Полученные модели изменения вязкости во времени после механического воздействия, демонстрирующая тиксотропные свойства консиститентного смазочного материала Литол-24 представлена на рис.3.21 и модифицированным дисперсными добавками серпентинитом рис. 3.22а и талькитом рис. 3.22б. (дисперсность 10мкм, концентрация 5% по масс.).

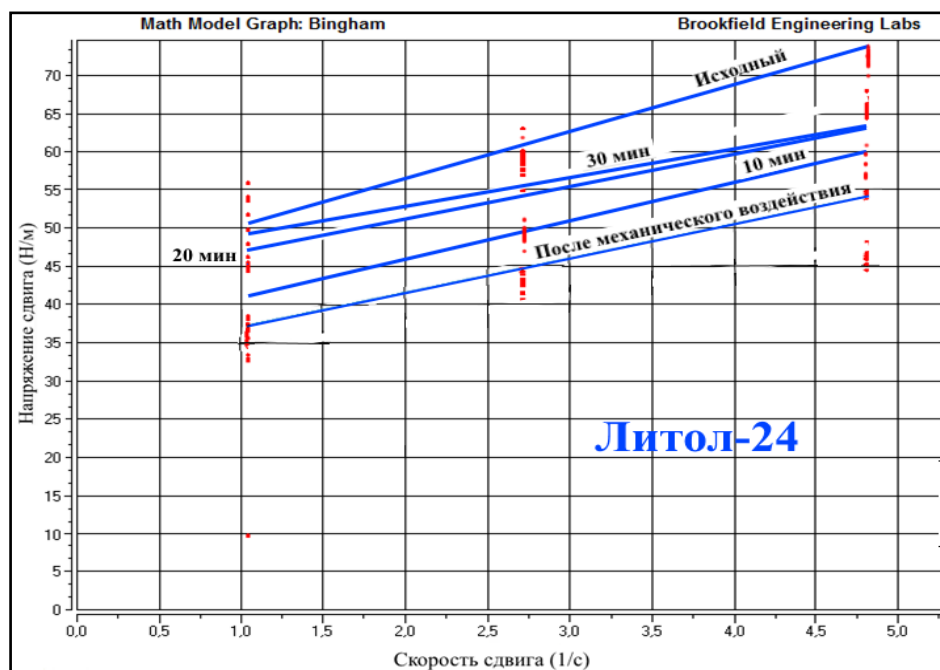


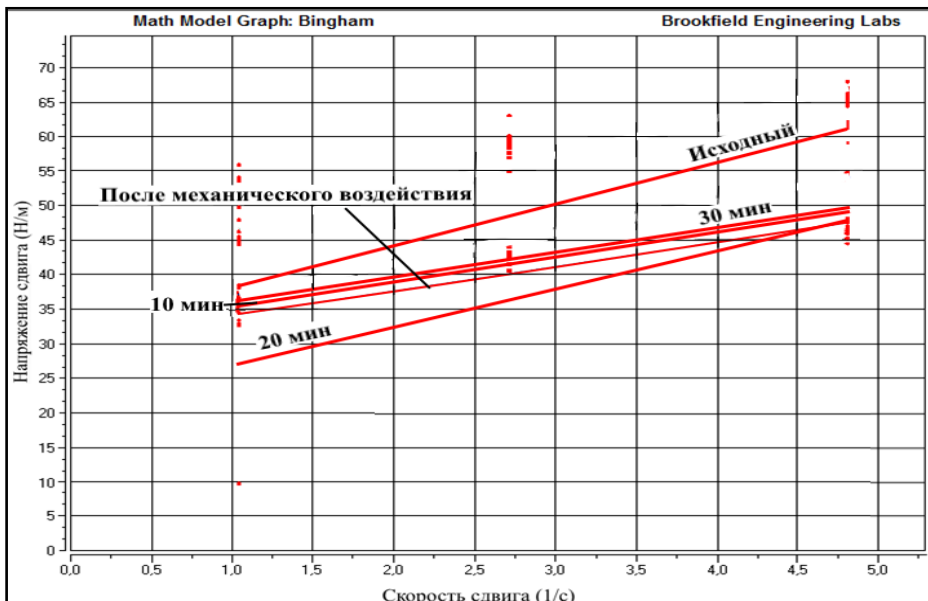
Рис.3.21 Тиксотропные свойства базового КСМ Литол-24 (общее время восстановления 40 мин)

Видно, что дисперсные добавки влияют на тиксотропные свойства. КСМ. КСМ содержащий дисперсные частицы серпентинита проявляет тиксостабильные свойства (затратив на обратное восстановление своей структуры наименьшее время). КСМ с дисперсными добавками талькитов проявил тиксолабильные свойства (быстро разрушается и медленно восстанавливается).

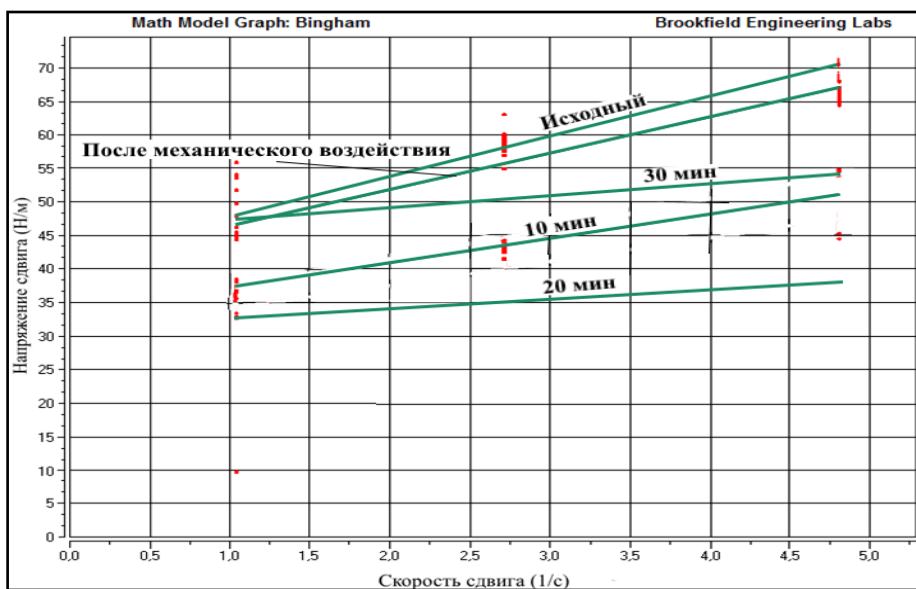
В структурном каркасе КСМ дисперсные добавки подвержены взаимодействию различных сил. При внешнем механическом воздействии превышающим предел прочности КСМ будут разрушаться связи, вызванные этими силами, притом вначале слабые, а затем более сильные. С

энергетической точки зрения наиболее выгодно вначале восстанавливаться более слабым связям, т.к. они требуют меньше энергетических затрат [90].

Можно предположить, что дисперсные добавки на основе серпентинитов обладают более слабыми связями со структурой, так как время восстановления первоначальных свойств после механического воздействия у них значительно меньше, чем у дисперсных добавок на основе тальцитов. Вероятно, данное явление обусловлено свойствами поверхностных зарядов отдельных частиц талькита и серпентинита (см. табл. 2.3).



а)



б)

Рис.3.22 Тиксотропные свойства КСМ с гидросиликатами магния:

- а) Литол-24+ серпентинит 5% масс. (общее время восстановления 50 мин);
- б) Литол-24+ талькит 5% масс. (общее время восстановления 80 мин).

Как видно из рис.3.21 и рис.3.22 время восстановления связей между частицами загустителя чистого Литол-24 и с наполнителями различается. Особенно выражена эта особенность у талькита – увеличение времени релаксации в 2 раза больше времени базового КСМ Литол-24. Данный факт подтверждает, что наполнитель оказывает влияния на скорость тиксотропного восстановления консистентного смазочного материала и что подобные наполнители не являются пассивными компонентами, а участвуют в структурообразовании смазочного материала.

Введение дисперсных добавок на основе гидросиликатов магния (талькитов и серпентинитов) предотвращает нежелательные уплотнения КСМ при отдыхе и способствует оптимизации условий трения при периодическом режиме работы. Наиболее оптимальным для периодического режима работы с малыми промежутками отдыха будет КСМ, содержащий дисперсные частицы талькитов. Такие КСМ понижают момент страгивания в узлах трения за счет своей сравнительно низкой плотности и обеспечивают хорошую способность удерживаться в узле трения.

3.4 Коррозионная стойкость

Применение дисперсных добавок на основе гидросиликатов магния оказывает влияние на изменение структуры КСМ, а также на химическую активность, с которой компоненты КСМ будет взаимодействовать с поверхностями пар трения. Одна из самых важных особенностей химического действия СМ – антикоррозионное действие.

В соответствии с описанным методом в п.2.3.3 проводилась оценка коррозионного действия Литол -24 и с 5% масс. добавками на основе гидросиликатов магния. Результаты присвоенных классов коррозионной стойкости КСМ представлены на рис.3.23

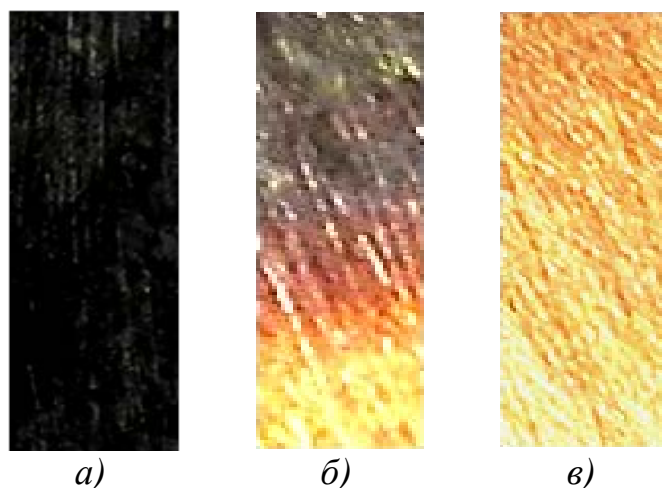


Рис.3.23 Коррозионное действие КСМ на медных пластинах
 а) Литол-24 – **4б**; б) Литол-24 + серпентинит 5% масс. – **2с**;
 в) Литол-24 + талькит 5% масс. – **1а**

В базовом состоянии Литол-24 обладает низкими антикоррозионными свойствами, введение в него дисперсных частиц гидросиликатов магния повышает эти свойства КСМ. Вероятно, это связано с образованием защитных пленок, которые ведут к изменению поверхностной энергии с образованием гидрофобного слоя. Доказательством данного предположения можно представить результаты измерения краевого угла смачивания поверхностей образцов до и после испытаний на коррозионную стойкость (рис. 3.24).

В исходном состоянии поверхность медного образца гидрофильна (угол смачивания менее 90°), а поверхности, подвергнувшиеся тепловому воздействию в смазочной среде становятся гидрофобными (угол смачивания более 90°).

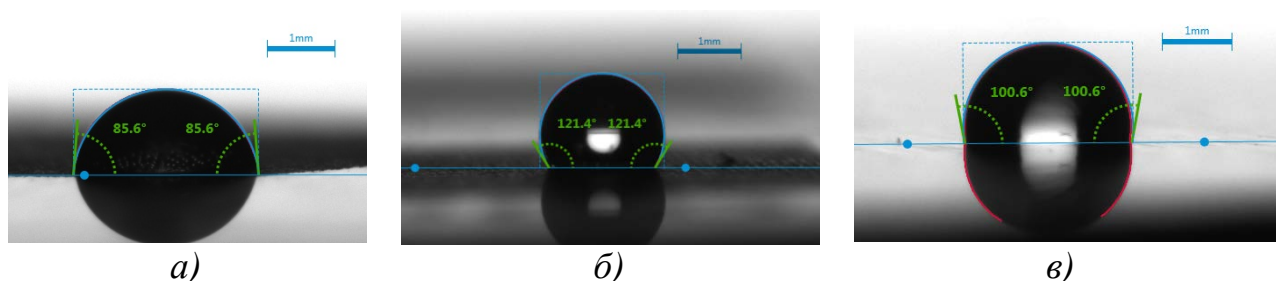


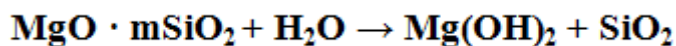
Рис. 3.24 Краевой угол смачивания поверхности образца до и после испытаний на коррозионную стойкость

а) исходная медная поверхность; б) после испытания КСМ + талькит 5% масс.;
 в) после испытания КСМ + серпентинит 5% масс.

Из проведенных результатов измерения краевого угла смачивания видно, что чем выше гидрофобность пленок, образуемых частицами дисперсных добавок КСМ, тем более устойчива поверхность к коррозионному воздействию внешней среды.

Одной из причин возникновения защитной пленки может быть содержание силиката магния, который является пленкообразующим ингибитором за счет образования ферросиликатной пленки на поверхности металла, что замедляет коррозионное действие.

Ингибирование коррозии металла вызвано протеканием реакции гидролиза силиката магния с образованием щелочи и аморфного осадка кремнезема с адсорбированной на нем водой:



Такое образование пленки может сопровождаться химическими реакциями, в результате чего образуется объемная полимерная сетка с высокими физико-механическими и защитными свойствами.

3.5 Выводы по главе

После проведения экспериментальных исследований, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- определен оптимальный состав гидросиликатов магния для КСМ на основе оценки триботехнических характеристик (противоизносных, противозадирных свойств);
- проведен фазовый анализ и определен состав гидросиликатов магния типа талькита и серпентинита;
- на ранее разработанной оснастке получены зависимости момента трения и динамики тепловыделения в процессе работы реального триботехнического узла (роликового подшипника);
- проведен анализ изменения структуры КСМ, определены распределения структурных составляющих и их размерные характеристики в зависимости от вида используемых дисперсных добавок;
- выполнены исследования вязко-пластичных свойств КСМ в зависимости от скорости сдвига и концентрации дисперсной добавки. Предложена функциональная зависимость для изменения вязкости КСМ от концентрации и скорости сдвига;
- предложена гипотеза, объясняющая аномалию изменения вязкости за счет структурных преобразований в КСМ, вызванных введением дисперсных добавок;
- получены зависимости времени восстановления вязкости СМ от типа применяемых дисперсных добавок;
- оценены антикоррозийные свойства КСМ и предложена физико-химическая модель формирования пленок ингибиторов.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ЗАЩИТНЫХ ПЛЕНОК, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ГИДРОСИЛИКАТАМИ МАГНИЯ

4.1 Формирование тонких пленок на поверхностях трибосорятий

В результате оптических исследований после испытаний на трение по ГОСТ 9490-75 были обнаружены две разновидности тонких пленок (рис.4.1). В случае использования КСМ с дисперсными частицами серпентинита происходит формирование тонких плёнок, основанных на склонности компонентов серпентинита к образованию стекловидных тел, размеры которых достигают до 50мкм, спекающихся за счёт высоких температур в зоне контакта (рис.4.1а). Следов схватывания второго рода на фрикционном контакте наблюдается мало.

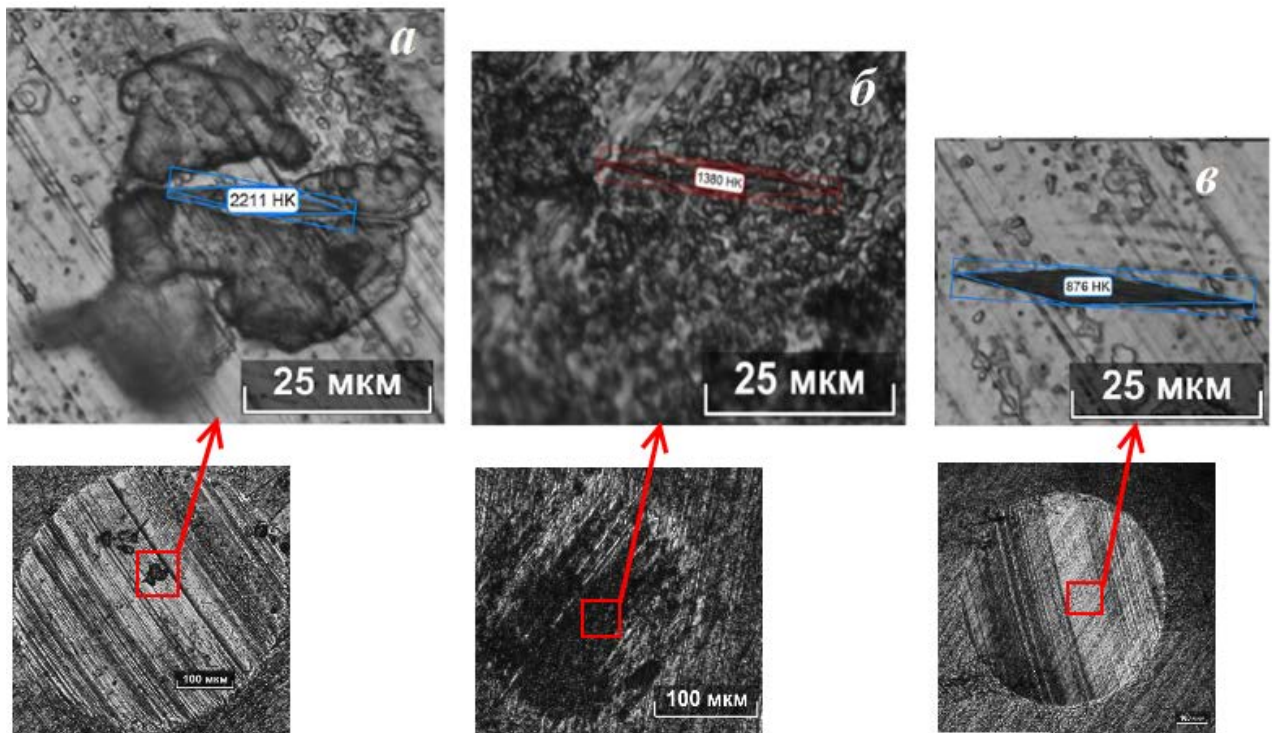
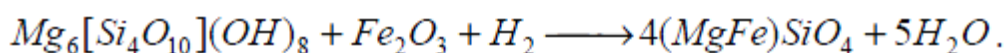


Рис.4.1 Микрофотографии отпечатков индентора: а - локальная область с плёнкой, образованной серпентинитом; б - локальная область с плёнкой, образованной талькитом; в - область поверхности трения без плёнки (x1000)

В случае использования КСМ с дисперсными частицами талькита механизм образования защитных пленок основан на адгезионных вырывах, заполненных пластичным талькитом. Местами по областям зоны трения могут формироваться стекловидные тела со средним размером до 10мкм.

Авторами [91] приведён возможный механизм образования защитной плёнки на поверхности трения, который состоит в том, что при механическом и тепловом воздействии серпентин (минерал, входящий в состав серпентинита) разлагается и, в процессе трения, выделяется количество теплоты, достаточное для разогрева и размягчения металла. Этот процесс приводит к возникновению следующей реакции:



При этом происходит внедрение в структуру металла микрочастиц минерала и образование композитной серпентинометаллической структуры (метал – минерал) на поверхности узлов трения.

На наблюдаемых участках (рис.4.1) было выполнено исследование твёрдости поверхностей трения в локальных участках с образовавшимися плёнками (рис.4.1 а, б), а также без их образования для базового СМ Литол-24(рис.4.1 в). Для измерения твёрдости использовался автоматический микротвердомер FM-300.

В результате проведённых измерений установлено, что твёрдость по Кнупу в локальной области с плёнкой, образованной серпентинитом может достигать 2211НК, пленки при тальките – 1380 НК, а в области без плёнки твёрдость составляет 876НК, что практически идентично твердости закаленного образца. Таким образом, на поверхности трения при фрикционном взаимодействии образуются и разрушаются защитные пленки, которые реализуют дискретное экранирование поверхностей, дополнительно разделяя материалы наряду с окисными плёнками.

Оптические исследования после испытаний на трение по разработанной схеме (см. п. 2.3.5) для шариковых подшипников качения не выявили образования тонких пленок (вероятно, по причине их слишком малого размера). Однако, на роликовых подшипниках с КСМ, модифицированным серпентинитом было зафиксировано возникновение подобных стекловидных тел как при испытаниях на трение скольжения (см. рис.4.2).



Рис. 4.2. Стекловидное тело, обнаруженное на поверхности трения роликового подшипника

Вероятно, возникновение тонких пленок более вероятно для трения скольжения, которое может возникать в роликовых подшипниках в большей мере, чем в шариковых подшипниках. Трение скольжения является «экстремальным» видом трения, которому свойственно более высокие контактные давления, сдвиговые усилия, локальные температуры, которые, возможно, и создают условия для возникновения подобных структур.

Был так же проведен микрорентгеноспектральный анализ на микроскопе SEM Mira3 Tescan с анализатором EDS Oxford Instruments X-Max, который показал, в зоне формирования стекловидных тел наличие в поверхностном слое большого содержания SiO_2 на поверхности металла после работы КСМ с гидросиликатом магния. Результаты представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Результаты МРСА поверхностных слоев образца после испытаний КСМ с гидросиликатом магния

O	Mg	Si	S	Ca	Fe
78,5 %	0,4 %	4,1 %	1,0 %	1,1 %	14,9 %

Формированию защитных пленок на основе гидросиликатов магния способствуют процессы, обусловленные их физико-механическими характеристиками и химическими свойствами. На рис.4.3 приведены схематические модели механизмов образования стекловидных тел (локальных плёнок) при соответствующих термомеханических условиях. В скобках на

рисунках приведены вероятные составы локальных стекловидных плёнок без учета влияния металлической подложки, на которых они формируются.

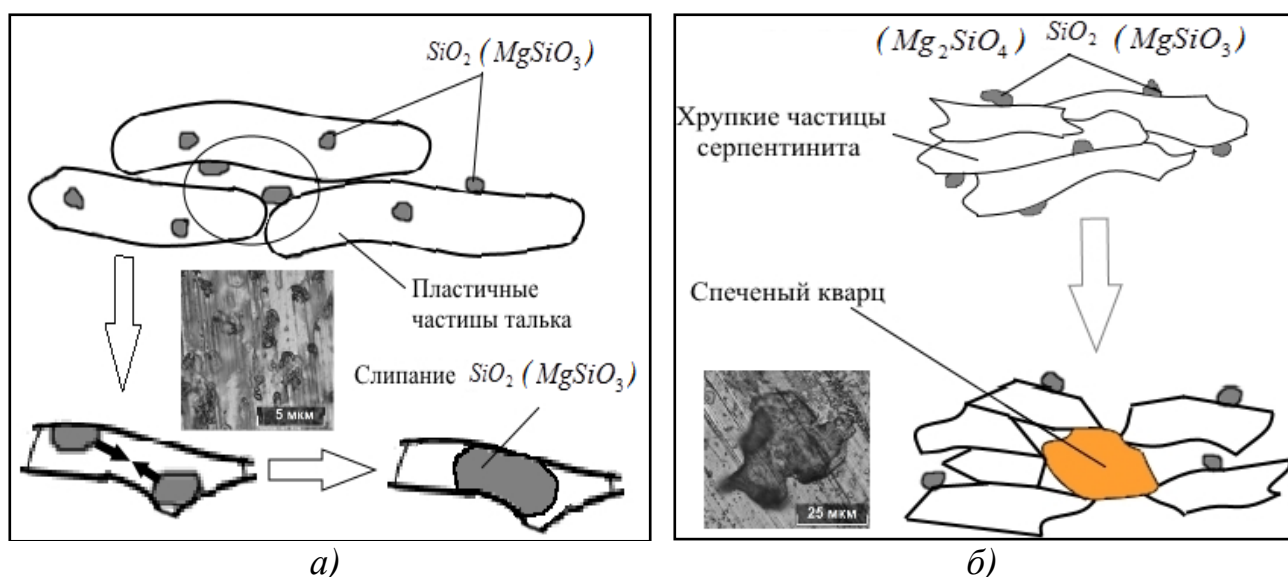
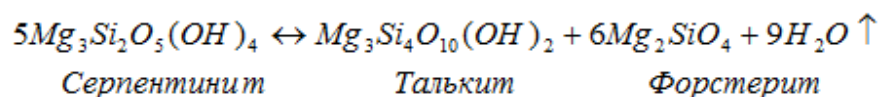


Рис.4.3 Механизм образования кварцевых стекловидных тел а) в тальките; б) в серпентините

Тепловое действие в результате трения приводит к фазовым превращениям гидросиликатов. Так при температурах до 490°C существуют все фазовые составляющие характерные для гидросиликатов магния. При температурах выше 490°C начинается распад фазовых составляющих. Например, серпентинит претерпевает изменения, в то время как талькит продолжает существовать вплоть до 780°C . (см. табл. 4.2)

Таблица 4.2 Температуры полиморфных превращений серпентинитов [92]

$<490^\circ\text{C}$	$490-650^\circ\text{C}$	$650-780^\circ\text{C}$	$>780^\circ\text{C}$
тальк, серпентинит, энстатит, брусит, форстерит	тальк, энстатит, брусит, форстерит	тальк, энстатит, форстерит	энстатит, форстерит



На рис. 4.4 представлены результаты термического воздействия на исходные порошки талькита (а) и серпентинита (б) до 1000°C , приведшая к характерному изменению цвета свойственного энстатиту и форстериту соответственно.



а) Талькит



б) Серпентинит

Рис.4.4 Порошки гидросиликатов магния после термического воздействия (до 1000°C)

Из литературных источников [58, 94] известно, что локальная температура нагрева в зоне трения может достигать очень высоких значений, что в свою очередь может привести к локальному изменению структуры дисперсного модификатора. Для оценки этих температур существует большое количество математических зависимостей [93, 95, 96] при определенных граничных условиях.

На ниже представленном расчете, базирующемся на работе проф. В.Г. Заребина [95], произведена оценка локальной температуры вспышки при множественном контакте и граничной смазке.

Расчет максимальной температуры вспышки при контакте двух тел в условиях граничной смазки для N циклов нагружения можно определить по выражению:

$$t_{max} = t_{min} + \frac{2 \cdot \alpha_{mn} \cdot q_k}{\lambda_m} \cdot \sqrt{\frac{a_m \cdot \tau_m}{\pi}} \quad (4.1)$$

где λ_m – теплопроводность смазочного материала; a_m – температуропроводность СМ; $\tau_m = \frac{\delta_m^2}{3 \cdot a_m}$ – длительность существования масляной пленки в контакте (δ_m – толщина пленки масла в контакте).

Определим толщину пленки СМ по формуле [97]:

$$\delta_m = \frac{P}{S \cdot \rho_m \cdot g} \quad (4.2)$$

где P – вес смазки; S – площадь контакта; ρ_m – плотность смазки; g – ускорение силы тяжести.

Минимальна температура вспышки:

$$t_{min} = \frac{2 \cdot \alpha_{mn} \cdot q_k}{\lambda_n} \cdot \left(\frac{a_n}{\pi}\right)^{0.5} \cdot \sum_{j=1}^N (\sqrt{j \cdot \tau_n} - \sqrt{j \cdot \tau_n - \tau_k}) \quad (4.3)$$

где τ_k, τ_n – длительность контакта и продолжительность цикла; α_{mn} – коэффициент распределения тепловых потоков, определим по методике Б.В. Протасова и И.В. Крагельского [98]:

$$\alpha_{mn} = \frac{R_{a1}}{R_{a2}} \cdot \frac{E_2}{E_1} \quad (4.4)$$

где $R_{a1,2}$ – среднее арифметическое отклонение профиля поверхности контактирующих поверхностей; $E_{1,2}$ – модули упругости.

Тепловой поток постоянной интенсивности q_k определим по формуле предложенной А.П. Амосовым [99]:

$$q_k = (1 - \alpha_{тп}) \cdot q_{тр} \quad (4.5)$$

Тепловыделение с удельной мощностью $q_{тр}$ на пятне контакта:

$$q_{тр} = \tau_{тр} \cdot V \cdot \frac{A_k}{A_r} = \tau_{тр,п} \cdot V \quad (4.6)$$

где $\tau_{тр}$ – удельная сила трения на номинальном контакте; $\tau_{тр,п}$ – удельная сила трения на пятне контакта; A_k, A_r – соответственно номинальная и фактическая площади контакта.

Коэффициент распределения тепловых потоков $\alpha_{тп}$ (показывает долю тепла трения, идущего в стационарных условиях на разогрев тела). Определяется по формуле:

$$\alpha_{тп} = \left(1 + \frac{\sqrt{\pi}}{4} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \sqrt{Pe}\right)^{-1} \quad (4.7)$$

где Pe – критерий Пекле, который характеризует соотношение между конвективным и молекулярным процессами переноса тепла.

$$Pe = \frac{V \cdot d_r}{a_n} \quad (4.8)$$

где d_r – пятно контакта $a_n = \frac{\lambda_n}{c \cdot \rho}$ – коэффициент температуропроводности (λ_n – теплопроводность; c – теплоемкость; ρ – плотность материала).

Для тепловой динамики в трении характерны большие скорости скольжения V , для них свойственен фрикционный разогрев на пятне контакта и критерий Пекле велик. При $Pe < 20$ фрикционный разогрев мал и им можно пренебречь. При больших скоростях скольжения $Pe > 20$ для упрощения анализа принимаем, что пятно контакта представляет собой окружность.

Таблица 4.3 Теплофизические параметры материалов

Показатель	Сталь	Талькит	Серпентинит
Теплоемкость, кДж/кг [°] С	708	0,87	0,91
Теплопроводность, Вт/м [°] С	27	0,273	4,4
Температуропроводность, м ² /с	$1,15 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-3}$
Плотность, кг/м ³	7595	2700	2700

В результате подстановки исходных значений для стали в формулу (4.1) получаем $t_{max} = 878^{\circ}\text{C}$. Полученный результат температуры вспышки в условиях граничного контакта в смазочной среде согласуется с результатами других исследователей [93]. Так же для исходных данных талька и серпентинита имеем $t_{max} = 900^{\circ}\text{C}$ и $t_{max} = 933^{\circ}\text{C}$, соответственно.

Из полученных результатов следует, что по сравнению с граничным трением в условиях смазки базовым КСМ, граничное трение с присутствием дисперсных модификаторов на основе гидросиликатов магния приводит к увеличению температуры вспышки. Однако наиболее опасным данное явление будет для пары трения, работающей в условиях граничного трения с модификатором, который притерпевает фазовые превращения при меньших температурах, образуя опасные абразивные соединения.

Вероятность возникновения остеклованных тел в серпентините выше, чем у талька, так как при высоких температурах частицы серпентинита охрупчиваются сильнее и не способны к внедрению SiO_2 (Mg_2SiO_4 , MgSiO_3) внутрь частицы.

4.2 Энергетические аспекты работы консистентного смазочного материала с дисперсными добавками

Как уже отмечалось ранее, свойства КСМ зависят не только от химического состава и физических свойств жидкого масла и загустителя, входящих в его состав, но и от природы и набора свойств дисперсных добавок (физико-химические и поверхностно-энергетические свойства), а все это вместе определяет подводимую и отводимую энергии к системе.

Д. С. Великовский [90] считает основным классификационным признаком, определяющим поведение консистентных смазочных материалов, наличие аномальной вязкости, обусловленной структурообразованием загустителя. Для полного понимания различий реологических и тиксотропных свойств КСМ с добавками и без необходимо изучить энергетические взаимодействия этих структур.

Размерное перераспределение ячеек каркаса при введении дисперсных частиц можно объяснить изменением поверхностной энергии, определяющаяся особенностью границ раздела, то есть поверхностями между контактирующими друг с другом фазами. Явления изменения поверхностной энергии обусловлены наличием избытка энергии Гиббса (свободной поверхностной энергии G^s) у молекул, образующих поверхностный слой каждой ячейки, особенностями структуры поверхностного слоя и его составом. Свободная поверхностная энергия определяется уравнением (4.9) [100]:

$$G^s = \sigma \cdot S \quad (4.9)$$

где σ – поверхностное натяжение; S – общая площадь поверхности раздела фаз.

$$S = S_{уд} \cdot V \quad (4.10)$$

где V – объем тела; $S_{уд}$ – удельная поверхность, приходящаяся на единицу объема дисперсной фазы.

Примем конфигурацию ячеек в форме сфер. Тогда площадь поверхности раздела фаз вычисляется по формуле:

$$S_{уд} = \frac{4\pi \cdot r^2}{\frac{4}{3}\pi \cdot r^3} = \frac{3}{r} = \frac{6}{d} \quad (4.11)$$

где d – диаметр ячейки структурного каркаса КСМ.

При проведении вычисления энергии Гиббса для базового КСМ и с наполнителем в виде дисперсного гидросиликата магния получим, что поверхностная энергия ячеек каркаса КСМ с дисперсными частицами уменьшилась на 10% по сравнению с базовым Литол-24.

Введенные частицы гидросиликата магния создают избыток энергии для всей дисперсной системы КСМ, что влечет к изменению структуры и протеканию самопроизвольных процессов, понижающих энергию поверхности каждой ячейки за счет изменения её размера. При энергетическом и структурном перестроении внутри подвижной системы возникает коалесценция (рис. 4.5 а) (процесс сопровождаемый изменением формы и размера ячеек КСМ и обусловленный действием сил межмолекулярного притяжения). Освободившиеся малые объемы структурных ячеек под действием коалесценции сосредотачиваются на поверхностях раздела фаз (на стенках дисперсных частиц), что можно наблюдать на рис. 4.5 б).

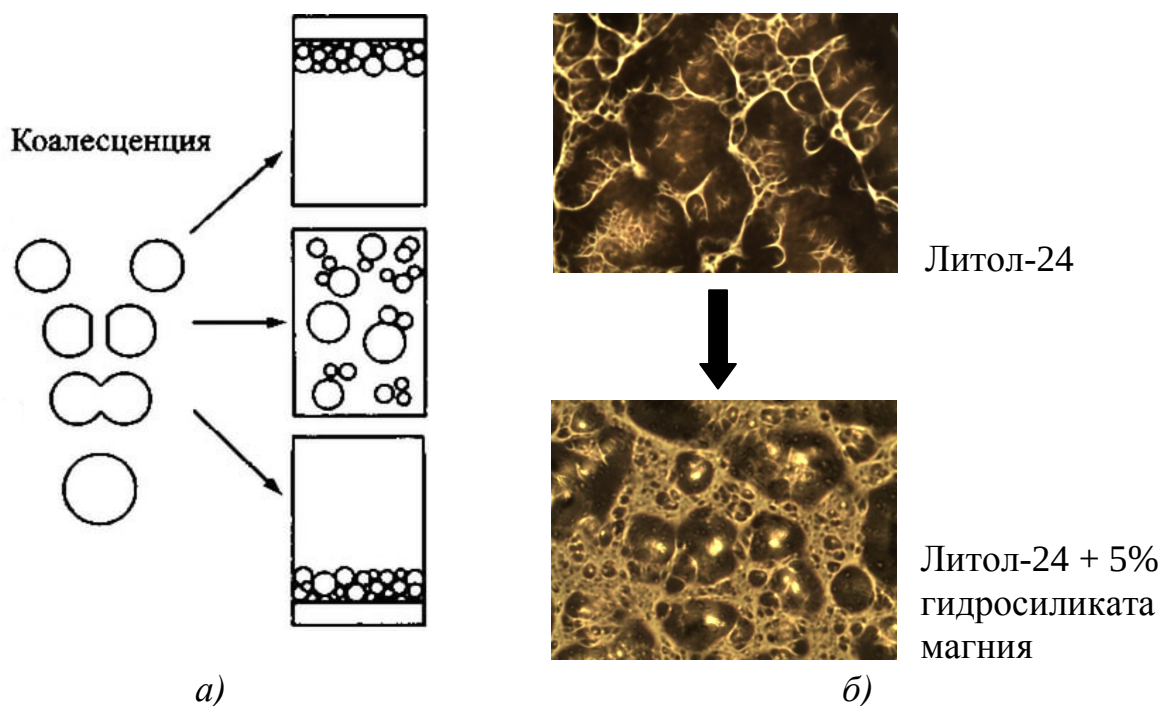


Рис. 4.5 Коалесценция:

а) схематическое изображение процесса; б) микрофотографии КСМ (x100)

Благодаря коалесценции большие объемы ячеек структуры КСМ находятся на больших расстояниях за счет разделения малыми новообразовавшимися ячейками, поэтому большие ячейки (обладающие

большей поверхностной энергией) не взаимодействуют друг с другом и представляют собой самостоятельные кинетические единицы. В таких системах дисперсная фаза подвижна и тем самым снижается вязкость всего КСМ и увеличивается время восстановления структуры (тиксотропные свойства).

В базовом же КСМ основную часть каркаса занимают большие объемы ячеек, которые напрямую контактируют друг с другом. В таких системах дисперсная фаза загустителя не перемещается свободно, поскольку структурно закреплена и, как следствие, вязкость КСМ выше, чем КСМ, содержащий дисперсные частицы гидросиликата магния.

На основании предположения о подобии теории устойчивости дисперсных систем (ДЛФО) [101] взаимодействию элементов структурного каркаса КСМ, были произведены оценочные расчеты потенциальной энергии взаимодействия структурных составляющих КСМ в зависимости от их размера и концентрации дисперсных частиц. Расчёты дали возможность построить график взаимодействия потенциальных энергий (рис. 4.6), который имеет 3 характерных перегиба:

Первый - характеризуется наличием больших структурных каркасов, обладающих большой энергией притяжения и соответствует практически полному отсутствию дисперсных частиц и максимальной вязкости КСМ.

На втором участке, соответствующем среднему размеру структурных ячеек отсутствует склонность к агрегатированию отдельных элементов системы по причине большого разброса размеров этих элементов. Это соответствует максимальной подвижности системы, вязкость минимальна (соответствует процессу коалесценции структурных ячеек).

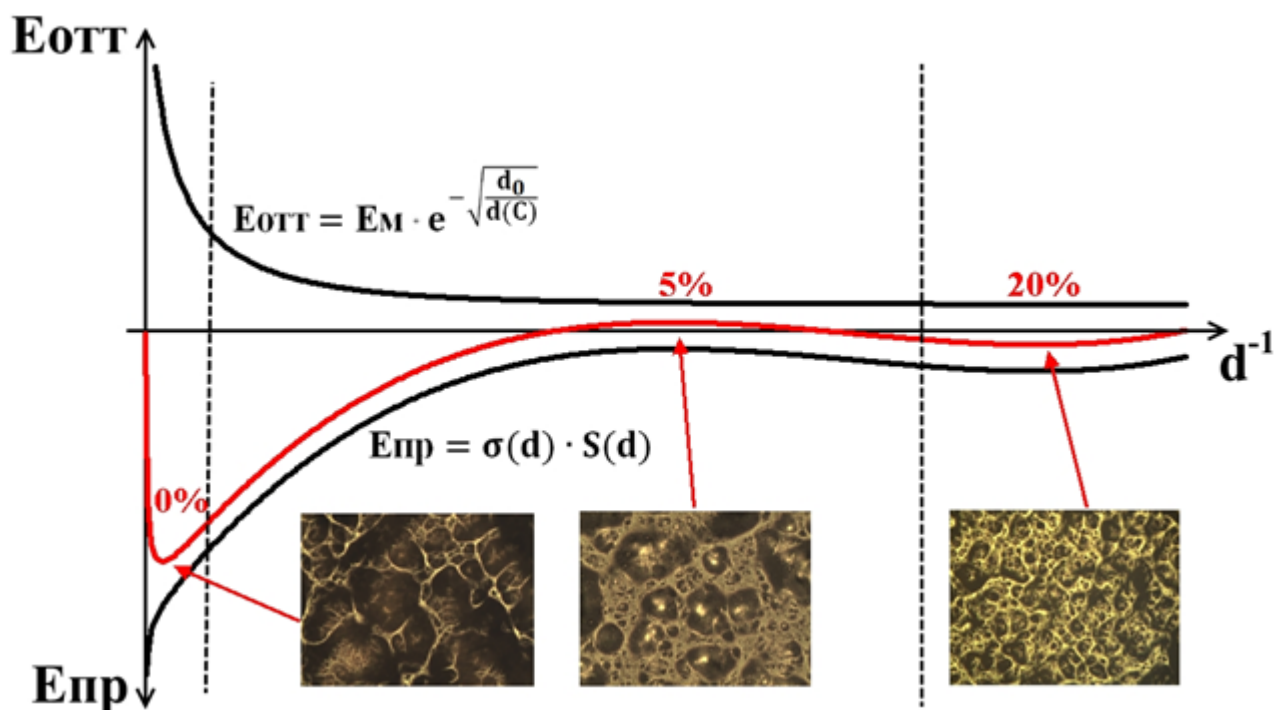


Рис. 4.6 Изменение потенциальной энергии взаимодействия структурных составляющих КСМ в зависимости от их размеров

Третий участок соответствует дальнейшему увеличению содержания дисперсных частиц, где происходит быстрая флокуляция структурных элементов, возрастает вклад энергии притяжения между дисперсными частицами и увеличению вязкости. Частицы не имеют прямого контакта, их разделяет прослойка среды (загустители, которыми при больших концентрациях добавки могут выступать не только мыла и кислоты, но и сами дисперсные частицы гидросиликатов магния).

4.3 Модель вязкости дисперсной системы по Т. Ри и Г. Эйрингу

Обзор литературы (см. п.1.2) показывает, что разнообразие существующих реологических моделей отражает принципиальные различия видов течения, которые наблюдаются в разных текучих системах. Однако результаты сравнения моделей с экспериментом позволяют сделать вывод о том, что примерно с одинаковой точностью можно описать одним и тем же реологическим уравнением различные по физико-химической природе системы, а одну и ту же дисперсную систему – принципиально разными реологическими уравнениями. В результате можно выбрать подходящее

реологическое уравнение для описания любого эксперимента, не задумываясь о реальном механизме течения пластичной жидкости.

Для описания физико-механических процессов при течении КСМ, содержащем дисперсные частицы гидросиликатов магния воспользуемся реологической моделью, описывающую полную реологическую кривую (рис.1.5 а) Т. Ри и Г. Эйринга [38]:

$$\mu = \sum_{n=1}^n \frac{X_n \cdot \beta_n}{\alpha_n} \cdot \frac{sh^{-1}(\beta_n \cdot \dot{\gamma})}{\beta_n \cdot \dot{\gamma}} \quad (4.12)$$

где X , β , α – постоянные. X - определяется долей сечения занимаемого на поверхности сдвига, β - пропорциональна времени релаксации и α - модуль сдвига.

Согласно модели Т. Ри и Г. Эйринга вязкость консистентного смазочного материала определяется как совокупность трех составляющих: первая - вязкость базового масла, вторая - дисперсная вязкость, вызванная течением частиц загустителя и третья составляющая – вязкость пластического течения, изменяющаяся в зависимости от скорости сдвига и обусловленная разрывом и агломерацией частиц загустителя. Где вклад вязкости, каждой составляющей, определяется долей сечения занимаемого на поверхности сдвига X_1 , X_2 , X_3 соответственно.

Модель Т. Ри и Г. Эйринга устанавливает связь сопротивления течению с двумя типами взаимодействия частиц, участвующих в течении: первый тип – те, что находятся в связанном состоянии и второй тип – разделенных частиц загустителя в масле. Однако данная модель не учитывают действие дисперсных частиц на значение вязкости консистентного материала. Дисперсная добавка взаимодействует с частицами загустителя, оказывая существенное влияние на реологические характеристики смазочного материала.

В рамках данной работы экспериментально установлено воздействие дисперсного наполнителя на основе гидросиликатов магния (серпентинит и талькит) на структурные каркасы СМ и изменение вязкости при динамическом воздействии. Зависимость вязкости от скорости сдвига (рис. 3.18) хорошо

согласуется с функцией Т. Ри и Г. Эйринга, а зависимость вязкости от концентрации (рис. 3.19) определяет положение по высоте теоретической кривой Т. Ри и Г. Эйринга.

На основании фотографий структурных каркасов, после механического воздействия, полученных с оптического микроскопа (см. рис. 3.16), выполнен анализ изображений и с помощью программного анализатора Thixomet определено распределение структурных составляющих каркаса консистентной смазки, что позволило рассчитать коэффициенты X_n для функции вязкости по Т. Ри и Г. Эйрингу. Результаты этих расчётов наглядно представлены на рис. 4.7, как видно из представленной гистограммы, с увеличением концентрации дисперсного наполнителя вклад в вязкость жидкого масла X_1 монотонно убывает (рис. 4.7а).

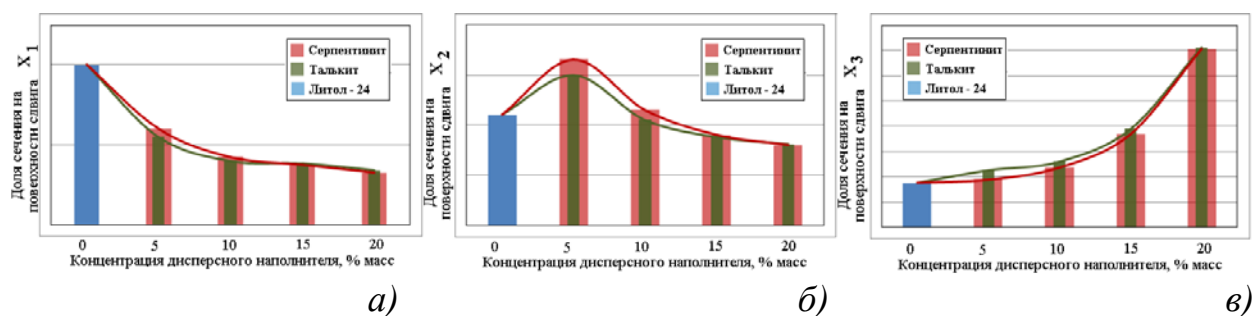


Рис.4.7 Изменение долей сечения на поверхности сдвига в зависимости от концентрации наполнителя (талькит и серпентинит): а) течение жидкого масла X_1 ; б) течение обособленных частиц X_2 в) течение агломерированных частиц X_3

Можно предположить, что это связано с перераспределением масла в замкнутых объемах загустителя, обусловленное увеличением роли в формировании новых структурных каркасов дисперсного наполнителя, а не только основного загустителя Литол-24 - 12-оксистеариновой кислоты.

Наличие не связанных частиц наполнителя в объёме масла приводит к увеличению ньютоновской дисперсной вязкости X_2 (рис. 4.7б) вплоть до 5% концентрации. Дальнейшее повышение концентрации наполнителя приводит к убыванию вклада X_2 , это связано с уменьшением свободного масла и размеров структурного каркаса. Размеры структурных каркасов напрямую зависят от

концентрации наполнителя, вероятно, это обусловлено тем, что каркасы загустителя перестраиваются относительно частиц дисперсного наполнителя.

Увеличение концентрации создает условия для формирования агломератов и как следствие, повышение коэффициента X_3 (рис. 4.7в). Следует отметить, что при повышенных концентрациях дисперсного наполнителя наблюдается тенденция к уменьшению размеров структурного каркаса вне зависимости от типа наполнителя.

Максимальное различие в структуре консистентного смазочного материала имеет место при 5% наполнителя и характеризуется разницей в размерах структурных каркасов, а так же количеством свободных частиц наполнителя в выделившемся масле. В консистентном смазочном материале с наполнителем на основе талькита количество свободных частиц в масле больше в сравнении с серпентинитом, вероятно, обусловлено особенностями кристаллического строения талькита и его способностью расслаиваться под действием жидкости (масла).[67]

Доли сечения определяются характеризуются потенциальными энергиями взаимодействия структурных составляющих. Представим графики изменения потенциальных энергий по долям сечения на поверхности сдвига в зависимости от концентрации наполнителя в виде трех аппроксимирующих функций полиномов, объединенных в систему уравнений.

Результаты вкладов долевого сечений обладают характерными перегибами подобно суммарной энергии взаимодействия. Чтобы это увидеть, необходимо представить все эти вклады в объединенном графике (рис. 4.8). Анализируя этот график можно предположить, что эти коэффициенты являются характеристикой энергетического взаимодействия структурных составляющих КСМ.

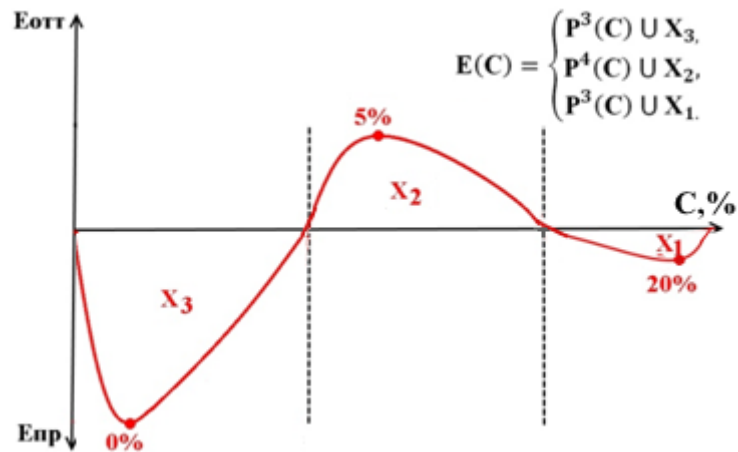


Рис. 4.8 Связь изменения долей сечения с энергией взаимодействия структурных составляющих КСМ, содержащей дисперсные частицы

Так как потенциальные энергии взаимодействия зависят от размеров структурных составляющих, а в свою очередь, как было уже показано ранее, размер структурных составляющих зависит от количества дисперсной добавки (см. п. 3.3.1), то можно сопоставить результаты определения энергий потенциального взаимодействия по ДЛФО с энергией структурных составляющих, определяемой реологическими свойствами среды КСМ.

Реологическая модель Т. Ри и Г. Эйринга может быть использована для оценки реологических характеристик консистентного смазочного материала, содержащего дисперсные добавки, если коэффициенты будут подобраны на основе экспериментальных данных. Данная возможность обусловлена тем, что коэффициенты X_n содержат в себе физический смысл и по их изменению можно судить о влиянии наполнителя на структурные составляющие КСМ.

Значения коэффициентов X_n долей сечения можно представить в зависимости изменения вязкости КСМ от температуры в зоне трения (рис.4.9).

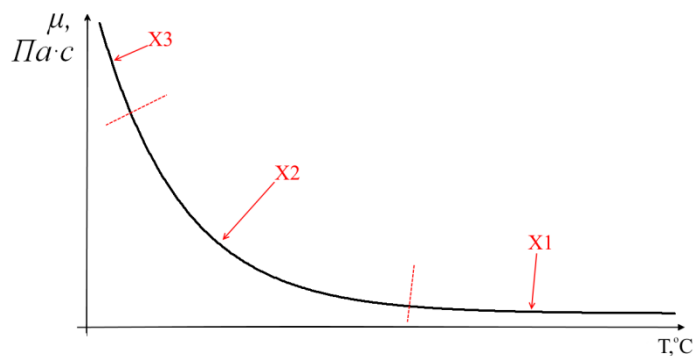


Рис. 4.9 Зависимость вязкости КСМ от температуры

Начальному этапу работы узла трения будет соответствовать участок с малыми температурами и большой вязкостью СМ, что определяется агломерацией частиц загустителя (X_3). Нормальному режиму работы, когда в результате механического взаимодействия температура узла трения повышается, соответствует участок со средней вязкостью пластического течения (X_2). Непосредственно в зоне контакта температура выше, чем по всему объему СМ и вязкость на этом участке будет наименьшей, что соответствует течению жидкого масла (X_1).

Так же следует отметить, что с увеличением концентрации дисперсного наполнителя класса гидросиликатов магния реологические и триботехнические характеристики консистентного смазочного материала становятся практически идентичными, т.е. динамическая вязкость, строение структурного каркаса и противоизносные свойства различаются в пределах погрешности. Это обусловлено смещением приоритета в механизме формирования структурных каркасов наполнителя, а не только загустителя.

4.4 Молекулярное взаимодействие гидросиликатов магния с поверхностью металла

При работе СМ, модифицированного дисперсными добавками можно рассмотреть процесс трения многостадийно: взаимодействие СМ с поверхностями трения; трение по единичным неровностям поверхности (выступающим пикам), которое приводит к изменению шероховатости поверхности и увеличивает вклад в величину силы трения. Совокупность этих процессов описана Боуденом и Тейбором [102] и представлена на рис.4.10. Данная модель отражает частичный контакт отдельных металлических неровностей сопряженных тел и граничное трение по смазочному слою в виде адсорбированных молекул. Нагрузка воспринимается площадью A ; металлический контакт реализуется на площади αA .

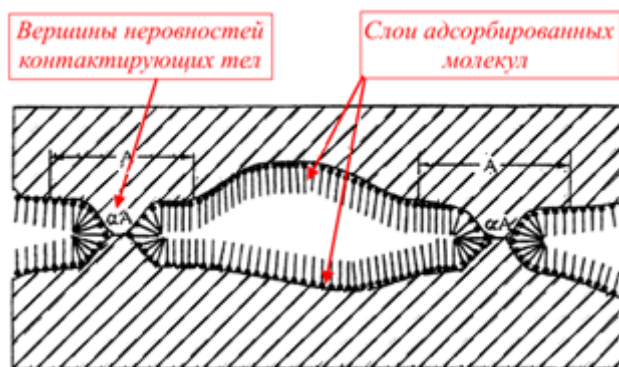


Рис.4.10 Схема контакта твердых тел при граничной смазке
(по Боудену и Тейбору)

Углеводородные цепочки занимают положение, перпендикулярное к поверхности трения. Таким образом, молекулы адсорбированные на поверхности образуют ориентированный мономолекулярный слой, на этих молекулах адсорбируется следующий слой за счет сил когезии, и так до образования полимолекулярного слоя, обладающего большой несущей способностью.

В КСМ Литол-24 в качестве загустителя используется октостеариновая кислота, которая образует адсорбционный слой поперечно ориентированных полярных молекул на контактирующих поверхностях пары трения. [103] При введении дисперсного наполнителя в состав КСМ происходит переориентация молекул октостеариновой кислоты в соответствии с полярностью частиц гидросиликата. Полярности и, соответственно, модели адсорбции на поверхности частиц талькита и серпентинита разнятся (см. табл.2.3 п.2.2.). В соответствии с правилом уравнивания полярностей по П.А. Ребиндеру [104] стеариновая кислота адсорбируется на поверхностях границ раздела фаз, при условии, что полярности этих фаз уравниваются. Для дифильных молекул (к которым относится октостеариновая кислота) характерна ориентация своей полярной частью к полярной фазе, а неполярной частью - к неполярной фазе [105].

Исходя из правила П.А. Ребиндера, проиллюстрируем модели молекулярного взаимодействия загустителя базового КСМ с дисперсными частицами талькита (рис.4.11) и серпентинита (рис.4.12) на поверхности металла в зоне трения.

Молекулы кислоты состоят из полярной «головки» и гидрофобного «хвоста». В случае с талькитом молекулы загустителя КСМ «головкой» ориентируются к полярной поверхности металла, а «хвостом» – к неполярной базальной поверхности талькита.

За счет такого расположения молекулярных связей загустителя и дисперсных частиц талькита на поверхности металла образуется равномерный интерфейсный слой, защищающий трибосопряжение от коррозии и износа (что было показано ранее в главе 3 данной работы). Этим объясняется увеличение температуры трибосопряжения в экспериментах при исследовании трения с КСМ и теоретических расчетах температуры вспышки (см. п. 3.1.4 и п. 4.1. данной работы), а именно за счет новообразовавшегося слоя из талькита, так как рабочая пара трения становится металл-талькит. При такой паре трения (металл-талькит) необходимы малые усилия на сдвиг, поскольку скольжение происходит по базальным поверхностям минерала (основным поверхностям, большим по площади).

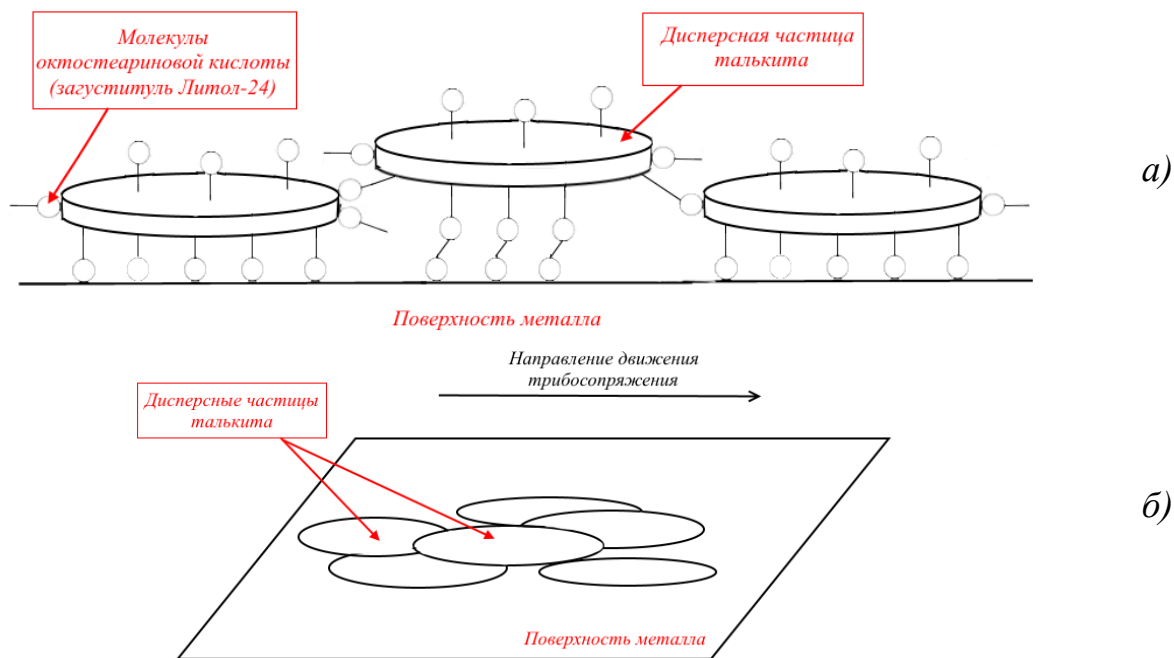


Рис.4.11 Модель молекулярных связей частиц талькита и октостеариновой кислоты на поверхности металла (а) и формирование защитного слоя частицами талькита на поверхности металла в результате молекулярного взаимодействия (б)

Обратная картина молекулярных связей будет наблюдаться в КСМ с дисперсной добавкой серпентинита (рис.4.12). Молекулы октостеариновой

кислоты «головкой» ориентируются как к полярной поверхности металла, так и к полярным базальным поверхностям частиц гидросиликата магния (серпентинита), а «хвостом» – к неполярным боковым граням пластин серпентинита. За счет такого расположения полярностей частиц серпентинита и октостеариновой кислоты, взаимодействие металла с частицами гидросиликата магния незначительно, так как возникают благоприятные условия для адсорбирования стеариновой кислоты на большие поверхности дисперсной добавки. При взаимном перемещении контактирующих поверхностей узла трения, происходит фрагментальный контакт дисперсных частиц серпентинита с металлическими поверхностями, поверхность становится неравномерно покрытой защитным слоем.

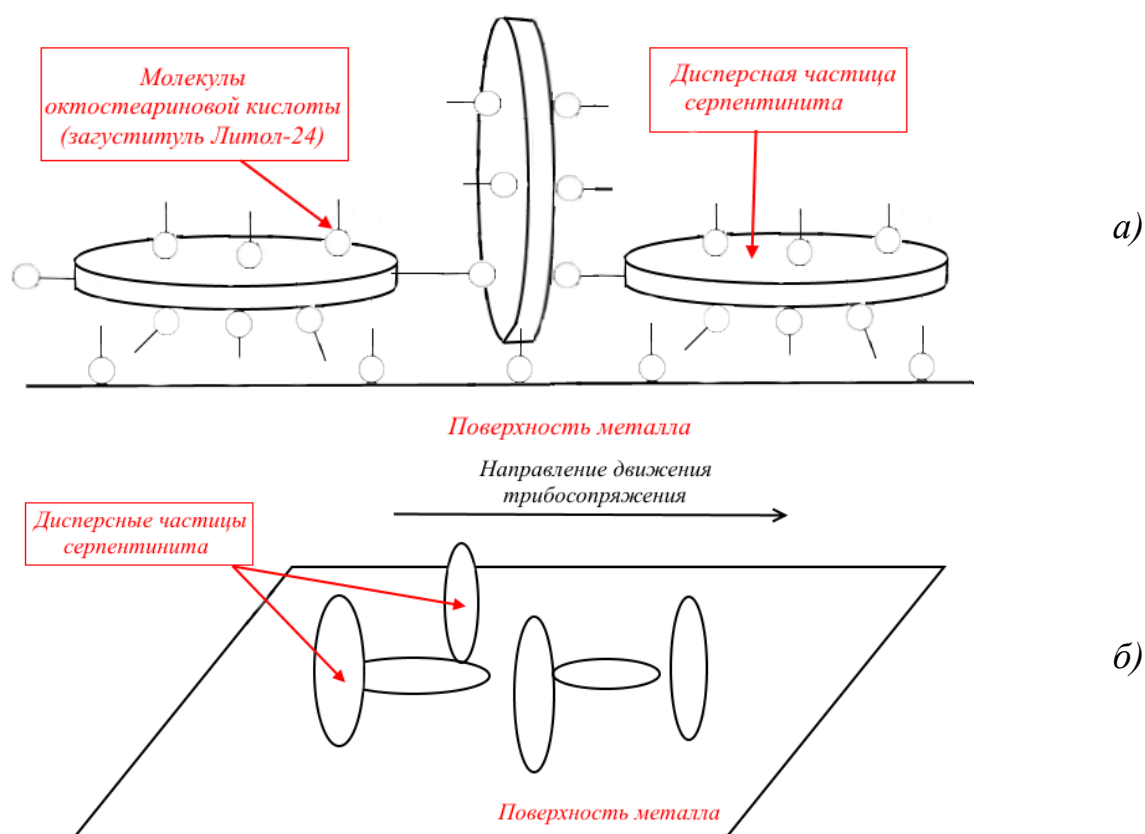


Рис.4.12 Модель молекулярных связей частиц серпентинита и октостеариновой кислоты на поверхности металла (а) и формирование защитного слоя частицами серпентинита на поверхности металла в результате молекулярного взаимодействия (б)

При формировании защитного слоя серпентинитом не обеспечивается равномерность покрытия поверхности металла, следовательно, образованный слой не стабилен на сдвиг, слабее защищает от износа и коррозии (см. п. 3.1.4 и

п. 4.1. данной работы). В результате хаотического ориентирования частиц серпентинита на поверхности металла необходимо затратить больше энергии на сдвиг, что ведет к значительному увеличению температуры в зоне контактирования, по сравнению с КСМ, содержащим дисперсные частицы талькита.

Процесс адсорбции идет в сторону выравнивания полярности системы, тем сильнее, чем больше первоначальная разность полярностей больших базальных поверхностей частиц гидросиликата магния и сформированного на поверхности металла молекулярного слоя КСМ. Основываясь на правиле уравнивания полярностей и представленных моделях взаимодействия октостеариновой кислоты с гидросиликатами на поверхности металла, можно сделать вывод, что адсорбционный слой КСМ тем устойчивее, чем больше будет оказываемое ориентирующее влияние обеими сторонами молекул загустителя с дисперсным наполнителем.

Согласно Б.В. Дерягину [106], чем тоньше граничный слой, разделяющий поверхности трения, тем меньше время требуется для исчерпания своей способности осуществлять эффективное разделение в условиях граничной смазки. Резкое увеличение коэффициента трения будет свидетельствовать о разрушении смазочного слоя (рис.4.13).



Рис.4.13 Долговечность граничных слоев разной толщины при трении (по Б.В. Дерягину)

Введение в КСМ добавок на основе гидросиликатов магния позволяет создать дополнительный интерфейсный слой из дисперсных частиц, что

увеличит толщину защитного слоя и уменьшит износ металлической поверхности.

4.5 Влияние температуры на формирование и разрушение защитных пленок, образованных гидросиликатами магния

Температура является одним из самых важных фактором, влияющим на процессы трения при граничной смазке, как самих трущихся поверхностей, так и при изменении свойств дисперсных частиц гидросиликатов магния в составе КСМ. Изменение температуры в зоне граничного трения большей частью определяется условиями режимов работы (от легкого режима работы узла трения до тяжёлого). Влияние таких режимов на изменение коэффициента трения описывается обобщённой температурной зависимостью, предложенной И.В. Крагельским (рис.4.14). [107]

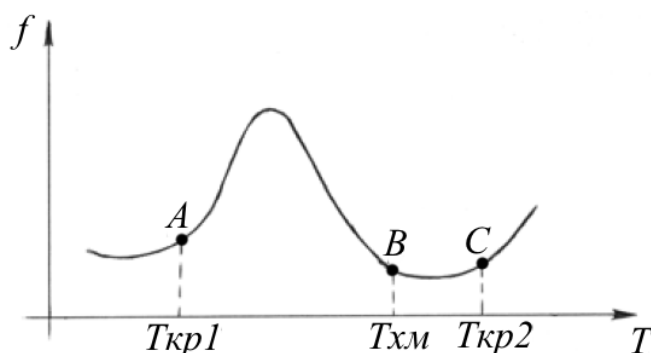


Рис. 4.14 Обобщённая зависимость коэффициента трения от температуры при граничной смазке

Данная обобщенная зависимость определяется тремя переходными температурами: $T_{кр1}$, $T_{кр2}$ и $T_{хм}$. Температура $T_{кр1}$ характеризует начало разрушения адсорбционного слоя (десорбция) молекул СМ. десорбция вызывает дезориентации молекул СМ на поверхности и падает несущая способность, появляется металлический контакт трущихся поверхностей. Это приводит к резкому увеличению коэффициента трения и катастрофическому разрушению сопряжённых деталей. Если СМ содержит химически активные компоненты или дисперсные добавки, то излишняя тепловая энергия, вызванная увеличением температуры в зоне трения способствует вступлению в реакцию с поверхностями этих активных компонентов СМ, особенно если в

процессе трения образуются ювенильные поверхности. Таким образом, с ростом температуры увеличивается толщина защитного покрытия между трущимися поверхностями, коэффициент трения начинает снижаться до тех пор, пока не достигнет температуры $T_{хм}$.

$T_{хм}$ характеризует такую толщину защитного слоя величина толщины слоя, при которой дальнейший рост защитной пленки энергетически не выгоден и остается примерно одинаковым в достаточно широком диапазоне температур. Достигнув температуры, соответствующей точки $T_{кр2}$, когда скорость разрушения защитной пленки превышает скорость ее образования. Вновь возникает металлический контакт трущихся поверхностей и рост коэффициента трения с последующим разрушением поверхностей и выходом из строя узла трения.

Следует отметить, что безразмерное увеличение концентрации химически активных веществ или дисперсных добавок в СМ не дают постоянного эффекта снижения коэффициента трения. Определенная концентрация создает минимально достижимый коэффициент трения, а дальнейшее увеличение концентрации вызовет коррозионно-механическое изнашивание. [108]

На основании обобщённой зависимости коэффициента трения от температуры при граничной смазке опишем процессы протекающие в трибоузле с КСМ, модифицированным дисперсными добавками гидросиликатов магния:

Механизм для КСМ с талькитами:

При достижении $T_{кр1}$ происходит механическое взаимодействие сопряженных деталей и дисперсной добавкой талькита. Пластинчатая конфигурация частиц минерала позволяет добавке ориентироваться параллельно в потоке КСМ относительно поверхности трения. Наблюдается повышение коэффициента трения в процессе приработки до достижения $T_{хм}$.

$T_{хм}$ - за счет адсорбции происходит адаптация полярных молекул поверхности металла, талькита и загустителя (12-октостеариновой кислоты). Молекулярное взаимодействие с поверхностями трибосопряжения по рис. 4.10. При достижении данной температуры коэффициент трения снижается и

остаётся практически постоянным в достаточно широком интервале температур. Происходит укрепление молекулярных связей активных соединений, процесс трения протекает по установившимся базальным поверхностям талькита. По мере повышения температуры увеличивается скорость образования модифицированного слоя из талькита. Одновременно увеличивается скорость разрушения этого слоя в результате изнашивания и диссоциации.

$T_{кр2}$ - скорость разрушения модифицированного слоя (молекулярных связей талькита и металла) превышает скорость его образования, имеет место металлический контакт пар трения, вызывая резкое повышение коэффициента трения, по причине отделения частиц талькита от поверхности металла. Коррозионно-механическое изнашивание сменяется интенсивным адгезионным износом, который представляет собой вырывы на поверхности трения (рис. 4.15а).

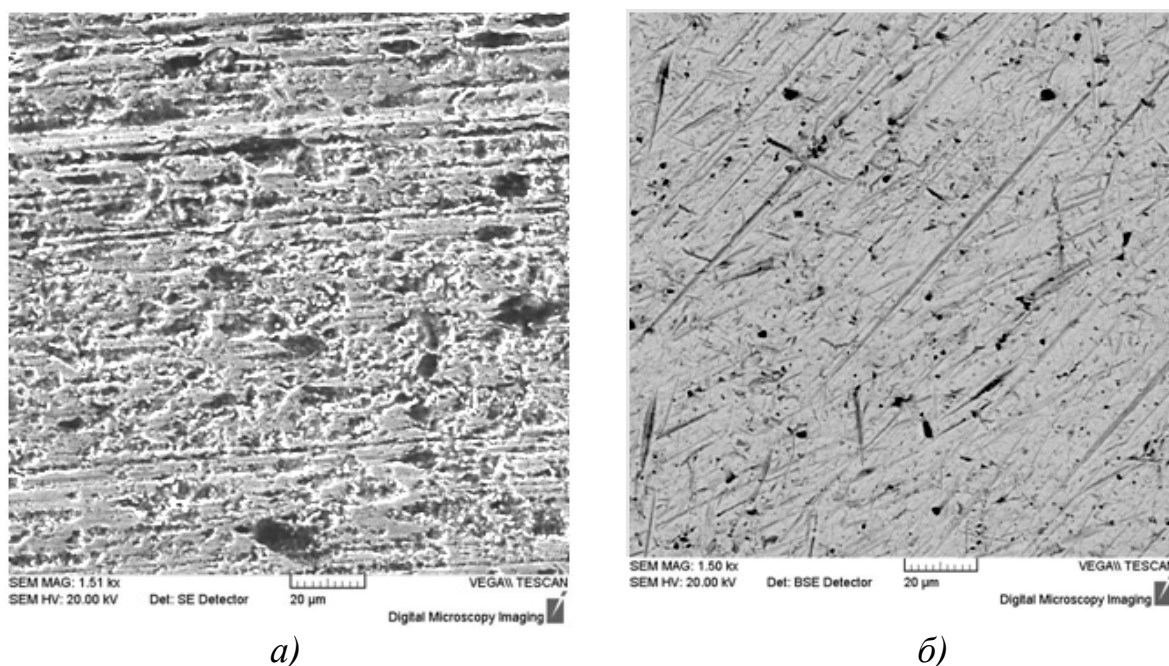


Рис. 4.15 Поверхность стали ШХ15 после трения скольжения в КСМ+5%масс.гидросиликата магния

а) талькит - адгезионные вырывы; б) серпентинит - абразивный износ

Механизм для КСМ с серпентинитами:

До достижения $T_{кр1}$ в паре трения превалирует механическое взаимодействие дисперсных частиц серпентинита с поверхностями металла. При молекулярном взаимодействии по модели рис. 4.12 происходит

«перекачивание» серпентинита в зоне трения, которое не образует связанную молекулярную цепочку с поверхностями.

При росте температуры $T_{хм}$ в зоне контакта серпентинит разлагается на химически активные компоненты (см. табл.2.3 п.2.2.). Образовавшийся из серпентинита форстерит за счет своих магнитных свойств закрепляется на поверхности металла и с дальнейшим ростом температуры спекается, формируя стекловидные тела (см. п. 4.1). Другая часть продуктов разложения серпентинита под действием температуры содержит в себе талькит, который оказывает свое влияние на создание защитного поверхностного слоя.

$T_{кр2}$ – при данной температуре могут разрушаться химические и магнитные связи стекловидных тел с поверхностью металла, что ведет к абразивному износу трибосопряжени (рис. 4.15б).

4.6 Влияние дисперсных частиц гидросиликата магния в составе кончистентного смазочного материала на коэффициент трения

Упругий слой смазки минимальной толщины с дисперсными частицами можно рассматривать как мягкое покрытие и для оценки коэффициента трения использовать выражение, предложенное И.В. Крагельским [109].

$$f = \frac{\tau_m}{p_r} + \frac{A_r}{\Delta^m \cdot p_r} \quad (4.13)$$

где τ_m - прочность покрытия на сдвиг; Δ - толщина покрытия; p_r - фактическое давление; A_r - фактическая площадь контакта; m – коэффициент, определяемый экспериментально (≈ 1).

Согласно выражению (4.13) уменьшение толщины покрытия приводит к увеличению коэффициента трения, что объясняется увеличением сдвигового сопротивления с уменьшением толщины покрытия.

В случае применения КСМ, модифицированного добавкой, коэффициент трения определяется составом КСМ и концентрацией дисперсных частиц. Основными параметрами, зависящими от концентрации дисперсных частиц будут напряжение сдвига и вязкость СМ. Второй вклад в изменение величины

коэффициента трения - это величина толщины мягкого покрытия и согласно модели молекулярного взаимодействия (см. п.4.4.), можно сделать предположение, что покрытие, формирующееся при использовании талькового наполнителя будет стабильнее держаться на поверхности, чем при использовании серпентинита.

Если принять предположение, что изменение толщины покрытия Δ связано с коагуляцией на поверхности трения частиц дисперсного наполнителя, то его можно спрогнозировать уравнением [110] коагуляции дисперсных частиц М. Смолуховского:

$$\frac{dn_x}{dr} = K \cdot (n_0 - n_x)^2 \quad (4.14)$$

где n_x - число скоагулированных частиц; r - радиус частицы; n_0 - начальная концентрация частиц; K - постоянная скорости коагуляции, которая определяется по формуле:

$$K = 8\pi \cdot D \cdot r \cdot P \cdot \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right) \quad (4.15)$$

где D - коэффициент диффузии единичной частицы; P - стерический фактор, учитывающий расположение частиц при столкновении; ΔE - средняя энергия, необходимая для слипания (потенциальный барьер); k - постоянная Больцмана; T - температура в зоне трения.

Выражения (4.14 и 4.15) справедливы для частиц сферической формы, когда как частицы гидросиликатов магния имеют вытянутую, пластинчатую форму, поэтому необходимо ввести коэффициент формы частиц. Коэффициент формы ($K\phi$) - это отношение длины частицы к ее диаметру, характеризующий разницу между фактическим размером частицы и эквивалентным радиусом частицы ($r_э$). Для сферических или кубических частиц коэффициент формы равняется единице. Для талька коэффициент формы обычно находится в интервале 5-20 [111]. А для частиц, представляющих собой смесь разных форм и меняющих ориентацию своих осей при движении, принимает коэффициент формы 2,9 (для серпентинита), тогда фактический радиус частицы:

$$r = K\phi \cdot r_3 \quad (4.16)$$

Подставив выражения (4.15, 4.16) в (4.14) и проинтегрировав, получим:

$$n_x = n_0 - \frac{n_0}{1 + n_0 \cdot 8\pi \cdot D(K\phi \cdot r_3) \cdot P \cdot \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right)} \quad (4.17)$$

Помимо вклада коагуляции дисперсных частиц в образовании защитного слоя, разделяющего трущиеся поверхности необходимо учитывать толщину смазочного слоя $\Delta_{см}$, которая зависит от большого количества кинематических и динамических процессов (вязкость, контактное давление, шероховатость, температура и др.).[112]

При трении контактирующих поверхностей в среде КСМ необходимо учитывать сопротивление на сдвиг смазочной среды, которое зависит от вязкости, поэтому в уравнении (4.13) вместо прочности покрытия на сдвиг (τ_m) примем $\tau_0(C, T) + \mu(C, \dot{\gamma}, T)$, где вязкость КСМ (μ) определяется по модели Т.Ри и Г. Эйринга (4.12), а предел текучести КСМ (τ_0) определяется экспериментально по диаграмме, представленной на рис.4.16.

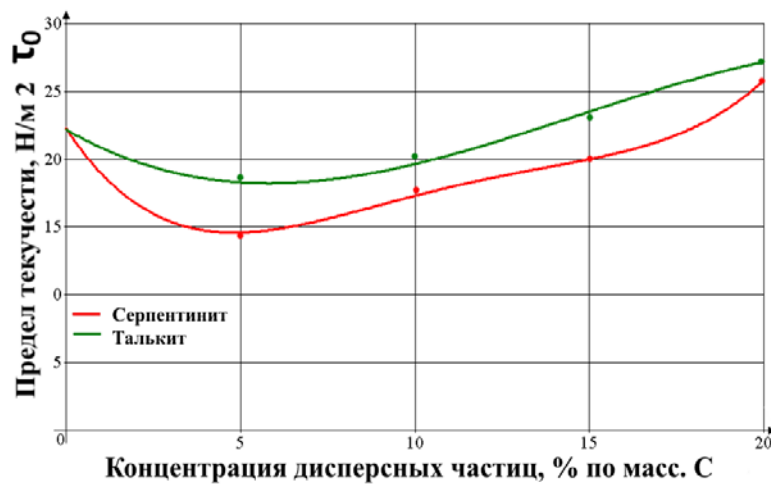


Рис.4.16 Влияние концентрации дисперсных частиц на предел текучести $\tau_0(C)$

С учетом вышеизложенного представим выражение (4.13) в виде:

$$\tau_{уд} = p_r \cdot f = (\tau_0(C, T) + \mu(C, \dot{\gamma}, T)) + \frac{A_r}{(n_x + \Delta_{см})^m} \quad (4.17)$$

где $p_r \cdot f$ по Г. Амонтоу [113] – удельная сила трения ($\tau_{уд}$), которая в данном случае может рассматриваться как предельное касательное напряжение в

контакте и является характеристикой, свойственной данным контактирующим поверхностям и смазочной средой.

В условиях граничного трения смазочная среда формирует химические и физические адсорбированные слои на трущихся поверхностях. Таким образом, выражение (4.17) позволяет установить взаимосвязь основных характеристик работы узла трения с КСМ, содержащем дисперсные частицы гидросиликата магния.

4.7 Практическое применение гидросиликатов магния в составе консистентных смазочных материалов

Поддержание подвижного состава в надлежащем состоянии, отвечающим требованиям эксплуатации ГУП «Горэлектротранс» является сложной и ответственной задачей. Одна из важных проблем - обслуживание ходовой части транспорта, от которой зависит безопасность движения. Изменение состояния ходовой части троллейбуса вызывается преимущественно воздействием внешних условий, таких как механические, тепловые нагрузки и электрохимические реакции. Регулярное обслуживание в процессе эксплуатации и своевременный ремонт предъявляет ряд требований к таким расходным материалам как КСМ.

В таблице 4.4 представлены основные неисправности ступичных узлов (рис.4.17). Условием предотвращения таких неисправностей является своевременное техобслуживание и ремонт ступиц троллейбуса, заключающееся в регулярном добавлении или замене СМ в подшипниках, а также их регулировке и затяжки.

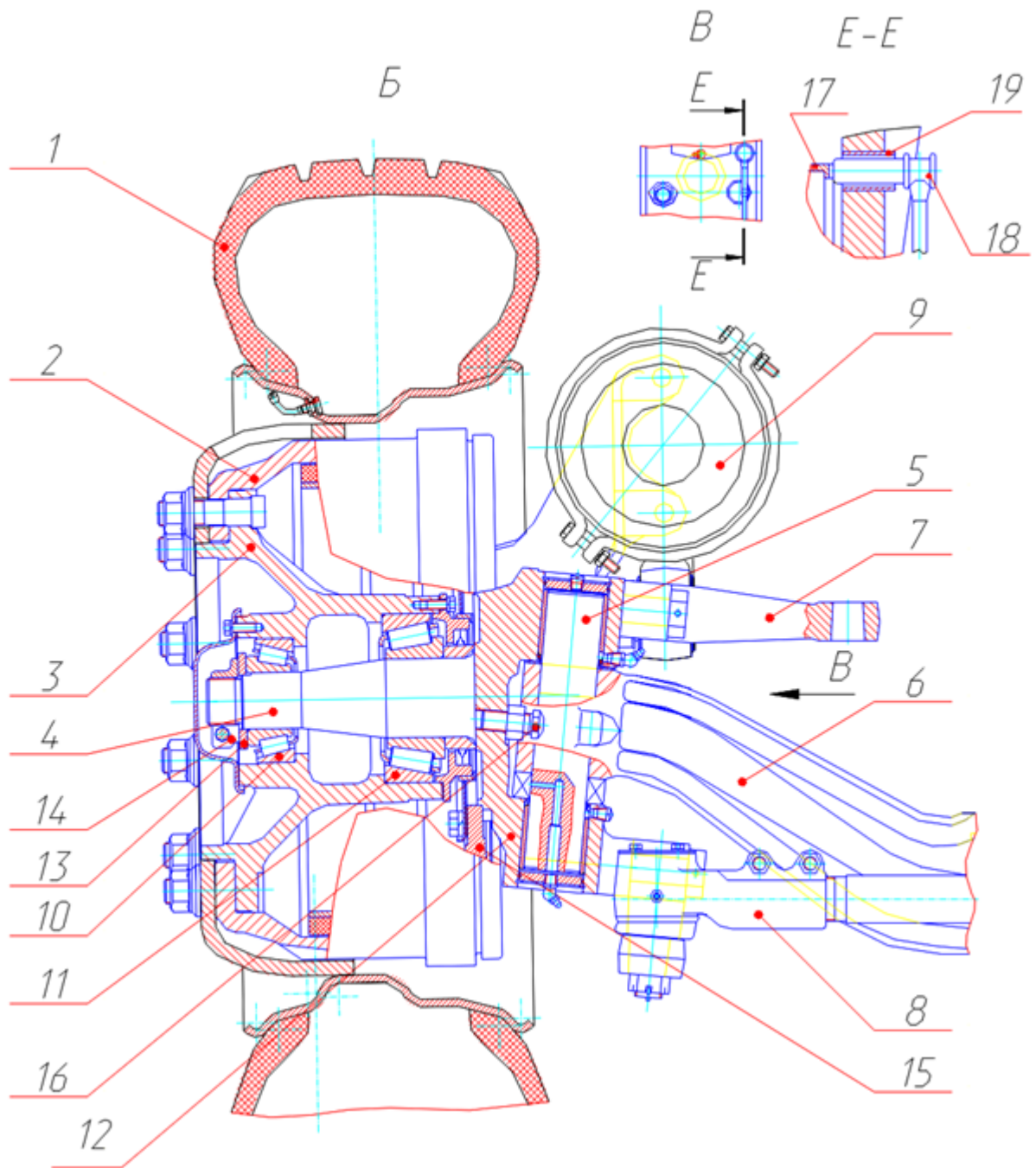


Рис. 4.17 Чертеж ступичного узла передней подвески РАМА троллейбуса
 1 – колесо; 2 – барабан тормозной; 3 – ступица; 4 – кулак поворотный; 5 – шкворень; 6 – балка; 7 – рычаг поворотный; 8 – поперечная рулевая тяга; 9 – тормозной механизм с тормозной камерой; 10, 11, 12 – подшипники; 13 – шайба; 14 – гайка; 15 – суппорт; 16 – болт упорный; 17 – ротор АБС; 18 – датчик АБС; 19 – втулка датчика [114].

Данные неисправности чаще всего являются следствием тяжелых режимов работы ступичного подшипника (поз. 10, 11 рис. 4.17), вызванного динамическими нагрузками, агрессивным коррозионным действием окружающей среды.

Таблица 4.4 – Неисправности ступичного узла, их причины

Неисправность	Причина
Осевой люфт в подшипнике ступицы колеса	Разрушение и износ подшипников
	Осевой люфт в подшипнике ступицы
Скрежет и стук при вращении колес	Разрушение и износ подшипников
Вытекание СМ из ступицы колеса	Избыточное количество СМ в ступице
	Износ и разрушение сальника ступицы
Чрезмерный нагрев подшипника в ступице колеса	Отсутствие СМ или чрезмерная затяжка подшипника ступицы

Для обеспечения безотказной работы ступичных подшипников необходимо использовать СМ соответствующие режиму эксплуатации. В настоящий момент в производственном депо ГУП «Горэлектротранс» существует необходимость в качественном отечественном КСМ, который позволит увеличивать интервалы технического обслуживания и сократить затраты на эксплуатационные расходы. К таким КСМ предъявляются ряд требований:

- надежно разделять трущиеся поверхности;
- обеспечивать высокую коррозионную стойкость;
- гарантированно удерживаться на поверхности под воздействием агрессивных сред;
- обладать высокими антифрикционными и противозадирными свойствами;
- сохранять комплекс заявленных свойств длительное время.

Для оценки основных триботехнических характеристик были выполнены сравнительные испытания используемых на данный момент импортных КСМ с КСМ, предлагаемыми в данной работе.

В таблице 4.5 представлены основные характеристики импортных КСМ (Renolit LX-EP2 и Shell Gadus S2 V220AC), используемых в ступичных узлах троллейбуса ГУП «Горэлектротранс».

Таблица 4.5 Результаты триботехнических испытаний импортных КСМ

Характеристики	Renolit LX-EP2	Shell S2 V220AC
	Результаты испытаний	
Испытания на четырехшариковой машине трения, нагрузка сваривания (Рс), Н	2000	2520
Испытания на четырехшариковой машине трения, диаметр пятна износа, мм	0,7	0,73
Испытания на противозадирные свойства на четырехшариковой машине трения, индекс задира	41	52
Температура каплепадения, °С	200	180

По методикам, описанным в гл.2 данной работы, были выполнены сравнительные триботехнические исследования импортных с базовым КСМ Литол-24 и на его базе модифицированные КСМ, содержащие 5% масс. дисперсные частицы размером 10 мкм талькита или серпентинита (рис.4.18).

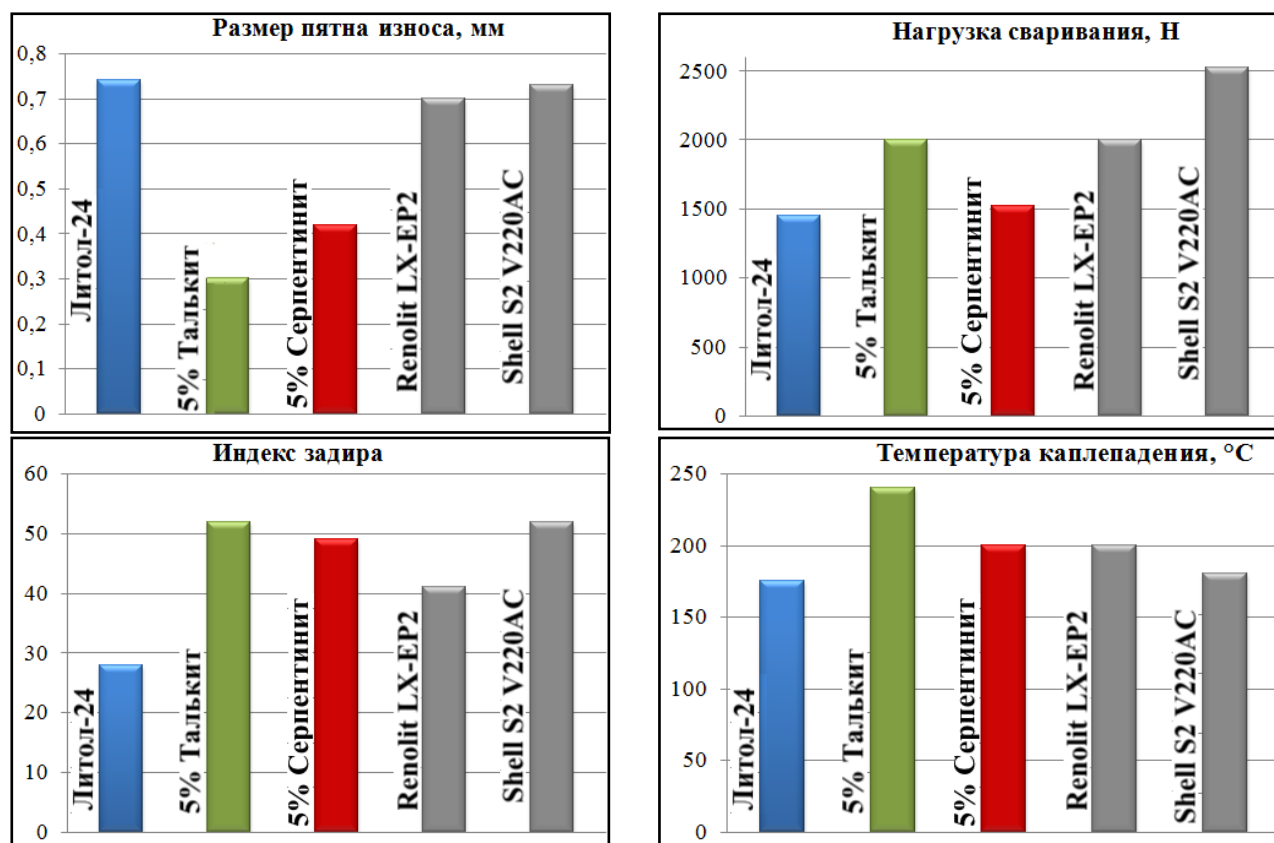


Рис.4.18 Сравнительные гистограммы триботехнических характеристик импортных КСМ с предлагаемыми

Как видно из сравнительных гистограмм, по всем показателям КСМ, модифицированные гидросиликатами магнезия повышают свои эксплуатационные характеристики, по сравнению с базовым СМ Литол-24, а в случае использования дисперсных частиц талькита, могут достигать аналогичных показателей с импортными образцами.

По результатам данных испытаний Литол-24 с дисперсными добавками талькита может обеспечивать высокие противоизносные, противозадирные свойства, а также проявлять способность хорошо удерживаться на поверхности узлов трения, что уже позволяет рекомендовать его в качестве замены импортных аналогов СМ. Однако, для полного соответствия требованиям, предъявляемым к КСМ ступичных узлов трения необходимо выполнение еще одного условия – высокая коррозионная стойкость. Для оценки влияния дисперсных частиц на антикоррозионные свойства КСМ были проведены сравнительные исследования КСМ (ГОСТ 32335-2013), результаты представлены на рис.4.19.

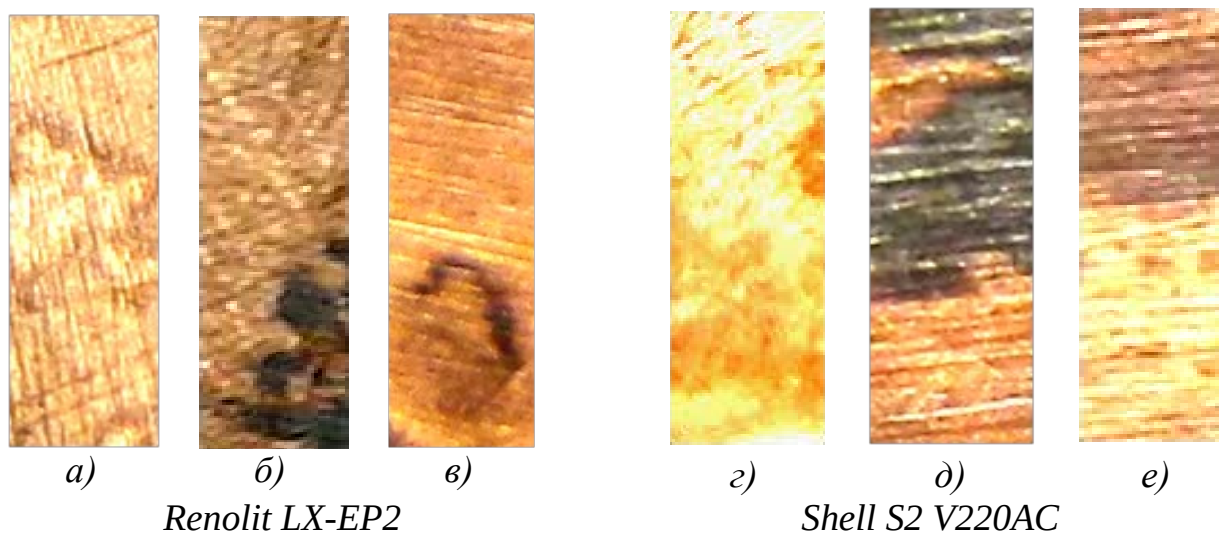


Рис. 4.19 Антикоррозионные свойства КСМ с дисперсными частицами гидросиликатов магнезия: а) Renolit LX-EP2 – **1b**; б) Renolit LX-EP2 + 5% серпентинит – **3b**; в) Renolit LX-EP2+ 5% талькит – **3a**; г) Shell S2 V220AC – **1b**; д) Shell S2 V220AC+ 5% серпентинит – **3b**; е) Shell S2 V220AC + 5% талькит – **2c**.

Как было установлено ранее (п. 3.4) в базовом состоянии Литол-24 обладает низкими антикоррозионными свойствами, введение в него

дисперсных частиц гидросиликатов магния повышает данные свойства (рис. 3.23). Результаты антикоррозионных свойств модифицированных дисперсными добавками гидросиликатов магния импортных КСМ, используемых в ступичных подшипниках и изначально обладающих высокими антикоррозионными свойствами (рис. 4.19 а, г) показали снижение коррозионной стойкости (рис. 4.19 б, в, д, е). Данное явление можно объяснить конфликтом между штатным пакетом антикоррозионных присадок и пассивирующим действием образующейся защитной пленки на основе гидросиликата магния.

Таким образом, Литол-24, модифицированный дисперсными частицами гидросиликатов магния, а именно талькитами удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к КСМ, работающим в ступичных узлах трения, и может быть рекомендован для замены импортных КСМ.

На основании данной рекомендации были реализованы натурные испытания КСМ с дисперсной добавкой талькита в роликовых радиально-упорных подшипниках с коническими роликами 6-7614А ступичного узла троллейбуса модели ПТЗ-5283 (рис. 4.20).



Рис. 4.20 Троллейбус модели ПТЗ-5283 и передний мост в сборе

Эксплуатация данного узла производилась в течение одного года с последующей разборкой и оценкой поверхностей трения подшипника (рис. 4.21). После года эксплуатации в рамках планового обслуживания ступичных узлов проводились исследования профилей поверхности колец подшипников, работавших с КСМ Renolit LX-EP2 и Литол-24+5% масс.талькит. На графике смятия профиля (кривая Аббота) (рис. 4.22) наблюдается уменьшение высоты и впадин профиля для Renolit LX-EP2, когда как у Литол-24 с талькитом по

большей частью наблюдается уменьшение глубины впадин и незначительное уменьшение высоты вершин, что характерно для образования защитного слоя, образованного гидросиликатом магнезия, про формирование которого упоминалось ранее.

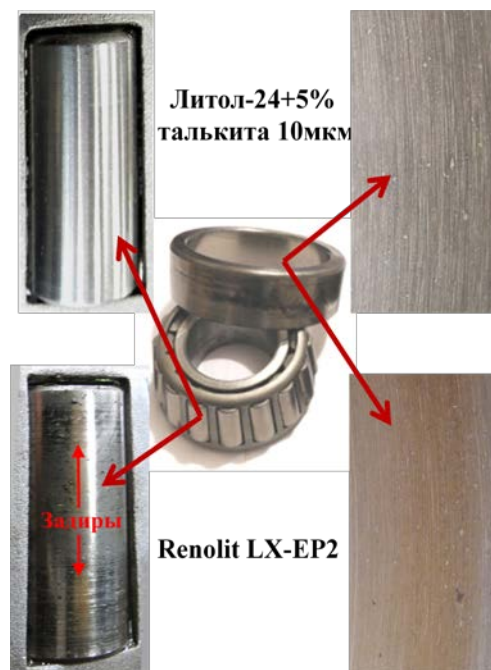


Рис. 4.21 Фотографии поверхностей колец и роликов подшипников после года эксплуатации.

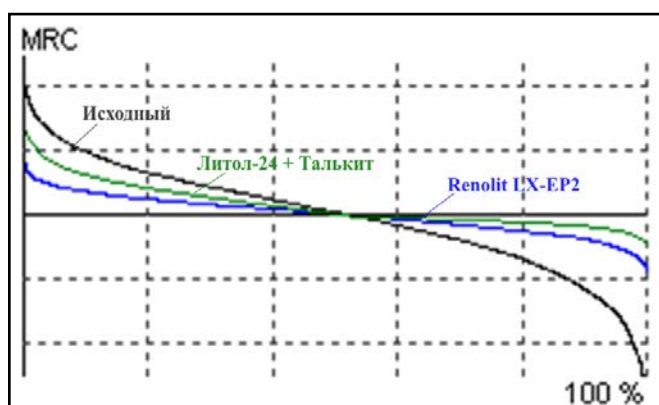


Рис.4.22 График смятия профиля (кривая Аббота) поверхностей подшипников ступичного узла троллейбуса

На основе анализа поверхностей колец и роликов можно отметить, что подшипник, эксплуатирующийся с Renolit LX-EP2, на поверхностях роликов имеет многочисленные задиры, а на кольцах полосы коррозии. Для Литол-24 с дисперсными частицами талькита характерно выхаживание поверхности роликов и образованию пористого слоя на поверхностях колец.

4.8 Выводы по главе

После проведенных экспериментальных и теоретических исследований были сделаны следующие выводы и заключения:

- установлено два механизма возникновения защитных слоев на поверхностях трения, в среде КСМ в зависимости от типа гидросиликата магния, используемых в них;
- зафиксировано возникновение стекловидных тел в зоне трения в присутствии КСМ с дисперсными частицами серпентинита. Установлена вероятная причина и условия их возникновения;
- установлена связь взаимодействия структурных элементов КСМ с теорией устойчивости дисперсных систем (ДЛФО);
- оценены изменения потенциальной энергии взаимодействия структурных элементов КСМ в зависимости от их размеров;
- установлено, что характеристиками энергетического взаимодействия структурных составляющих КСМ могут служить коэффициенты долевого сечений, входящих в уравнение Т. Ри и Г. Эйринга;
- предложены модели молекулярных связей частиц талькита и серпентинита с загустителем базового КСМ и поверхностями трения;
- предложен механизм зависимости коэффициента трения от температуры для контактирующих поверхностей в среде КСМ, модифицированного дисперсными добавками гидросиликата магния;
- предложена функциональная зависимость для возникновения удельной силы трения, как касательного напряжения в зоне контакта трущихся поверхностей в среде КСМ с учетом возникновения защитного слоя, образованного гидросиликатами магния;
- выполнены натурные испытания предложенных в работе КСМ в ступичных подшипниках троллейбуса;
- произведены сравнительные испытания триботехнических характеристик предложенных КСМ с импортными образцами;
- выработаны рекомендации по применению предложенных в работе КСМ

Заключение

По результатам проведенной исследовательской работы могут быть сделаны следующие выводы:

1. Определен эффективный состав на основе дисперсных частиц гидросиликатов магния в КСМ. В результате проведенных исследований установлено: применение гидросиликатов магния (10мкм, 5%масс) в КСМ для тальцитов уменьшает величину износа на 61%, задира на 76%, момент трения на 68%. Для серпентинитов: уменьшение величины износа на 42%, задира на 69%, момента трения на 47%. Введение добавок позволяет изменять структуру и свойства КСМ за счет их взаимодействия с загустителями, базовым маслом и другими компонентами СМ.

2. Обнаружены следы сформированных в процессе трения тонких плёнок на основе гидросиликатов магния. На поверхности трения при фрикционном взаимодействии образуются и разрушаются защитные пленки, которые реализуют дискретное экранирование поверхностей, дополнительно разделяя материалы наряду с окисными плёнками.

3. Предложена модель формирования тонких пленок в результате взаимодействия с дисперсными частицами гидросиликатов магния в составе КСМ на поверхности работающего узла трения. Установлены два механизма формирования тонких пленок и конкуренция при их взаимном возникновении. Вероятность возникновения остеклованных тел в серпентините выше, чем у талька, так как при высоких температурах частицы серпентинита охрупчиваются сильнее и не способны к внедрению кремнезема и форстерита SiO_2 (Mg_2SiO_4 , MgSiO_3) внутрь частицы.

4. Реологические свойства консистентных смазочных материалов напрямую зависят от их структуры. Без использования реологических методов нельзя оценить структурно-механические свойства СМ. Рассмотрено влияние структуры КСМ на реологические свойства, базирующееся на модели Т. Ри и Г. Эйринга и теории устойчивости дисперсных систем (ДЛФО) применительно к КСМ с дисперсными частицами гидросиликатов магния. Установлено, что

мерой энергетического взаимодействия структурных элементов КСМ могут служить коэффициенты долевых сечений.

5. Предложен метод определения оценки эффективности КСМ в подшипниках качения. Разработана оснастка для ЧШМ-3,2 увеличивающая функционал испытательных возможностей стандартной машины трения, учитывающая реальный вид трения в подшипниках качения (трение качения в сочетании с трением скольжения).

6. Установлено влияние структуры смазочного материала на ряд эксплуатационных характеристик обусловленных наличием дисперсных частиц гидросиликатов магния. Антикоррозийная эффективность объясняется двумя процессами формирования ферросиликатных пленок: за счет взаимодействия ионов железа с силикат-анионами и за счет хемосорбции силиката. Повышение температуры каплепадения связано с увеличением молекулярных связей в КСМ.

7. Предложена уточнённая функциональная зависимость, определяющая удельную силу трения, в зависимости от концентрации дисперсного наполнителя, учитывающая возникновение защитного слоя, образованного на поверхностях трения гидросиликатами магния. В условиях граничного трения смазочная среда формирует химические и физические адсорбированные слои на трущихся поверхностях. Предложенное выражение позволяет установить взаимосвязь основных характеристик работы узла трения с КСМ, содержащем дисперсные частицы гидросиликата магния.

8. Разработан и испытан на ступичном узле трения КСМ с дисперсными добавками, который позволит увеличивать интервалы техобслуживания ступицы троллейбуса и сократить затраты на эксплуатационные расходы.

Список литературы

1. Ваванов В.В., Вайншток В.В., Гуреев А.А. Автомобильные пластичные смазки. – М.: Транспорт, 1986. – 145 с.
2. NIIR Board of Consultants and Engineers Modern Technology of Petroleum, Greases, Lubricants & Petro Chemicals (2nd Revised Edition).NIIR PROJECT CONSULTANCY SERVICES, 2015. – 704 p.
3. Hand Book Of Lubricants, Greases And Petrochemical Technology Paperback. – by EIRI. Engineers India Research Institute, 2008. – 251 p.
4. ГОСТ 7143-73 Смазки пластичные. Метод определения предела прочности и термоупрочнения. Введен с 01.01.1975. М.: Стандартиформ, 2016.
5. Великовский Д.С., Поддубный В.Н., Вайншток В.В. Консистентные смазки. – М.: Химия, 1966 – 264 с.
6. Piet M. Lugt Grease Lubrication in Rolling Bearings. – Wiley, 2013. – 472 p.
7. Yu. L. Ishchuk Lubricating Grease Manufacturing Technology Hardcover. – New Age International Private Limited, 2005. – 236 p.
8. ГОСТ 26581-85 Смазки пластичные. Метод определения эффективной вязкости на ротационном вискозиметре. Введен с 30.06.1986. М.: Издательство стандартов, 1985.
9. ГОСТ 7163-84 Нефтепродукты. Метод определения вязкости автоматическим капиллярным вискозиметром. Введен с 01.07.1985. М.: Стандартиформ, 2016.
10. ГОСТ 19295-73 Смазки пластичные. Метод определения механической стабильности. Введен с 01.01.1975. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
11. Сеницын В.В. Подбор и применение пластичных смазок. – М.: Химия. 1974. – 414 с.
12. ГОСТ 6793-74 Нефтепродукты. Метод определения температуры каплепадения. Введен с 01.01.1975. М.: Стандартиформ, 2006.

- 13.Черножуков Н.И. Технология переработки нефти и газа Часть 3. – М: Химия, 1967 – С. 324.
- 14.ГОСТ 7142-74 Смазки пластичные. Методы определения коллоидной стабильности. Введен с 01.01.1975. М.: Стандартиформ, 2006.
- 15.ГОСТ 5734-76 Смазки пластичные. Метод определения стабильности против окисления. Введен с 01.01.1977. М.: Стандартиформ, 2006.
- 16.Бонер К.Дж. Производство и применение консистентных смазок: перевод с англ. инж. А. П. Чочиа. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 704 с.
- 17.ГОСТ ISO 11009-2013 Нефтепродукты и смазки. Определение стойкости консистентных смазок к вымыванию водой. Введен с 01.01.2015. М.: Стандартиформ, 2014.
- 18.ГОСТ 9566-74 Смазки пластичные. Метод определения испаряемости. Введен с 01.01.1976. М.: Стандартиформ, 2006.
- 19.Ishchuk Yu. L. Lubricating Grease. Manufacturing Technology. – New Age International Publisher, 2005. – 248 p.
- 20.ГОСТ 7143-73 Смазки пластичные. Метод определения предела прочности и термоупрочнения. Введен с 01.01.1975. М.: Стандартиформ, 2006.
- 21.Dorinson A., Ludema K.C. Mechanics and Chemistry in Lubrication. – Elsevier Science Publishers B.V., 1985. – 634 p.
- 22.ГОСТ 9.082-77 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Масла и смазки. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию бактерий. Введен с 01.01.1979. М.: Стандартиформ, 2006.
- 23.Биоповреждения смазочных масел в условиях хранения / Фарзалиев В.М., Бабаев Э.Р., Алиева К.И. и др. // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – С. 24-28.
- 24.Мак – Кета Дж. Дж. Новейшие достижения нефтехимии и нефтепереработки: пер. с англ. Абрамсона И.И. – М.: Химия, 1968. – С. 58-60.
- 25.Курчик Н.Н., Вайншток В.В., Шехтер Ю.Н. Смазочные материалы для обработки металлов резанием. – М.: Химия, 1972. – 312 с.

- 26.Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
- 27.Гаркунов Д.Н. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
- 28.Кламманн Д. Смазки и родственные продукты: синтез, свойства, применение, междунар. Стандарты: перевод с англ. Г. И. Липкина. – М.: Химия, 1988. – 488 с.
- 29.Probing the effect of thickener on tribological properties of lubricating greases / Fan X., Li W., Li H. and ect. // Tribology International. – 2018. – Vol. 118. – P. 128-139.
- 30.Tribological properties of conductive lubricating greases / Fan X., Xia Y., Wang L. // Friction. – 2014. – Vol. 2, Issue 4. – P. 343-353.
- 31.Хебда М., Чичинадзе А.В. Справочник по триботехнике. Том 2. Смазочные материалы, техника, смазки, опоры скольжения и качения. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
- 32.Михайлов Н.В., Ребиндер П.А. О структурно-механических свойствах дисперсных и высокомолекулярных систем // Колл.журнал. – 1955. – Т. 18, №2, – С. 107-119.
- 33.Матвеев В.Н., Кирсанов Е.А. Вязкость и структура дисперсных систем // Вестник Московского Ун-та. Сер.2. Химия. – 2011. – Т.52, №4. – С. 243-276.
- 34.Смольский Б.П., Шульман З.П., Горилославец В.М. Реодинамика и теплообмен нелинейно вязкопластичных материалов. – Минск: Наука и техника, 1970. – 446 с.
- 35.Ostwald Wo., Auerbach R. Ueber die Viscositat Kolloider Losungen im Struktural-Laminar-und Turbalenz-gebiet // Kolloid Zeitschrift. – 1926. – Bd. 38. – S. 261-264.
- 36.Casson N.A. Rheol. of disperse systems // Ed. C. C. Mill. L. – 1959. – P. 84.
- 37.Hershell W.H., Bulkey R. Konsistenzmessungen von Gummi-Btnzolloosungen // Kolloid Zeitschrift. – 1926. – S. 291.

38. Ree T., Eyring H. Theory of Non-Newtonian Flow. // 2. Solution System of High Polymers, J.Appl.Phys. – 1955. – Vol. 26, N. 7. – P. 793-809.
39. Bingham E.C. Fluidity and plasticity. – N.Y.: McGraw-Hill, 1922. – 219. p.
40. Маньковская Н.К. Современные представления о химизме процессов окисления различных классов углеводородов, его ингибирования и антиокислительная стабильность пластичных смазок. – Киев: Наукова думка, 1976. – 46 с.
41. Фукс И.Г. Добавки к пластичным смазкам. – М.: Химия, 1982. – 248 с.
42. Абрамзон А. А., Гаевой Г. М. Поверхностно-активные вещества. – Л.: Химия, 1979. – 376 с.
43. Фещенко В.Н. Справочник конструктора. Книга 1. Машины и механизмы. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. – 800 с.
44. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники. Учебник. – М.: Инфра-М, 2014. – 336 с.
45. Крагельский И. В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
46. Гаркунов Д. Н. Современные проблемы триботехники и ее общественная значимость // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2007. – №6. – С. 2-4.
47. Балабанов В.И. Безразборное восстановление трущихся соединений автомобиля. Методы и средства. – М.: АСТ, 2014. – 60 с.
48. Кужаров А.С., Кужаров А.А. Еще раз и несколько иначе о металлоплакировании, ФАБО и безызносности // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т 13, №4(3). – С. 772-775.
49. A computed model for tribological properties of porous self-lubricating PPS composites: Numerical analysis and experimental verification / Wang H., Liu D., Yan L. and ect. // Wear. – 2014. – Vol. 320, Issue 1. – P. 94-102.
50. Введение в проблему использования природных слоистых геомодификаторов в трибосопряжениях / Усачев В.В., Погодаев Л.И., Телух Д.М. и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – №1. – С.36-43.

- 51.Space grease lubrication modeling: A discrete element approach / Busquet M., Renouf M., Berthier Y., Sicre, J. // Tribology International. – 2017. – Vol. 111. – P. 159-166.
- 52.Стебелева О.П., Кашкина Л.В., Кулагин В.А. Получение углеродных наномодификаторов для смазочных материалов с использованием кавитационной технологии // Известия Самарского НЦ РАН. – 2011. – Т. 13, №1(2). – С. 401-403.
- 53.Гинзбург Б.М., Точильников Д.Г. Влияние сшивающего агента и фуллерена C60 на свойства твердосмазочного покрытия // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70, вып. 1. – С. 94-99.
- 54.Дунаев А.В. Состояние применения нетрадиционной триботехники для безремонтного восстановления сопряжений трения узлов и агрегатов машин и оборудования // Сборник научных трудов. «Современные технологии в горном машиностроении». – 2012. – С. 154-163.
- 55.Усачев В.В., Погодаев Л.И., Крюков Е.Ю. Разработка технологии упрочняющей обработки трибосопряжений природными геомодификаторами трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009. – №11. – С. 8-23
- 56.Зуев В.В. Конституция, свойства минералов и строение земли (энергетические аспекты). – С.-Пб: Наука, 2005. – 400 с.
- 57.Телух Д.М., Кузьмин В.П., Усачев В.В. Введение в проблему использования природных слоистых гидросиликатов в трибосопряжениях. [Электронный ресурс]. (www.reaa.ru/yabbfiles/Attachments/geomodifikatory.doc). Проверено 13.11.2017.
- 58.К механизму взаимодействия природных слоистых гидросиликатов с поверхностями трения / Погодаев Л.И., Буяновский И.А., Крюков Е.Ю. и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009. – №5. – С. 71-81.
- 59.Дубинин А.Д. Энергетика трения и износа деталей. – Киев: Машгиз, 1963. – С. 55.

60. Donnet C., Erdemir A. Tribology of Diamond-Like Carbon Films. Fundamentals and Applications. – Springer US XVI, 2008. – 664 p.
61. ГОСТ 9490-75 Материалы смазочные. Жидкие и пластичные. Метод определения триботехнических характеристик на четырёхшариковой машине. Введен с 01.01.1978. М. ГОССТАНДАРТ СССР, 1978.
62. ГОСТ 21150-87 Смазка Литол-24. Технические условия. Введен с 01.01.1989. М.: Стандартиформ, 2006.
63. Лист технического описания Литол-24 [Электронный ресурс]. ([http://www.gazpromneft-oil.ru/Clients/gpn.nsf/id/17D7B420C23F95A1C2257A8E00621720/\\$file/TDS%20%D0%9B%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%BB-24_rus.pdf](http://www.gazpromneft-oil.ru/Clients/gpn.nsf/id/17D7B420C23F95A1C2257A8E00621720/$file/TDS%20%D0%9B%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%BB-24_rus.pdf)). Проверено 13.11.2017.
64. Каталог Литол-24 [Электронный ресурс]. (<http://www.oilright.ru/?page=catalogitem&item=117>). Проверено 13.11.2017.
65. Технические характеристики Литол-24 [Электронный ресурс]. (<http://tpgargo.ru/catalog/smazki-gost-i-tu/litol-24>). Проверено 13.11.2017.
66. Бетехтин А.Г. Курс минералогии: учебное пособие. – М.: КДУ, 2007. – 722 с.
67. Чыонг Суан Нам Изучение физико-химических закономерностей адсорбции в суспензиях талька Олотского месторождения: автореф. дисс. ... канд. хим. наук. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 24 с.
68. Тарасевич Ю.И. Строение и химия поверхности слоистых силикатов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 246 с.
69. О процессе форстеритообразования при обжиге дунита / Будников П.П., Хорошавин Л.Б., Перепелицын В.А. и др. // Журнал прикладной химии. – 1967. – №6. – С.1369-1370.
70. ГОСТ 32335-2013 (ASTM D 4048-10) Смазки пластичные. Определение коррозионного воздействия на медную пластинку. Введен с 01.01.2015. М.: Стандартиформ, 2016.

- 71.ГОСТ Р ИСО 4287-2014 Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. Введен с 01.01.2016. М.: Стандартиформ, 2015.
- 72.Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник. – М.: Машиностроение, 2008. – С. 127-128.
- 73.Цыганок С.В. Влияние наноструктурных антифрикционных добавок на физико-химические и эксплуатационные свойства товарных пластичных: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Москва: Изд-во ООО «Генезис», 2013. 22 с.
- 74.Хуссеин Хайдар А. Твердые композиционные присадки на основе металлизированного графита для пластичных смазочных материалов: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Иваново: Изд-во ГОУ ВПО «ИГХТУ», 2009. 19 с.
- 75.Бреки А.Д. Триботехнические свойства модифицированных смазочных масел: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Спб: Изд-во СПбГПУ, 2011. 20 с.
- 76.Усачев В.В. Исследование влияния функциональных добавок к смазочным композициям на работоспособность трибосопряжений: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. СПб, Изд-во СПбГУВК, 2009. 24с.
- 77.ГОСТ 30858-2003 Обеспечение износостойкости изделий. Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Основные положения. Введен с 01.01.2006. М.: Стандартиформ, 2005.
- 78.Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: «Наука», 1976. – 280 с.
- 79.Dunaev A.V. Hypotheses mechanism of repair serpentine tribopreparatov // Nanotechnics. – 2012. – № 4 (32). – P. 58-63.
- 80.Голего Н.Л. Технологические мероприятия по борьбе с износом в машинах. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. – 193 с.

- 81.Бонер Ч. Дж. Редукторные и трансмиссионные масла. – М.: Химия, 1967. – 540 с.
- 82.Противоизносные свойства консистентного смазочного композиционного материала, содержащего смесь гидросиликатов магния / Медведева В.В., Бреки А.Д., Крылов Н.А. и др. // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2016. – №2 (19). – С. 30-40.
- 83.Оценка влияния размера частиц и концентрации порошков горных пород на противоизносные свойства жидких смазочных композиций / Медведева В.В., Скотникова М.А., Бреки А.Д. и др. // «Известия ТулГУ», Технические науки. – 2015. – №11-1. – С. 57-65.
- 84.Степанов С.Н., Табенкин А.Н., Тарасов С.Б. Метрологическое обеспечение производства. – СПб.: Издат-во Политехнического ун-та, 2012. – 147 с.
- 85.Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-ч т.: Т.2. – 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 912 с.
- 86.Исследование противоизносных свойств пластичного смазочного композиционного материала, содержащего дисперсные частицы слоистого модификатора. трения / Медведева В.В., Бреки А.Д., Крылов Н.А. и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2016. – №1 (64). – С. 75-82.
- 87.Исследование изнашивания стали ШХ15 в среде пластичных смазочных композиционных материалов, содержащих дисперсные частицы слоистого модификатора трения / Медведева В.В., Бреки А.Д. Крылов Н.А. // Технология металлов. – 2016. – №7. – С. 17-26
- 88.Противоизносные свойства консистентного смазочного композиционного материала, содержащего смесь гидросиликатов магния / Медведева В.В., Бреки А.Д., Крылов Н.А. и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и Технологии. – 2016. – №2(19). – С. 30-40.

89. О механизме противоизносного действия смазочного композиционного материала, содержащего смесь гидросиликатов магния / Медведева В.В., Бреки А.Д., Крылов Н.А. и др. // Сборник тр. междунар. конф. «Современное машиностроение: Наука и образование» ММЕСЕ'2016 / СПбПУ. – СПб., 2016. – С. 486-498.
90. Великовский Д. С. Консистентные смазки. – М.: Химия, 1966. – 264 с
91. Шаров Г.И., Ерохин И.А., Осипенко Ю.В. Применение системы энергосбережения в поршневых ДВС // Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на транспорте: труды третьего международного симпозиума по транспортной триботехнике «ТРАНСТРИБО-2005» / СПбГПУ. – СПб., 2005. – С. 212-215.
92. Торопов Н.А. Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник . Выпуск 3. Тройные системы. – Л.: «Наука», 1972. – 448 с.
93. Денисова Н.Е., Литвинов А.Н. Модель расчета температуры вспышки в зоне контакта трибосопряжений // Сборник трудов Международного симпозиума «Надежность и качество» / ПГУ – Пенза, 2008. – С. 387-389
94. Smith J. F., Vishnyakov V.M., Davies M. I. Nanoscale Friction Measurements Up to 750 °C // Tribology Letters. – 2013. – Vol.49, Issue 3. – P. 455–463.
95. Заренбин В. Г. Расчет температурной вспышки при множественном контакте и граничной смазке // ГВУЗ Вестник ПДАБА. – 2011. – №6-7. – С. 12-16.
96. Blok H. Theoretical Study of Temperature Rise at Surfaces of Actual Contact Under Oiliness Lubricating Conditions // Proc. of Gen. Discussion Lubrication and Lubricants, Instn. Mech. Engrs. – 1937. – Vol. 2. – P. 222-235.
97. Хохлов В.М. Расчет площадей контакта, допускаемых напряжений, износа и износостойких деталей машин: Монография. – Брянск: БГТУ, 1999. – 104 с.
98. Способ оценки распределения тепловых потоков в трибосопряжениях: патент 926574 СССР: МПК G01N 3/56 // Протасов Б.В., Крагельский И.В., Рамзаев А.П., Сачек Б.Я.; заявитель и патентообладатель Саратовский

политехнический институт и Институт Машиноведения им. акад. А.А. Благонравова. – 2982445/25-28; заявл. 16.09.80; опобл. 07.05.82, Бюл. №17 – 3 с.: ил.

99. Амосов А.П. Теплофизические модели трения инертных и взрывчатых материалов. – М.: Машиностроение, 2011. – 363 с.
100. Ким Н.М. Поверхностные явления и дисперсные системы. Уч.пособие. – Кузбасс: КузГТУ, 2010. – 151 с.
101. Дерягин Б.В., Чураев М.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985. – 398 с.
102. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел . – М.: Машиностроение, 1968. – 544 с.
103. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Гос. Изд-во Физ.-Мат. Лит-ры., 1963. – 472 с.
104. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1964. – 574 с.
105. Алимарин И.П. Демонстрационный эксперимент по общему курсу аналитической химии. – М.: Химия, 1974. – 288 с.
106. Дерягин Б.В. Что такое трение? – М.: Издат-во Академии Наук СССР, 1963. – 234 с.
107. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1967. – 480 с.
108. Михайлов А.В., Королев И.А., Красный В.А. Теория трения и изнашивания: Учебно-методический комплекс. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2016. – 166 с.
109. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
110. Галкин В.А. Уравнение Смолуховского. – М.: Физматлит, 2001. – 330 с.
111. Клёсов А.А. Древесно-полимерные композиты. – С-Пб.: НОТ, 2010. – 736 с.

112. Тимофеев Г.А., Красавин С.И. К вопросу определения толщины смазочного слоя при решении триботехнических задач // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2016. – № 12. – С. 1-8.
113. Крагельский И.В. Развитие науки о трении. — М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 236 с.
114. Сайт об электротранспорте [Электронный ресурс]. (<http://eltroll.ru>).
Проверено 13.11.2017.

Приложения







УТВЕРЖДАЮ

Начальник производства (по ремонту
троллейбусов и изготовлению запасных частей)

«Производственное депо»

Секриеру В.И.

«04» сентября 2017 г.

АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы Медведевой В.В.
«Повышение триботехнических характеристик консистентных смазочных
материалов путем применения дисперсных частиц гидросиликатов магния».

Настоящим актом подтверждается, что при выполнении плановых работ по обслуживанию подвижного состава в ступичных подшипниках троллейбуса 6-7614А использовались смазочные материалы, модифицированные дисперсными частицами на основе гидросиликатов магния, предложенные в диссертационной работе Медведевой В.В. «Повышение триботехнических характеристик консистентных смазочных материалов путем применения дисперсных частиц гидросиликатов магния».

Использование данных смазочных материалов в целом перспективно и позволяет сократить материальные затраты на ремонт и обслуживание подвижного состава троллейбусных парков г. Санкт-Петербург ГУП «Горэлектротранс».

На основании полученного тестового использования данных смазочных материалов можно спрогнозировать технико-экономический эффект в размере около 300тыс. руб. в год.

Начальник ЦРТ

Зеновьева Л.И.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение
 высшего образования
 «Санкт-Петербургский политехнический
 университет Петра Великого»
 (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Политехническая ул., 29, С.-Петербург, 195251
 Телефон (812) 297-20-95, факс 552-60-80
 E-mail: office@spbstu.ru

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
 деятельности

Разинкина Е.М.

2017 г.



АКТ

О внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы
 Медведевой В.В. «Повышение триботехнических характеристик
 консистентных смазочных материалов путем применения дисперсных
 частиц гидросиликатов магния».

Настоящий акт составлен о том, что материалы кандидатской диссертации заведующего лабораторией «Масла, смазки и смазочные материалы» кафедры «Машиноведение и основы конструирования» включены в монографию «Жидкие и консистентные смазочные композиционные материалы, содержащие дисперсные частицы гидросиликатов магния для узлов трения управляемых систем». Монография используется при изучении дисциплины «Основы теории смазочного действия и смазочные материалы» на кафедре «Машиноведение и основы конструирования» при подготовке магистров по направлениям:

22.04.01_13 «Трибоматериаловедение, компьютерное моделирование и технологии управления сроком службы изделий»;

15.04.01_14 «Конструкторско-технологические разработки триботехнического назначения»;

а также при выполнении учебной и научно-исследовательской работы студентов и выпускных квалификационных работ по специальности

15.04.01_14 «Конструкторско-технологические разработки триботехнического назначения».

Зав.кафедрой «МиОК» д.т.н., проф.

М.А. Скотникова