

РОСЖЕЛДОР

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)**

На правах рукописи

Камерова Эльвира Атласовна

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ
В ЖИДКИХ СМАЗОЧНЫХ СРЕДАХ**

05.02.04 - Трение и износ в машинах

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель -
доктор технических наук,
профессор
Кохановский В.А.

Ростов - на - Дону

2016 г.

4.4 Выводы.....	120
Глава 5. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ.....	121
5.1 Сравнение теоретических и экспериментальных результатов.....	121
5.2 Результаты промышленных испытаний.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	130
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	132
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	146

Введение

Актуальность темы. Высокая несущая способность полимерных композиционных фторопластсодержащих покрытий объясняется их значительной податливостью, что увеличивает фактическую площадь трибоконтакта и соответственно снижает величину реальных нормальных контактных напряжений. Существенным недостатком этих материалов являются ограничения скорости скольжения, связанные с их относительно низкой теплостойкостью.

Несмотря на уникальные антифрикционные свойства фторопласта существенным резервом повышения износостойкости рассматриваемых металлополимерных трибосистем и расширения скоростного диапазона их применимости является переход от граничного трения самосмазыванием к жидкостному трению в условиях гидродинамики.

Однако промышленные масла, проникая и агрегируясь в толще композита, инициируют деструктивные процессы в покрытии и снижают его адгезию к субстрату. Существенно ограничить отрицательное влияние жидкой масляной среды можно уменьшив контактную площадь адсорбента. Это возможно в радиально-упорных конических подшипниках с самосмазывающимся покрытием.

В этом случае во время пусков, выбегов и срывов гидродинамического клина покрытие будет работать в режиме самосмазывания и контактировать с жидкой смазочной средой только торцами, т. к. рабочая поверхность заблокирована контртелом.

В стационарный период необходимо обеспечить гидродинамический режим смазывания, что повысит допустимую скорость скольжения в результате дополнительного охлаждения подшипника картерным маслом. При этом существенно повышается износостойкость антифрикционного покрытия и ресурс трибосистем.

Степень разработанности темы. Известны описания ряда неудачных попыток снижения температурного режима в металлополимерных парах с исследуемыми покрытиями, что связано с деградиционными процессами, протекающими в покрытиях под действием жидких сред. Значительно замедлить эти процессы и использовать смазочно-охлаждающие свойства жидких смазочных материалов удалось, используя в работе безззорные радиально-упорные подшипники.

Цель работы - повышение ресурса и допустимой скорости скольжения металлополимерных трибосистем с композиционными фторопластсодержащими покрытиями путем совершенствования метода смазывания.

Выполнение поставленной цели требует решения следующего **комплекса задач**:

1. Установить основные закономерности изменения адгезионных и вязкоупругих свойств фторопластсодержащих антифрикционных полимерных покрытий в жидких смазочных средах.
2. Определить рациональный состав и режимы эксплуатации рассматриваемых металлополимерных трибосистем при граничном трении в жидких смазочных средах.
3. Совершенствовать конструкцию трибосистем для создания условий, обеспечивающих режим гидродинамического смазывания.
4. Сформировать расчётные модели и разработать алгоритм, обеспечивающий определение эксплуатационных триботехнических характеристик металлополимерных трибосистем рассматриваемого класса.
5. Выполнить промышленную проверку эффективности результатов исследований выводов и рекомендаций.

Научная новизна результатов исследований.

1. Выявленные закономерности взаимодействия матричного связующего, как адгезива, с жидкими смазочными материалами;

установленная оценка работоспособности композита в зависимости от времени экспозиции, температуры и вязкости смазочных масел.

2. Результаты анализа вязкоупругого поведения фторопластсодержащих покрытий в жидких смазочных средах, позволившие подтвердить непротиворечивость гипотезы об абсорбционном повышении контактной жесткости композитов в масляных средах, а также впервые определить критическую нагрузку, блокирующую этот эффект.

3. Итоги экспериментального определения основных триботехнических характеристик металлополимерных пар трения с композиционными полимерными покрытиями, работающими при граничном трении в среде жидких смазочных материалов в режиме самосмазывания фторопластом.

4. Комплекс теоретических и экспериментальных исследований, позволивший разработать конструкцию радиально-упорного подшипника скольжения с оппозитными осевыми канавками, обеспечивающую переход от граничного трения к устойчивому гидродинамическому режиму.

Практическая значимость работы.

1. Разработан подшипник с полимерным антифрикционным покрытием, на рабочей поверхности которого выполнены две оппозитно расположенные осевые канавки сегментального сечения, обеспечивающие при работе в картерной масляной ванне устойчивый гидродинамический режим трения.

2. Установлены рациональные режимы эксплуатации металлополимерных трибосистем с фторопластсодержащими композиционными покрытиями, дающими возможность при переходе от граничного к гидродинамическому трению увеличить допустимую скорость скольжения в 3 раза и при этом увеличить ресурс более, чем в 5 раз.

3. Получен комплекс расчетных моделей, позволяющий определить основные эксплуатационные характеристики рассматриваемых трибосистем, работающих в жидких смазочных средах, включающий следующие модели: адгезионной прочности соединения покрытие – субстрат, вклада

вязкоупругой деформации композита в формирование зазора сопряжения, интенсивности изнашивания покрытия, коэффициента трения, температуры и ресурса.

4. Результаты промышленных испытаний подшипников на технологическом оборудовании Лопастного завода ООО «Роствертол» получили удовлетворительную оценку и позволили повысить износостойкость опорных узлов на 25 – 27%.

Методы исследований. Базой теоретических исследований являлись известные классические закономерности ламинарного течения жидкостей в уравнениях Навье-Стокса и Рейнольдса.

Экспериментальные исследования выполнялись на прецизионном современном оборудовании и специальной установке при планировании полнофакторных экспериментов и статистической обработки результатов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Закономерности изменения адгезионной прочности фторопластсодержащих композиционных покрытий в жидких смазочных средах в условиях различной температуры, времени экспозиции и вязкости смазочного материала.

2. Особенности вязкоупругой деформации полимерных фторопластсодержащих антифрикционных покрытий в жидких смазочных средах и впервые установленная величина пороговой нагрузки, ограничивающей абсорбционное повышение контактной жесткости покрытий в этих условиях.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволившие повысить скоростные режимы и ресурс металлополимерных подшипников скольжения с фторопластсодержащим композиционным покрытием.

4. Триботехнические эксплуатационные характеристики (коэффициент трения, температура, интенсивность изнашивания, ресурс) металлополимерных подшипников скольжения, работающих в среде жидких

смазочных материалов в режиме граничного (самосмазывание фторопластом) и жидкостного (гидродинамического) трения.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась корректной постановкой исследовательских задач, применением классических уравнений гидродинамики и современных программ численных расчетов. Экспериментальные исследования проводились на своевременно поверенном оборудовании, по полнофакторным планам типа 2^k с последующей статистической обработкой результатов.

Апробация результатов. Основные положения работы обсуждались на научно-технических профессорско-преподавательских конференциях ДГТУ в 2012-2014г., 12-й международной научно-практической конференции «Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике» 15 ноября 2013г, 8-я Международная научно-практическая конференция «Интерагромаш-2015» 3-6 марта 2015г. Промышленные испытания подшипников выполнялись в редукторе ленточношлифовального станка Лопостного завода ООО «Роствертол» и показали удовлетворительные результаты.

Диссертация выполнялась в лаборатории трения кафедры «Технология конструкционных материалов» и в лаборатории машиностроения и высоких технологий Южного научного центра АН РФ.

1. Полимерные антифрикционные покрытия в смазочных средах

Полимерные композиционные материалы в виде антифрикционных покрытий в настоящее время широко применяются в тяжело нагруженных трибосистемах, обеспечивая значительные ресурсы современных узлов трения [5,39,50,92,102,122,137,141,145].

Высокая несущая способность полимерных композитов объясняется их значительной податливостью (модуль на порядок меньше, чем у металлов), что увеличивает фактическую площадь трибоконтакта и соответственно снижает величину реальных нормальных контактных напряжений [53,64,153].

Рассматриваемые композиты содержат в своем составе фторопласт Ф-4 (политетрафторэтилен) в виде нитей «полифен» с высоко ориентированной структурой [55,66]. Это обеспечивает некоторое повышение прочности и существенное снижение ползучести при сохранении покрытием самосмазывающих свойств.

Матричным материалом композита и одновременно адгезивом, закрепляющим покрытие на субстрате, является растворное фенольное связующее модифицированное термостойким каучуком [44,118].

Несмотря на уникальные антифрикционные свойства фторопласта (ПТФЭ) [8,12,130,131] и его способность работать в узлах трения в режиме самосмазываемости существенным резервом повышения его износостойкости представляется дополнительное применение смазочных материалов. Тогда во время пусков и выбегов будут работать покрытия, а в стационарный период – смазка. Однако подавляющее количество промышленных жидких смазочных материалов содержат поверхностно активные присадки, которые, в силу своих свойств, способны нарушить адгезионные связи и существенно снизить прочностные параметры покрытия и его износостойкость [27,36,54,101].

Последнее обстоятельство делает исследования по влиянию жидких и пластичных смазочных материалов на триботехнические свойства рассматриваемых полимерных покрытий весьма важными и актуальными.

1.1 Состав, структура и технология нанесения покрытий

Состав полимерного композита, применяемого в виде покрытий антифрикционного назначения, определяется эксплуатационными требованиями и композиционной структурой материала.

Армирующая компонента композита осуществляет прочностные, антифрикционные и технологические функции [30,55,92]. Антифрикционные функции выполняются фторопластовыми нитями «полифен», имеющими относительно низкую прочность и практически нулевую адгезию ко всем связующим [36,43,131]. Это – обратная сторона уникальной антифрикционности фторопласта [36,44,149].

Прочностную и технологическую функции выполняют нити из полимера другого химического состава – полиимида. Эти нити, торговой марки «аримид Т», значительно прочнее фторопластовых (см. табл.1) и имеют хорошую адгезию к связующим, применяемым в качестве матричных материалов, то есть обеспечивают технологичность покрытий [36,90,103].

Следует отметить, что в антифрикционных покрытиях исследуемого класса нашли применение самые различные волокна: вискозные, полиэфирные, поливинилспиртовые, хлопковые и ряд других [55], однако нити отечественного производства марки «аримид Т» позволяют точнее обеспечить в композите термическую равностойкость [72,90,103].

Соединение отдельных нитей осуществляется чисто механически: скручиванием, валянием (войлок или мат), трикотажными вязаниями [31,123], в виде шнуров, лент и путем ткацких переплетений. Последний – это наиболее технологичный способ, а специальная техническая ткань позволяет надежно закрепить фторопластовые нити в покрытии и придавать им требуемое направление.

Таблица 1.1 Физико-механические свойства полимерных нитей
[90,103,111,112,130,132,147]

№ п/п	Свойство		Тип нитей	
	Наименование	Размерность	Полифен ТУ 6-06-9-7-81	Аримид Г ТУ 6-06-9-11-80
1	Плотность	Г/см ³	2,2 – 2,3	1,41 – 1,43
2	Рабочая температура	°С	275	300
3	Модуль при растяжении	МПа	3240	9360 - 10400
4	Водопоглощение	%	0	1,5
5	Прочность	Гс/текс	15,3	45 - 55
6	Прочность при сжатии поперёк волокон	МПа	500-600	1700-1900

Тканые каркасы композита выполняются таким образом, чтобы на лицевую рабочую сторону покрытия было выведено до 100% фторопластовых нитей, а на изнанку, прилегающую к металлической поверхности подшипника, до 85 – 95% прочных полиимидных нитей с хорошей адгезией к связующему [50,53,66]. Это реализуется в полуторослойных тканях атласного или саржевого плетения (2 утка, 1 основа) или в однослойных саржах типа 1/2 и 1/1 (полотно). В последних случаях фторопластовые нити вводятся в ткань путем предварительной скрутки с другими нитями. Для повышения прочности и износостойкости тканого каркаса композита в армирующей ткани на рабочую поверхность иногда выводятся прочные нити с шагом 5-6 мм.

Матричное связующее объединяет все компоненты композита в единый материал, перераспределяет действующие напряжения между отдельными элементами армирующего каркаса, обеспечивает адгезию покрытия к субстрату и защищает армирующий каркас от внешних воздействий среды [44,63,67,120].

В качестве матрицы композита могут быть использованы самые разные связующие [5,11,46,80,143,145]: эпоксидные, фенолоформальдегидные,

полиимидные, кремнийорганические, полиэфирные, цианакрилатные и т.п. Общим требованием к ним, помимо экономических, является хорошая адгезия к прочным волокнам и субстрату. Механические и теплофизические свойства матрицы зависят от конкретных условий эксплуатации узла трения и выбор ее может варьироваться в весьма широких пределах.

Независимо от химической природы, связующие, в рассматриваемом классе композитов, имеют общие характерные особенности. Адгезия (и смачиваемость) матрицы к фторопласту полностью отсутствуют [10,36,37,131]. Под давлением (при пропитке и отверждении покрытия) связующее механически заполняет пространство между нитями и несплошности между отдельными филаментами во фторопластовых нитях. Этим объясняется наличие пор и неравномерной плотности матрицы по сечению композита.

Кроме того, наружный чисто фторопластовый слой, лишь частично заполненный связующим, представляет собой как бы ворс, относительно легко деформируемый рабочей нагрузкой [66]. Это доказывает S-образная кривая зависимости напряжения – деформация, полученная при сжатии композита.

Выведение части фторопластовых нитей на изнанку покрытия образует сеть микроканалов и микропор как в рабочей, так и в адгезионной области покрытия – субстрат (Рис.1.1). Несплошности в этой области и в сечении композита заполняются смазочным материалом и в результате его терморасширения и действия поверхностно активных присадок становятся источником деградиационных процессов, снижающих износостойкость покрытия.

НЕСПЛОШНОСТИ В СЕЧЕНИИ КОМПОЗИТА

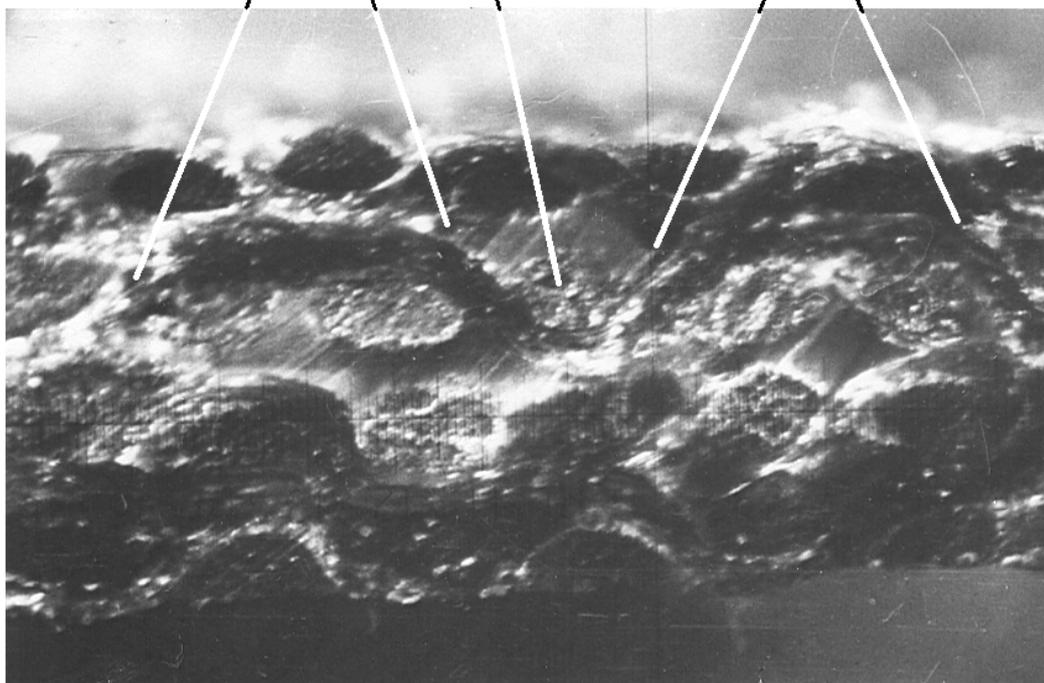


Рис. 1.1. Сечение полимерного композита ($\times 60$) [58]

В нашем случае, в качестве матричного связующего и одновременно адгезива для фиксации покрытия выбран растворный фенолформальдегидный клей марки Гипк-114 по ТУ 6-05-251-65-77 (АФК-101), модифицированный термостойким каучуком. Это одно из наиболее экономичных, технологичных, маслбензостойких и теплостойких связующих [43,46]. Матрица составляет 16–32 вес. % и после отверждения представляет собой совокупность двух взаимопроникающих пространственных сеток [46,118], а структура ее является аморфной практически по всему сечению композита.

Следовательно, анализ влияния на композиционную структуру антифрикционных покрытий их отдельных компонентов позволяет сделать вывод об определяющей роли в композиционной структуре армирующего каркаса покрытия.

Технология нанесения покрытий складывается из 2-х этапов. В начале изготавливают препрег – тканый каркас, пропитанный неотвержденным раствором связующим [63,67]. Затем препрег сушат, раскраивают в

соответствии с размером и формой трибоповерхности, располагая фторопластовые нити параллельно вектору скорости скольжения и фиксируют на поверхности трения [69]. Отверждение связующего в покрытии выполняется в соответствии с ТУ. Режимы отверждения применяемого матричного материала ГИПК-114 (АФК-101) являются: нормальное давление 1 – 2 МПа, создаваемое специальными приспособлениями; температура $200 \pm 5^{\circ}\text{C}$, обеспечиваемая термошкафами, и выдержка при этой температуре в течение 3-х часов [74]. Для создания необходимого давления отверждения рационально использовать упругую деформацию подшипниковой втулки, сформировав замкнутый технологический пакет [66,109] (Рис.1.2).

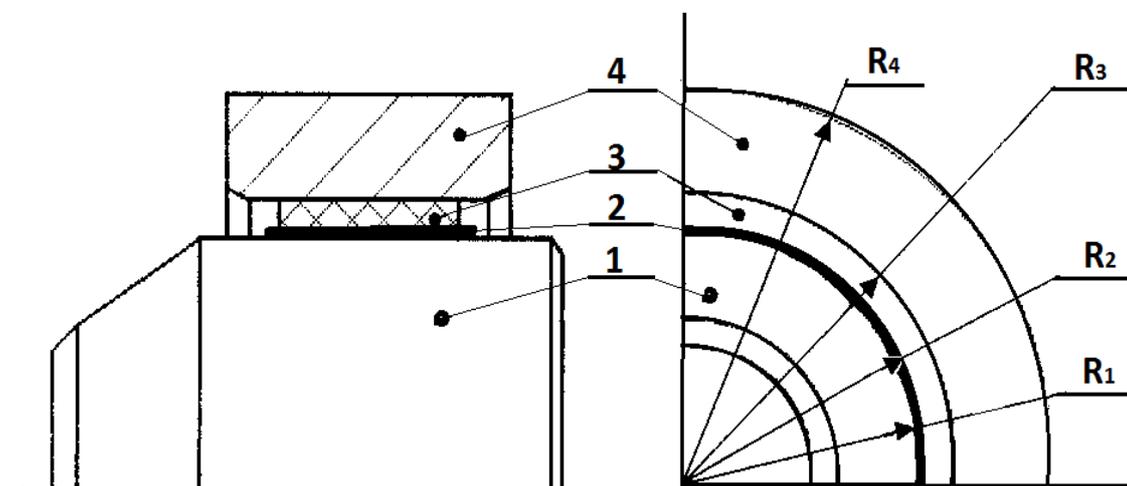


Рис. 1.2. Схема замкнутого технологического пакета: 1-оправка, 2-антиадгезив, 3-препрег, 4-подшипниковая втулка

Таким образом, композиционную структуру антифрикционного покрытия и его функциональные качества определяют состав и технология одновременного отверждения матричного материала по сечению и в зоне адгезионного крепления покрытие – субстрат.

1.2 Рабочие процессы на контактных поверхностях покрытий

Главными процессами, протекающими в области трибоконтакта, являются трение и изнашивание. Причем, для подшипников с рассматриваемым композиционным покрытием в большинстве случаев

основным является изнашивание, поскольку потери на трение компенсируются избытком мощности машины. Отдельные фазы изнашивания антифрикционных фторопластсодержащих покрытий описаны в обзоре [75].

Известно [91,129,113,147], что во фторопластсодержащих композитах механизмы трения и изнашивания обеспечиваются специфическим строением фторопласта, которое представляет собой ориентированные кристаллические плоскости, разделенные аморфными областями. Кристаллические образования легко проскальзывают по аморфным прослойкам, обеспечивая самосмазывание и отделяются как частицы износа.

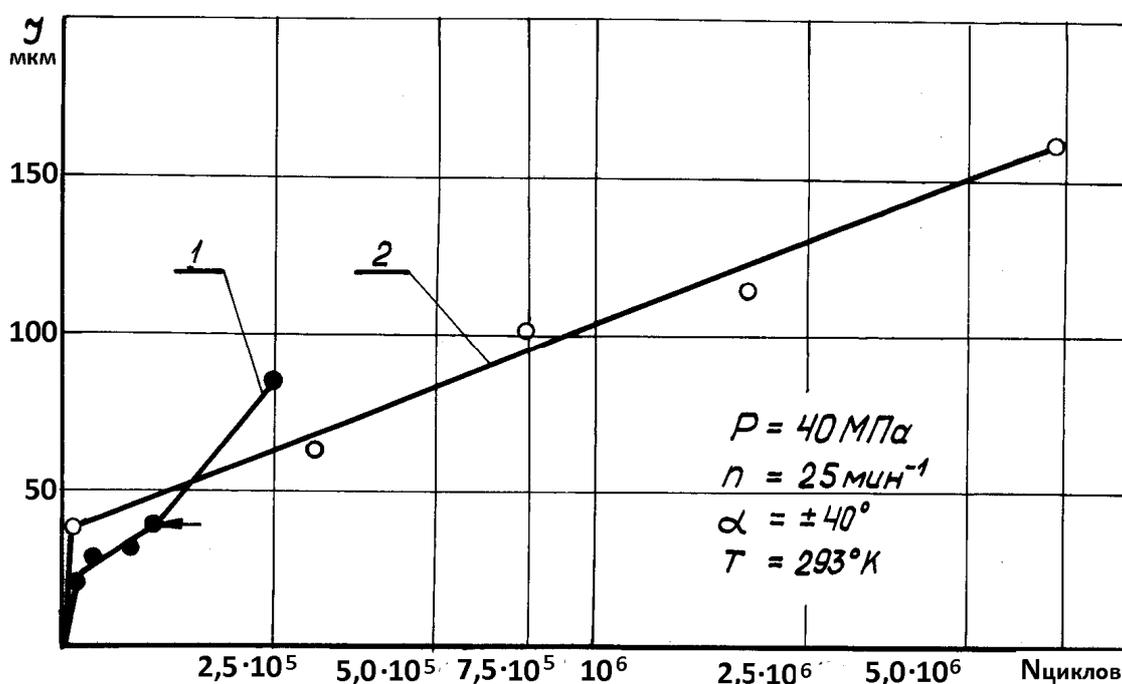


Рис. 1.3. Графики износа: 1- металлофторопластовой ленты и 2- антифрикционного покрытия на основе неправильного атласа [66]

По данным [13,76,82,141,146,152] в металлополимерных парах трения, включающих фторопластсодержащие материалы в основном реализуется адгезионный тип изнашивания, что подтверждается близостью графиков на рис.1.3 линейной зависимости. Основой адгезионного изнашивания является фрикционный перенос полимера [13,129,147].

Исходная поверхность покрытия состоит из фторопластовых волокон с тонкой относительно жесткой пленкой матричного фенольного связующего.

В ходе начального контакта эта пленка разрушается. Ее фрагменты могут быть вынесены из зоны контакта, перенесены на контртело или частично поглощены фторопластовым слоем. Фторопласт способен обволакивать твердые частицы без повреждения рабочего слоя [93,100].

Дальнейший подвод энергии вызывает аморфизацию фторопластовой поверхности [25,26], как следствие интенсивной деформации. Одновременно растет площадь фактического контакта, снижаются контактные нормальные напряжения и происходит текстурирование фторопласта в направлении движения [11,13,26,49,73,94].

В процессе аморфизации и текстурирования на границах кристаллических образований в волокнах возникают структурные дефекты в виде межфибрильных микротрещин [13,148,153]. Текстурирование сопровождается вытягиванием чешуеподобных пленок – будущих частиц износа [13,25]. Адгезионное отделение этих чешуек формирует частицы износа, которые частично переносятся на металлическое контртело и частично удаляется из трибоконтакта [130,148].

Пленка переноса фторопласта является не сплошной, а фрагментарной из-за слабой адгезии к металлу контртела. Когда она достигает критической толщины примерно 10 – 40нм, то выносится из зоны трения [13,25,113].

Продукты износа фторопласта являются своеобразным смазочным материалом. При их сохранении в контактной области или при искусственном туда введении (например, натиранием контртела) ресурс трибосопряжения увеличивается на 10 – 25% [82,139,140].

Перенесенный на контртело полимер – это фторопласт, подвергнутый термомеханической и термоокислительной деструкции [76,144], в котором образовались активные макрорадикалы [13,94]. Они частично рекомбинируют, а частично реагируют с активированной трением поверхностью контртела и компонентами смазочных материалов, также подвергнутых деструкции [13,144,153].

Известно [13,144,147], что для всех полимерных материалов

характерен фрикционный массоперенос. Поэтому, рассматриваемые гибридные композиты с фенольной матрицей переносят на металлическое контртело и фенольные фрагменты, но поверхность этих фрагментов всегда покрыта слоем фторопласта толщиной 2 – 3 нм [49,144,147].

Период приработки трибосопряжения с композиционным покрытием продолжается до заполнения пленкой переноса отдельных впадин между микронеровностями металлического контртела [140,147].

Стационарный период процесса трения характеризуется наибольшей продолжительностью, динамическим равновесием разрушения и образования пленки фрикционного переноса [147].

В период катастрофического изнашивания выработан весь объем фторопластовых нитей и удалены из трибоконтакта продукты износа. В этот период начинают изнашиваться прочные волокна. Коэффициент трения при этом возрастает, а износостойкость падает и обнажается металлический субстрат.

Таким образом, процесс трения фторопластсодержащего гибридного композита характеризуется в основном нарушением межмолекулярных связей, а процесс изнашивания нарушением межатомных связей. Причем, приведенный в работе [133] коэффициент диффузии масла МС-20 в композит равный $0,1 \cdot 10^{-8}$ см²/с показывает, что жидкие среды существенно влияют на оба эти процесса.

Ресурс любого подшипника определяется величиной допустимого зазора трибосопряжения [12,39,78], наибольшую часть которого формирует процесс изнашивания. Однако полимеры, являясь вязкоупругими материалами, подвержены ползучести под действием рабочих нагрузок. Вклад деформации ползучести в формирование зазора металлополимерного трибосопряжения может достигать в зависимости от температуры и нагрузки 20 - 40% от толщины покрытия [7,54,58,60,82]. Кроме того, величина деформации ползучести соизмерима с размерами поля допуска на рабочий диаметр подшипника (для размеров примерно до 50мм).

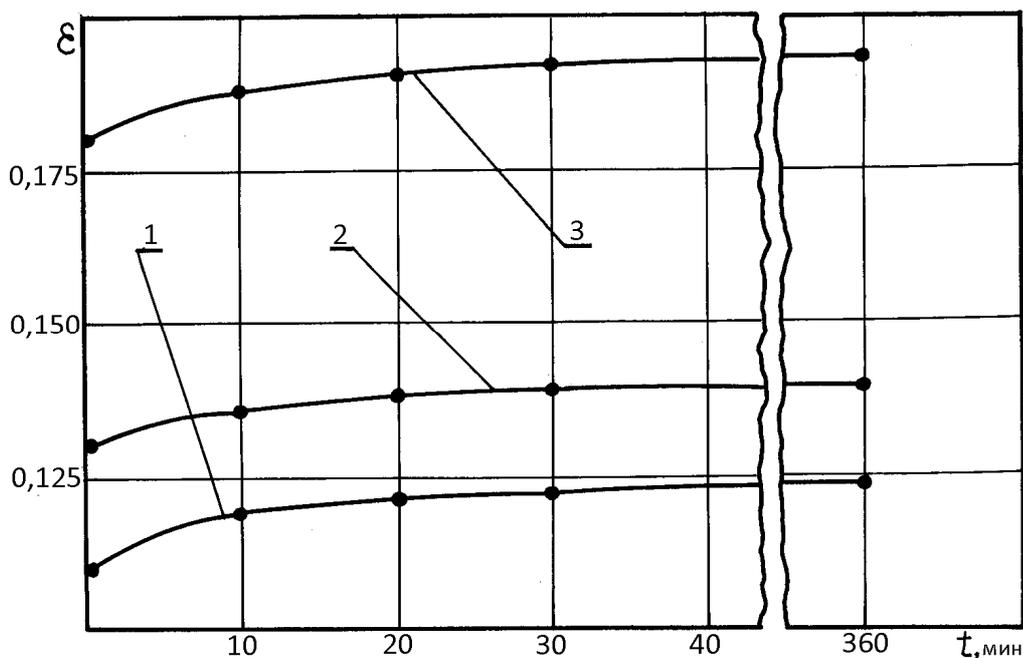


Рис.1.4. Кривые ползучести при сжатии композиционных покрытий на основе 1 –ткани, 2 –трикотажа, 3 –нетканого материала (войлока)[55]

Типичные кривые ползучести в воздушной среде для исследуемых покрытий представлены на рис.1.4. При 20⁰С деформация достигает ≈ 20%.

В качестве моделей ползучести используется целый ряд выражений [6,88,99]. Для полимерных композиционных покрытий [52,54,60,83] удобно 3-х параметрическое выражение наследственного типа, полученное из уравнения Максвелла – Томсона - «типичное твердое тело»

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \left(\frac{\sigma}{E_\infty} - \frac{\sigma}{E_0} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (1.1)$$

где σ — напряжения сжатия,

E_0 и E_∞ - соответственно мгновенный и равновесный модули,

τ - постоянная времени ползучести, t – время.

Параметры выражения (1.1) имеют физический смысл и определяются регрессионными эмпирическими моделями [60]. Равновесный модуль полимерного композита E_∞ составляет ≈ 80 – 90% мгновенного E_0 .

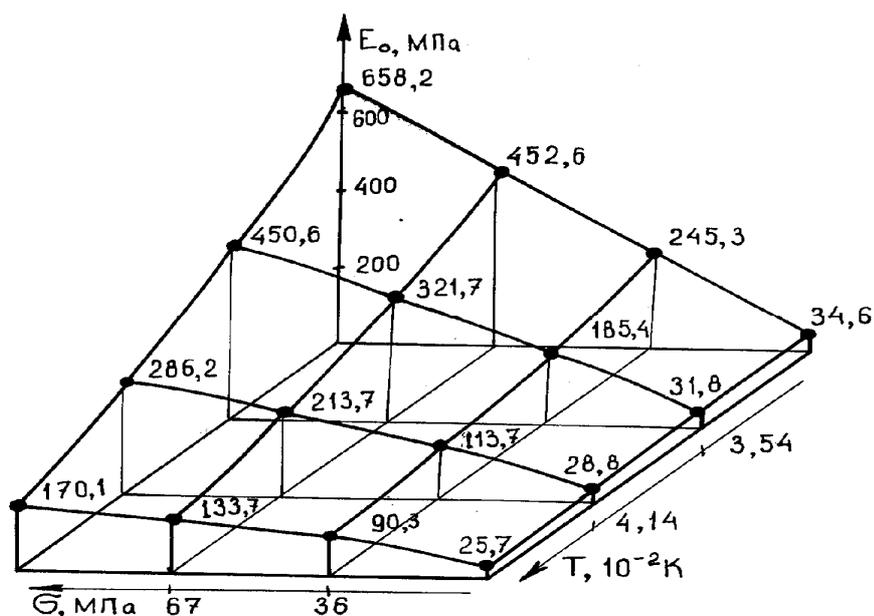
Жидкие среды, разрыхляя матрицу композита, безусловно влияют на его вязкоупругие свойства. Известно [10,14,22,60,68,99], что начальный

процесс ползучести является нестационарным, занимает по времени примерно 3τ (постоянных времени ползучести) и представляет собой до 90% суммарной деформации [60].

Таким образом, ползучесть протекает параллельно приработке трибосопряжения и величина деформации ползучести суммируется с приработочным износом. Это обстоятельство и приводит у ряда исследователей [82,146] к завышенным приработочным износам композиционных полимерных покрытий.

Кроме процессов протекающих на рабочей поверхности антифрикционного полимерного композита (трения и изнашивания) и в его объеме (ползучести), одну из главных ролей в обеспечении работоспособности покрытия играет прочность его адгезионной связи с металлическим субстратом.

Матричное фенольное связующее, являясь термореактивным полимером с аморфной структурой, обладает свойствами полимеров и подчиняется закономерностям их поведения [19,46]. Особенностью его адгезионной функции можно считать контакт не только с полимерным материалом, но и с металлом.



а)

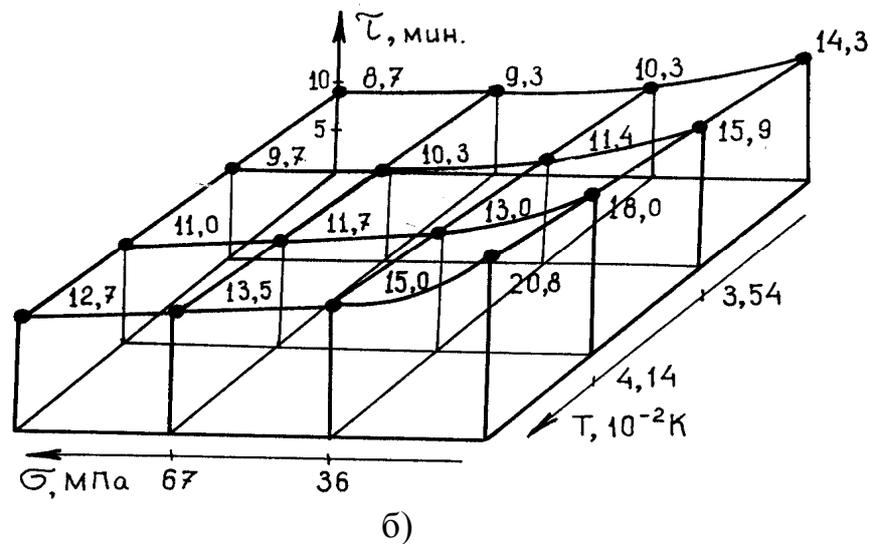


Рис. 1.5. Зависимость параметров ползучести от термосилового нагружения: а) - мгновенного модуля, б) - постоянной времени ползучести

Следует отметить, что нарушение адгезии покрытия с металлическим субстратом сразу делает подшипник неработоспособным. Однако тонкий адгезионный слой матричного связующего непосредственно соприкасается с активной средой только небольшими торцевыми поверхностями. С рабочей поверхности он в какой-то степени защищен металлическим контртелом и толщиной композита, сквозь который еще должна проникнуть среда, а со стороны изнанки – металлом. Эти обстоятельства возможно несколько повышают адгезионную прочность покрытия, замедляя проникновение жидкой среды в адгезионный слой.

Очень важным при нанесении покрытий является строгое соблюдение технологических режимов, обеспечивающих полную полимеризацию связующего. В противном случае его недоотвержденные легкие фракции могут вымываться жидкими средами.

Одним из способов оценки адгезионных свойств клеевого шва, гибкое покрытие – металлический субстрат, являются испытания на неравномерный отрыв или отслаивание [34,43,89,127,128]. В связи с тем, что покрытие, даже при полном отделении от субстрата, сохраняет гибкость угол отслаивания принимается равным 180° .

Такая оценка адгезионной прочности клеевого шва в воздушной среде дана в работах [63,68,89] и равна для применяемого матричного связующего 2,0–2,3кН/м. Величина остаточной прочности антифрикционных покрытий после их 100 часовой выдержки в водных средах приведена на рис. 1.6.

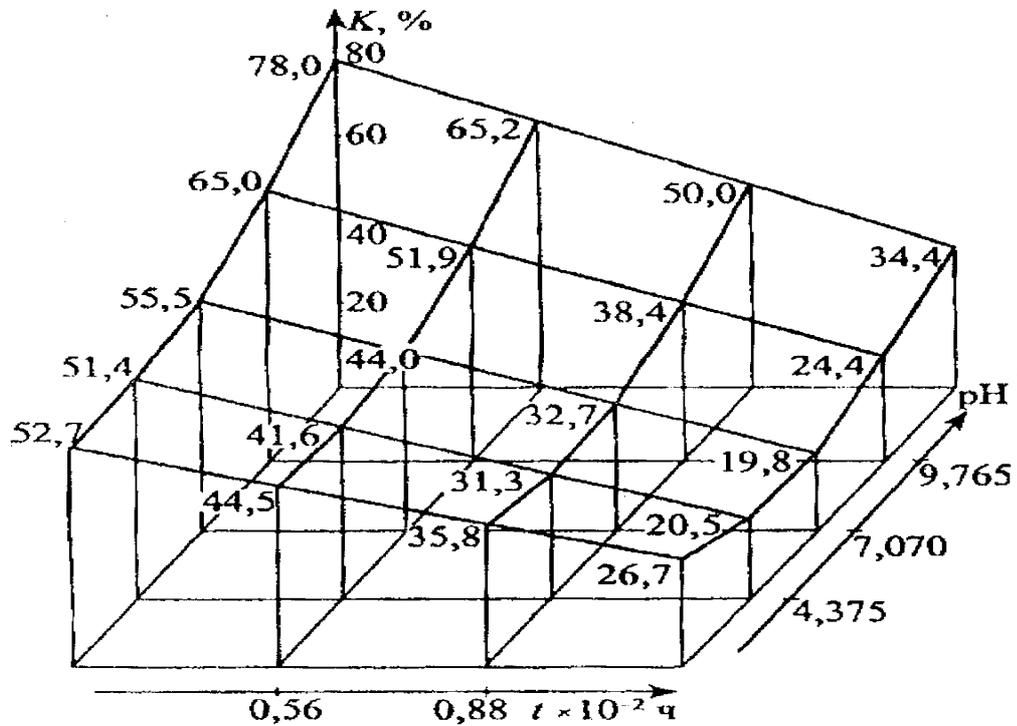


Рис.1.6. Остаточная адгезионная прочность покрытия в среде воды [68]

Существенную роль для адгезионной прочности играет природа субстрата. Так, после 500 часовой экспозиции в индустриальном масле марки И12А адгезионное соединение на стали ст.3 потеряло 33% прочности, а на бронзе БрО10Ф1 только 26% [53].

Это связано в первую очередь с коррозионной стойкостью металла субстрата в различных средах. Некоторые металлы могут вытравливаться маслами и продуктами их деструкции, что разрушает подслоем клеевого шва и работоспособность покрытия.

Таким образом, анализ приведенных данных показывает, что подавляющее количество применяемых в машиностроительной практике активных жидких сред различного технологического или конструкционного назначения оказывает значительное влияние на все свойства и процессы,

связанные с работоспособностью полимерных композиционных покрытий: трение и изнашивание рабочей поверхности, объемной ползучести и адгезионного закрепления на субстрате. Вместе с тем, данные о влиянии на триботехнические характеристики антифрикционных полимерных покрытий жидких смазочных сред в современной литературе практически отсутствуют.

1.3 Физико-химические процессы в контактных зонах

Смазка, как правило, облегчает трение и уменьшает износ. Однако действие смазочного материала может вносить в работу металлополимерной трибосистемы и отрицательные моменты. Так, проникая в поры, микроканалы и диффундируя в толщу покрытия жидкие масла могут способствовать разрыхлению композита; вымывая продукты износа и недоотвержденные низкомолекулярные вещества из матричного связующего. Они, препятствуя переносу пленки фторопласта на контртело, могут снижать износостойкость и, блокируя водородные связи, уменьшать адгезионную прочность покрытия.

В гибридном антифрикционном композите только фторопластовые нити являются гидрофобным химически инертным элементом материала. Полиимидные волокна способны абсорбировать жидкости до 5% вес.[90,132]. Фенолкаучуковая матрица химически стойка к большинству активных жидких сред, но наличие пор, заполняемых жидкостью и ее последующее терморасширение под действием генерируемого трением тепла, разрыхляет композит [46,57].

Известно [14,85], что свойства сетчатых полиметиленафенолов в значительной степени определяются большим числом физических узлов, возникающих в результате контакта гидроксильных групп фенольных ядер. Разрушение этих узлов при сорбции полярных молекул сопровождается снижением механических свойств, которое аналогично изменениям, наступающим при температуре, превышающей температуру устойчивости водородных связей.

Набухание полимерных композитов в различных жидких средах [14,53] является результатом диффузии среды и растворенных в ней веществ. Набухание является одним из критериев оценки работоспособности полимерного материала в жидких средах. По [3,48] привес полимера в результате его набухания в жидкой среде на 1% эквивалентен увеличению его размеров на 0,02%.

В литературе [53] имеются сведения о набухании исследуемых композитов в виде покрытий на оксидированном титане в горюче-смазочных жидких средах при 22⁰ С (Рис.1.7).

Анализ графиков показывает, что равновесное или близкое к нему насыщение у всех использованных жидкостей наступает примерно за 60-80 часов, а его величина обратно пропорциональна вязкости жидкостей. Это подтверждается данными [53] о коэффициентах диффузии (табл.1.2).

В работе [101] приводятся модели, описывающие влияние диффузии бензина на жесткость (модуль) полиформальдегида.

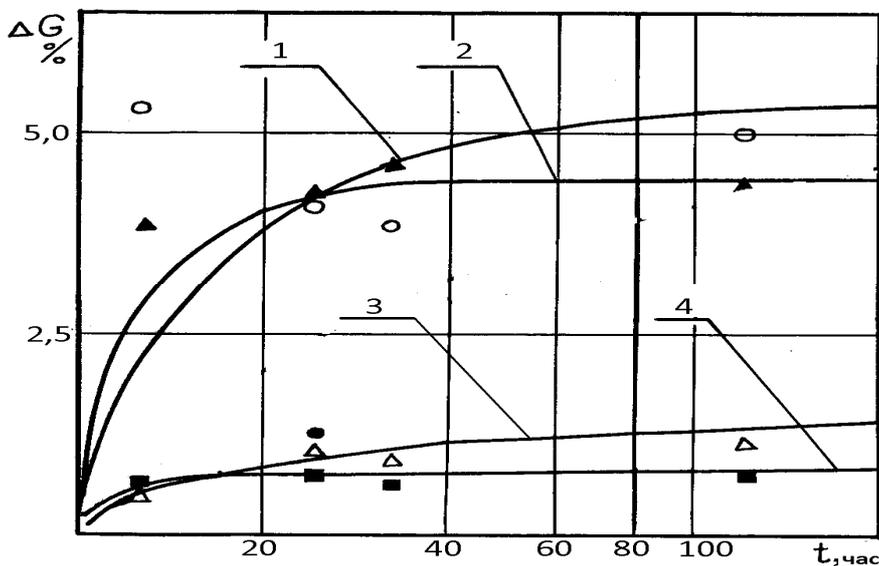


Рис.1.7. Увеличение массы покрытий в средах: 1- реактивного Т-1 и 2- дизельного топлива ДЛ, 3 - синтетического Б-3В, 4- нефтяного масла МС-20

Вызванное бензином снижение жесткости описывается выражением

$$E = 1 - p \cdot C^{1,5}, \quad (1.2)$$

где E – средний модуль,

p – параметр модели,

C – относительный привес.

Таблица 1.2. Диффузионные параметры композита [53]

№ п/п	Среда	Температура, °С / К	Коэффициент диффузии, $10^{13} \text{ м}^2/\text{с}$
1	Реактивное топливо Т-1	20/233	1,051
		60/293	1,377
2	Дизельное топливо ДЛ	20/233	1,284
		60/293	2,007
3	Синтетическое масло Б-3в	20/233	0,902
4	Минеральное масло МС-20	20/233	0,487

Следует отметить, что величина постоянной скорости переноса жидкой среды, определяющей набухание полимерных композитов в средах нефтяного происхождения, коррелирует с уровнем вязкости этих сред, что подтверждается полученным в [53] коэффициентом линейной корреляции, равным + 0,962 с достоверностью 95%.

В работах [53,85] показано, что характер приращения веса полимерных композитов в жидких средах носит линейный характер, то есть подчиняется законам Фика.

Наряду с приращением массы полимеров в активных жидких средах наблюдается и обратный процесс – миграция низкомолекулярных веществ в окружающую среду [98,101]. У термореактивных полимеров, в частности фенопластов, он менее интенсивен, чем у термопластов (у полистирола до 0,48 мг/л).

Жидкие смазочные материалы оказывают значительное влияние на все физико-механические свойства полимеров [27,54,133]. Так, авиационное масло МС-20 повышает относительное удлинение при разрыве с 185 до 200%, а керосин – до 330%. Поликарбонат после экспозиции в масле

МС-20 при температуре 70°C теряет 7% прочности и 44% удлинения при разрыве, то есть охрупчивается.

Большинство жидких сред существенно снижают деформационно-прочностные характеристики полимерных материалов. Наиболее опасными областями для развития трещин разрушения являются у аморфных полимеров (матричное связующее покрытий) межмолекулярные образования, а у кристаллических (волокна нитей каркаса) – межсферолитные [42,124]. В работе [124] приводятся данные о том, что сорбция жидкой среды (керосин) тем выше, чем больше процент кристалличности и величина действующих напряжений (Рис.1.8).

К сожалению, в современной технической литературе практически полностью отсутствуют прямые экспериментальные данные о процессах трения и изнашивания полимерных композиционных покрытий данного класса в среде жидких смазочных материалов. Результаты исследований аналогов дополняют только качественную картину процесса. Некоторые авторы [2] просто не учитывают изменение свойств полимеров в средах смазочных масел.

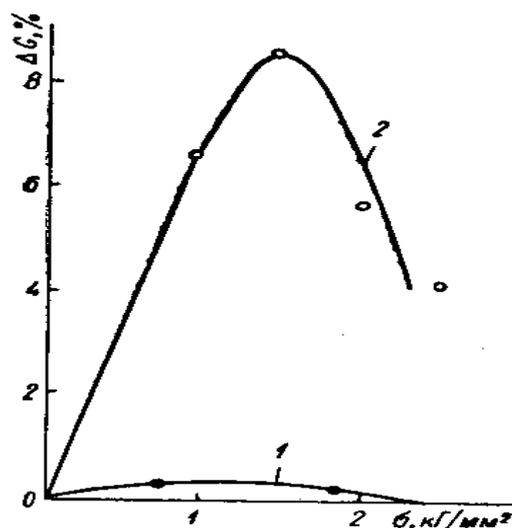


Рис.1.8. Зависимость количества сорбированного фторопластом Ф4-Д керосина от напряжений и степени кристалличности 1 – 45%, 2 – 80% [124]

Изменения свойств полимеров в этих жидких средах сказывается и на

таких вязкоупругих характеристиках как ползучесть. В работе [84], на примере ползучести при растяжении, указывается, что распределение концентрации жидкой фазы по объему материала зависит от геометрической формы и размеров полимерного образца. Следствием этого является различие деформации ползучести у образцов разной толщины, что требует специальных экспериментальных исследований ползучести для покрытий с различным армирующим каркасом.

Данные по ползучести полиформальдегида при растяжении [84] показывают, что деформация ползучести в воде на 20% больше, чем на воздухе. Следует отметить, что по данным [124] наименьшее влияние жидких сред оказывается на полимер при совпадении траекторий напряжений с направлением ориентации макромолекул полимера (рис. 1.9).

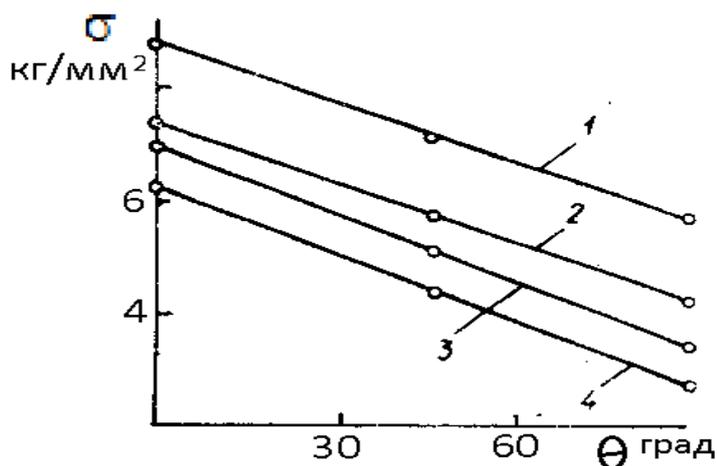


Рис. 1.9. Зависимость разрушающего напряжения от угла между растягивающей силой и направлением ориентации полимера на воздухе - 1,2 и в спирте - 3,4.

Для полимерных композиционных покрытий это принципиально невозможно, так как рабочая сжимающая нагрузка в подшипниках (σ) действует перпендикулярно направлению волокон фторопласта в ткани. Зато траектории касательных напряжений (τ) в несколько раз меньше совпадают с ними.

В работе [57] приводятся подробные данные о ползучести при сжатии исследуемых покрытий в водных средах. Установлен факт повышения

жесткости покрытия, характеризуемый мгновенным модулем, в среде дистиллированной воды в связи с ее проникновением в толщу композита. Кроме того, показано, что при высоких нагрузках порядка 100 МПа этот эффект пропадает. Предполагается, что при высоких нагрузках вода из пор композита отжимается.

Следует отметить, что, абсорбируясь, отдельные водные включения в порах композита в виде эллипсоидов вращения, не просто повышают жесткость как несжимаемая фаза, но еще способствуют локальному росту напряжений [22,70].

Адгезия полимерных связующих в значительной степени определяется водородными связями [43,45], которые блокируются средами с активными ОН группами. Характерно, что после удаления активных сред сушкой, адгезионная прочность восстанавливается.

В металлополимерных трибосистемах полимерные композиционные покрытия далеко не всегда являются наиболее слабым звеном системы. По данным [120] окружающая среда часто сильнее действует не на клей, а на склеиваемые материалы.

Композит покрытия, благодаря армирующему каркасу, имеет весьма высокую когезионную прочность и разрушается, в обычных условиях эксплуатации, только в результате последовательного изнашивания. Как значительно менее прочный характеризуется адгезионный шов, состоящий из тонкого слоя матричного связующего и поверхности субстрата.

По своей природе и поверхностной структуре металл субстрата является гидрофобным (плохо смачиваемым жидкой средой), но поверхностная даже тонкая пленка окислов делает его гидрофильным. А все физико-химические взаимодействия твердого тела с жидкой средой начинаются со смачивания его поверхности.

Природа материала субстрата, благодаря своей поверхностной энергии [44,85], не только определяет величину сил адгезионного взаимодействия, но также и долговечность их существования в различных активных жидких

средах. Последнее обстоятельство лимитируется коррозионной стойкостью металла субстрата. Подслоная (под слоем покрытия) коррозия образует слой рыхлого оксида, как правило, значительно менее прочного, чем основной металл субстрата, и приводит к быстрому разрушению адгезионного шва. Покрытие просто отслаивается без всякого внешнего силового воздействия.

В работе [53] приводятся результаты сравнительной адгезионной прочности закрепления антифрикционных покрытий рассматриваемого класса на стальном $P_{ж}$ и бронзовом $P_{б}$ субстрате в виде регрессионных моделей, связывающих прочность клеевого шва на неравномерный отрыв и время выдержки в среде индустриального минерального масла марки И12А.

Модели имеют структуру экспонент

$$\left. \begin{aligned} P_{ж} &= 0,764 \exp(-0,068 t), \\ P_{б} &= 0,621 \exp(-0,040 t), \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

где t – время выдержки в масляной среде.

Анализ моделей показывает, что бронзовый субстрат обеспечивает повышение долговечности адгезионного шва более чем на 20%. Эффект обеспечивается более высокой коррозионной стойкостью бронзы.

Таким образом, отдельными экспериментами и особенностями структуры полимеров установлено существенное влияние жидких нефтяных промышленных продуктов практически на все эксплуатационные свойства антифрикционных полимерных композиционных покрытий (трение, изнашивание, ползучесть, адгезионную технологию закрепления).

Следует отметить, что отсутствие в настоящее время систематических исследований физико-химического влияния жидких смазочных сред на триботехнические параметры металлополимерных трибосистем препятствует внедрению в практику их эксплуатации высокоэффективных режимов жидкостного трения.

1.4 Выводы

1. Анализ специальной технической литературы показал, что

исследование триботехнических параметров полимерных антифрикционных покрытий в жидких смазочных средах значительно отстает от потребности промышленности в применении эффективных методов жидкостной смазки в тяжело нагруженных металлополимерных трибосистемах.

2. Основными направлениями, обеспечивающими устойчивую работоспособность композиционных полимерных покрытий в среде жидких смазочных материалов являются исследования следующих процессов: трения, изнашивания, ползучести и адгезионной прочности.

3. На основе обобщения и анализа имеющейся информации установлена последовательность общих кинетических этапов взаимодействия жидких смазочных материалов с полимерными антифрикционными покрытиями на металлическом субстрате, что обеспечит мероприятия по локализации разрушающего действия этих сред.

4. Анализ изложенного позволяет реализовать эффективное использование рассматриваемых металлополимерных трибосистем в режимах жидкостного смазывания на основе всесторонних серьезных теоретических и экспериментальных исследований.

1.5 Цель и задачи исследований

Анализ, проведенный в обзоре научно-технической литературы, посвященной применению антифрикционных полимерных композиционных покрытий показал высокую эффективность рассматриваемых металлополимерных трибосистем, эксплуатируемых в различных условиях. Вместе с тем известно, что практически все жидкие среды оказывают существенное влияние на целый ряд физико-механических свойств полимерных материалов. Это обстоятельство не может не сказаться и на триботехнических характеристиках полимерных композитов, в частности на их ресурсе. Результаты, приведенные в литературных источниках, как показал их анализ, носят частный характер и включают ограниченную информацию.

С другой стороны, наиболее эффективным режимом работы узлов трения скольжения является жидкостный, гидростатический или гидродинамический. Использование в подобном режиме полимерных покрытий представляется весьма перспективным. В этом случае полимерное покрытие будет работать только в периоды пусков и выбегов или при других причинах отсутствия смазочного материала, а в условиях стационарного жидкостного режима изнашивания покрытия не будет. Все изложенное доказывает необходимость серьезных исследований влияния масел на триботехнические свойства композита и выработку рекомендаций по их рациональному применению.

Следовательно, цель данной работы может быть сформулирована следующим образом: повышение ресурса и допустимой скорости скольжения металлополимерных трибосистем с композиционными фторопластсодержащими покрытиями путем совершенствования метода смазывания.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих частных задач.

1. Установить основные закономерности изменения адгезионных и вязкоупругих свойств фторопластсодержащих антифрикционных полимерных покрытий в среде жидких смазочных материалов.
2. Определить рациональный состав и режимы эксплуатации рассматриваемых металлополимерных трибосистем, при граничном трении в жидких смазочных средах.
3. Совершенствовать конструкцию трибосистем для создания условий, обеспечивающих режим гидродинамического смазывания.
4. Сформировать расчетные модели, обеспечивающие определение эксплуатационных триботехнических характеристик металлополимерных трибосистем рассматриваемого класса.
5. Промышленная проверка эффективности результатов исследований, выводов и рекомендаций.

2. Смазывание подшипников с полимерным покрытием

Особенностью рассматриваемых металлополимерных трибосистем с композиционным фторопластсодержащим полимерным покрытием, работающих в смазочной ванне, является наличие двух последовательных режимов смазывания: в начале – граничного при самосмазывании фторопластом, затем жидкостного гидродинамического. Причем, в процессе граничного смазывания, в радиально-упорном подшипнике покрытие на конической поверхности подшипниковой втулки, являющееся адсорбатом, блокируется от адсорбции жидкой смазочной среды ответной конической деталью. Безззорный подшипник может быть создан только при наличие фторопласта в податливом покрытии, обеспечивающего граничный режим самосмазывания.

Выход трибосистемы на гидродинамический режим работы выполняется автоматически в результате всплытия шейки вала на величину требуемого зазора под действием гидродинамического давления. Это обеспечивается двумя оппозитно расположенными канавками.

В качестве обобщенного геометрического показателя, характеризующего относительные размеры канавок, используем предложенный в работе [135] коэффициент относительной площади F .

$$F = \frac{F_K}{F_H}, \quad (2.1)$$

где

F_K – площадь канавки,

F_H – номинальная площадь подшипниковой втулки.

Следовательно, для возникновения перехода к режиму гидродинамического смазывания необходимо доказать принципиальную возможность возникновения в заполненной смазочным материалом канавке гидродинамического давления, обеспечивающего всплытие шейки вала.

2.1 Обеспечение жидкостного трения

Рассматриваются три эквидистантные цилиндрические поверхности: металлическая поверхность подшипниковой втулки или дно канавки, рабочая поверхность покрытия и поверхность шейки вала, которая в режиме самосмазывания совпадает с поверхностью покрытия, а в гидродинамическом режиме отделена от покрытия зазором. По данным, приведенным в работах [28,114,135], любые канавки на поверхности подшипников улучшают условия жидкостной смазки, снижая коэффициенты трения и величину износа. Кроме того, экспериментально установлено [24], что рабочая поверхность между канавками в процессе работы приобретает наклон в сторону движения. Это объясняют расклинивающим действием жидкого смазочного материала [24] или повышенным износом у кромки канавки [116].



Рис. 2.1 Схема контактной зоны: а) подшипник, б) канавка

На схеме (Рис. 2.1) обозначено стрелками направление вращения вала ω , ширина b и глубина канавки δ , равная толщине покрытия. Канавка, заполнена жидким смазочным материалом.

На первом этапе после пуска подшипника полагаем, что его основная поверхность работает в граничном режиме смазывания, а в области канавки имеет место жидкостный режим. В процессе приработки происходит

деформация поверхности покрытия, ее аморфизация [73]. Поверхность покрытия изменяет исходную поверхность с неровной периодической структурой ткани на абсолютно гладкую и однородную. Давление в канавках приподнимает шейку вала и образует зазор между ней и покрытием подшипниковой втулки. Образовавшийся масляный клин переводит подшипник в гидродинамический режим смазывания.

Выберем условия однозначности для решения плоской задачи в полярных координатах. Сделаем следующие допущения.

1. Трибосистема представляет собой радиально-упорный конический ($\alpha = 12 \pm 2$ град.) подшипник с покрытием, обеспечивающим самосмазываемость. В покрытии имеются две продольные канавки. Подшипник погружен в ванну жидкого смазочного материала. На него опирается вращающийся с угловой скоростью ω вертикальный вал.

2. Все материалы трибосистемы считаем изотропными с известными инженерными константами.

3. Нагрузка создается постоянной по величине и направлению силой.

4. Средними контактными напряжениями считаем напряжения от радиальной составляющей нагрузки на площади развертки рабочей поверхности подшипниковой втулки с учетом площади канавок.

5. Расчетной линейной скоростью считаем скорость на среднем диаметре подшипника.

6. Изменения поверхности покрытия завершаются в приработочный период и не учитываются в дальнейшем.

7. Вязкость жидкого смазочного материала не зависит от давления в гидродинамическом зазоре.

8. В режиме самосмазывания фторопластовая пленка переноса на шейку вала уплотняет стыки канавок и препятствует вытеканию смазочного материала в окружном направлении.

9. Считая ширину канавки малой в сравнении с диаметром подшипника $b/d \ll 1$, разворачиваем ее для удобства в прямую (см. Рис. 2.2).

10. Расчет ведется для установившегося ламинарного движения смазочного материала в плоской двумерной системе координат [40].

11. Считаем на основе работы [116], что, в замкнутом в радиальном сечении пространстве канавки, смазочный материал циркулирует и имеет линию нулевого тока (см. Рис. 2.2).

Рассмотрим расчетную схему поставленной задачи.

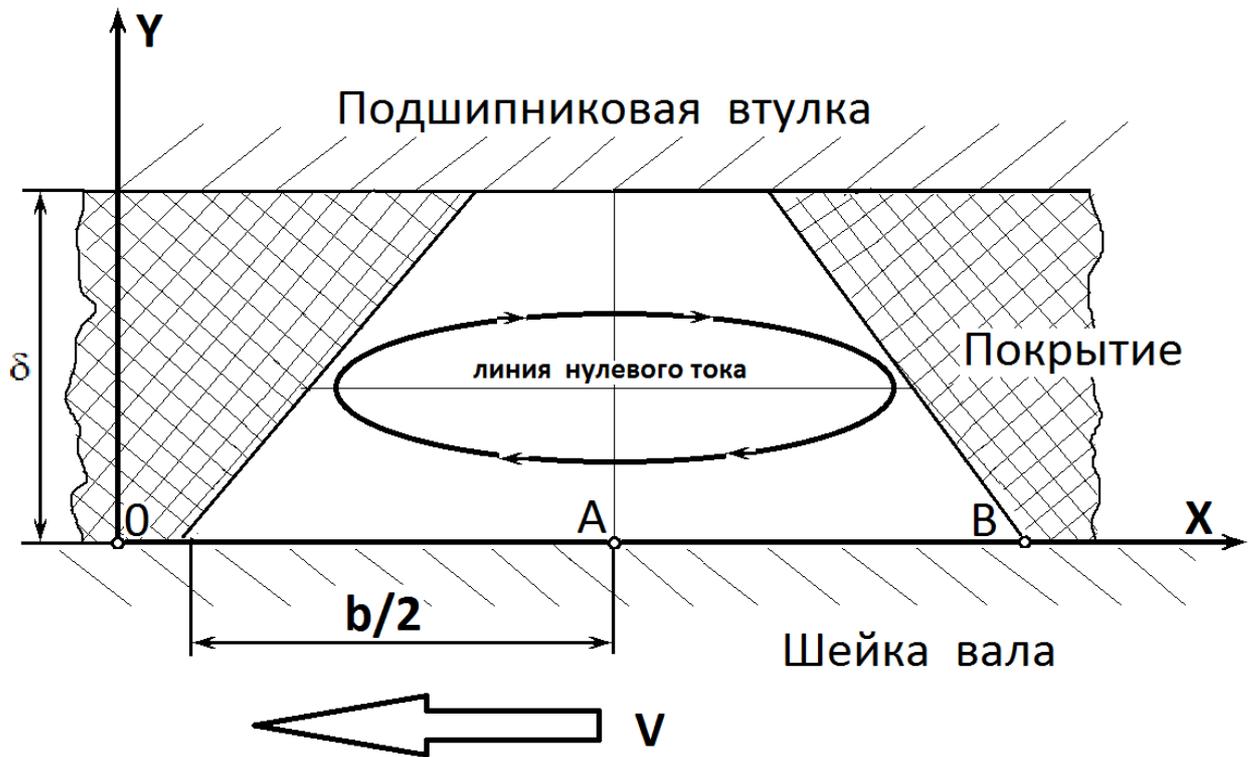


Рис. 2.2. Расчетная схема

Угол наклона стенок канавки принимаем равным 45 градусам, то есть длина клиновидной части зазора равна толщине покрытия. Линия нулевого тока показана в середине циркуляционной кривой.

Для установившегося течения жидкого смазочного материала в зазоре клиновидной формы, рассматриваемого в декартовых координатах, воспользуемся уравнением течения тонкого слоя вязкой несжимаемой жидкости из работы [116]

$$\frac{\partial^2 V_n}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (2.2)$$

где

V_n – скорость потока смазочного материала,

P - гидродинамическое давление,

μ - динамическая вязкость смазочного материала.

Проинтегрировав это уравнение по y , получим

$$V_n = \frac{1}{2\mu} y^2 \frac{\partial P}{\partial x} + yC_1 + C_2 \quad . \quad (2.3)$$

Постоянные интегрирования найдем из граничных условий:

при $y = 0$ $V_n = -V$, где V – линейная скорость вращения вала, $C_2 = -V$;

при $y = h$ $V_n = 0$, где h – максимальная глубина канавки.

Тогда

$$C_1 = -\frac{h}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{V}{h} \quad .$$

Подставим выражения для C_1 и C_2 в (2.3)

$$V_n = \frac{1}{2\mu} y^2 \frac{\partial P}{\partial x} + y \left(-\frac{h}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{V}{h} \right) - V$$

и получим окончательно

$$V_n = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - hy) + \frac{V}{h} (y - h) \quad . \quad (2.4)$$

Используя выражение (2.4), найдем объем жидкого смазочного материала, протекающего через поперечное сечение канавки в одну секунду

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^h V_n b^* dy = \frac{b^*}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \left[\int_0^h y^2 dy - h \int_0^h y dy \right] + \frac{V}{h} \left(\int_0^h y dy - h \int_0^h dy \right) = \\ &= -\frac{b^* h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{Vh}{2} \quad , \end{aligned} \quad (2.5)$$

где b^* – длина подшипника по образующей.

Предполагая, что расход смазочного материала равен нулю, получим

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{6\mu V}{h^2} \quad . \quad (2.6)$$

В выражении (2.4) обозначим координаты линии нулевого тока как y^* и найдем ее уравнение, считая, что $V_n = 0$. Тогда

$$V_n = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (y^{*2} - hy^*) + \frac{V}{h} (y^* - h) \quad . \quad (2.7)$$

Первый корень квадратного уравнения $y^* = h$ представляет собой одно из граничных условий, второй – является уравнением линии нулевого тока

$$y^* = - \frac{2\mu V}{h} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^{-1}. \quad (2.8)$$

Решить это уравнение можно, задаваясь уравнением неподвижной стенки канавки [114]. В работе [4] доказано по результатам экспериментальных исследований, что в зоне канавки АВ при расширении сечения в направлении движения шейки вала, наблюдается отрицательное давление. Его принимают равным давлению насыщенного пара смазочного материала и считают, что для этой области $\frac{\partial P}{\partial x} = 0$. Избыточное гидродинамическое давление имеет место только в области 0А перед неподвижной стенкой. Считая, что эта стенка наклонена к абсциссе под углом 45^0 , уравнение неподвижной стенки канавки представим в следующем виде:

$$h = h_{max} \frac{x}{\delta}. \quad (2.9)$$

Подставив уравнение (2.9) в выражение (2.6), получим

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{6\mu V \delta}{h_{max}^2 x^2}. \quad (2.10)$$

Проинтегрируем уравнение (2.10) по x и будем иметь

$$P = \frac{6\mu V \delta}{h_{max}^2 x} + C. \quad (2.11)$$

Постоянную интегрирования находим по граничным условиям

$$\text{при } x = \frac{\delta}{2} \quad P = P_n,$$

где P_n - подъемная сила.

$$\text{Тогда получим} \quad C = P_n + \frac{12\mu V \delta}{h_{max}^2}. \quad (2.12)$$

Подставив выражение (2.12) в (2.11) и проведя очевидные преобразования будем иметь

$$\mathbf{P} = P - P_n = \frac{6\mu V}{h_{\max}^2} \left(\frac{\delta}{x} - 2 \right). \quad (2.13)$$

При $x = 0$ выражение (2.13) не имеет смысла, так как превращается в бесконечность. Используем данные работы [9], где установлено, что объемные свойства жидких смазочных материалов начинают проявляться с пленок, толщиной 0,1мкм (10^{-7} м). Следовательно, можно считать, что минимальное значение толщины масляной пленки у начала канавки (точка начала координат) равно 0,1мкм.

Умножим обе части уравнения (2.13) на dx и проинтегрируем его в пределах от $x_{\min} = \delta \frac{h_{\min}}{h_{\max}}$ до $b/2$ получим

$$\mathbf{P} = \frac{6\mu V}{h_{\max}^2} \left(\int_{\delta \frac{h_{\min}}{h_{\max}}}^{\frac{b}{2}} \frac{\delta}{x} dx - 2 \int_{\delta \frac{h_{\min}}{h_{\max}}}^{\frac{b}{2}} dx \right) = \frac{6\mu V}{h_{\max}^2} \left[\delta \ln \frac{bh_{\max}}{2\delta h_{\min}} - 2 \left(\frac{b}{2} - \frac{h_{\min}}{h_{\max}} \right) \right]$$

Считая что $\delta \frac{h_{\min}}{h_{\max}} \approx 0$, а $h_{\max} = \delta$ получим окончательно для гидродинамического давления в канавке

$$P = \frac{6\mu V}{\delta} \left(\ln \frac{b}{2h_{\min}} - \frac{b}{\delta} \right). \quad (2.14)$$

Проверка размерности и контрольный расчет для жидкого смазочного материала марки МС-20 при температуре 30⁰С, ширине канавки 3мм и скорости скольжения 0,3м/с показал, что величина поддерживающей силы в этом случае определяется давлением.

Таким образом, несмотря на то, что благодаря значительным упрощениям задачи, полученная аналитическая зависимость носит только качественный характер, она доказывает возможность использования канавок на рабочей поверхности подшипниковых втулок для создания условий к автопереходу от граничного трения к жидкостному.

2.2. Моделирование жидкостного трения

В работе [138] рассмотрены несколько типов подшипников скольжения: с секторами контактной поверхности (multilobe), с аккумулятором давления (pressure dam) и ряд других. В статье [154] рассмотрены особенности конструкции и динамики подшипников, в том числе, радиального подшипника с двумя аксиально ориентированными канавками.

Пример конструкции подшипника скольжения с канавками, расположенными вдоль его оси, представлен на рис. 2.3,а. Опорная шейка вала устанавливается в подшипниковую втулку с зазором c и, при работе подшипника в режиме жидкостного трения, радиус окружности контактной поверхности втулки равен $R+c$. Осевые канавки подшипника, обеспечивают лучшую подачу смазки в зону трения и существенно подавляют образующиеся вихревые течения. Аккумулятор давления предназначен для компенсации падения давления при разрыве смазочного слоя [150].

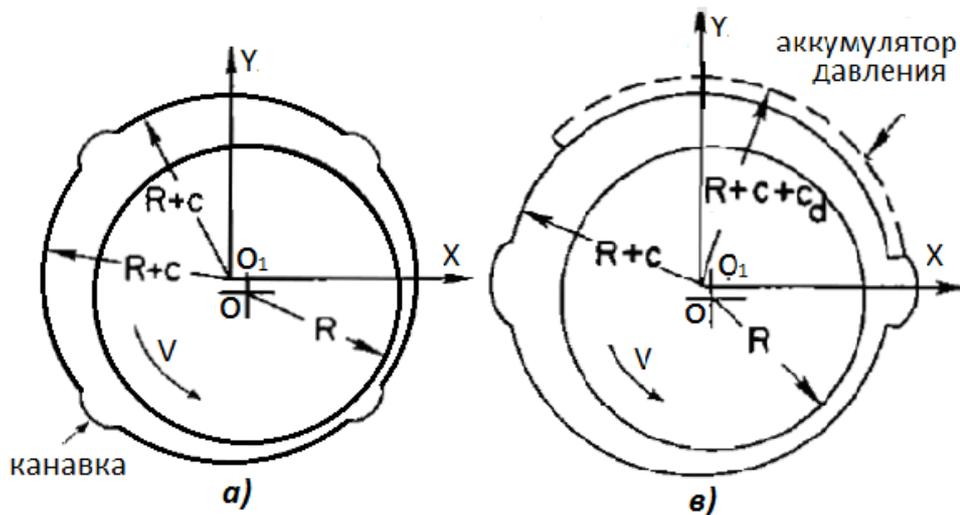


Рис. 2.3. Радиальные подшипники скольжения: а) с четырьмя маслоподдерживающими канавками, б) с аккумулятором давления.

При моделировании гидродинамики таких подшипников скольжения всегда предполагается, что разрушение масляной пленки возникает при отрицательном давлении (так называемое половинное условие Зоммерфельда). Уравнение Рейнольдса решается на передней и задней кромках каждого сектора подшипника, а на его торцах давление полагается

равным нулю. Гидродинамическое давление интегрируется только по областям, где давление положительно.

В работе приведены данные нескольких подшипников с аксиально ориентированными канавками. Параметры одного из них приведены ниже.

Диаметр вала, D (мм)	25,397;	Зазор, c (мм)	0,037;
Угол охвата одного сектора, χ	151° ;	Длина, L (мм)	12,7.

Геометрия аккумулятора давления должна выбираться в зависимости от направления действующей нагрузки. В отличие от статики, когда нагрузка обусловлена весом ротора, при работе в редукторах нагрузки могут быть существенно увеличены и усложнены по воздействию. Такая нагрузка может меняться по величине и направлению в зависимости от передаваемого момента, скорости вала и дополнительных случайных нагрузок. Поэтому, картина действующих усилий должна быть точно определена с учетом возможных изменений, а также переключений между нагруженным и ненагруженным режимами.

Дополнительное исследование процессов в подшипнике скольжения с канавками имело целью получить количественные обоснования качественных результатов, представленных в разделе 2.1, а также объяснения наблюдаемого экспериментально эффекта всплытия вала при достижении определенной скорости его вращения.

Это исследование включает численное решение на основе уравнения Рейнольдса плоской осесимметричной стационарной задачи для одного из сечений радиально-упорного подшипника с канавками. Кроме того, выполняется конечноэлементное моделирование на основе уравнения Навье-Стокса двумерной задачи о течении жидкого смазочного материала в сечении канавки. Это осуществляется с целью восстановления контуров циркуляционных течений и распределения давления, а также решения трехмерной задачи о течении смазочного материала в окрестности и вдоль канавки.

В ходе этого исследования определялись зависимости скачков давления в канавках от их ширины, скорости вращения вала и вязкости смазочного материала. Предполагалось, что канавка имеет сигментальную цилиндрическую форму, углубляясь в тело подшипника на толщину полимерного композитного покрытия, принимаемую равной 0,5 мм. Радиус цилиндра, образующего канавку, изменяли в диапазоне 0,5 – 3 мм. Цилиндрическая форма канавки, при которой отсутствуют острые углы, была выбрана с тем, чтобы исключить возникновение численной неустойчивости при решении дифференциальных уравнений гидродинамики. Геометрические размеры подшипника соответствовали эксперименту.

Следовательно, в данном случае численный анализ поставленной задачи должен дать решение, обеспечивающее логическое объяснение экспериментально полученных эффектов при гидродинамическом режиме смазывания радиально-упорных подшипников скольжения.

2.3. Решение плоской осесимметричной задачи о течении в канавках

При решении задачи использовалась методика и результаты исследования гидродинамического смазывания подшипников скольжения, представленные в работе [150].

С целью определения возможности использования в расчетах основных соотношений классической теории смазывания оценим величину числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\rho V C}{\mu}.$$

Переход к турбулентному режиму, когда необходимо применять ту или иную модель турбулентности, осуществляется при $\text{Re} \sim 2000$ [150]. Полагая плотность жидкого смазочного материала $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, характерную скорость $V = 0,5 \text{ м/с}$, зазор $C = 0,01 \text{ мм}$, вязкость $\mu = 0,1 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$ при $\approx 60 - 70^\circ\text{C}$, получим верхнюю оценку для числа Рейнольдса $\text{Re} \approx 50$, что не позволяет ожидать существенного проявлений турбулентных эффектов. Поэтому при

исследовании радиально-упорного подшипника скольжения использовались уравнения гидродинамики для ламинарного режима .

На первом шаге был разработан численный метод и программное средство генерации геометрии области течения смазочного материала в сечении радиально-упорного (конического) подшипника с двумя канавками. Как отмечено выше, канавки предполагались сигментального цилиндрического сечения с радиусом ρ_k , заглубленными в тело подшипниковой втулки на величину δ , которая во всех расчетах принималась постоянной и равной 0,5 мм, что обусловлено толщиной полимерного композиционного антифрикционного покрытия.

Если центр сечения расположен в начале координат, а центры обеих канавок – на оси абсцисс, то координаты центров канавок равны

$$\begin{cases} x_c(R, \rho_k, \delta) = \pm R \pm \delta \mp \rho_k \\ y_c(R, \rho_k, \delta) = 0 \end{cases}, \quad (2.15)$$

где

R - радиус сечения подшипника (см. рис.2. 4).

Дальнейшие соотношения для простоты даны только для правой канавки. В частности, координаты точек пересечения контура канавки и окружности радиуса R равны

$$\begin{cases} x_{\text{int}} = \frac{R^2 + x_c^2(R, \rho_k, \delta) - \rho_k^2}{2 \cdot x_c(R, \rho_k, \delta)} \\ y_{\text{int}} = \pm \sqrt{R^2 - x_c^2(R, \rho_k, \delta)} \end{cases}. \quad (2.16)$$

Тогда азимутальный угол, охватываемый правой канавкой, будет равен

$$\theta_{\text{int}} = 2 \cdot \arctg(y_{\text{int}}/x_{\text{int}}),$$

а координаты точек на контуре канавки соответственно

$$\begin{cases} x_k(\theta) = \frac{x_c + \sqrt{x_c^2 - [1 + tg^2(\theta)] \cdot (x_c^2 - \rho_k^2)}}{1 + tg^2(\theta)}; & |\theta| \leq \theta_{\text{int}}/2. \\ y_k(\theta) = \sqrt{\rho_k^2 - (x_{\text{int}}^2 - x_c^2)} \end{cases} \quad (2.17)$$

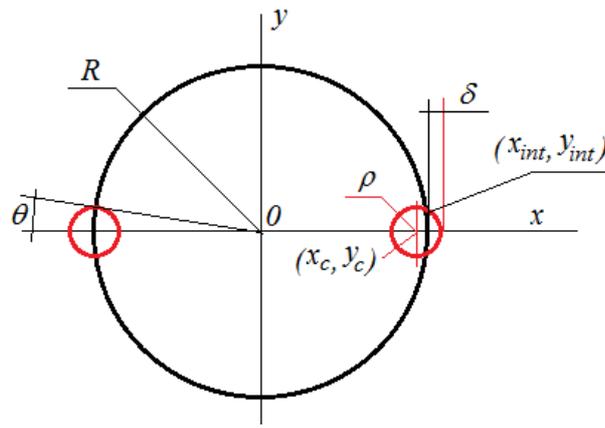


Рис. 2.4. Геометрия моделируемой контактной поверхности подшипника

Радиус-вектор, соединяющий центр подшипника с точками на поверхности канавки, будет иметь вид

$$r_k(\theta) = \sqrt{x_k^2(\theta) + y_k^2(\theta)}.$$

Соответственно, длина радиус-вектора, направленного из геометрического центра подшипника в точки на его внутренней поверхности будет равна

$$R_{out}(\theta) = \begin{cases} r_k(\pi/2 - \theta) & \text{при } (\theta \leq \pi/2) \cap (\theta \geq \pi/2 - \theta_{int}/2) \\ r_k(\theta - \pi/2) & \text{при } (\theta \geq \pi/2) \cap (\theta \leq \pi/2 + \theta_{int}/2) \\ r_k(3\pi/2 - \theta) & \text{при } (\theta \leq 3\pi/2) \cap (\theta \geq 3\pi/2 - \theta_{int}/2) \\ r_k(\theta - 3\pi/2) & \text{при } (\theta \geq 3\pi/2) \cap (\theta \leq 3\pi/2 + \theta_{int}/2) \\ R_\delta & \text{иначе} \end{cases} \quad (2.18)$$

Тогда распределение толщины смазочного слоя по азимуту будет описываться функцией

$$h(\theta) = R_{out}(\theta) - R - c, \quad (2.19)$$

где буквой c (clearance) обозначен зазор в подшипнике в зонах, свободных от канавок.

Отметим, что гидродинамическая задача может решаться только при допущении о непрерывности смазочного слоя по всему периметру подшипника. Таким образом, соотношения (2.15) – (2.19) позволяют генерировать для численного решения допустимые конфигурации подшипника с двумя аксиально ориентированными канавками и распределенной по углу толщиной канала, по которому движется жидкий

смазочный материал. В связи с тем, что эти зависимости, представленные в табличной форме, будут использоваться для численного решения уравнения Рейнольдса острые кромки переднего и заднего краев канавок были скруглены.

Необходимость такого скругления при численном решении двух- и трехмерных течений в подшипниках отмечена в работе [142]. Это скругление осуществлялось радиусом, равным зазору в контактной части подшипника. Оно выполнялось путем пятиточечной фильтрации, производимой с массивом точек, характеризующих распределение толщины $\{h(\theta)\}_{1,\dots,N}$ слоя смазочного материала по азимуту

$$\tilde{h}_i = (h_{i-2} + 2h_{i-1} + 3h_i + 2h_{i+1} + h_{i+2})/9. \quad (2.20)$$

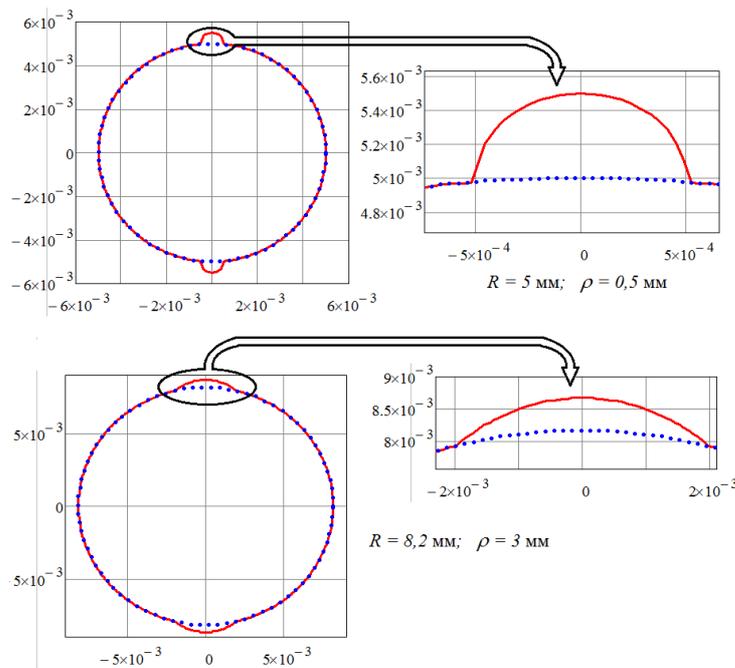


Рис. 2.5. Геометрия рабочих контуров подшипниковых втулок при различных радиусах сечений и канавок.

На рисунке 2.5 приведены два примера рабочих контуров подшипниковой втулки при различных радиусах сечений и канавок. Сплошной контур обозначает поверхность подшипниковой втулки, а точками обозначен контур шейки вала. Зазор трибосопряжения равен 0,01 мм.

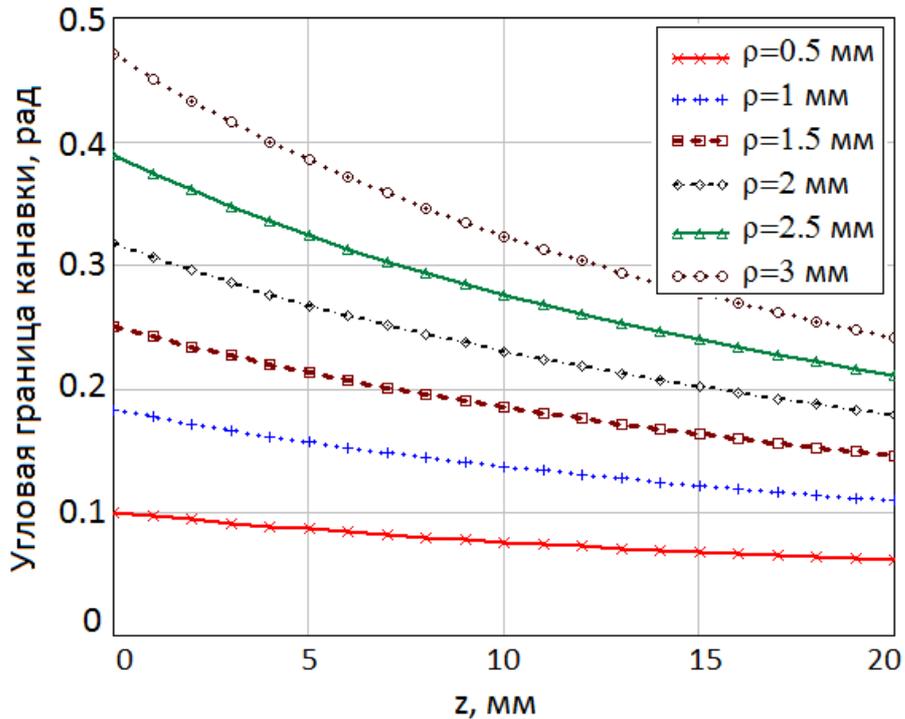


Рис. 2.6. Графические зависимости угловых границ канавок $\hat{\theta}(z)$ от их радиуса и осевой координаты z

В связи с тем, что радиально-упорный подшипник является коническим, и, следовательно, диаметры направляющих окружностей по высоте конуса различны (см. рис.2.6), окружная скорость тоже меняется вдоль его оси. Поэтому решение уравнения Рейнольдса производилось для 5 равноотстоящих друг от друга сечений, на которых радиус вращения составлял 5; 5,8; 6,6; 7,4; 8,2 мм.

Радиус канавки для каждого рассчитываемого подшипника всегда предполагался неизменным, заглубление постоянным, т.е. ось цилиндрической канавки была параллельна образующей конуса.

Поэтому азимутальное распределение толщины смазочного материала для каждого сечения было различным, как это иллюстрирует рисунок 2.7, где представлены два крайних сечения конического подшипника и распределения толщины слоя смазочного материала для случая канавки радиусом 1,5 мм.

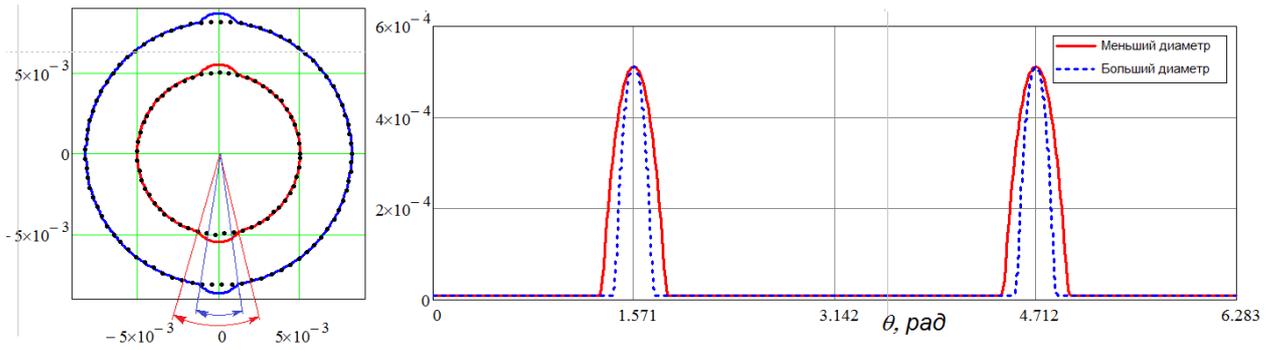


Рис. 2.7. Два крайних сечения конического подшипника ($R_1 = 5$ мм, $R_2 = 8,2$ мм) и соответствующие азимутальные распределения толщины слоя смазочного материала для случая канавки радиусом 1,5 мм

Правая часть классического уравнения течения смазочного материала, носящего имя Рейнольдса [154]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x}(\rho h U) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (2.21)$$

описывает его течение, вызванное градиентом давления. Левая часть этого уравнения представляет собой течение, вызванное нормальным (сжимающим) и тангенциальным (сдвиговым) движением границы со скоростью U (см. рис.2.8). В уравнении (2.21) ρ, μ - плотность и динамическая вязкость жидкого смазочного материала соответственно.

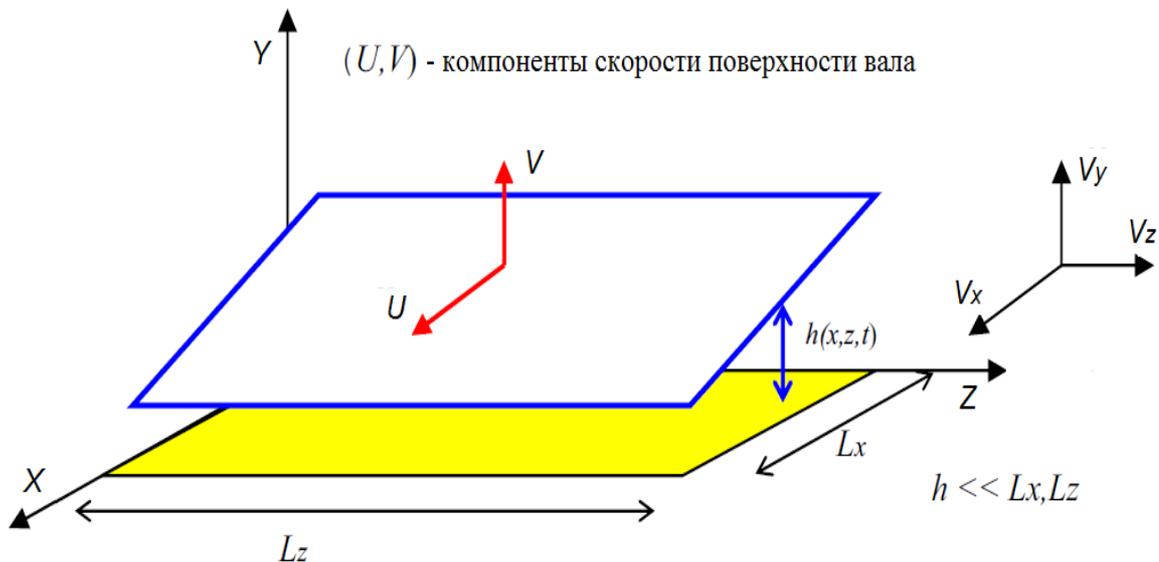


Рис. 2.8. Система координат, используемая в уравнении Рейнольдса

Решение уравнения (2.21) для поля давлений $P(x, z, t)$ при соответствующих граничных условиях позволяет определить компоненты поля скоростей согласно следующим формулам

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - yh) + \frac{y}{h} U \\ V_z &= \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} (y^2 - yh) \end{aligned} \quad , \quad (2.22)$$

а также сдвиговые напряжения

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} (2y - h) + \frac{\mu}{h} U; \quad \tau_{zy} = \mu \frac{\partial V_z}{\partial y} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} (2y - h) \quad (2.23)$$

на верхней ($y = h$)

$$\tau_{xy}|_{y=h} = \frac{h}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{h} U; \quad \tau_{zy}|_{y=h} = \frac{h}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2.24)$$

и на нижней ($y = 0$) поверхностях

$$\tau_{xy}|_{y=0} = -\frac{h}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{h} U; \quad \tau_{zy}|_{y=0} = -\frac{h}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2.24)$$

Уравнение (2.21) задано в декартовой системе координат, однако расчетная схема решения плоской осесимметричной стационарной задачи для сечений радиально-упорного подшипника с двумя канавками предполагает переход к полярной системе. Кроме того, стационарный характер задачи предполагает равенство нулю производных по времени, а то, что течение смазки будет рассматриваться для каждого отдельного сечения – равенство нулю частных производных по координате z . Одновременно полагаем, что эксцентриситет отсутствует, и окружная скорость вала постоянна $U = \Omega R$.

Для перехода к полярной системе выполним следующие замены переменных, имея в виду зависимость толщины смазочного слоя от азимутальной координаты $h(\theta)$ и несжимаемость жидкости $\rho = const$

$$x \rightarrow R\theta, \quad \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta}, \quad \frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \quad (2.25)$$

При этих допущениях уравнение в частных производных (2.21) преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 P}{d\theta^2} + \frac{3}{h(\theta)} \cdot \frac{dh(\theta)}{d\theta} \cdot \left[\frac{dP}{d\theta} - \frac{2\mu\Omega R^2}{h^2(\theta)} \right] = 0. \quad (2.26)$$

Отметим, что структура уравнения (2.26) демонстрирует эквивалентность угловой скорости и динамической вязкости, т.е., например, увеличение в два раза угловой скорости эквивалентно двукратному увеличению вязкости смазки.

Для численного решения уравнения (2.26), которое имеет второй порядок, выполняется его приведение к системе уравнений второго порядка согласно схеме

$$\begin{aligned} P &\rightarrow P_0 \\ \frac{dP}{d\theta} &\rightarrow \frac{dP_0}{d\theta} = P_1 \\ \frac{d^2 P}{d\theta^2} &\rightarrow \frac{dP_1}{d\theta} \end{aligned}$$

Тогда, после разрешения уравнения относительно старшей производной, получим систему

$$\begin{pmatrix} \frac{dP_0}{d\theta} \\ \frac{dP_1}{d\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1 \\ \frac{3}{h(\theta)} \cdot \frac{dh(\theta)}{d\theta} \cdot \left[\frac{2\mu\Omega R^2}{h^2(\theta)} - P_1 \right] \end{pmatrix}. \quad (2.27)$$

Для уравнения (2.27) необходимо решить двухточечную краевую задачу (см. рис.2. 8) с периодическими граничными условиями

$$\begin{aligned} P_0(0) &= P_0(2\pi) = P_{in} \\ P_1(0) &= P_1(2\pi) \end{aligned}, \quad (2.28)$$

где P_{in} - значение давления смазки, задаваемое на участке, свободном от канавок.

Однако данная система имеет второй порядок, поэтому в точках $\theta = 0; \theta = 2\pi$ необходимо также задавать значение производной давления по углу, которое неизвестно.

Для решения подобных задач применяется метод «пристрелки», который заключается в том, что вместо краевой задачи решается задача Коши, и на начальном шаге производной в точке $\theta = 0$ присваивается произвольное значение, которое по результатам решения сравнивается со значением производной в конечной точке $\theta = 2\pi$. На следующем шаге значение производной при $\theta = 0$ изменяется так, чтобы обеспечить второе краевое условие (2.28), и опять сравнивается со значением производной при $\theta = 2\pi$. Итерационный процесс останавливается, когда второе краевое условие выполняется с необходимой точностью. При решении задачи остановка итерационного процесса осуществлялась, когда это равенство выполнялось с точностью 0,1%.

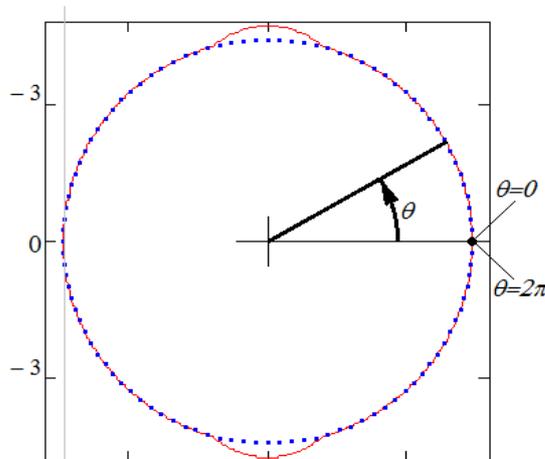


Рис. 2.9. К формулировке задачи о течении смазки в зазоре в полярных координатах

Пример численного решения задачи (2.27) и (2.28) – зависимостей гидродинамического давления в зазоре и его градиента от азимутального угла приведен на рис.2.10. Как следует из первого графика, в зоне размещения канавок наблюдается резкий скачок давления и его плавный спад в областях между канавками.

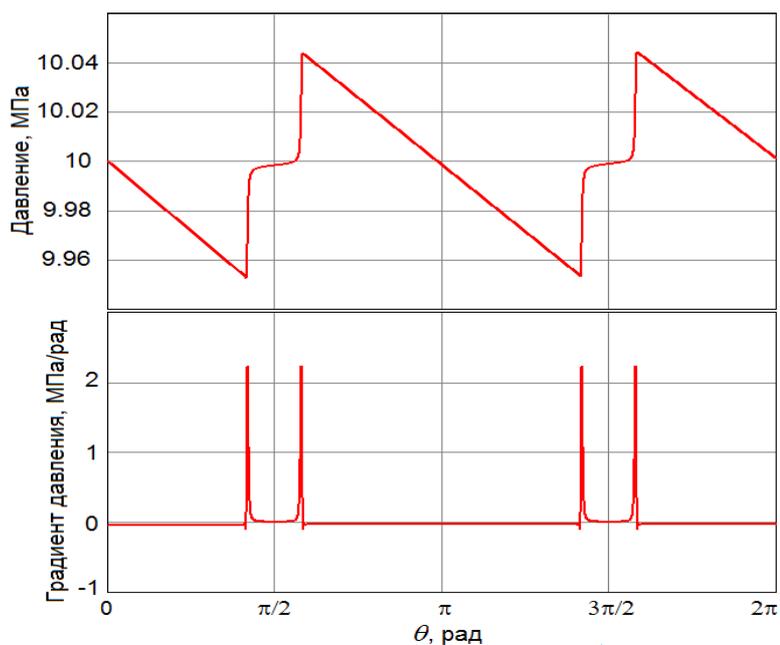


Рис. 2.10. Примеры окружных зависимостей давления и градиента давления в смазочном слое

Для малых значениях начального давления в смазочном слое давление может принимать отрицательные значения, т.е., возможно возникновение режима кавитации. Этот результат, который наблюдался при всех исследованных значениях скоростей и давлений, обусловлен тем, что уравнение Рейнольдса не предполагает дополнительной подачи смазочного материала в зону трения. Однако исследуемые образцы подвергаются испытанию в масляной ванне, где падение давления в зоне разряжения приводит к подсосыванию недостатка смазочного материала, исключая возникновение зон пониженного давления, представленных на рисунке 2.10.

Такая компенсация падения давления со стороны ванны окружающего смазочного материала аналогична действию аккумулятора давления – «плотины», описанной в работах [138,150]. Поэтому, следуя рекомендациям этих работ, необходимо учитывать характер изменения давления, предсказываемый уравнением Рейнольдса, только на передней и задней кромках каждого сектора подшипника, т.е. в зоне размещения осевых канавок.

При изменении начального давления на границах интегрирования установлено, что величина скачка давления, обусловленного наличием

канавки, зависит не от этого давления, а только от скорости вращения вала, вязкости смазочного материала и размеров канавки.

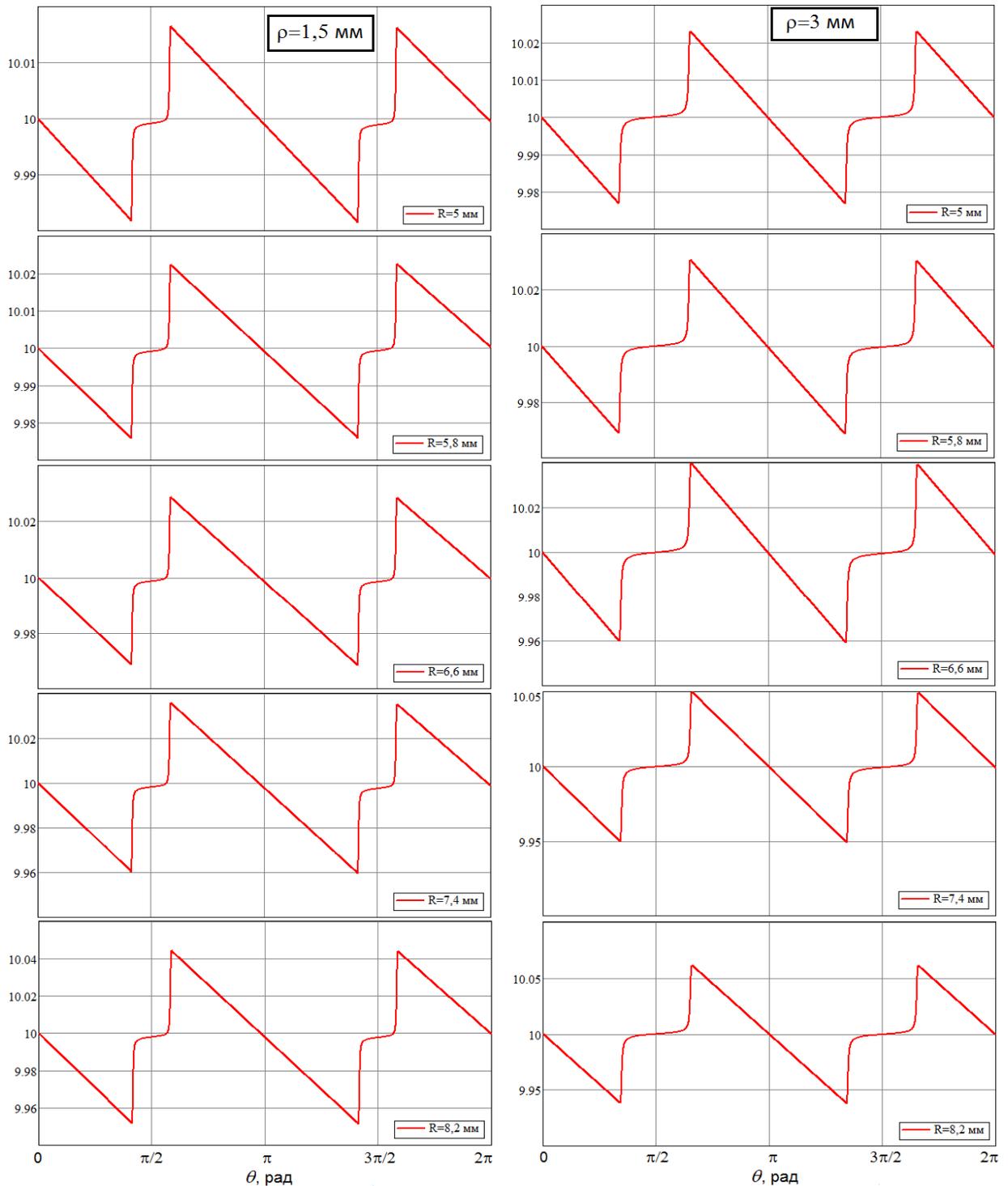


Рис. 2.10. Радиальные зависимости изменения давления (МПа) в пяти сечениях смазочного слоя, полученные в результате решения уравнения Рейнольдса. Слева – для радиуса канавок 1,5 мм, справа – 3 мм (Динамическая вязкость $0,25 \text{ Н*с/м}^2$, частота вращения 120 об/мин, толщина смазочного слоя вне канавок 0,01 мм)

На рисунке 2.11 приведены два семейства графиков зависимости давления в окрестности канавок, выполненных радиусами 1,5 и 3 мм в пяти сечениях конического подшипника. Представленные графики демонстрирует рост скачка давления с увеличением окружной скорости вращения, а также ширины канавок (вязкость смазочного материала в этом случае считаем постоянной). С уменьшением зазора в смазочном слое скачок давления значительно возрастает.

Для радиально-упорного конического подшипника скольжения этот факт означает, что влияние канавок в подшипнике, слабо нагруженном осевым усилием, будет незначительно, тогда как с ростом осевого усилия их влияние будет сильно возрастать.

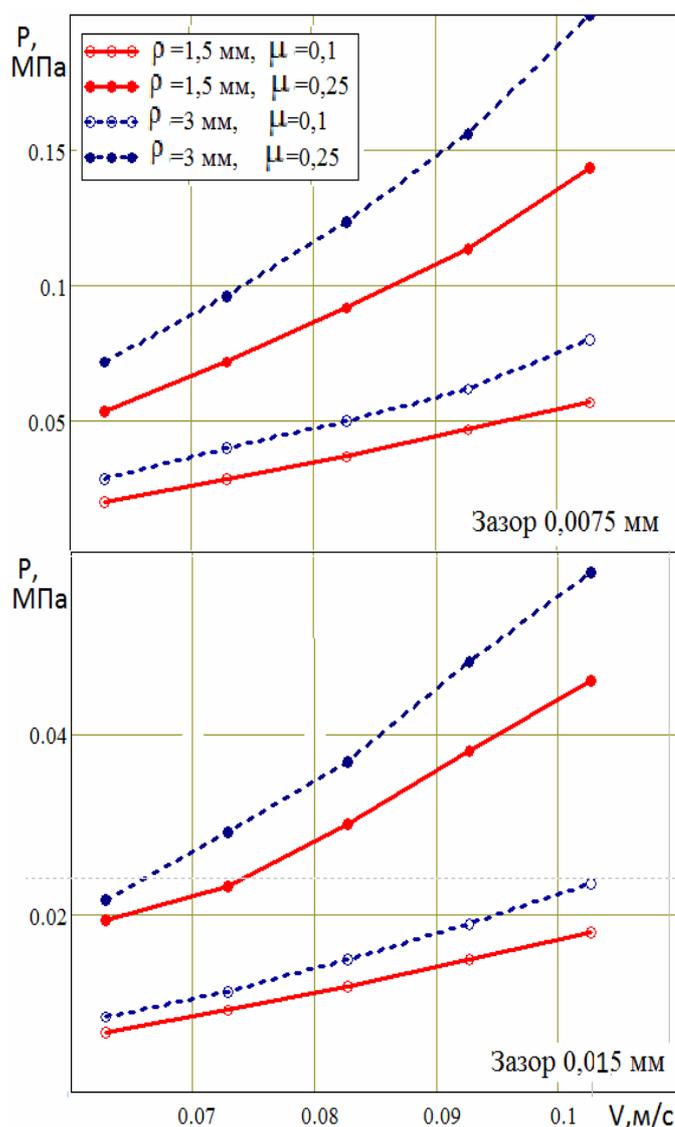


Рис. 2.12. Зависимость скачка дополнительного давления жидкого смазочного материала в осевых канавках радиально-упорного подшипника от окружной скорости при различных зазорах (толщинах смазочного слоя) и вязкости смазочного материала.

Эта закономерность иллюстрируется рисунком 2.12, где представлены зависимости скачка давления от окружной скорости при двух различных величинах зазора для двух значений вязкости. Так, при изменении зазора от 0,015 до 0,0075 мм, при тех же режимах, наблюдается увеличение дополнительного давления более чем в 3 раза.

Приведенные графики подтверждают также увеличение этого давления с ростом ширины канавки. В частности, при изменении радиуса выреза (т.е. ширины канавки) от 1,5 мм до 3 мм величина дополнительного давления также увеличивается примерно в 3 раза.

Значительная разность давлений в сечениях одной канавки свидетельствует о том, что вдоль канавок должно возникать циркуляционное движение. Более подробное исследование этого явления будет выполнено в процессе моделирования трехмерной задачи методом конечных элементов.

То обстоятельство, что величины вязкости μ и угловой скорости Ω входят в уравнение (2.26) равноправно, показывает, что на характер процесса оказывает влияние не каждая из этих величин порознь, а их произведение, которое имеет размерность давления. Сглаженная диаграмма рассеяния расчетных точек величины дополнительного давления от двух переменных - радиуса вращения R и величины произведения вязкости на угловую скорость $\mu\Omega$, представлена на рис.2.13 а.

График показывает, что величина этого давления как функции обоих аргументов возрастает с ростом R и $\mu\Omega$. Причем влияние каждого из двух аргументов порознь близко к линейному, но с ростом каждого из них усиливается влияние другого. Очевидно также, что обращение в нуль каждого аргумента приводит к обращению в нуль самого давления. Такие зависимости аппроксимируются эмпирической моделью типа

$$P = A \cdot R + B \cdot (\mu \cdot \Omega) + C \cdot (\mu \cdot \Omega)^2. \quad (2.29)$$

В результате вычисления коэффициентов A, B, C получены следующие их значения

$$A = 0.158; \quad B = -0.038; \quad C = 12.07$$

Максимальная относительная погрешность вычисления давления по полученной формуле не превосходит 5% в диапазоне исследованных размеров и режимов трения (сравните рис. 2.13.а и б). Малая величина коэффициента B , тем не менее, не позволяет пренебречь им, т.к. в этом случае и относительная и абсолютная погрешности достигают величины 50% и более.

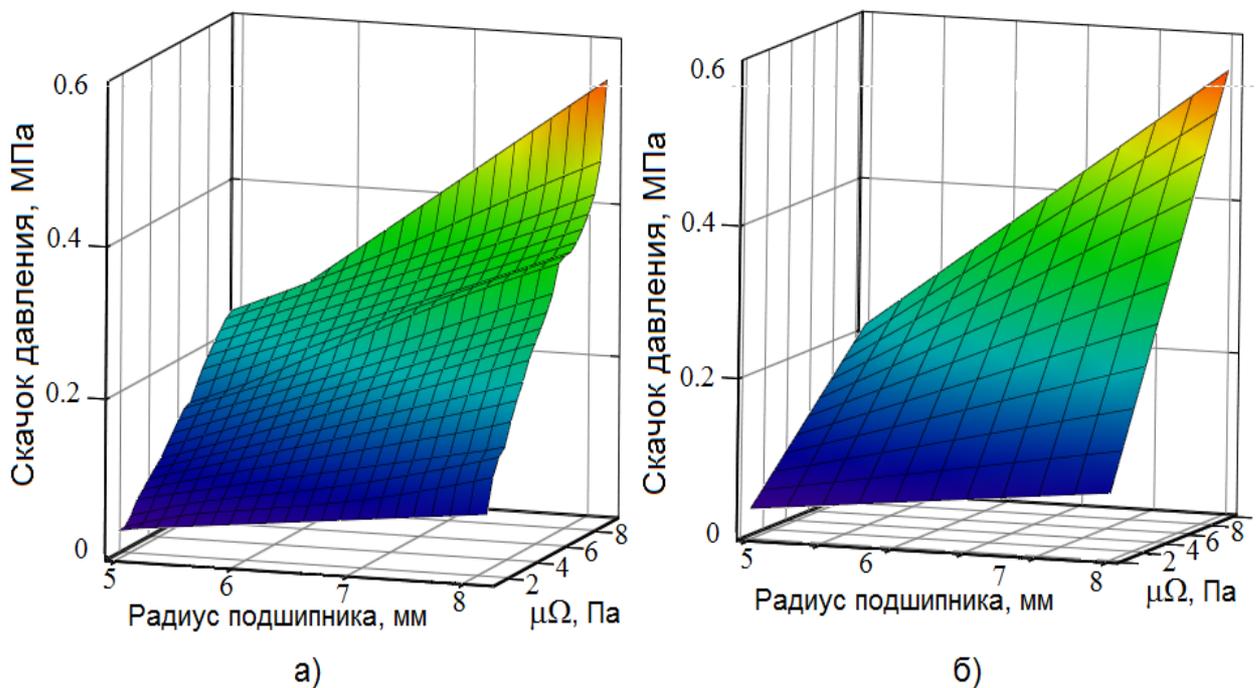


Рис.2.13. Зависимость скачка дополнительного давления в канавке от радиуса подшипника R и величины произведения вязкости на угловую скорость $\mu\Omega$.

а) – результаты расчета по уравнению Рейнольдса, б) – по формуле (2.29)

В качестве выводов по проведенному исследованию трибологической модели радиально-упорного подшипника, работающего в гидродинамическом режиме смазывания, можно отметить, что наличие осевых канавок вызывает скачок давления жидкого смазочного материала в зоне их расположения. Однако в предположении, что объем смазочного материала замкнут, уравнение Рейнольдса предсказывает плавное падение давления между канавками. При малых начальных давлениях эта ситуация может приводить к возникновению отрицательных давлений, т.е. к

кавитации, что вполне согласуется со многими экспериментальными данными.

Однако, в рассматриваемой триботехнической системе, где обеспечено свободное поступление смазки, влияние такого снижения давления при удалении от канавок значительно снижено. Величина дополнительного давления возрастает с расширением канавок, с ростом скорости в зоне контакта, вязкости смазочного материала и с уменьшением зазора. От величины начального давления величина дополнительного давления не зависит. В коническом подшипнике скольжения с двумя осевыми канавками окружная скорость линейно меняется вдоль оси согласно соотношению $V_{окр} = \Omega R = \Omega(R_0 + z \cdot tg(\psi))$, где z - осевая координата, а ψ - угол конусности. Это приводит к изменению давления вдоль канавки и может способствовать возникновению циркуляционного движения смазки.

2.4. Решение трехмерной задачи об осевом распределении давления в канавках

С целью проверки и более детального исследования закономерностей, установленных выше, было выполнено построение конечноэлементной модели на основе уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости и сделан ее анализ в стационарном режиме. На первой стадии была построена модель плоского спрямленного сечения (см. рис.2.14), нижняя граница которого двигалась горизонтально со скоростью $V = V_{окр}$, верхняя – фиксирована. Канавка была выполнена с радиусом 3 мм, толщина смазочного слоя вне канавки составляла 0,02 мм.

Уменьшение толщины этого слоя приводило к очень сильному загущению конечноэлементной сетки, что осложняло получение устойчивого, удовлетворительно сходящегося решения.

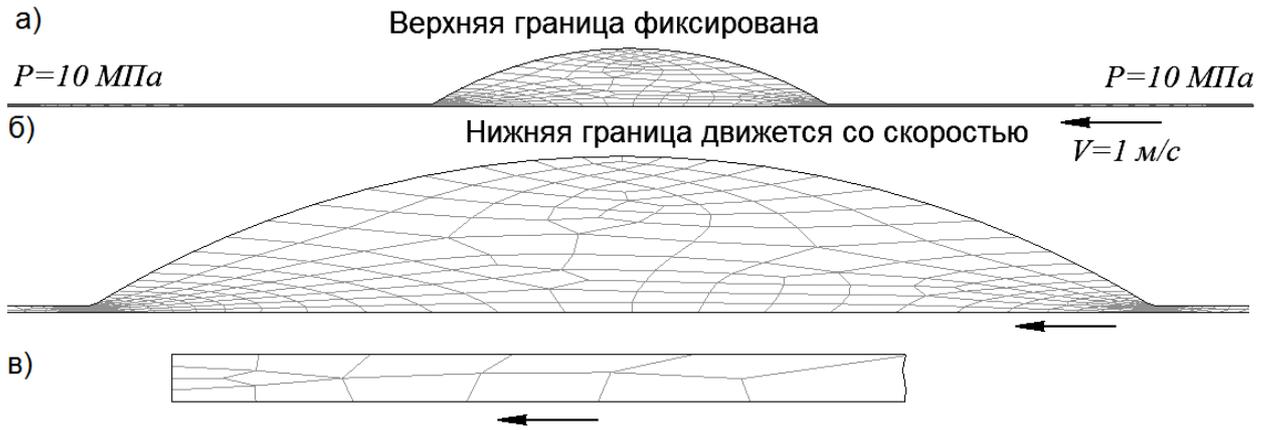


Рис. 2.14. Область моделирования и ее конечноэлементное разбиение

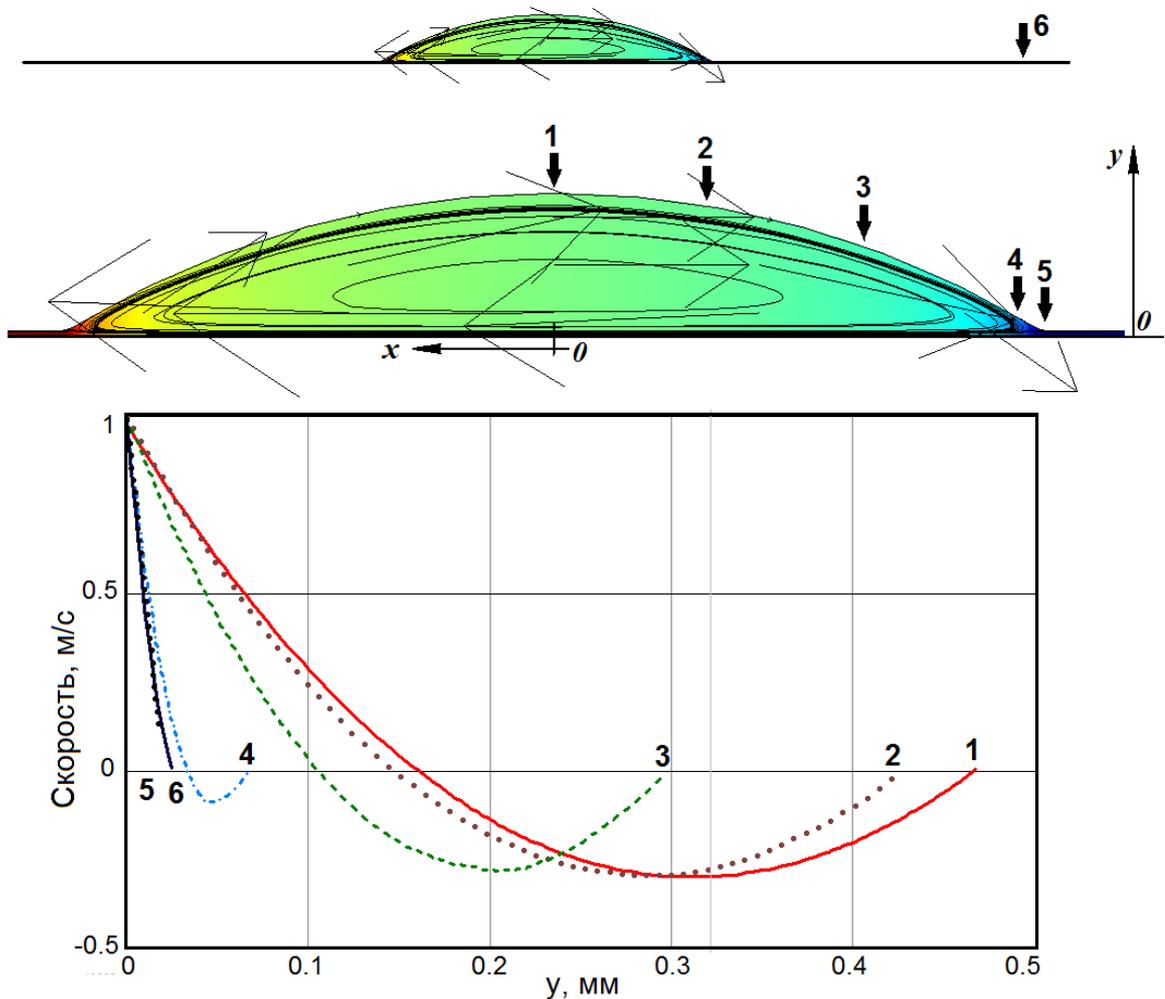


Рис. 2.15. Результаты постпроцессинга конечноэлементной модели течения смазочного материала в зоне расположения осевой канавки: линии тока и направления течения с цветовой картой изменения давлений (верх), распределение горизонтальных компонент скоростей по сечениям (низ)

Целью этого этапа исследования была проверка характера изменения давления вдоль траектории движения смазки и ее движения в канавке.

На левой и правой границах устанавливались периодические граничные условия, т.е равенство давлений и обеих компонент скорости. Результаты решения, представлены на рисунках 2.15 и 2.16. Как следует из рисунка 2.15, где представлены линии тока и распределения горизонтальных компонент скоростей смазки по сечениям, ее движение в канавках носит ламинарный циркуляционный характер.

Изменение давлений вдоль пути трения полностью повторяет его характер, установленный выше аналитически и численно путем решения уравнения Рейнольдса. Установленные характер и количественные параметры скачка давления подтверждают справедливость результатов, полученных выше.

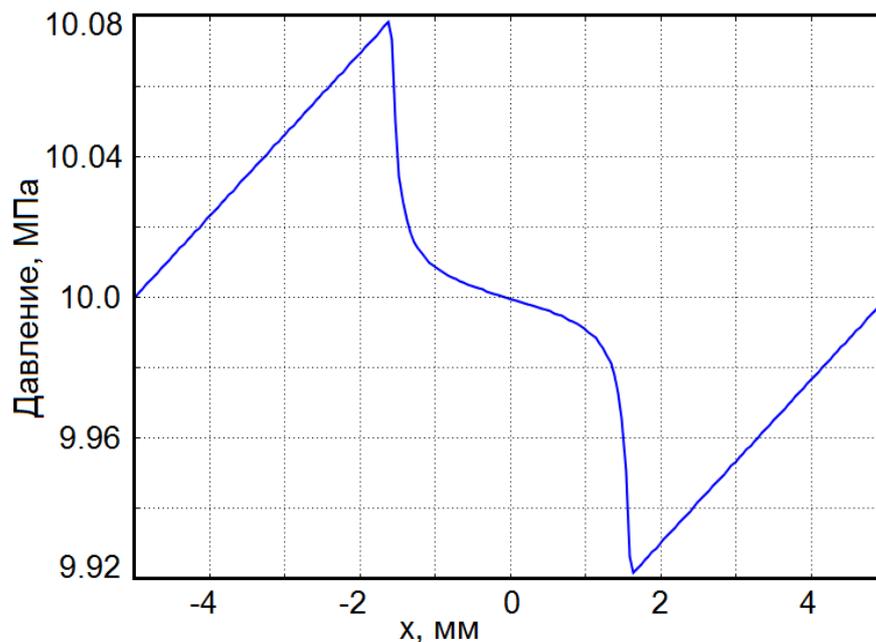


Рис. 2.16. Изменение давления в смазочном материале вдоль пути трения (результат конечноэлементного моделирования)

Для выяснения характера движения жидкого смазочного материала в пространстве был разработан трехмерный аналог двумерной модели - спрямленный участок объема смазочного материала. Так же, как и в двумерном случае, на границах разреза смазки I и II установлены периодические граничные условия (см. рис. 2.17,a).

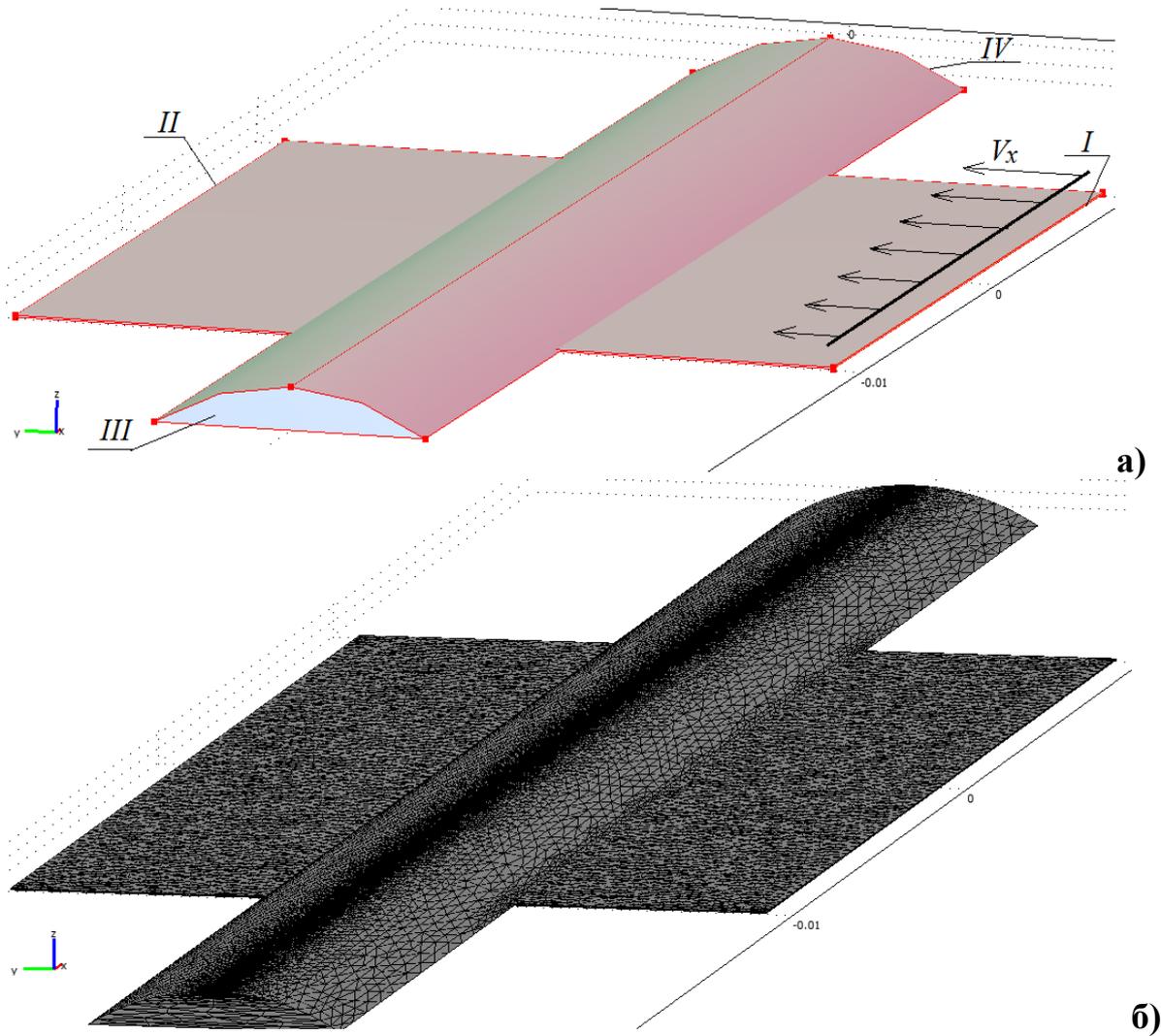


Рис. 2.17. Геометрия, граничные условия (а) и конечноэлементное разбиение трехмерной модели

На торцевых поверхностях канавки III и IV, которые удалены от поверхности трения, установлено условие о величине давления, которое принято равным давлению на границах разреза. В случае, приводимом ниже, это 10 МПа. Канавка вырезана радиусом 3 мм, толщина слоя смазочного материала вдали от канавки принята равной 0,02 мм. Конечноэлементное разбиение модели, представленное на рис. 2.17, б содержит 178000 конечных элементов, а число степеней свободы равно 860000. Верхняя поверхность модели фиксирована, нижняя движется со скоростью, линейно изменяющейся вдоль оси y по закону $V_x = V_0(1 + 0.5 \cdot x/0.1)$, тем самым, имитируя изменение окружной скорости вдоль оси радиально-упорного подшипника.

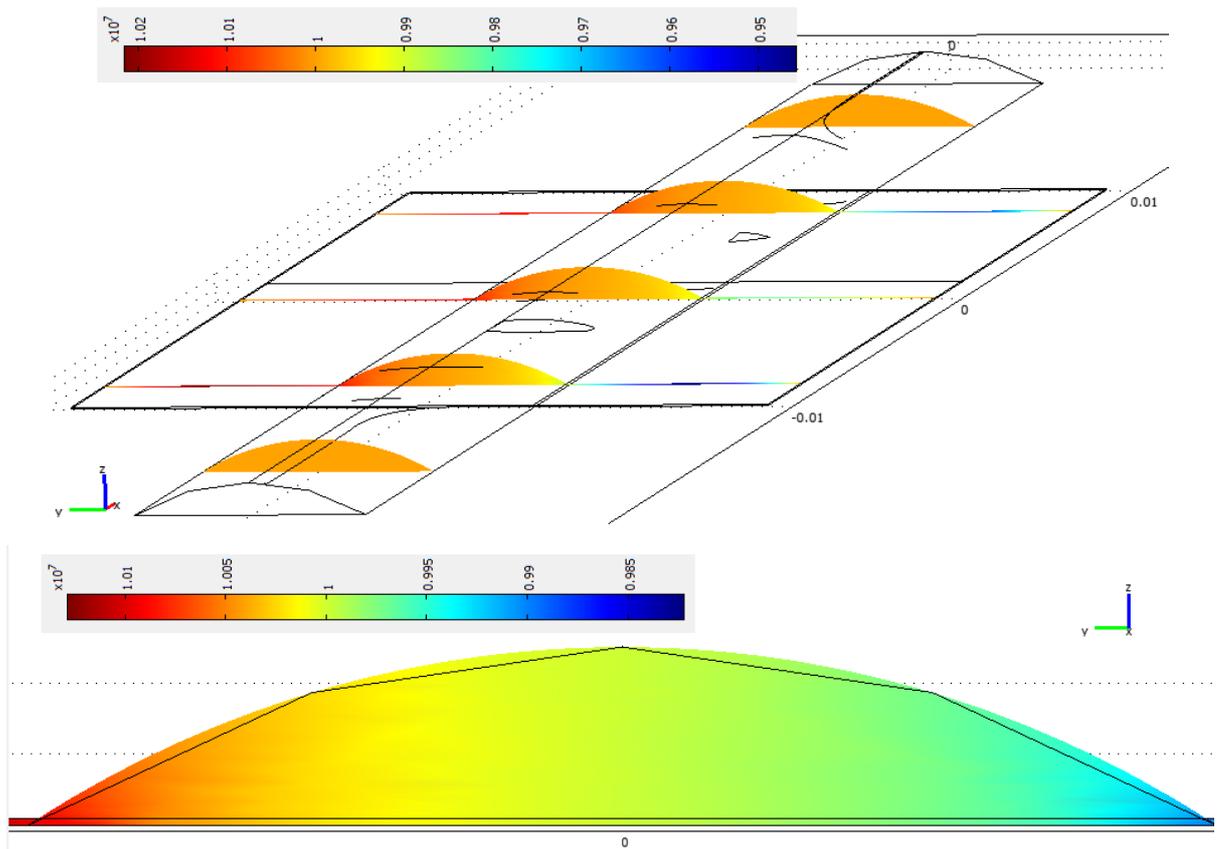


Рис. 2.18. Цветовая карта распределения давления смазочного материала в канавках

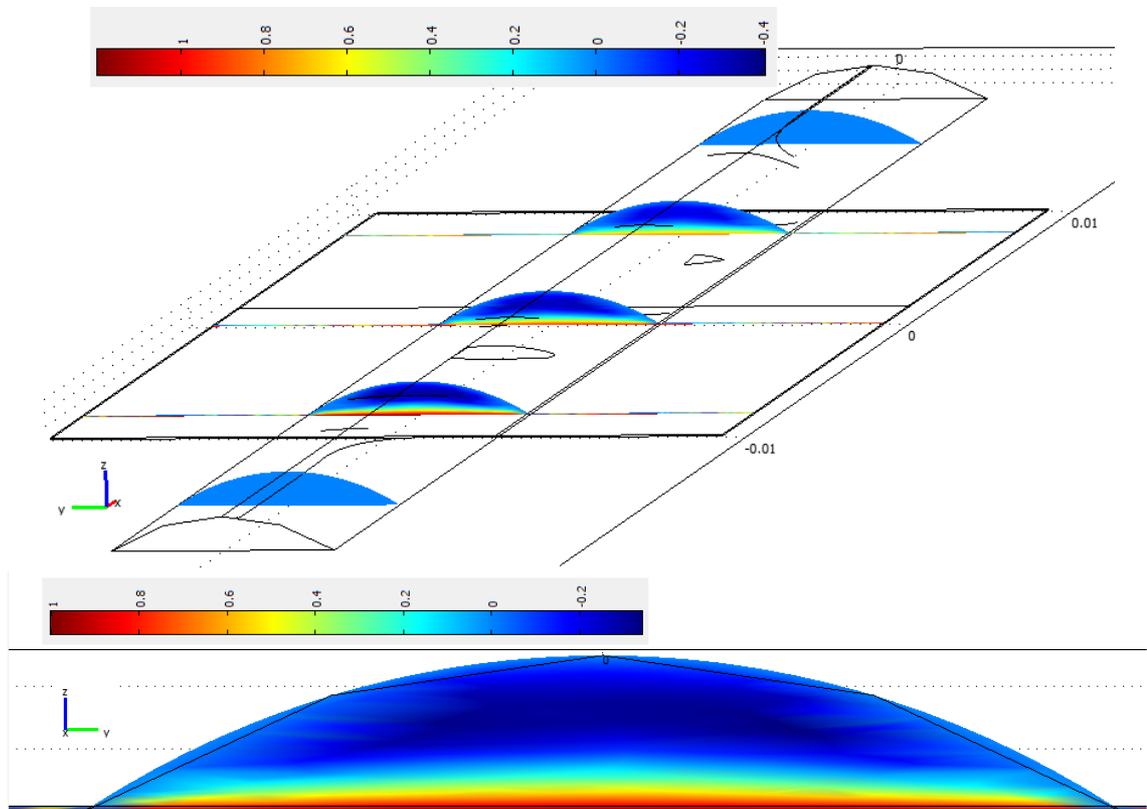


Рис. 2.19. Цветовая карта распределения окружной компоненты скорости в канавках

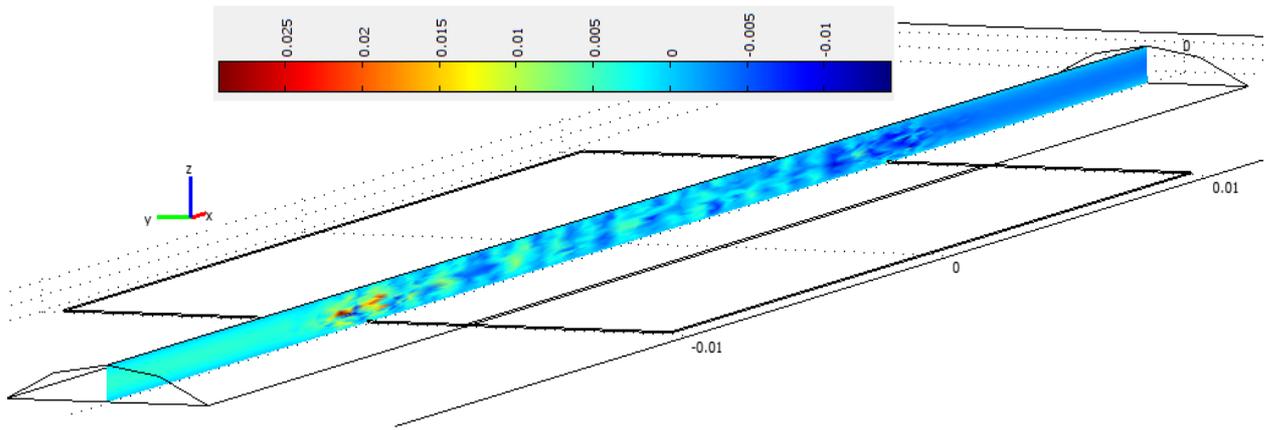


Рис. 2.20. Цветовая карта распределения скорости течения смазки вдоль оси канавки

Результат восстановления распределения давления вдоль траектории движения смазки в окрестности канавки (рис. 2.21), аналогичный представленному на рис. 2.16 для двумерного случая, демонстрирует качественное сходство, на которое накладывается сглаженность пиков давления, что вызвано возможностью перетекания смазочного материала вдоль оси канавки.

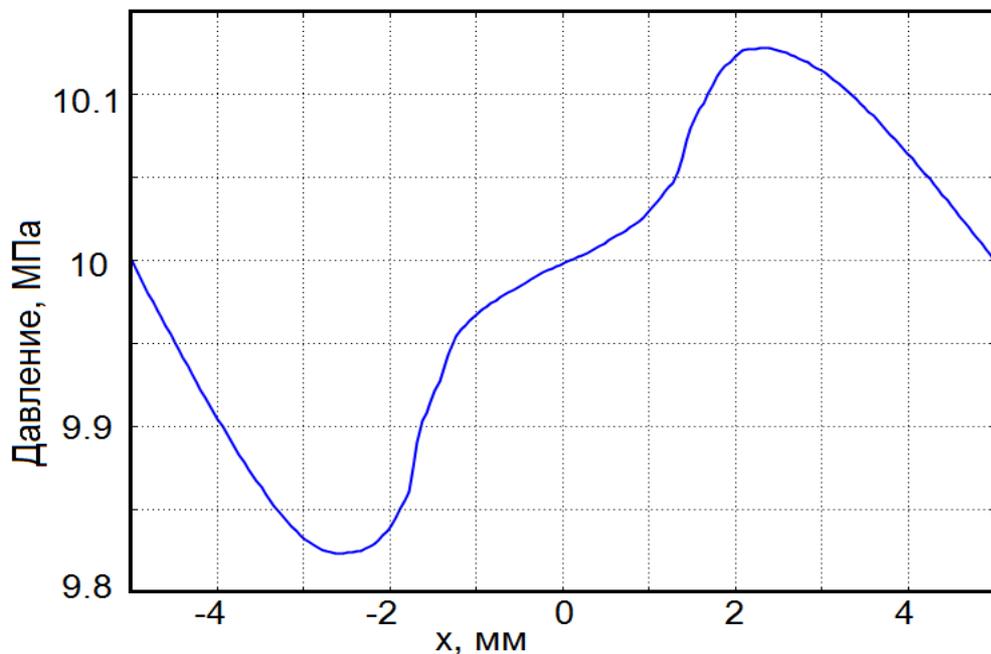


Рис. 2.21. Изменение давления в смазочном материале вдоль пути трения (результат конечноэлементного трехмерного моделирования)

Качественную характеристику изменения давлений в сечениях, расположенных вдоль оси X (имитация сечений вдоль оси вращения подшипника), дает рисунок 2.18, где приведена цветовая шкала давлений.

Аналогично на рисунке 2.19 иллюстрируется распределение окружной компоненты скорости смазочного материала вдоль маслоподдерживающей канавки.

Анализ сечения вдоль канавки показывает (рис. 2.20), что разность скоростей движения на торцах подшипника способствует циркуляционному течению смазочного материала вдоль канавки.

Наибольшая ширина канавок, рассмотренных при моделировании радиально-упорного подшипника со средним диаметром 14,535 мм составляет 3 мм, а коэффициент относительной площади, с учетом угла конуса в 10 градусов, для этого случая равен

$$F = \frac{F_K}{F_H} = \frac{60,93}{269} = 0,234.$$

Таким образом, на основе численно-аналитических расчетов доказана возможность доработки конструкции беззазорных радиально-упорных подшипников с фторопластсодержащим самосмазывающимся полимерным покрытием, обеспечивающей автоматический переход в стационарном периоде работы от граничного к жидкостному трению. Жидкостное трение позволит значительно увеличить скоростной режим и ресурс подшипника.

2.5 Выводы

1. На основе приближенного решения уравнения Навье-Стокса для установившегося течения вязкого несжимаемого смазочного материала получено аналитическое выражение, доказывающее возможность использования осевых канавок в подшипниковой втулке для перехода от граничного к жидкостному трению.
2. Численно - аналитическое решение уравнения Рейнольдса для плоской осесимметричной задачи о течении вязкой жидкости в двух осевых канавках

сегментального сечения позволило выявить резкий скачок давления в зоне канавок, а также установить зависимость давления и его градиента от величины азимутального угла.

3. При вариациях начального давления на границах интегрирования показано, что величина скачка давления, обусловленная наличием канавок, зависит не от этого давления, а только от вязкости смазочного материала, скорости скольжения и поперечного размера канавки.

4. Анализ результатов численных расчетов и графиков позволил установить резкий рост скачка давления при уменьшении толщины смазочного слоя (рабочего зазора в подшипнике).

5. Построение и анализ конечноразмерной (трехмерной) модели течения вязкой несжимаемой жидкости подтвердили зависимости, полученные ранее в двумерной модели, установили характер распределения гидродинамического давления вдоль оси канавок и доказали наличие циркуляции жидкости вдоль канавок.

3. Методика экспериментальных исследований

Масляная среда с одной стороны облегчает процесс трения, с другой – снижает физико-механические характеристики антифрикционных полимерных покрытий. В этом разделе приводится методика исследования, в результате которой определяется область рационального применения рассматриваемых покрытий в присутствии смазочных материалов различной вязкости.

3.1 Структура исследований

Целый ряд агрегатов и механизмов в силу своего назначения работают в среде жидких смазочных материалов. Это различные насосы, смесители, вентильные системы и т. п.

Фторопластсодержащие полимерные композиционные покрытия обладают свойством самосмазываемости, высокой несущей способностью и значительным ресурсом. Критерием работоспособности металлополимерной трибосистемы является величина зазора трибосрпращения, определяемая суммой величины износа и деформации ползучести полимерного покрытия. Кроме того, покрытие должно быть прочно закреплено на металлическом субстрате.

Жидкие смазочные материалы как рабочая среда оказывают существенное влияние на все три параметра: адгезию покрытия, вязкоупругие свойства композита и его антифрикционные характеристики. Эти параметры и определяют структуру экспериментальных исследований [40], представленную на рис.3.1.

Основной этап включает теоретические и экспериментальные исследования трения и изнашивания металлополимерной пары композиционное покрытие – металлическое контртело в смазочной среде различной вязкости. Применяются различные материалы контртел и разные тканые структуры армирующих каркасов композита. Вязкость смазочной среды изменяется в широких пределах.

Параллельно определяется прочность адгезионного соединения покрытия и его ползучесть под нагрузкой. Все экспериментальные исследования выполняются непосредственно в масляной ванне после 100 - 300 часовой предварительной экспозиции покрытия в среде этого же масла.

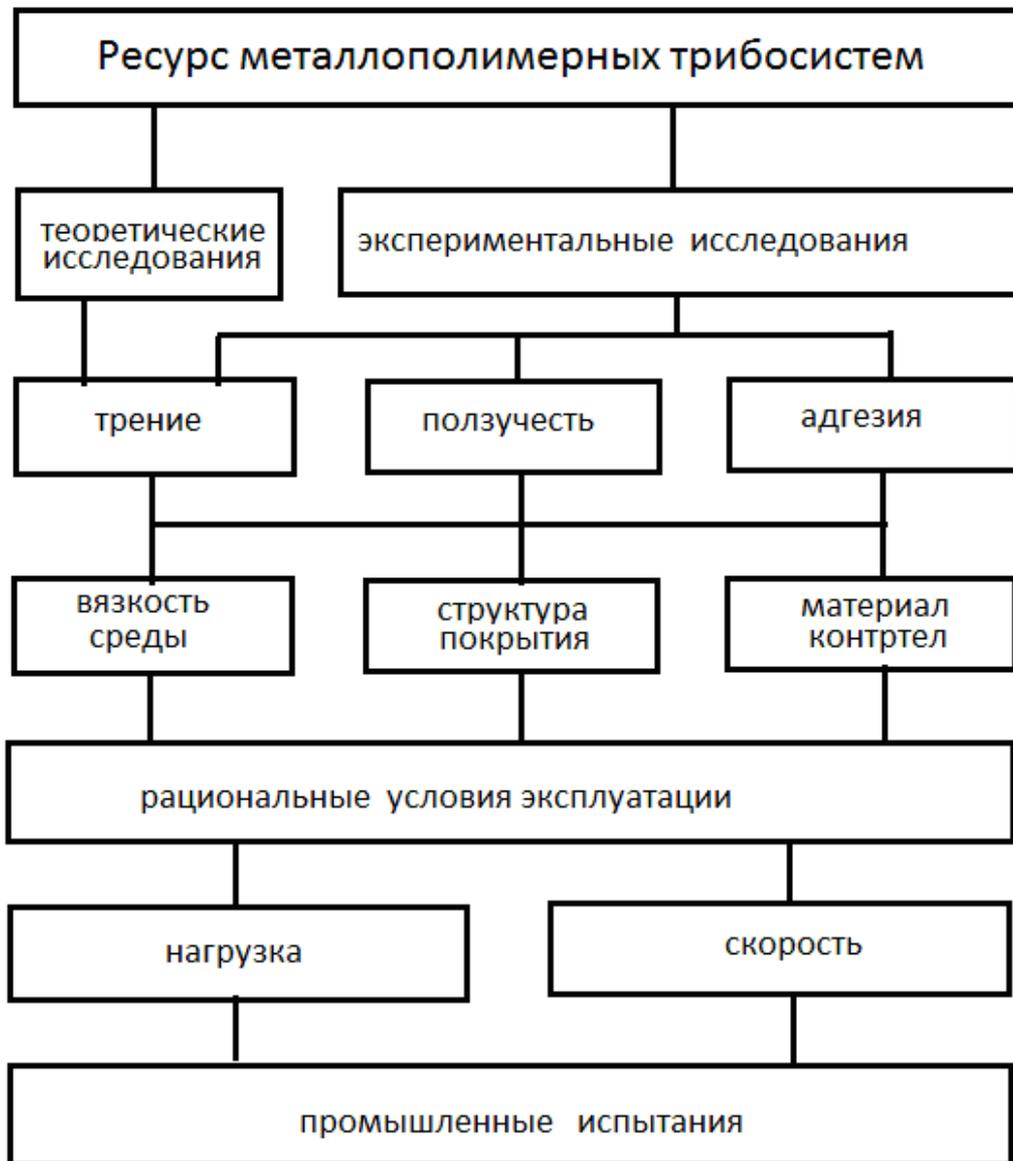


Рис. 3.1 Структурная схема исследований

Весь комплекс исследований разделен на три отдельных блока, охватывающих последовательно адгезионную прочность клеевого соединения антифрикционное покрытие – субстрат, вязкоупругие деформации композита при сжимающих трансверсальных нагрузках и блок триботехнических исследований. Это сведено в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 Экспериментальные блоки исследований

№ п/п	Блок	Цель исследований	Выход	Факторы	Диапазон варьирования	Оборудование	Погрешность
1	Адгезионные исследования	Обеспечение эффективности закрепления покрытия на субстрате	Прочность на отслаивание	Тип покрытия	Атлас0,55;0,3 саржа 1/3	Машина ИР5074-3 для испытания текстильных материалов	±10%ё
				Тип субстрата	Сталь 45 и латунь Л63		
				Вязкость среды	100–1244 сСт при 20 ⁰ С		
2	Исследование вязкоупругих свойств	Определение вклада деформации ползучести в формирование зазора трибосопряжения	Величина ползучести при сжатии, модули E ₀ и E _∞	Тип покрытия	Атлас0,55,0,3 саржа 1/3	Комплекс для механических испытаний TIRA test 2850	±5%
				Вязкость среды	100–1244 сСт при 20 ⁰ С		
				Нагрузка	5 – 100 МПа		
				Температура	20 – 100 ⁰ С		
3	Исследования триботехнических свойств	Установление рациональной области эксплуатации композиционных полимерных покрытий в жидких смазочных средах	Интенсивность изнашивания, коэффициент трения, ресурс, приработочные параметры	Тип покрытия	Атлас0,55,0,3 саржа 1/3	Стенд для испытания металлополимерных пар трения в жидких средах	±15%
				Тип контртела	Сталь45,ШХ15, ОХ18Н8Т		
				Вязкость среды	10–120 сСт		
				Нагрузка	5 – 50 МПа		
				Скорость	0,1 – 0,3м/с		

В таблице 3.1 приводятся цели, реализуемые в отдельных экспериментальных блоках и выход отдельных серий опытов. Кроме того, здесь даны переменные факторы и их диапазон варьирования, кратко описаны экспериментальные установки и достигнутая точность экспериментальных исследований.

Средние контактные напряжения рассчитывались по проекции опорной поверхности подшипника; скорость скольжения принималась равной скорости на среднем диаметре конического образца; вязкость жидких смазочных материалов приводится в соответствии с их температурой.

Паспортные метрологические характеристики применяемого оборудования и измерительных приборов, а также данные работ [20,35,89,105,136] позволили установить наиболее вероятные экспериментальные погрешности.

3.2 Оборудование и инструменты

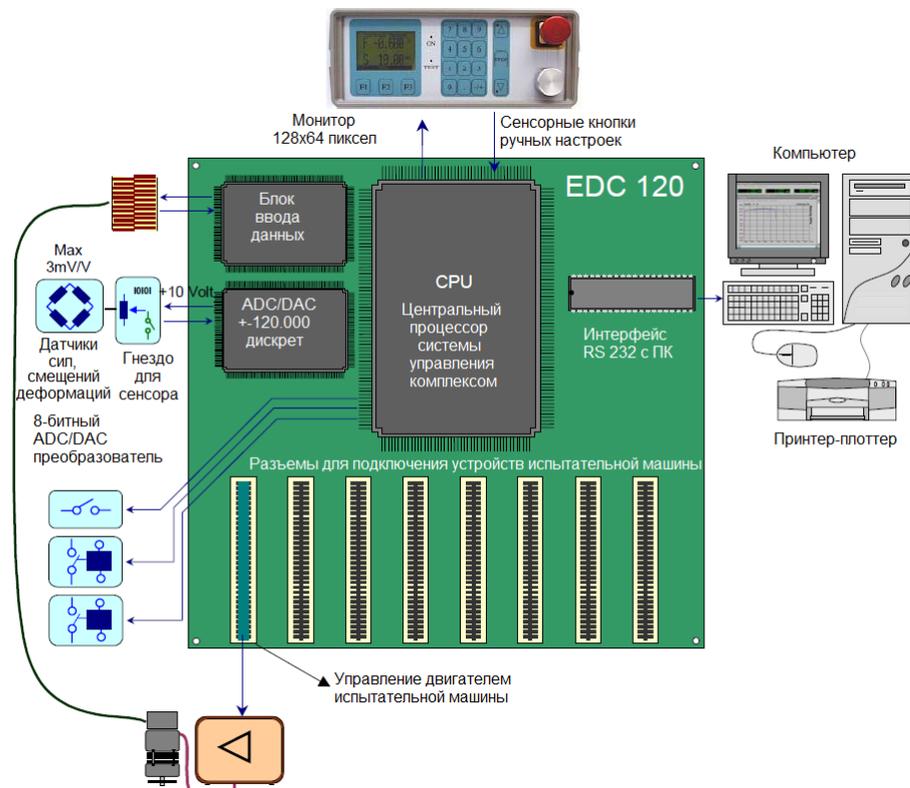
Исследования адгезионной прочности закрепления антифрикционных покрытий на субстрате [43,47] проводилось на стандартной испытательной машине отечественного производства модели ИР5074-3, предназначенной для испытания текстильных материалов. Конец ткани при отслаивании зажимался винтами между двумя планками в специальном приспособлении. Скорость нагружения соответствовала 100 мм/мин.

В соответствии с ГОСТ4650-80 все манипуляции с образцами начинались не позже одной минуты после их выемки из масляной ванны и продолжались не более 3-х минут.

Вязкоупругие свойства полимерного композита исследовались на прецизионном комплексе для механических испытаний модели TIRA test 2850 фирмы DOLI (Рис. 3.2) [40]. Этот комплекс представляет собой универсальную испытательную машину с механическим приводом, которая управляется электронной системой EDC – 120.



a)



б)

Рис. 3.2. Общий вид машины TIRA test 2850 с блоком управления ECD120 (а) и структурная схема этого комплекса (б)

Управляющая система связана с персональным компьютером и интерфейсом, позволяющим в диалоговом режиме выполнять все необходимые настройки параметров программы исследований.

Основные технические данные испытательного комплекса включают:

- предельное усилие - 25кН;
- точность при динамометре 25кН -5кН(0,02%), при - 5кН -0,5кН(0,01%);
- траверсный путь - до500мм;
- точность измерения траверсного пути - $\pm 0,5\text{мкм}$ (0,0001%).

Испытательная машина этого комплекса была оснащена специальным приспособлением, обеспечивающим сжатие исследуемого композита между двумя параллельными плоскостями. Приспособление представляет собой стальной цилиндр, шлифованный торец которого, передающий рабочую нагрузку, имеет площадь 1см^2 , другой - коническое углубление для центрирования стального шарика диаметром 12 мм. Усилие от траверсы машины передавалось на шарик через лыску. Образец и приспособление помещались в емкость с жидкой смазочной средой. Система нагружения образца представлена на рис. 3.3.

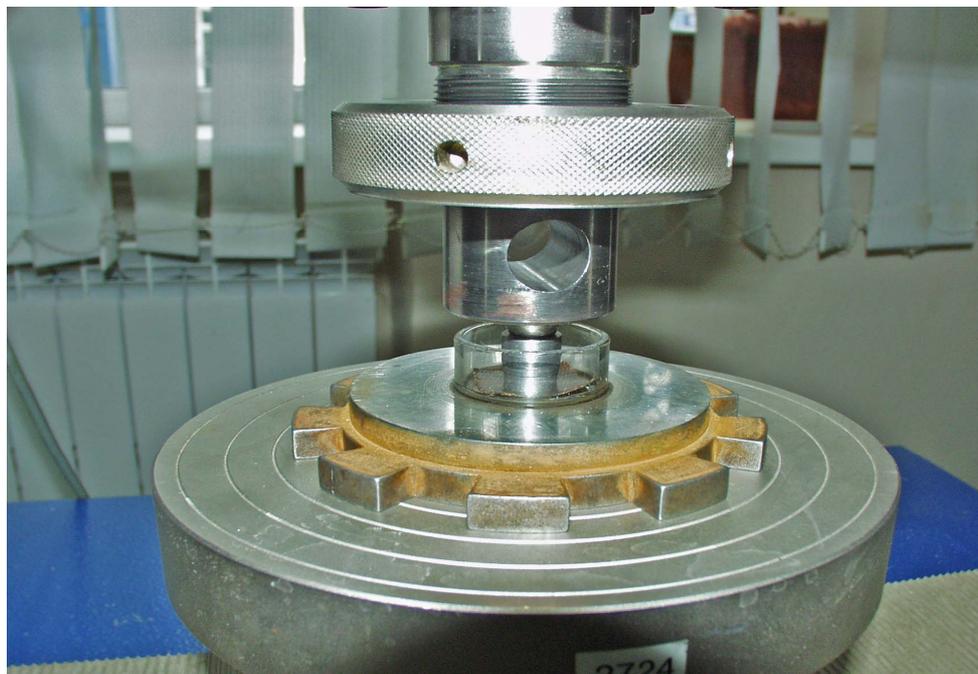


Рис. 3.3 Общий вид системы нагружения образцов в жидких средах

В связи с тем, что измерение деформации испытуемого композиционного материала можно было выполнить только по траверсному пути (толщина материала покрытия относительно мала и не превышает 0,3 – 0,55мм), а нагружающее устройство машины, включая силоизмеритель, обладает конечной жесткостью, перед каждым испытанием материала при тех же режимах снималась холостая нагрузочная диаграмма машины. Это дало возможность исключить из общей регистрируемой при испытаниях деформации часть, соответствующую деформации нагружающего устройства машины.

Конструктивной особенностью прецизионных деформационных машин, к которым относится модель TIRA test 2850, обеспечивающих управление и стабилизацию нагрузок при испытаниях на ползучесть, является система авторегулирования. Эта система по сигналу силоизмерителя автоматически поддерживает заданную нагрузку с определенной точностью.

Чем выше создаваемые усилия, тем более жесткий и менее чувствительный силоизмеритель используется в системе. В условиях данных экспериментальных исследований применяли силоизмеритель с максимальным усилием 25000 Н (2500 кгс), обеспечивающий точность поддержания нагрузки 10 Н (≈ 1 кгс).

Собственная жесткость всего нагружающего устройства вызывает ограничение предельной скорости нагружения, что лимитируется возникновением вынужденных и автоколебаний на собственной частоте контура «упругая часть машины + образец + система авторегулирования». Результаты этого явления представлены на рис. 3.4. Здесь приведены временные зависимости траверсного пути и нагружающей силы в холостом цикле сжатия. Первоначальный скачок и колебания нагружающего усилия вызваны контактом траверсы с основанием машины.

Этот контакт, образующийся примерно через 3 секунды, вызвал осцилляции на траверсном пути, зарегистрированные на диаграмме.

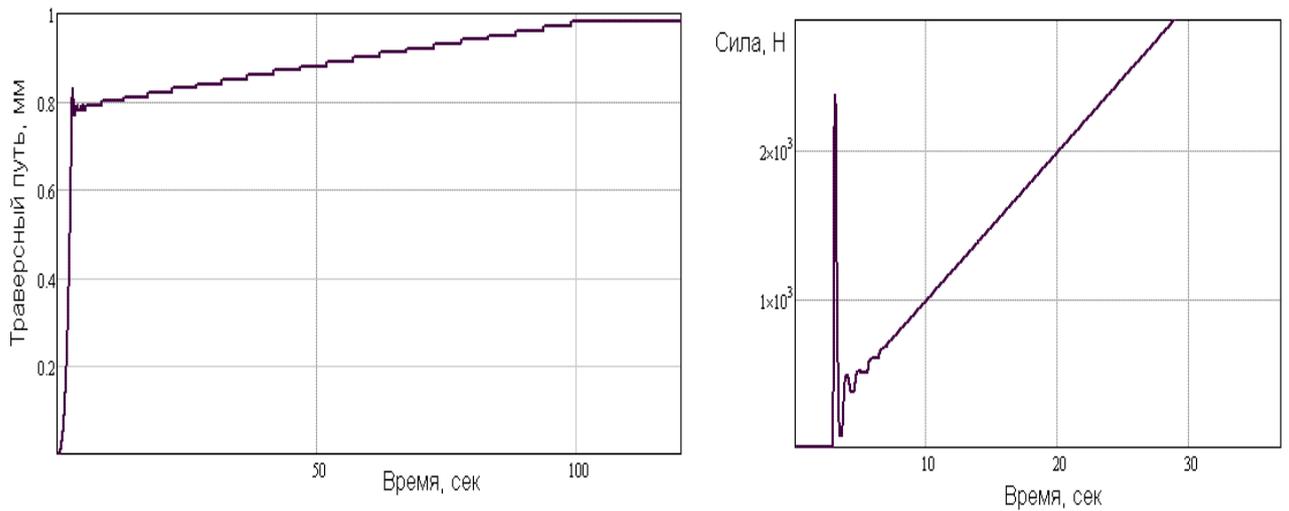


Рис. 3.4 Временные зависимости траверсного пути (слева) и силы (справа), зарегистрированные измерительной системой TIRA test 2850 в начале цикла сжатия с постоянной скоростью (диаграммы сняты в отсутствие образца - собственная деформация машины и приспособления).

Колебания быстро затухают и сжимающая нагрузка растёт с постоянной скоростью, что доказывается линейным характером роста силы на диаграмме справа.

Запись диаграмм начиналась из состояния машины, когда траверса была поднята на некоторую высоту, и имел место зазор между пуансоном и образцом композита. В результате этого на диаграммах, снятых машиной, регистрируется полный траверсный путь до и после контакта. Файлы реализаций экспериментов для исключения холостого хода обрабатывались специальной программой, выполненной в среде Math CAD 14.

Каждому испытанию образцов предшествовали 10-20 циклов холостого нагружения машины. Результатом каждого испытания были два файла - нагружения самой машины и машины вместе с образцом. Программа обработки файлов позволяла выделить вязкоупругую деформацию исследуемого антифрикционного композита.

Предварительные нагружения машины показали, что в диапазоне нагрузок до 20000 Н гистерезис машины при данной точности не имеет места. Следовательно, в пределах разрешающей способности 0.01 мм остаточные деформации отсутствуют, и деформирование происходит по одному повторяющемуся закону. Одновременно, испытание машины

статическими нагрузками в требуемом для исследований диапазоне, позволило установить, что ползучесть упругой подсистемы машины также отсутствует. Это обстоятельство позволило построить модель влияния деформации на силу и, наоборот, зависимость собственной упругой деформации машины от приложенного усилия.

Таблица 3.2 Фрагмент типового файла диаграммы нагружения испытуемого образца (контакт индентора с образцом обозначен подчеркиванием)

Время, сек	Траверсный путь, мм	Показания силоизмерителя, Н
0.02	0.00	-0.80
0.04	0.00	0.00
0.06	0.00	-0.80
0.08	0.00	0.00
0.10	0.00	-0.80
0.12	0.00	0.80
0.14	0.00	0.00
0.16	0.00	-0.80
0.18	0.00	0.00
0.20	0.00	-0.80
0.22	0.00	0.00
0.24	0.00	0.00
0.26	0.00	0.80
0.28	0.00	0.80
0.30	0.00	-0.80
0.32	0.01	1.60
0.34	0.01	0.80
0.36	0.01	0.80
0.38	0.01	0.00
0.40	0.01	0.80
0.42	0.02	2.40
0.44	0.02	0.80
0.46	0.02	0.00
0.48	0.03	2.40
0.50	0.03	2.40
0.52	0.04	3.20
0.54	0.04	4.00
0.56	0.05	3.20
0.58	0.05	5.60
0.60	0.06	5.60

Полученные регрессионные модели, аппроксимирующие снятые диаграммы, имеют вид: зависимость нагрузки от траверсного пути

$$F(\varepsilon) = \left[-5.5393 \cdot 10^5 \cdot |\varepsilon|^3 + 2.644 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon^2 + 1.012 \cdot 10^4 \cdot |\varepsilon| \right] \cdot \text{sign}(\varepsilon) \quad (3.1)$$

и зависимость траверсного пути от приложенной силы

$$\varepsilon(F) = 0.034 \cdot \text{th}(F/557.5) + 2.064 \cdot 10^{-5} \cdot F \quad (3.2)$$

При обработке диаграмм деформирования исследуемого материала из общей деформации, регистрируемой машиной, вычиталось выражение (3.2). Снятые при калибровке испытательной машины результаты (сплошная линия) и их модельная аппроксимация (пунктир) представлены на рис. 3.5.

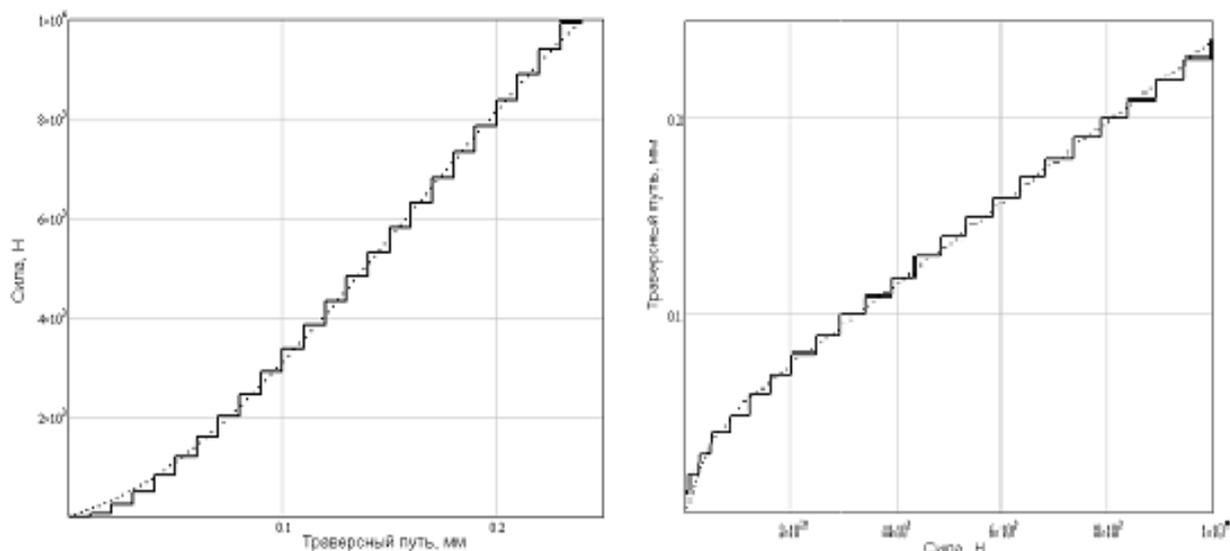


Рис. 3.5 Диаграммы, снятые при калибровке машины

Таким образом, использованное оборудование и методика его применения позволили обеспечить требуемую точность экспериментальных результатов при исследовании вязкоупругой деформации композита.

Исследование триботехнических характеристик полимерных композиционных покрытий выполнялось на специальном стенде [40], обеспечивающем бесступенчатое регулирование скорости вращательного движения металлических контртел, контактирующих с полимерным покрытием. Стенд смонтирован на основе настольно-сверлильного станка модели НС-12 (Рис. 3.6). Варьирование скорости вращения шпинделя станка обеспечивалось частотным преобразователем модели ATV312HU16N4. Частота вращения устанавливалась по тахометру ИО-30.

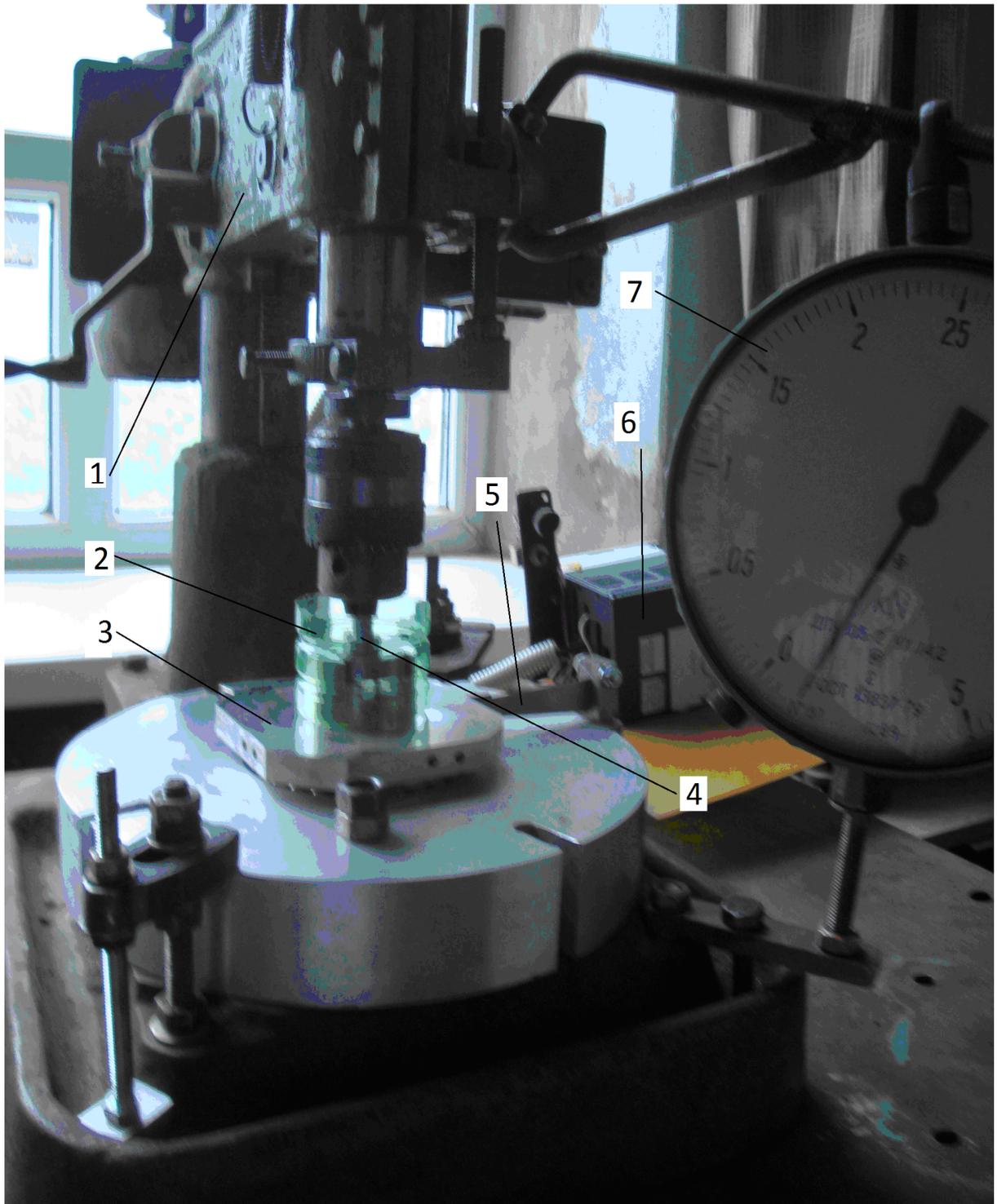


Рис. 3.6 Стенд для триботехнических исследований:

1 – настольно-сверлильный станок НС-12, 2 – емкость для жидких сред, 3 – поворотная часть приспособления, 4 – исследуемая пара трения, 5 – тензобалка, 6 – частотный регулятор, 7 – нагрузочный динамометр растяжения

Контртелу, закреплённому в патроне станка, сообщалось вращательное движение. Нагрузка на исследуемый подшипник с покрытием обеспечивалась динамометром растяжения марки ДПУ-0,5-2 (ГОСТ 13837 - 79) через рычажную систему с соотношением плеч 1:10. Тарировка системы нагружения выполнялась образцовым динамометром сжатия ДОСМ-3-1 (ГОСТ 9500 - 84).

Таблица 3.3. Метрологические характеристики средств измерений

№ п/п	Наименование	ГОСТ	Тип	Пределы измерений	Цена делений	Класс точности	Погрешность
1	Штангенциркуль	166-89	ШЦ-1	0-125мм	0,1мм	2	$\pm 0,05$ мм
2	Микрометр	Япония	Mitutoyo	0-25мм	0,001 мм	1	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$ мм
3	Головка измерительная рычажно - зубчатая	18833-73	ИГ	0-1мм	0,001 мм	2	$\pm 4 \cdot 10^{-4}$ мм
4	Штангенглубиномер	162-90	ШГ	0 -200 мм	0,01	2	$\pm 0,5$ мм
5	Динамометр сжатия образцовый	9500 – 84	ДОСМ 3 - 1	0-30кН	0,013 кН	1	$\pm 1,5$ %
6	Динамометр растяжения	13837-79	ДПУ 0,5 - 2	0 – 5кН	0,05кН	2	$\pm 2,0$ %

Измерительные системы лабораторного стенда включали тензобалку для измерения крутящего момента (коэффициента трения). и термопару ХК для определения температуры жидкой смазочной среды. Все электрические сигналы передавались через усилитель и 8-ми канальный АЦП на компьютер, где обрабатывались специальной программой ZET Lab.

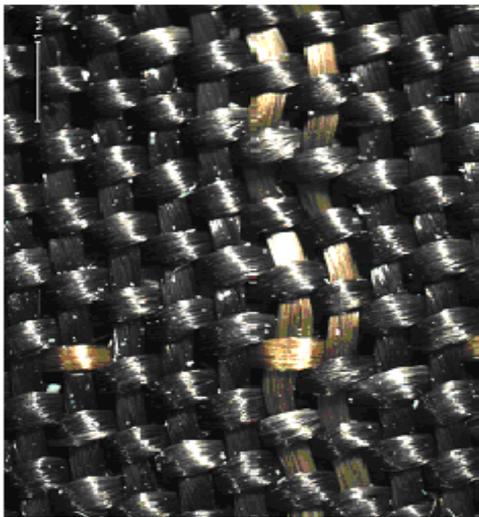
Величина радиального износа антифрикционного покрытия оценивалась по разности глубин просадки в коническое отверстие образца эталонной конической пробки до и после испытаний.

Достоверность результатов экспериментальных исследований достигалась использованием измерительных средств, прошедших обязательную своевременную поверку, а также выполнением параллельных опытов и статистической обработкой результатов [1,16,18,65,108,96,]. Сводные данные о метрологических характеристиках используемых приборов и инструментов приведены в таблице 3.3.

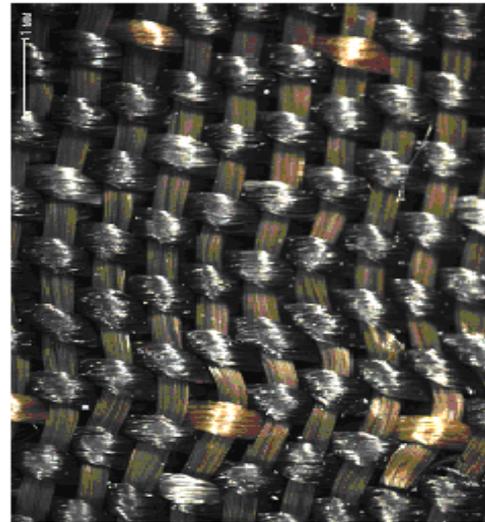
Следовательно, использованное оборудование и инструмент имеют достаточный диапазон характеристик, позволяющий успешно решить все поставленные в данной работе задачи.

3.3 Применяемые материалы и образцы

В качестве армирующего каркаса антифрикционных полимерных покрытий использовались две ткани одинакового атласного плетения, но разной толщины, формирующие композит толщиной 0,53 и 0,3 мм и одна ткань саржевого плетения для композита толщиной 0,46 мм [55] (Рис. 3.7).



а)



б)

Рис. 3.7 Поверхность саржи: а) рабочее лицо, б) изнанка

Все ткани имеют полуторослойную структуру: одну основу и два утка. У тканей атласного плетения на рабочую поверхность выведено 100% фторопластовых нитей. Ткань саржевого плетения имеет на рабочей поверхности кроме фторопластовых нитей (на фото темного цвета) сетку из полиамидных нитей (светлые), а изнанка на 60 – 65% состоит из полиимида с

хорошей адгезией к матричному связующему. Ткани этих плетений используются в серийном производстве шарнирных подшипников серии ШЛТ (Таблица 3.4).

Таблица 3.4. Тканые армирующие каркасы покрытий

№№ п/п	Тип ткацкого переплетения	Артикул	Технические условия ВНИИ ПХВ	Толщина, мм
1.	Двууточный полуторослойный шестиремизный неправильный атлас	5387/2 – 79	268 – 80	0,534±0,004
2.		5392 – 81	300 – 83	0,229±0,002
3.	Двууточная полуторослойная саржа 1/3	5384/3 - 80	278 – 81	0,455±0,003

В качестве матричного связующего и одновременно адгезива используется фенолформальдегидный клей модифицированный термостойким каучуком АФК -101 (ГИПК-114). На первом этапе из ткани изготавливался препрег. Ткань пропитывалась неотвержденным растворным связующим и высушивалась 24 часа на воздухе, а затем при 80⁰С в сушильном шкафу для полного удаления растворителей. Раскрой препрега выполняется по развертке покрытия. Причем при раскрое фторопластовые нити должны по возможности совпадать с направлением вращения, что обеспечит наибольшую износостойкость покрытия [55,69]. Для конических отверстий это требование полностью выдержать невозможно.

В качестве антиадгезива использовалась фторопластовая пленка, толщиной 0,1 мм (ТУ 6-11-5751-766-1). Режимы нанесения покрытия строго соответствовали технологическим условиям на связующее: 473 К (200⁰С) при выдержке 3 часа под давлением 1,5 – 2,0 МПа. Поверхность под покрытие зашкурировалась наждачной бумагой Ф14А-25НМ, обезжиривалась ацетоном и этиловым спиртом [47,110].

Для фиксации покрытия на поверхности образцов и обеспечения нагрузки отверждения матричного связующего применялось специальное

пружинное приспособление [40]. Его использование при нанесении покрытий на образцы для антифрикционных испытаний показано на рис. 3.8.

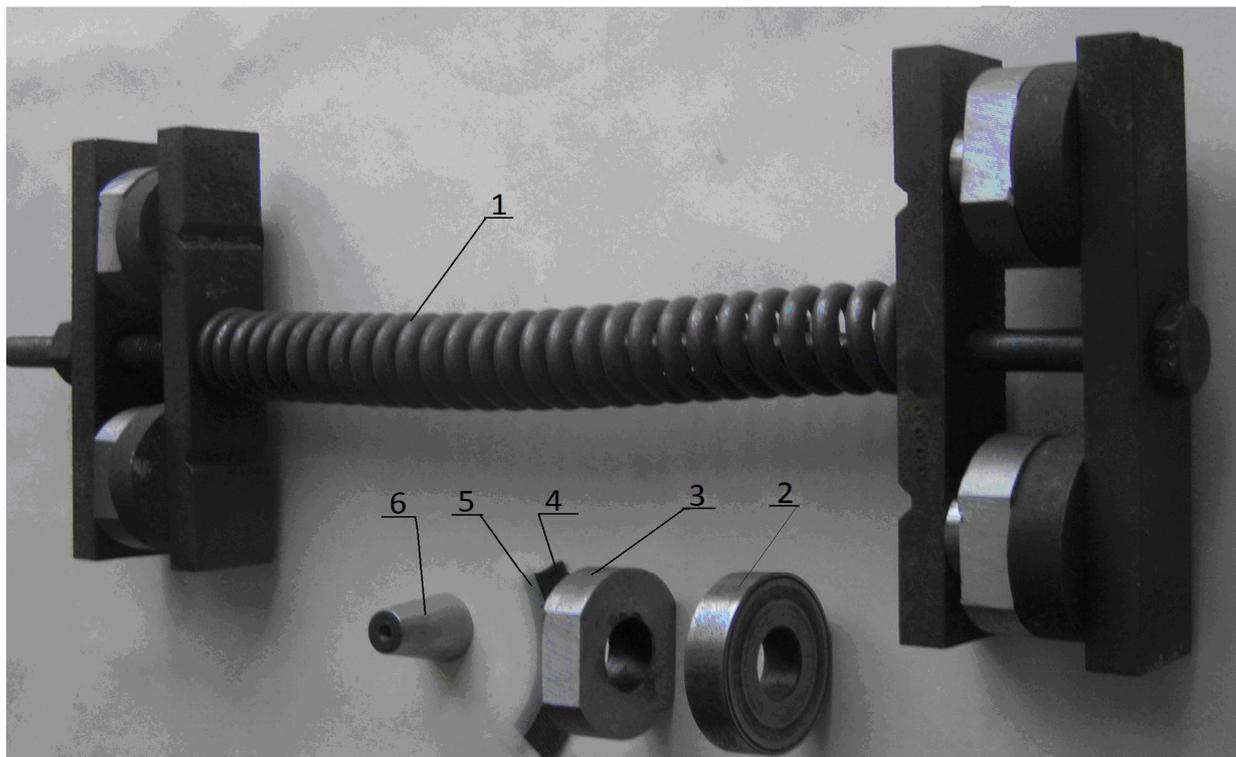


Рис. 3.8 Приспособление для нанесения покрытия на экспериментальные образцы: 1- пружина, 2- опора, 3 – образец, 4 – препрег, 5 – антиадгезив, 6 – пуансон

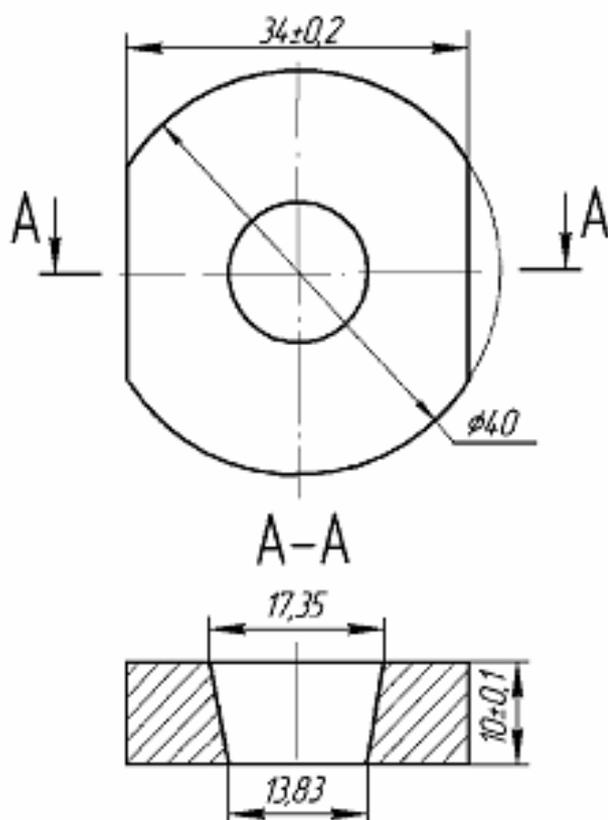
Плоские образцы в виде пакета во фторопластовой пленке просто зажимаются между планками приспособления. Величина усилия отверждения регулировалась степенью сжатия пружины. Покрытия сушились, а затем отверждались в печах СНОЛ-3,5/3,5-И1.

Исследования адгезионной прочности покрытий проводилось на образцах в виде пластин из стали 45 (ГОСТ1050-88) и латуни Л63 (ГОСТ 15527-2004) размером 2×15×120 мм с отверстием для захвата разрывной машины.

Образцы для трибоиспытаний представляли собой втулки с коническим внутренним отверстием (Рис. 3.9). Материал образцов – сталь 45.

Полимерное композиционное покрытие наносилось на поверхность внутреннего отверстия. Для установки образцов в приспособление и

предотвращения их проворота они имеют две симметричные фрезерованные лыски. Все образцы шлифованы по торцам в один размер $10 \pm 0,1$ мм.



а)

б)

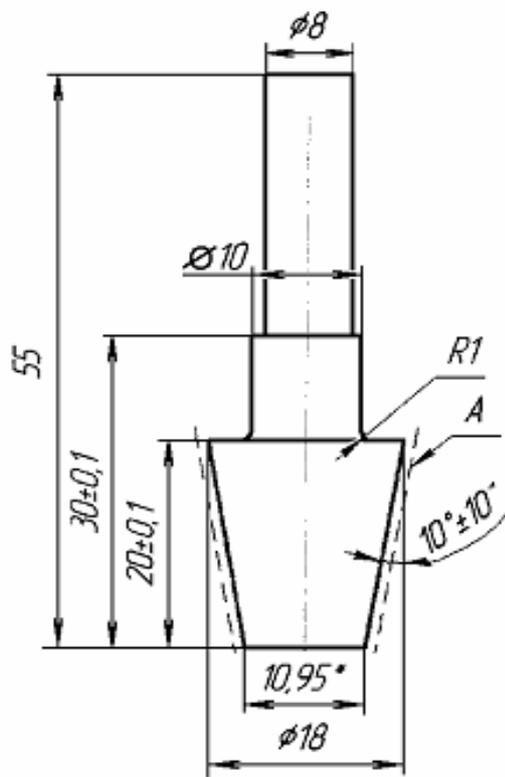
Рис. 3.9 Образцы для трибоиспытаний: а) эскиз, б) фото

Контртела – ответные детали, сопрягаемые с покрытием (рис. 3.10), изготавливались из широко используемых машиностроительных материалов (см. таблицу 3.5). Они представляют собой стальные конические валики с поверхностью, шлифованной и полированной до $R_a = 0,2-0,4$ мкм. Контртела из сталей 45 и ШХ15 прошли термообработку. Выбранный угол конуса гарантирует отсутствие самоторможения, так как $\text{tg}10^\circ$ равен 0,173468, что значительно превышает коэффициенты трения в исследуемом трибосопряжении. На цилиндрической части контртел предусмотрен уступ для удобства их закрепления в патроне станка при одинаковом вылете.

Таблица 3.5 Свойства применяемых металлов

№№	Марка	Модуль E,	Коэффициент	Предел	Относитель-
----	-------	-----------	-------------	--------	-------------

п/п	материала	МПа	Пуассона ν	прочности σ_B , МПа	ное удлинение δ , %
1.	Сталь 45	$2,06 \times 10^5$	0,33	598	16
2.	Сталь ШХ15			715	21
3.	Сталь 12Х18 Н9Т			528	38
4	Титановый сплав ВТ3-1	$1,15 \times 10^5$	0,30	1150	12
5	Латунь Л63	$1,03 \times 10^5$	0,36	350	20



а) б)
Рис. 3.10 Контртела: а) эскиз, б) фото

В качестве жидких смазочных материалов используются минеральные масла селективной очистки различной вязкости. Совмещение этих масел позволяет варьировать вязкость в очень широких пределах. Основные характеристики применяемых жидких смазочных материалов приведены в таблице 3.6 [127].

Таблица 3.6. Параметры масел

Наименование	Марка	ГОСТ, ТУ	Вязкость при температуре в сСт		Температура в °С		Плотность кг/м ³
			20 ⁰ С	50 ⁰ С	Застывания	Вспышки	
Турбинное	Тп-22С	101821-2001	100	22-23	-15	186	900
Авиационное	МС-20	21743-76	1244	151,3	-18	270	897

Узлы трения не термостатированы, а ограниченный до 40 см³ объем масла в экспериментальном узле трения приводят к существенному росту температуры, что снижает вязкость смазочного материала. Регулирование температуры в зоне трения осуществляется периодической заменой масла на свежее по показаниям встроенной в зону трения термопарой.

Таким образом, по нагрузочно-скоростным и точностным показателям разработанный экспериментальный комплекс позволяет решить поставленные в работе исследовательские задачи.

3.4 Планирование экспериментов и обработка результатов

Заключительный технический результат экспериментальных исследований, структура и информационные свойства математических моделей процессов и предметов исследований целиком определяются рациональностью выбранных экспериментальных планов [1,59,65]. Естественные вариации свойств реальных технических объектов приводят к существенному разбросу значений выхода экспериментов, достигающего по ряду источников 20 - 40% [17,134]. Это подтверждает необходимость статистической обработки выходных данных для надёжного установления результатов и правильного понимания тенденций исследуемых процессов.

Поэтому планирование и выполнение каждого блока экспериментальных исследований осуществлялось на базе многофакторных экспериментов по схеме двухуровневых полнофакторных планов [1,65,117].

Практика показывает [12,48,53,61], что модели триботехнических характеристик металлополимерных трибосистем в ограниченном

Адгезионные исследования	Экспозиция в масле	t	час	20	60	100	40
	Кинематическая вязкость (20 ⁰ С)	v	сСт	100	672	1244	572
Исследования ползучести	Температура	T	⁰ С	20	60	100	40
	Контактные напряжения	σ	МПа	5	52,5	100	47,5
	Кинематическая вязкость	v	сСт	30	57,5	85	27,5
	Экспозиция в масле	t	час	20	60	100	40
Триботехнические исследования	Кинематическая вязкость (20 ⁰ С)	v	сСт	100	672	1244	572
	Контактные напряжения	σ	МПа	5	32,5	60	27,5
	Скорость скольжения	V	м/с	0,1	0,2	0,3	0,1

Обработка выхода полнофакторных экспериментальных планов включает следующие этапы:

- расчет дисперсии воспроизводимости в натуральных переменных,
- расчет дисперсии воспроизводимости в логарифмах натуральных переменных,
- оценка однородности дисперсий выхода в логарифмах по критерию Кохрена,
- определение коэффициентов уравнения регрессии,
- оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента,
- переход к модели в натуральных переменных,
- оценка адекватности модели по критерию Фишера,
- оценка вариаций выхода при 5% разбросе входной информации.

Результаты классических однофакторных экспериментов обрабатывались методом наименьших квадратов по стандартной методике [18,65]. Для сравнительных экспериментов рассчитывались доверительные интервалы.

В итоге можно считать разработанной [40] и опробованной с удовлетворительным результатом на жидкостях разной физической природы общую методологию исследования антифрикционных полимерных фторопластсодержащих композиционных материалов.

Глава 4. Эксплуатация покрытий в жидких смазочных средах

Одним из наиболее перспективных режимов эксплуатации узлов трения является их работа в условиях жидкостной смазки. Однако жидкие смазочные материалы оказывают существенное влияние на весь комплекс физико-механических свойств полимерных композиционных покрытий [54,77].

В первую очередь это относится к адгезионному закреплению антифрикционного покрытия на субстрате, гарантирующему работоспособность трибосистемы [68,70].

Кроме того, общеизвестно, что ресурс узла трения, обеспечивается зазором в трибоконтакте, который, в нашем случае, зависит от вязкоупругих свойств полимерного покрытия и его износостойкости [21].

Таким образом, рекомендации по эксплуатации полимерных покрытий в режиме жидкостного трения определяются результатами исследований по влиянию жидкой смазочной среды на адгезию, вязкоупругие свойства и износостойкость покрытия.

4.1 Адгезионная прочность покрытий

Наличие в исследуемых антифрикционных полимерных композиционных покрытиях фторопластовых нитей, имеющих практически нулевую адгезию к матричному связующему, приводит к возникновению в структуре композита различных микродефектов - пор и несплошностей [68]. Присутствие в товарных маслах химически активных веществ (кислотное число в МС-20 равно 0,03, а в Тп22-С - 0,6 [121]) может вызывать подслоиную коррозию, что резко снизит адгезионную прочность.

Тепло, генерируемое в процессе трения, интенсифицирует все физико-химические процессы. Снижая вязкость масел, температура способствует капиллярному проникновению и агрегированию жидкости в порах композита, а также повышает скорость диффузионных процессов.

Одновременно происходит температурное снижение физико-механических свойств полимерных материалов, что эквивалентно уменьшению износостойкости полимерных покрытий и ресурсу узла.

Наглядные результаты разрушения адгезионных связей на стальном и латунном субстрате представлены на рисунке 4.1.

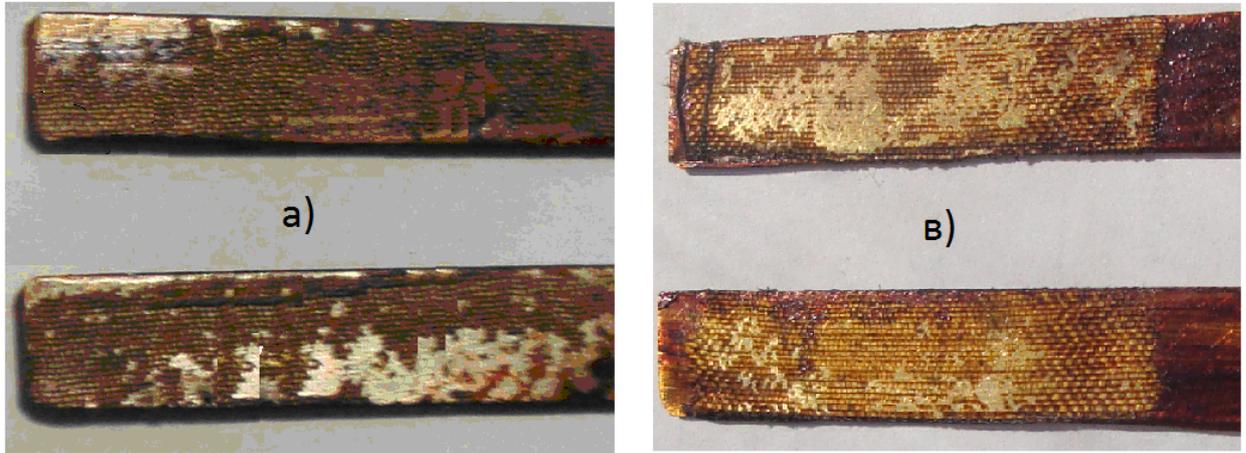


Рис. 4.1 Разрушение адгезионных связей субстрат – связующее и ткань - связующее на стальном а) и латунном в) субстрате

Следует отметить, что при отслаивании покрытия на основе тканых каркасов, наиболее слабым местом является адгезионный шов. Разрушение его может происходить как по металлу, так и по ткани в зависимости от зоны воздействия среды. Предпочтительным является разрушение по ткани, так как покрытие при этом продолжает некоторое время работать за счет разницы в коэффициентах трения на рабочей поверхности и на субстрате.

Исходными данными для сравнительных исследований были результаты адгезионной прочности рассматриваемых покрытий в воздушной среде. Полученные значения прочности соответствовали для стального субстрата 6,0 кН/м, а для латунного 5,64 кН/м, то есть клеевой шов на стали в среднем на 6% прочнее, чем на латуни.

Далее исследовалось влияние на адгезионную прочность покрытий наименее вязкого турбинного масла Тп 22-С. Учитывая повышение температуры при трении, ее поддерживали постоянной все время экспозиции

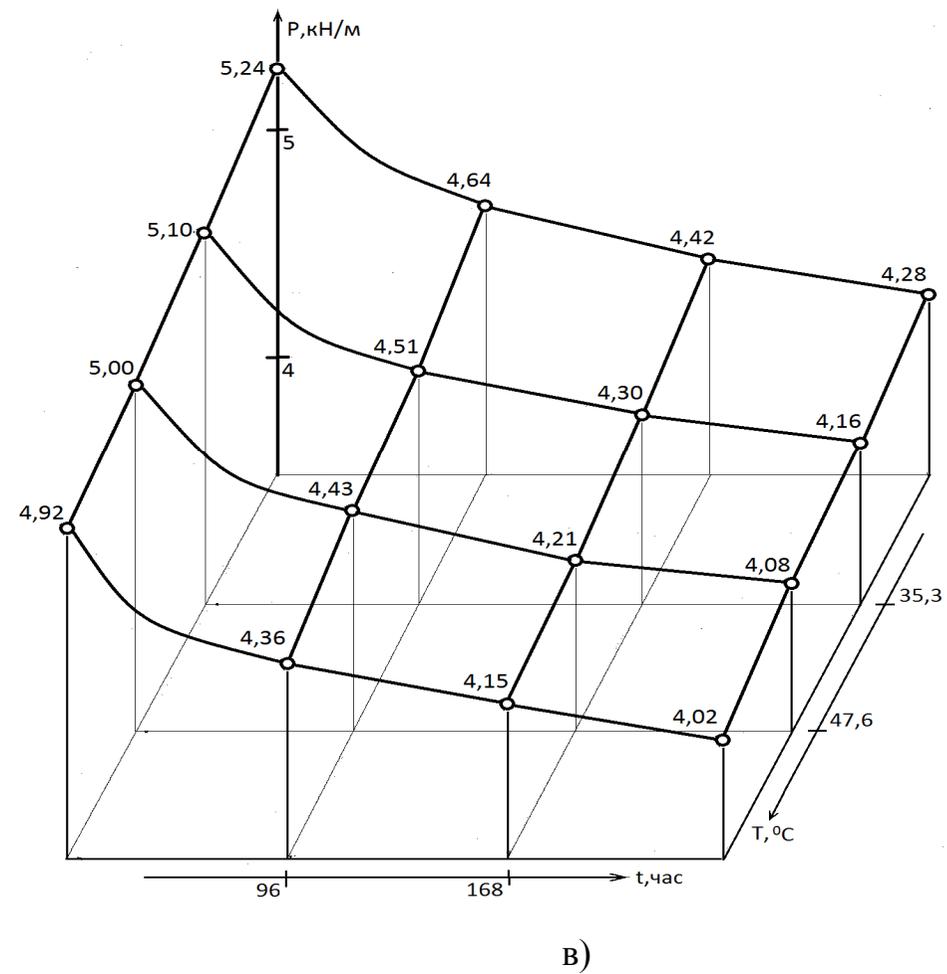
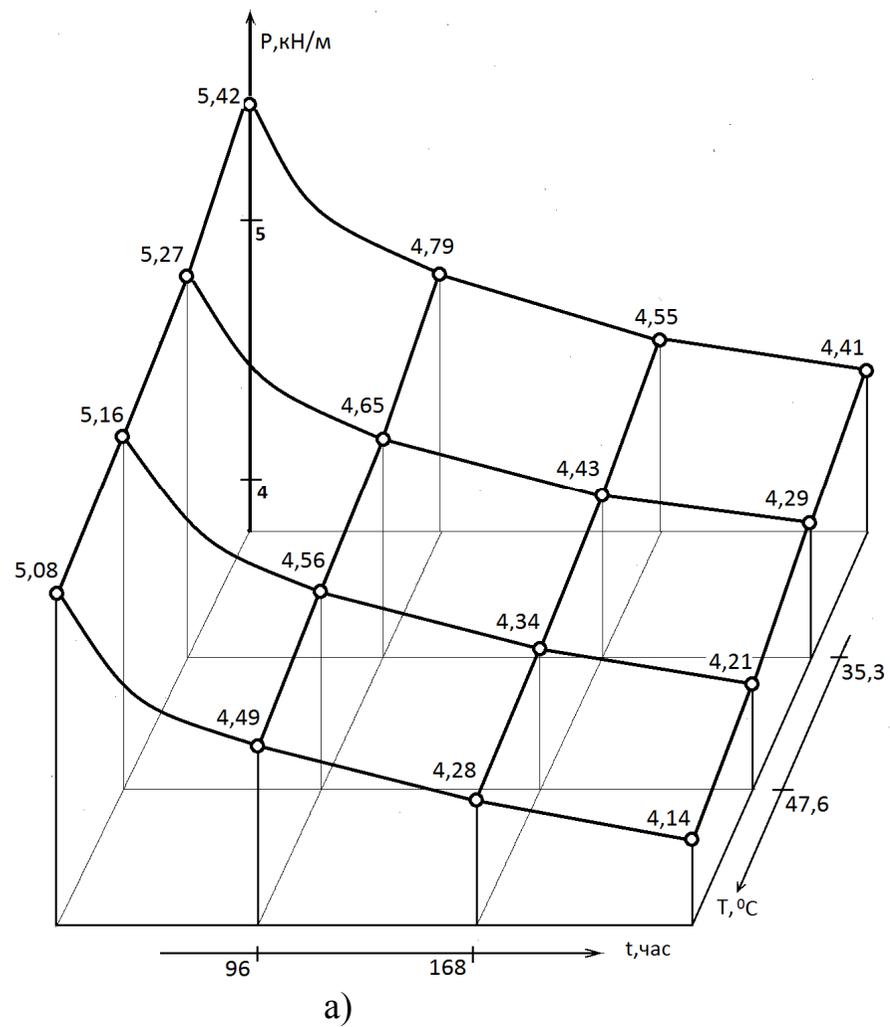


Рис. 4.2 Адгезионная прочность антифрикционных покрытий в среде турбинного масла марки Тп22-С на стальном а) и латунном в) субстрате

образцов в среде масла. В результате исследований получены данные об адгезионной прочности антифрикционных фторопластсодержащих покрытий на стальном и на латунном субстрате Тп22-С (см. Рис.4.2).

Здесь, в качестве примера, представлены зависимости адгезионной прочности в среде наименее вязкого масла марки Тп22-С. Значительно более вязкое масло марки МС-20 влияет на адгезионную прочность, подчиняясь очень близким аналогичным закономерностям.

После статистической обработки результатов исследований, полученные адекватные регрессионные модели адгезионной прочности антифрикционных фторопластсодержащих покрытий, приведены в таблице 1 для различных типов субстрата и марок товарного смазочного материала.

Таблица 4.1. Модели адгезионной прочности покрытий

Смазочный материал	Субстрат	Факторы	Выход	Модель	Погрешность, %
Тп22-С	Сталь	t, час	P, кН/м	$P=8,84 t^{-0,089} T^{-0,066}$	2,1
	Латунь			$P= 8,50 t^{-0,088} T^{-0,065}$	2,0
МС-20	Сталь	T, °C		$P= 8,88 t^{-0,067} T^{-0,108}$	3,0
	Латунь			$P= 8,59 t^{-0,076} T^{-0,072}$	2,5

Анализ полученных выражений и близость величин параметров моделей при их общей структуре позволяет сделать заключение об однотипности механизма понижения адгезионной прочности покрытий несмотря на существенное различие в вязкости исследованных жидких смазочных материала и разницу в природе металла субстратов.

Кроме того, с учетом относительно низких погрешностей индивидуальных моделей, указанное обстоятельство позволяет получить

единую обобщенную для всего исследованного диапазона факторов и материалов расчетную модель в следующем виде:

$$P = 8,958 t^{-0,08} T^{-0,078}. \quad (4.1)$$

Обобщенная модель адекватна и позволяет получить результаты с наибольшей погрешностью равной 6,2% относительно любого индивидуального сочетания исследованных факторов. Графическая интерпретация модели представлена на рис. 4.3.

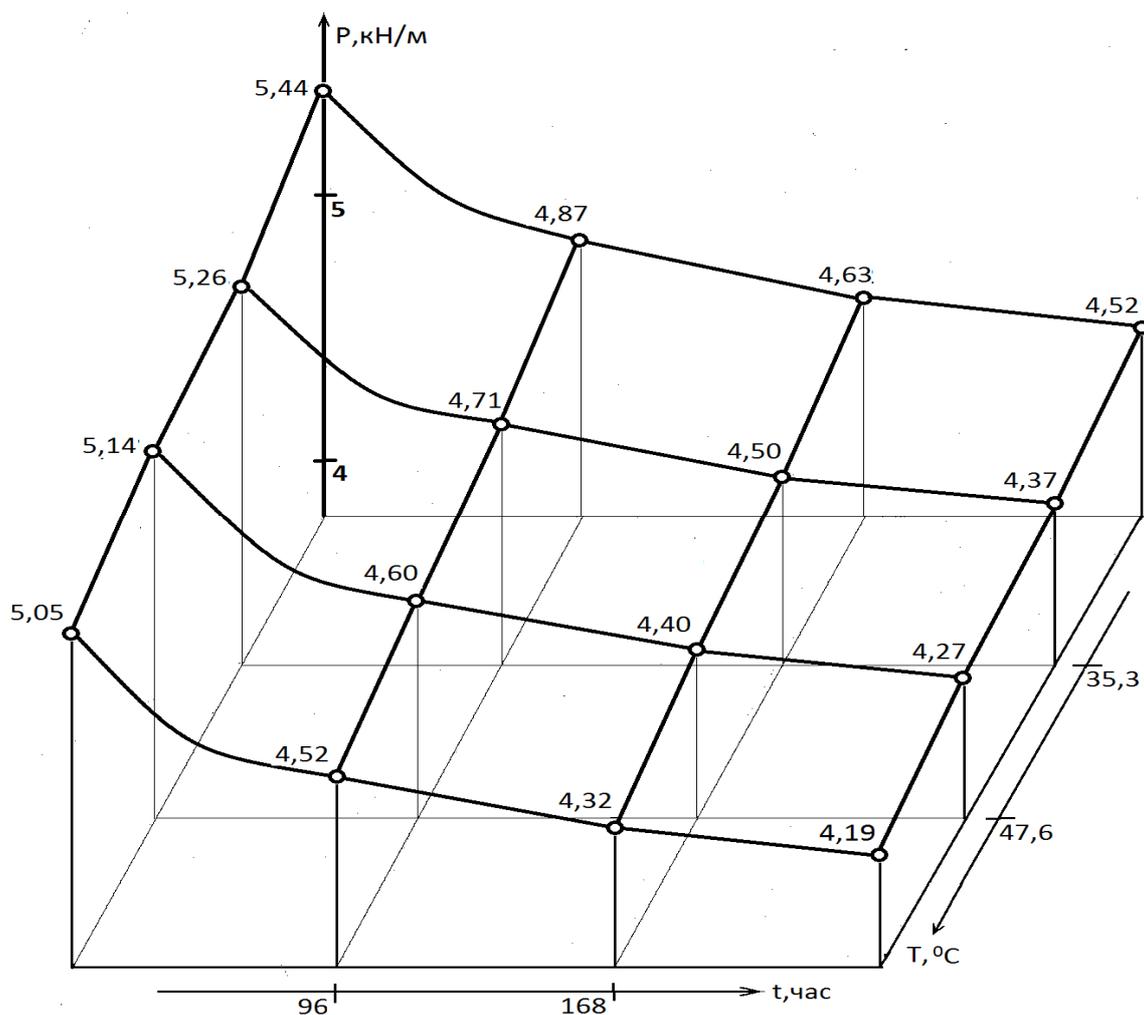


Рис. 4.3 Графическая интерпретация обобщенной модели зависимости адгезионной прочности антифрикционных покрытий от температуры жидкой смазочной среды и времени экспозиции для исследованных минеральных масел и субстратов

С инженерных позиций представляется более эффективным оперировать при расчетах не величиной адгезионной прочности на

отслаивание в кН/м, а процентом ее снижения по отношению к адгезионной прочности того же соединения в воздушной среде K

$$K = (P_{\text{возд}} - P) 100\% / P_{\text{возд}} \cdot \quad (4.2)$$

Модели потери адгезионной прочности при экспозиции в исследованных смазочных средах в условиях повышенной температуры имеют следующий вид:

для стального субстрата в турбинном масле

$$K = 7,98 \cdot 10^{-3} t^{1,448} T^{1,68 - 0,676 \lg t}, \quad (4.3)$$

и в авиационном масле

$$K = 3,44 \cdot 10^{-3} t^{1,477} T^{1,81 - 0,67 \lg t}, \quad (4.4)$$

для латунного субстрата в турбинном масле

$$K = 9,1 \cdot 10^{-4} t^{1,825} T^{2,089 - 0,85 \lg t}, \quad (4.5)$$

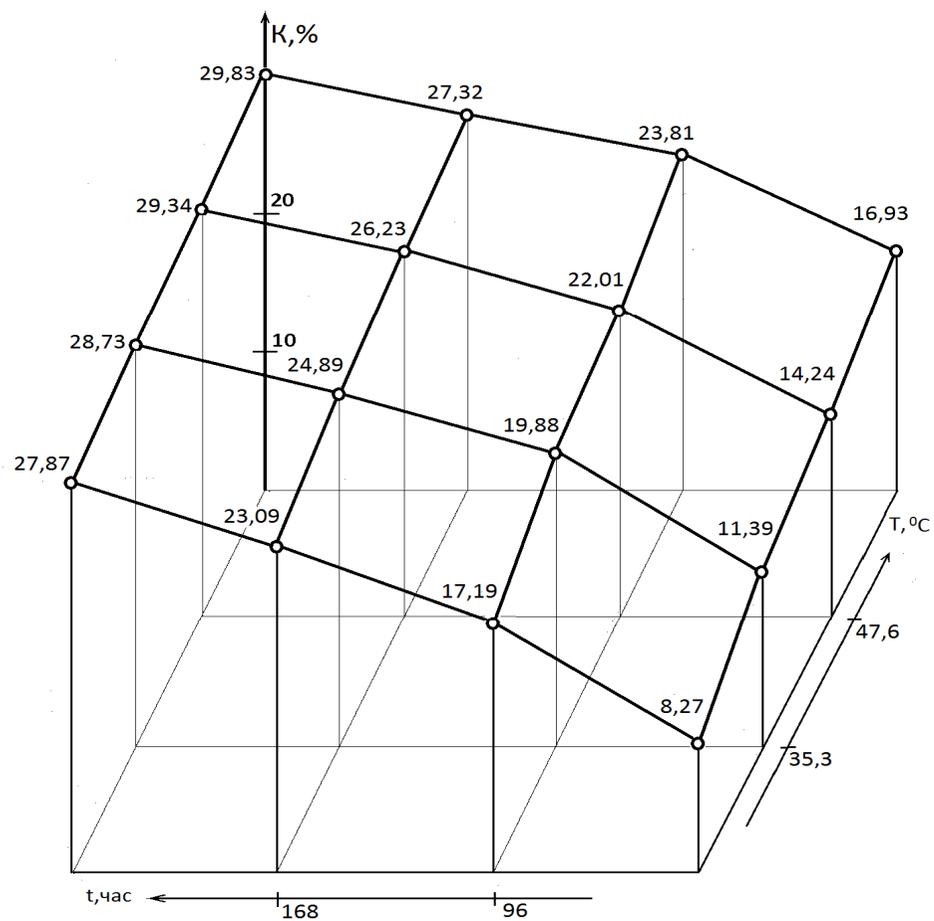
и авиационном $K = 2,63 \cdot 10^{-3} t^{1,491} T^{1,762 - 0,637 \lg t}.$

$$(4.6)$$

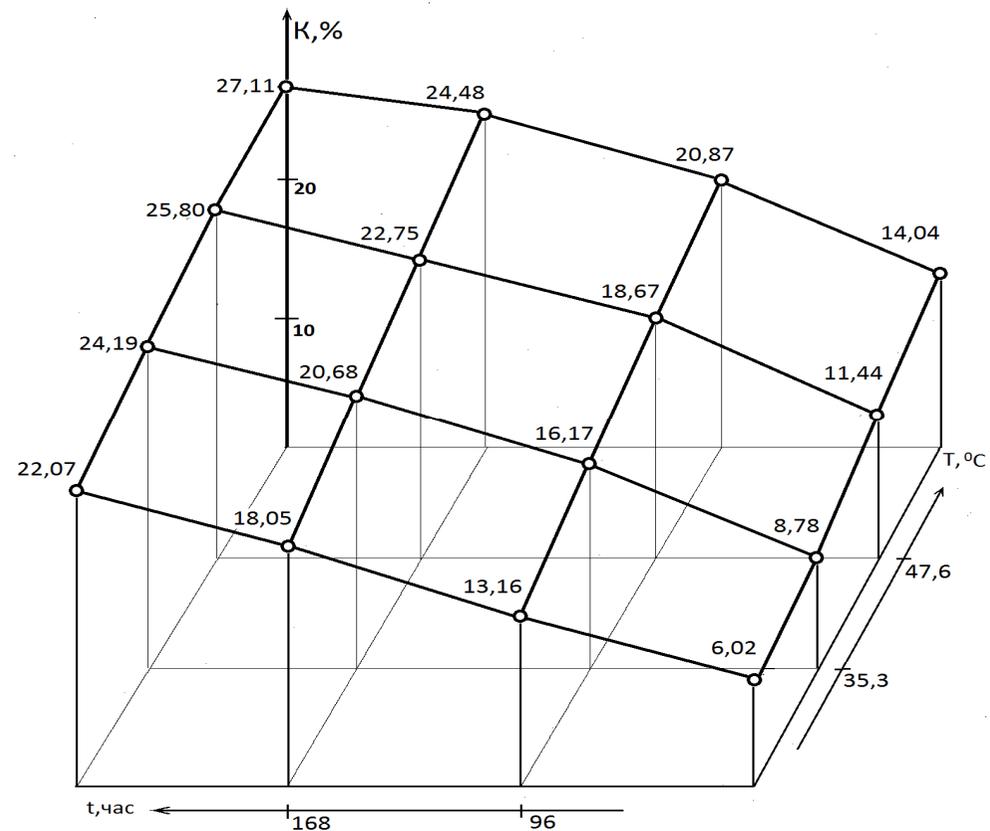
Полученные модели адекватны и имеют погрешность, не превышающую 5%. Они сложнее предыдущих, так как включают взаимодействия и в большей степени различаются величиной коэффициентов. Это может быть объяснено влиянием природы субстрата и разной проникающей способностью рассматриваемых смазочных сред, определяемой их вязкостью. Влияние природы субстрата (сталь и латунь) в воздушной среде составляет примерно 6%, а изменение вязкости масел в диапазоне температур 20 – 60⁰С для Тп22-С составляет 100 – 15 сСт, а для МС-20 - 1244 – 83сСт

Графическая интерпретация типичных моделей потери антифрикционным покрытием адгезионной прочности приведена на Рис.4.4.

Для оценки вклада каждого из четырех исследованных переменных факторов был произведен сравнительный количественный анализ средней потери адгезионной прочности клеевого шва покрытие - субстрат в смазочной и воздушной среде.



а)



б)

Рис. 4.4 Влияние времени экспозиции в жидкой смазочной среде и температуры на величину потерь адгезионной прочности антифрикционных покрытий на стальном субстрате: а) в турбинном масле Тп22-С и б) в авиационном масле МС-20

Причем, выборка по потерям прочности усреднялась по всем исследуемым в данном случае факторам: материалу субстрата, смазочному материалу, температуре среды и времени экспозиции образцов.

Результаты анализа данных, представленных в таблице 4.2, позволили установить, что все исследуемые факторы статистически значимо влияют на адгезионную прочность антифрикционного покрытия. Наибольшее влияние на этот параметр, определяющий работоспособность покрытия, оказывает время контакта полимера со смазочной средой и ее температура.

Таблица 4.2 Среднее снижение адгезионной прочности покрытий от исследуемых факторов

Снижение адгезионной прочности в масляных средах (%) в сравнении с воздушной средой при варьировании следующих параметров							
Материала субстрата		Смазочного материала		Температуры среды (°C)		Времени экспозиции (час)	
Сталь	Латунь	Гп22-С	МС-20	23	60	24	240
19,4	16,53	19,23	16,30	14,90	20,70	10,00	25,60
2,87		2,93		5,80		15,60	

Физическая природа влияния жидких сред на полимерные материалы (см. раздел 1.3) состоит из капиллярных, абсорбционных и диффузионных процессов, интенсивность которых в значительной степени зависит от величины поверхности, контактирующей со средой. Таким образом, для повышения работоспособности антифрикционных покрытий необходимо по возможности сократить величину контактной поверхности подшипника и время ее контакта с жидкой смазочной средой.

Одним из путей решения этого вопроса конструктивными методами является применение конических радиально-упорных подшипников скольжения с покрытием в паре с металлической также конической опорной шейкой вала. Угол конуса должен быть выбран таким, чтобы тангенс его образующей был больше коэффициентов трения фторопластсодержащего

композита по стальной шейке вала [78]. Подобная металлополимерная трибосистема (см. раздел 3.3) имеет угол, равный 10^0 .

Во внерабочее время коническое контртело плотно беззазорно сопряжено с подшипниковой втулкой и защищает основную рабочую поверхность покрытия от контакта со смазочной средой. В периоды пусков и выбегов пара работает беззазорно в режиме самосмазывания фторопластом или в режиме граничного трения, что также ограничивает доступ жидкого смазочного материала к рабочей поверхности подшипника.

Только в режиме жидкостного трения доступ смазочного материала не будет ограничен, но жидкая смазка будет способствовать охлаждению полимерного покрытия. Кроме того, в этом режиме объем рабочего фторопласта не участвует и будет сохраняться, увеличивая общий ресурс трибосистемы.

Для окончательного подтверждения сформулированных положений необходимы экспериментальные исследования триботехнических характеристик радиально-упорных подшипников скольжения с полимерными композиционными покрытиями, работающими в жидких смазочных средах.

4.2 Вязкоупругие свойства покрытий

Антифрикционные полимерные композиционные покрытия в настоящее время успешно эксплуатируются при относительно низких скоростях скольжения и высоких нагрузках в режиме самосмазывания. Существенно расширить для этих высокоэффективных материалов область применяемых скоростей скольжения можно, используя жидкостный режим смазывания.

При этом известно [22,57], что рассматриваемые покрытия подвержены деструкции в жидких средах, включая смазочные. Вместе с тем, проникновение жидких сред в толщу композита и их абсорбция может вызывать абсорбционное повышение жесткости покрытия, частично

компенсирующее рост деформации при деструктивных процессах. Это изменение свойств фторопластсодержащих композитов в водных средах экспериментально установлено [56,68,70]. Однако данные об аналогичном поведении антифрикционных фторопластсодержащих покрытий в жидких смазочных средах в литературе отсутствуют, но имеются сведения о привесе (набухании) этих материалов в различных маслах [54]. Изложенное, позволяет выдвинуть рабочую гипотезу об абсорбционном повышении жесткости рассматриваемых полимерных покрытий в жидких смазочных средах.

Таким образом, предполагаем, что изменение вязкоупругих свойств полимерных покрытий подчиняется двум процессам: деструктивному снижению жесткости и ее абсорбционному повышению.

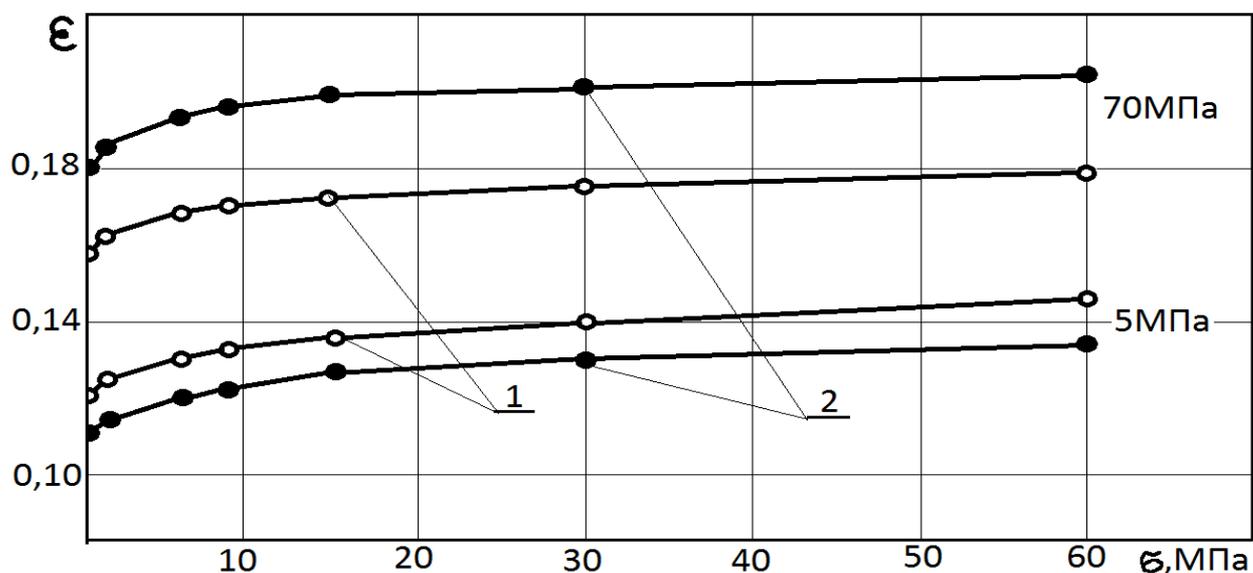


Рис. 4.5 Влияние жидкой смазочной среды и нагрузки на деформацию ползучести покрытия в среде: 1- масла, 2 – воздуха

На первом этапе были выполнены сравнительные экспериментальные исследования деформации ползучести полимерных покрытий на основе ткани атласного плетения в воздушной и жидкой смазочной среде (Тп22-С по ТУ101821-2001) с вязкостью при 20°C равной 100 сСт. Время экспозиции в

масле составляло 24 часа, а исследования ползучести - 60 минут. Все эксперименты по ползучести проводились непосредственно в масляной ванне. Результаты приведены на рис. 4.5.

Анализ графиков наглядно показывает, что при относительно низких нагрузках (5МПа) ведущим процессом является абсорбционное повышение жесткости, ведущее к уменьшению величины деформации ползучести. Высокие нагрузки (70МПа) отжимают жидкую фазу из тела композита и определяющими становятся деструктивные процессы.

В качестве вязкоупругой модели полимерного композита выбрано уравнение «типичного твердого тела» [60,83]

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \left(\frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma}{E_0}\right)\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (4.6)$$

где

E_0 и E – мгновенный и равновесный модули, МПа;

τ – постоянная времени ползучести, мин:

t – время, мин;

σ – контактные нормальные напряжения, МПа.

Параметры моделей ползучести приведены в таблице 4.3. Они определены по экспериментальным данным методом наименьших квадратов.

Таблица 4.3 Параметры моделей ползучести

Напряжения, σ , МПа	5	70	5	70
Мгновнный модуль, E_0 , МПа	43,4	374,5	39,3	420,1
Равновесный модуль E , МПа	38,8	344,8	35,7	394,6
Постоянная времени, τ , мин	10,1	6,8	12,5	8,1
Наибольшая деформация, δ , мм	0,061	0,112	0,073	0,094
Среда	Масло Тп22-С		Воздух	

Оценку жесткости покрытий осуществляли по экспериментальной величине мгновенного модуля. Для этого были выполнены дополнительные исследования ползучести при 30 и 57 МПа. Обработав результаты, получили модели, связывающие мгновенный модуль с величиной контактных напряжений в виде следующих выражений:

$$\text{для масляной среды} \quad E_0 = 12,329\sigma^{0,795}, \quad (4.7)$$

$$\text{и воздушной} \quad E_0 = 9,2\sigma^{0,911}. \quad (4.8)$$

Погрешность моделей не превышает 6,5%. Решая уравнения (4.7) и (4.8) совместно, найдем точку пересечения описываемых ими кривых, равную контактному напряжению 12,47МПа. Графическое представление моделей выполнено на рис. 4.6.

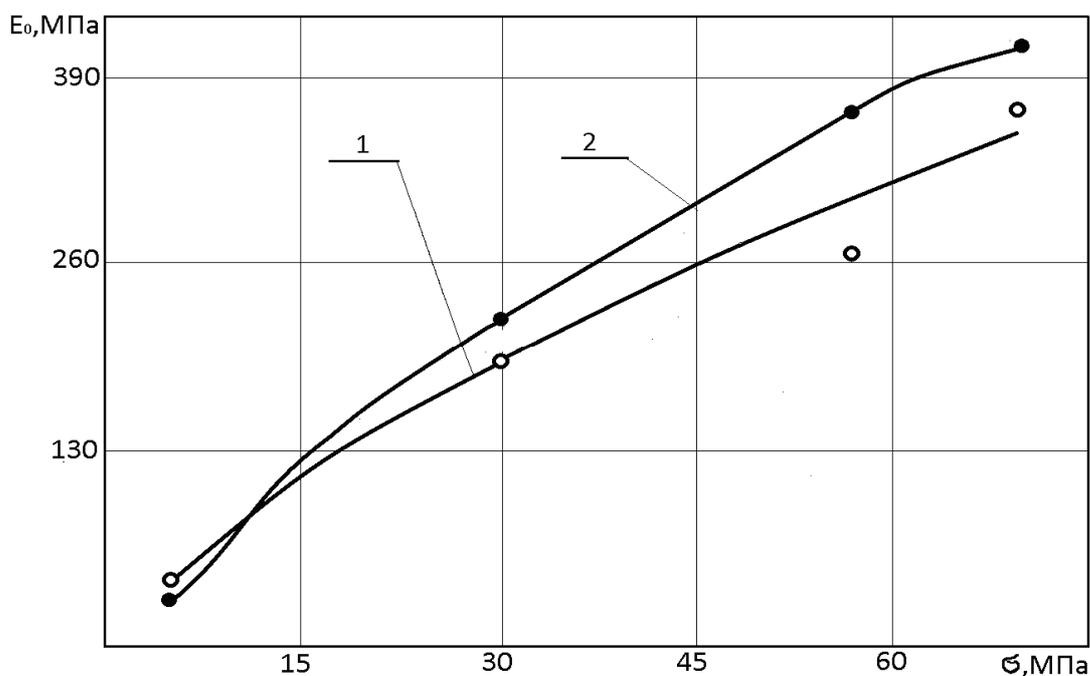


Рис. 4.6 Зависимость мгновенного модуля от контактных напряжений в смазочной (1) и воздушной (2) средах

Анализ графиков показывает, что при низких нагрузках (менее 12,5МПа) величина мгновенного модуля покрытия в исследованной области в результате абсорбционного повышения жесткости растет до 10,4%, а при высоких нагрузках (более 12,5МПа) - падает до 10,8%. Следовательно, при эксплуатации покрытий в режиме жидкостного смазывания и нагрузках более

12,5МПа при расчетах необходимо учитывать деструкцию полимерных покрытий в жидких смазочных материалах.

Таким образом, экспериментально подтверждена непротиворечивость выдвинутой рабочей гипотезы об абсорбционном повышении жесткости фторопластсодержащих антифрикционных покрытий в жидких смазочных средах.

Дальнейшие экспериментальные исследования проводились для оценки степени влияния на деформационную вязкоупругую составляющую зазора трибосопряжения, вязкости минеральных масел и типа армирующей компоненты антифрикционного композиционного покрытия. Результаты экспериментального определения параметров вязкоупругой модели «типичного твердого тела» представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 Параметры моделей ползучести и вязкоупругая составляющая зазора трибосопряжения

Каркас композита	Среда	Экспозиция, час	Нагрузка МПа	Параметры модели ползучести			Максим. деформация, ϵ	Составляющая зазора, δ мм
				E_0 , МПа	E_∞ , МПа	τ , мин		
Двух-уточный шестиремизный полторослойный атлас	Турбинное масло Тп22-С	24	5	43,40	38,77	10,10	0,131	0,069
			70	374,48	344,81	6,84	0,218	0,116
		240	5	48,01	44,27	6,11	0,114	0,057
			70	282,47	251,31	5,57	0,280	0,140
	Авиационное масло МС-20	24	5	52,87	48,09	9,40	0,098	0,069
			70	366,00	329,91	10,10	0,187	0,124
		240	5	57,89	52,58	9,60	0,095	0,062
			70	219,24	210,22	7,16	0,219	0,177
	Воздух	—	5	39,30	35,70	12,5	0,139	0,074
			70	420,10	394,6	8,10	0,178	0,111
Двух-уточная полторослойная саржа 1/3	Турбинное масло Тп22-С	24	5	39,51	37,06	6,30	0,135	0,065
			70	312,44	291,14	6,60	0,241	0,113
		240	5	64,65	60,48	9,10	0,083	0,040
			70	289,5	270,0	10,5	0,259	0,128
	Авиационное масло МС-20	24	5	38,17	35,83	11,40	0,151	0,068
			70	275,60	259,80	17,83	0,269	0,121
		240	5	51,57	47,11	8,36	0,106	0,052
			70	220,74	214,65	14,74	0,286	0,155
	Воздух	—	5	31,90	30,10	9,10	0,167	0,083
			70	386,40	369,10	8,90	0,190	0,093

Анализ табличных данных позволяет, используя в качестве критерия разность величин полной деформации покрытия в воздушной и смазочной средах, сделать ряд выводов.

Время экспозиции при малых нагрузках (5МПа) независимо от типа покрытия (саржевый или атласный каркас) и марки минерального жидкого смазочного материала (Тп22-С и Мс-20), имеющего разную вязкость, приводит к уменьшению величины вязкоупругой деформации полимерного антифрикционного покрытия. Причем, чем длительнее экспозиция, тем деформация меньше. Установленное абсорбционное повышение жесткости покрытия объясняется заполнением пор и несплошностей композита жидким материалом.

Следует отметить, что последовательно проникая в толщу композита, жидкая среда заполняет тем больше микропор покрытия, чем они ближе к разделяющей фазы поверхности. Таким образом, мы имеем в сечении покрытия как бы слоистую структуру с различным наполнением пор и соответственно с различными свойствами. Найденные экспериментально характеристики ползучести соответствуют усредненным величинам.

Параллельно абсорбционному повышению жесткости протекает противоположный деструктивный процесс, снижающий жесткость и увеличивающий деформацию покрытия. При более высоких нагрузках этот процесс превалирует, поскольку, интенсивное нагружение отжимает композит, удаляя из его толщи жидкость, а рост внутренних напряжений вокруг сохранившихся жидких включений - концентраторов способствует деструктивным процессам [22].

Используя основную идею метода «случайного баланса», объединим экспериментальные результаты в одну общую выборку по каждому отдельному параметру и установим основные усредненные количественные характеристики рассматриваемых процессов. Сравним подобные объединенные выборки композитов с различным армирующим каркасом:

саржевым и атласным. При нагрузке 5МПа средняя величина деформации покрытия из первой выборки в смазочной среде по сравнению с воздушной снизилась на 30,1% больше, чем во второй. При нагрузке 70МПа та же выборка с саржевым каркасом показала увеличение деформации на 37,8% больше, чем выборка с атласным каркасом. То есть покрытие с саржевым каркасом в среднем примерно на 30% чувствительнее к влиянию жидкого смазочного материала. Это обстоятельство может быть объяснено тем, что на рабочую поверхность композита с каркасом саржевого плетения выведена сетка полиамидных нитей «Аримид Т», которые сами могут абсорбировать жидкости до 1,5% [90].

Сравнивая усредненные выборки по типу смазочного материала, установили, что турбинное масло Тп22-С при 5МПа снижает деформацию покрытий на 24%, а при 70МПа увеличивает ее на 11,1% интенсивнее, чем авиационное масло МС-20. Это связано с гораздо меньшей вязкостью турбинного масла и, следовательно, более быстрой и легкой его абсорбцией.

Сравнивая по аналогичной методике влияние на свойства покрытий нагрузки, устанавливаем, что абсорбционное повышение жесткости при 5МПа составляет в среднем 25,4%, в то время как деструктивное снижение жесткости при 70МПа после значительного отжатия свободной жидкости достигает 33,1%.

Однако следует отметить, что снижение жесткости, несколько увеличивая зазор трибосопряжения, не влияет на объем фторопласта в композите и на его антифрикционные свойства, то есть общий ресурс покрытия в режиме самосмазывания не должен существенно сократиться. Отмеченное же общее снижение ресурса, по нашему мнению, определяется в основном деструктивными процессами в фенолформальдегидно-каучуковой матрице композита, отвечающей за его целостность, перераспределение усилий и капсулирование фторопластовых волокон.

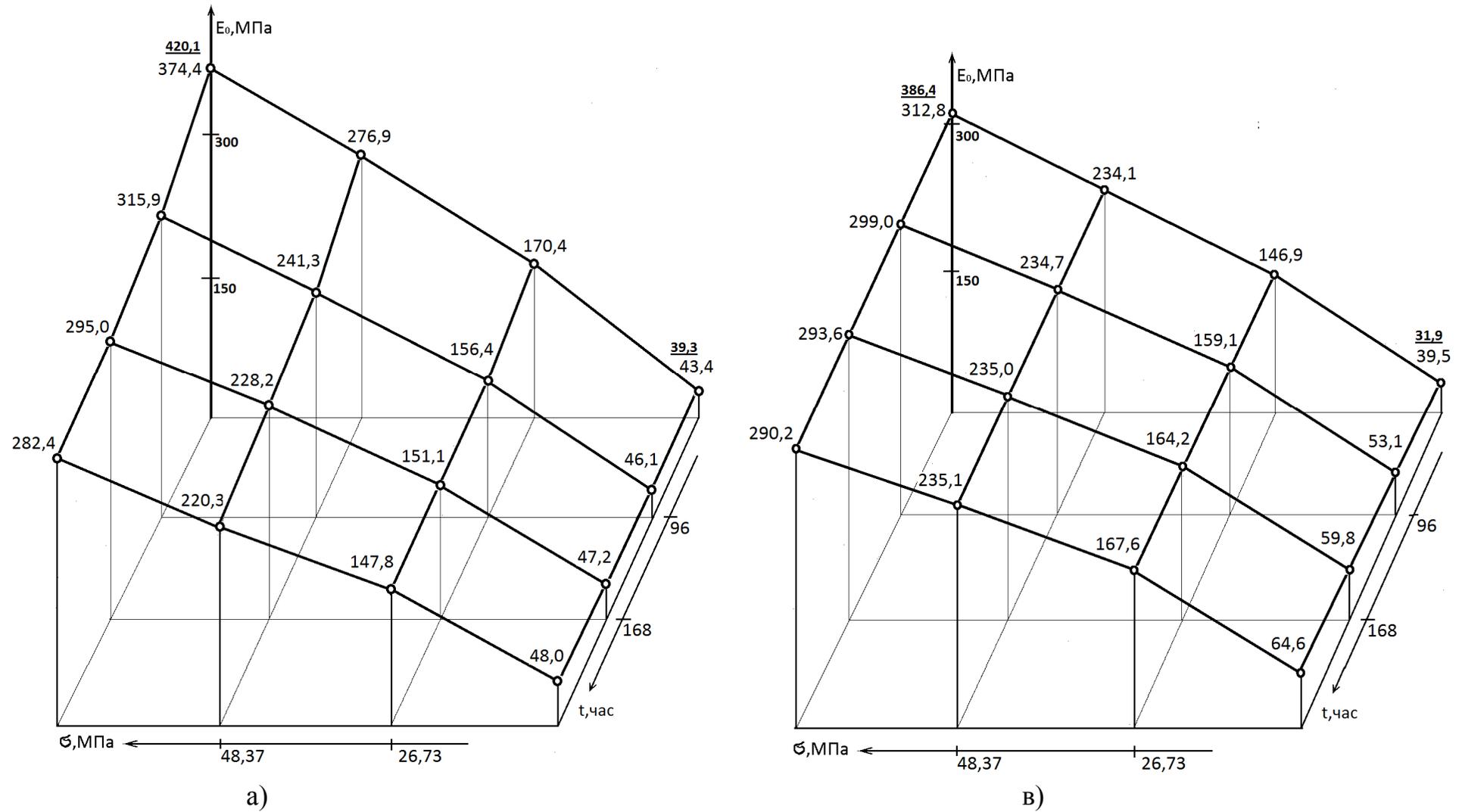


Рис. 4.7 Влияние нагрузки и времени экспозиции в среде турбинного масла марки Тп22-С на жесткость антифрикционных полимерных покрытий с каркасом на основе ткани атласного а) и саржевого в) плетения

Используя экспериментальные данные таблицы 4.4, получены интерполяционные регрессионные модели зависимости жесткости исследованных покрытий от нагрузки и времени экспозиции в жидких смазочных средах. Применяя логарифмирование выхода, получим модели мультипликативного вида однотипной структуры

$$E_0 = a t^b \sigma^{c-d \lg t}, \quad (4.9)$$

где

E_0 - мгновенный модуль, МПа;

t - время экспозиции, час.

Параметры моделей приведены в таблице 4.5. Все модели адекватны. Пример графической интерпретации моделей покрытий с разным каркасом приведен на рис.4.7.

Имеющиеся в крайних точках графиков подчеркнутые цифры соответствуют величинам мгновенного модуля, полученным при тех же нагрузках в воздушной среде.

Таблица 4.5 Параметры моделей жесткости покрытий
(мгновенного модуля E_0)

Каркас покрытия	Среда	Параметры моделей жесткости				Погрешность, %	
		a	b	c	d	Максим.	Средняя
1	2	3	4	5	6	7	8
Атлас	Тп22-С	7,349	0,145	1,0169	0,145	5	±1,5
	МС-20	8,628	0,199	1,0486	0,229		
	Общая	7,988	0,172	1,0327	0,187	13,5	±8,3
Саржа1/3	Тп22-С	3,515	0,364	1,0810	0,215	5	±1,5
	МС-20	4,863	0,269	1,0225	0,198		
	Общая	4,189	0,317	1,0518	0,207	16,1	±8,4

Анализ величин параметров моделей позволил установить следующее:

- наибольшее влияние на мгновенный модуль покрытия оказывают контактные напряжения;

- имеющиеся смешанные взаимодействия напряжений и времени экспозиции влияют на мгновенный модуль в исследованном диапазоне сильнее фактора времени.

Используя близость величин параметров моделей E_0 для различных типов смазочных материалов и одного вида композита (например, строки 1 и 2 табл.4.5), были получены обобщенные модели покрытий. Эти модели имеют большую погрешность, но обладают определенной универсальностью, что делает их удобными для приближенных оценочных расчетов. Обобщенная модель для покрытия с каркасом из ткани атласного плетения представлена графиком на рис. 4.8. Здесь же для сравнения приведены величины мгновенного модуля, полученные в воздушной среде при тех же значениях нагрузки.

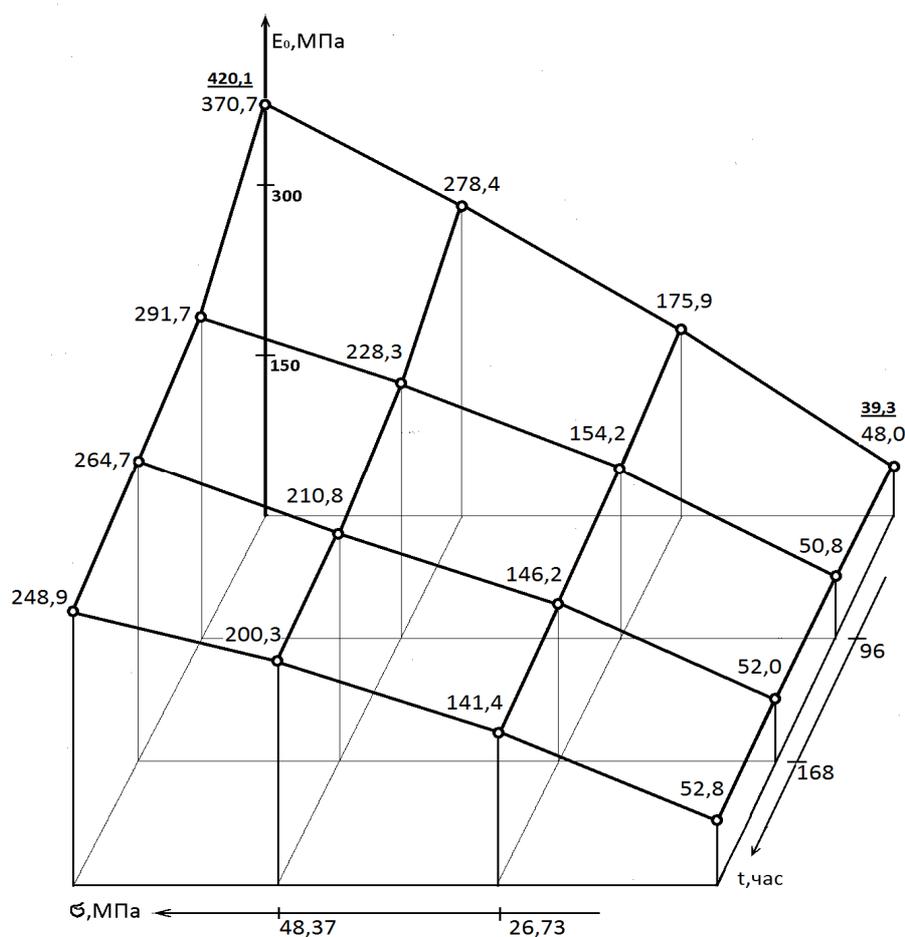


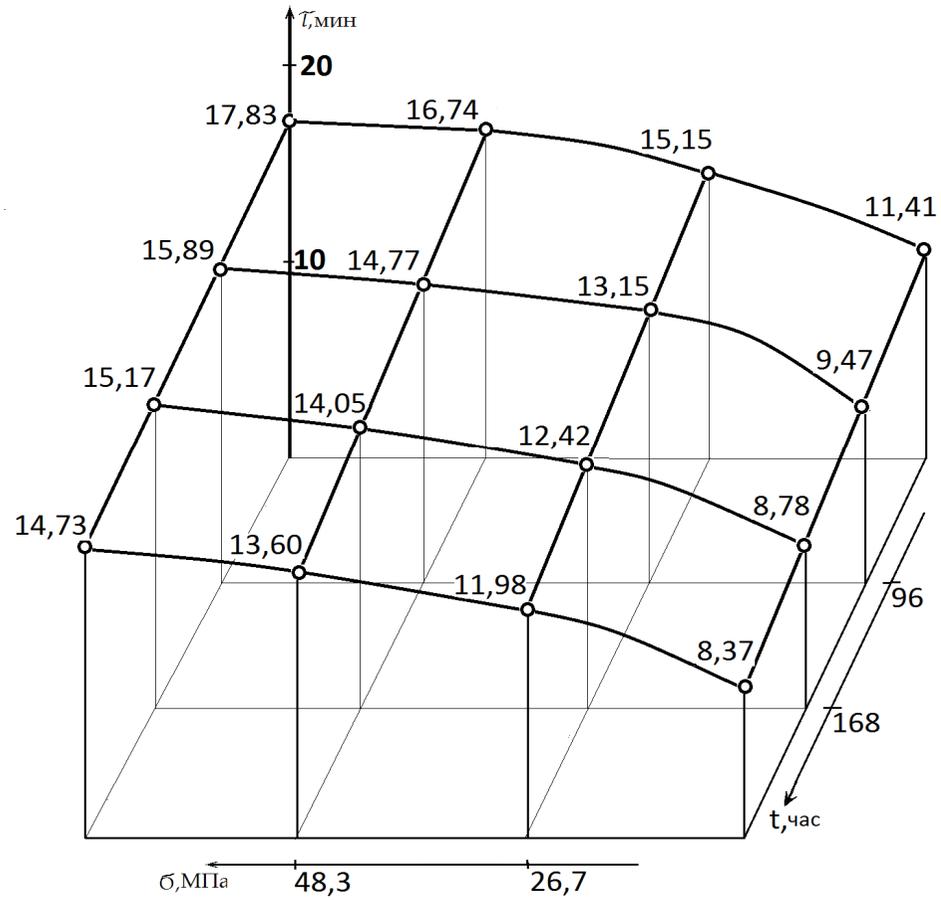
Рис. 4.8. Обобщенная модель изменения жесткости покрытий на основе каркаса из ткани атласного плетения в среде минеральных масел

Следует отметить, что все адсорбционно-абсорбционные эффекты в рассматриваемом композите существенно зависят от площади контакта с жидкой фазой – смазочной средой, поэтому конструктивный путь снижения влияния жидкой фазы представляется весьма перспективным. Применение радиально-упорных подшипников, гарантирует покрытия от проникновения среды во время пусков, выбегов, срывов гидродинамического клина и в нерабочие периоды, когда трибосистема безззорна.

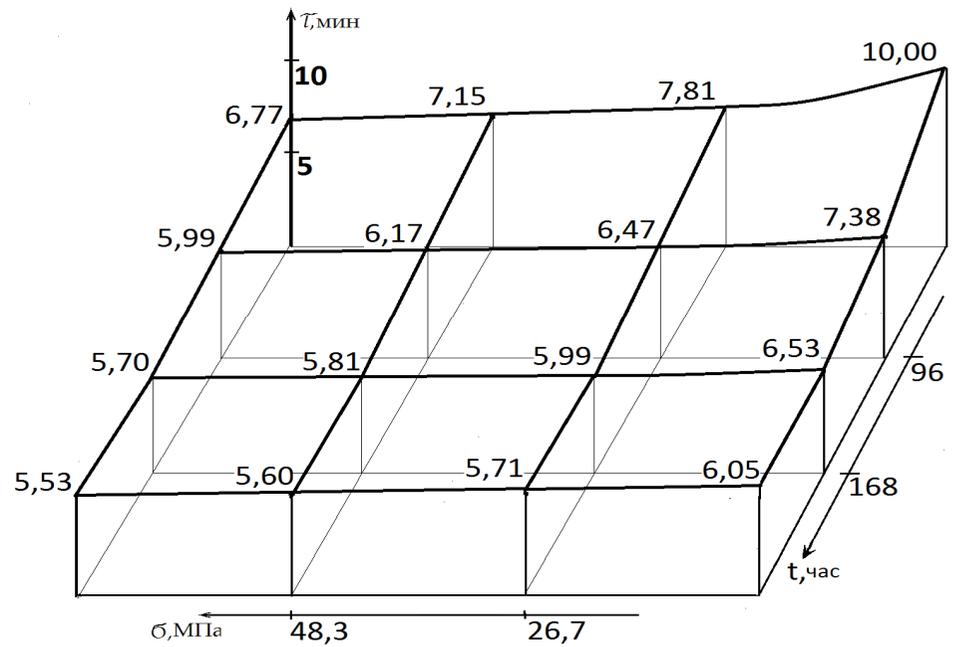
Интересно сравнить постоянную времени ползучести для композитов с разными армирующими каркасами (см. Рис. 4.9). Этот параметр отвечает за крутизну кривой ползучести и время наступления стационарного процесса. Рост величины параметра τ замедляет протекание процесса ползучести.

Полуторослойная саржа 1/3 имеет на рабочей поверхности сетку 6×6 мм из полиимидных нитей, которые имеют хорошую адгезию к матричному связующему, но одновременно набухают в жидких средах. Следовательно, деструктивным процессам, в этом случае, подвергается и матрица и каркас композита, что проявляется в значительном размахе изменений параметра τ . Это имеет место, несмотря на менее пористую и более плотную матрицу в связи с хорошей адгезией полиамидных волокон к матричному связующему. С ростом нагрузки процесс ползучести композита с саржевым каркасом замедляется. Это может быть объяснено невозможностью быстрого «отжима» жидкой среды из полиамидных волокон. Средняя величина постоянной времени ползучести у композита с саржевым каркасом примерно в два раза превышает этот параметр у композитов с атласным каркасом.

Композит с каркасом из ткани атласного плетения имеет поверхность из инертного фторопласта и постоянная времени ползучести изменяется в гораздо меньшей степени. Кроме того, легкий «отжим» жидкой смазочной среды из капиллярных полостей, образованных фторопластовыми нитями приводит к уменьшению постоянной времени с ростом нагрузки.



в)



а)

Рис. 4.9. Постоянная времени ползучести композита с армирующим каркасом: а) из саржи 1/3 и в) атласа

Общей реакцией двух рассматриваемых композиционных материалов является наибольшая величина градиента изменения параметра τ в диапазоне начального влияния переменных факторов (времени экспозиции и сжимающей нагрузки), а также уменьшение τ с ростом времени экспозиции в смазочной среде.

Анализ материалов данного раздела позволяет сделать заключение о том, что абсорбционное повышение жесткости играет в контактных процессах компенсирующую положительную роль только при весьма низких рабочих нагрузках, не превышающих 10–12 МПа. Напротив, деструктивные процессы в фенольной матрице и полиимидных волокнах со временем накапливаются и при увеличении напряжений могут приводить к снижению ресурса.

4.3 Антифрикционные свойства покрытий

Окончательную достоверную информацию о работоспособности и рациональных режимах применения полимерных композиционных покрытий в исследуемых условиях могут дать только экспериментальные триботехнические исследования рассматриваемых металлополимерных трибосистем. Причем, выполненные в том же диапазоне контактных нагрузок. Эти исследования проводились в соответствии с экспериментальными планами типа ПФЭ 2^2 непосредственно в масляной ванне объемом около 50 см³.

В подобных условиях на полимерное покрытие кроме жидкой смазочной среды действовала еще и температура, генерируемая в процессе трения. Следует отметить, что температурный режим при трении в среде турбинного Тп22-С и авиационного МС-20 масел, несмотря на существенную разницу в их вязкости, различался всего на 1-3⁰С. Тоже можно отметить и о

типе армирующего каркаса композита. Это позволило получить общую температурную модель трибосреды в следующем виде:

$$T = 61,486 \sigma^{0.228} V^{0.377}, \quad (4.10)$$

где

σ — контактные напряжения, МПа;

V — скорость скольжения, м/с.

Модель адекватна и позволяет вести интерполяционные расчеты с погрешностью не превышающей 3%. Характерно отсутствие в структуре модели смешанных взаимодействий (коэффициент статистически незначим).

Графическое представление модели выполнено на рис. 4.10.

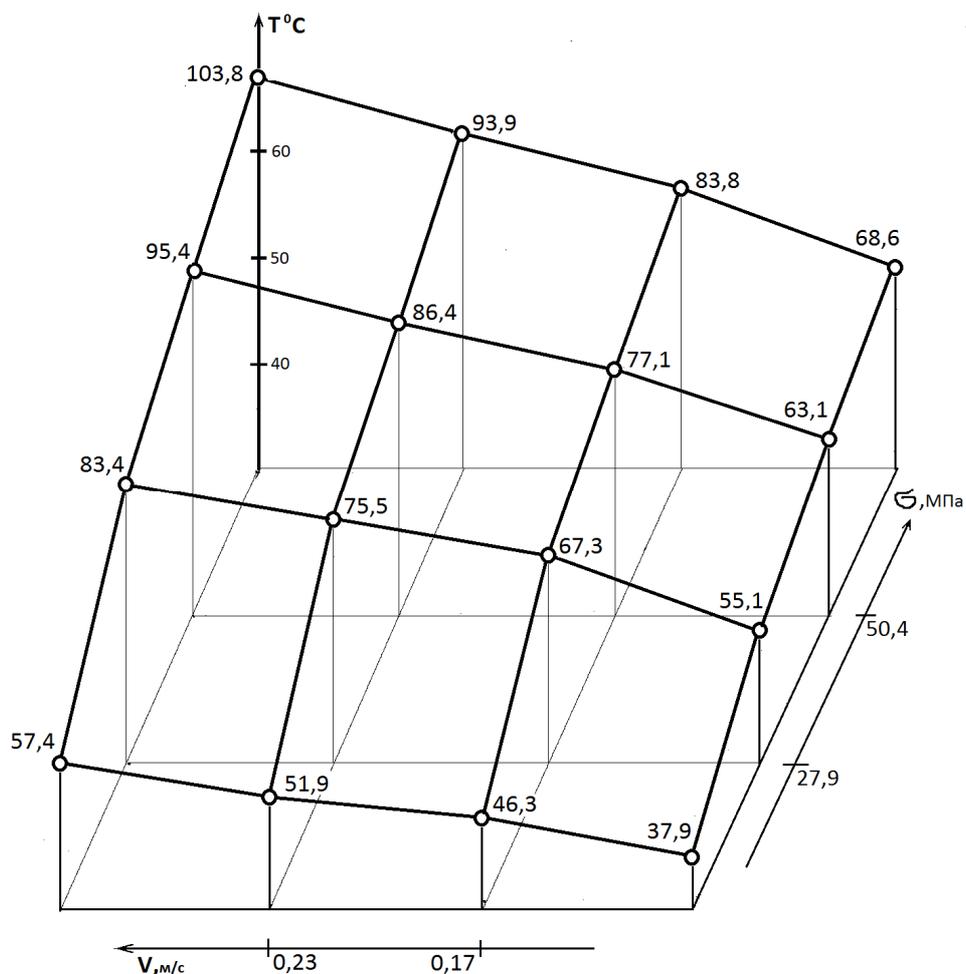


Рис. 4.10 Зависимость температуры зоны трения от нагрузочно-скоростных режимов

Во всем нагрузочно-скоростном диапазоне, имевшим место при исследованиях, наблюдался граничный тип смазывания с коэффициентом трения характерным для полимерных композиционных покрытий рассматриваемого класса с учетом температурных условий [61,77]. Вклад жидкостного трения, иногда возникавшего на краткие периоды, судя по результатам, был незначительным.

Одной из основных характеристик работы трибосистем является коэффициент трения. Его зависимость от режимов нагружения, особенно в условиях нивелирования температуры жидкой средой, достаточно сложная. Напряжения понижают коэффициент трения: во-первых в связи с отжатию абсорбированного масла, а во-вторых из-за увеличения контактной поверхности относительно низко модульным покрытием.

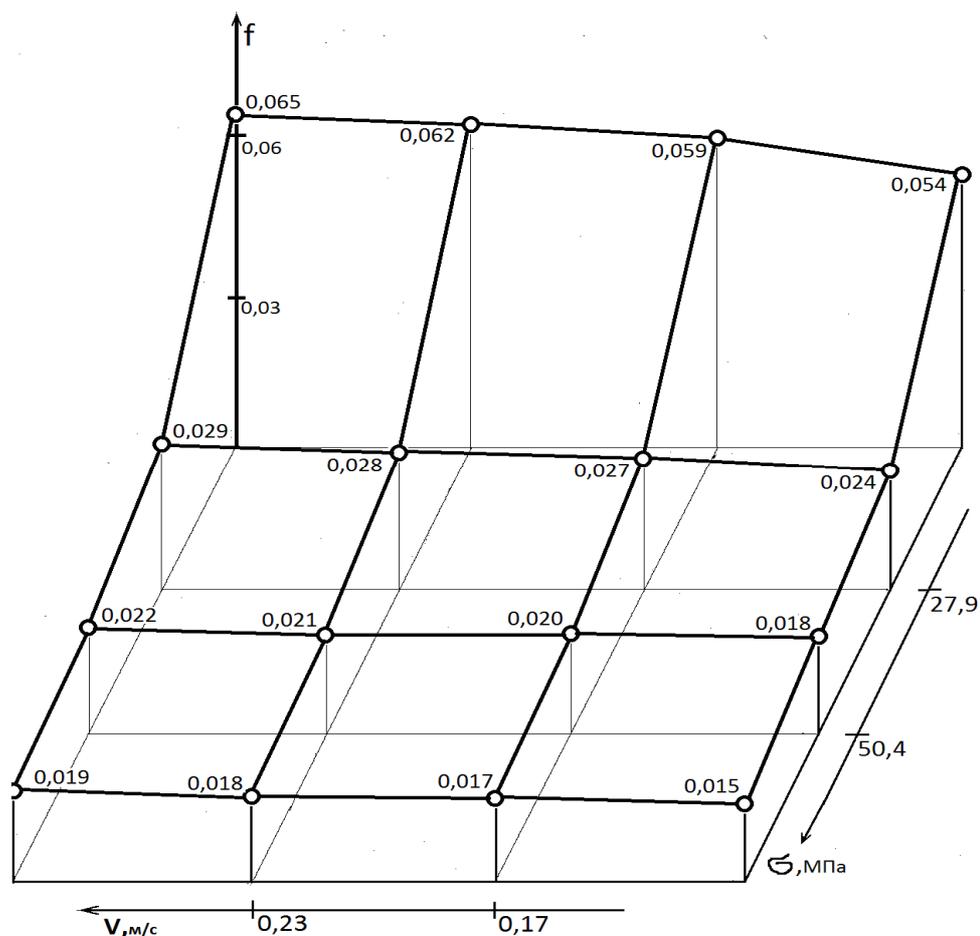


Рис. 4.11. Влияние нагрузочно-скоростных режимов на коэффициент трения трибосистемы в среде минерального масла

Свой вклад делает и повышение температуры, хотя скорость скольжения влияет на нее в наименьшей степени.

Вклад спонтанно возникающих коротких периодов гидродинамики увеличивает размах значений коэффициента трения до 32%. Используя принцип верхней оценки для построения модели, (рис. 4.11) были усреднены коэффициенты трения, полученные только в условиях граничного трения и режима самосмазывания фторопластом покрытия. Полученная модель имеет следующий вид:

$$f = 0,182 \sigma^{-0,483} V^{0,177}. \quad (4.11)$$

Модель адекватна и обеспечивает погрешность не более 3%.

Относительно высокий коэффициент трения при низких контактных нагрузках (5,4МПа) характеризуется малой контактной поверхностью и граничным смазыванием покрытия, постепенно отжимаемым маслом. С ростом нагрузки увеличивается контактная поверхность, отжимается и вытесняется с гидрофобных фторопластовых волокон покрытия слой минерального масла и наступает режим самосмазывания. Об этом свидетельствуют величины коэффициентов трения для последующих условий эксперимента ($\approx 0,029 - 0,015$).

Стандартным параметром, характеризующим износостойкость трибосопряжения является интенсивность изнашивания (графики на рис. 4.12). Качественный характер зависимости этого параметра для двух использованных минеральных масел идентичен и растет с увеличением нагрузочно-скоростных режимов. Однако при практически одинаковой наименьшей интенсивности изнашивания (Тп22-С – 0,60 и МС-20 – 0,57) наибольшая величина этого параметра для более вязкого авиационного масла выше более чем в 4 раза. Это связано, по-видимому, с медленным проникновением более вязкого масла в толщу композита и соответствующим медленным и неполным его отжатием.

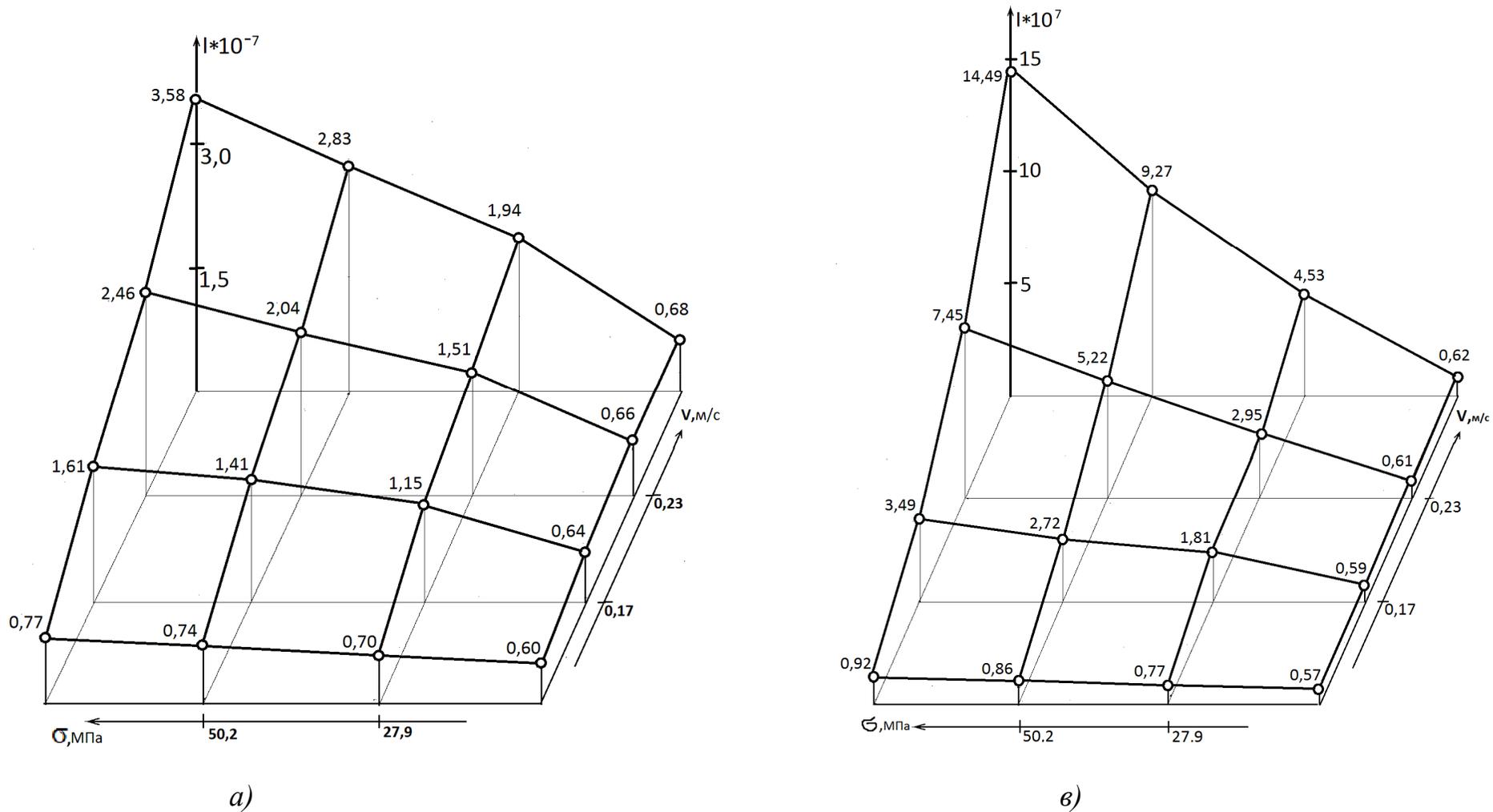


Рис.4.12 Влияние нагрузочно-скоростных режимов на интенсивность изнашивания покрытия на основе ткани атласного плетения в среде минеральных масел марок: а) Тп22-С и б) МС-20

Наличие масляных микрообъемов внутри полимерного композита ведет к резкому росту локальных напряжений, разрушающих его матрицу [22]. Кроме того, наряду с деструктивными процессами, снижающими износостойкость покрытий, в процессе испытаний отмечалось кратковременное спонтанное возникновение гидродинамического режима смазывания, что снижает износ покрытия.

Модели, связывающие интенсивность изнашивания полимерного покрытия с каркасом на основе ткани атласного переплетения с режимами нагружения имеют следующий вид:

для турбинного масла Тп22-С

$$I = 9,364 \cdot 10^{-2} \sigma^{1,244} V^{0,501 \ln \sigma - 0,774}, \quad (4.12)$$

для авиационного масла МС-20

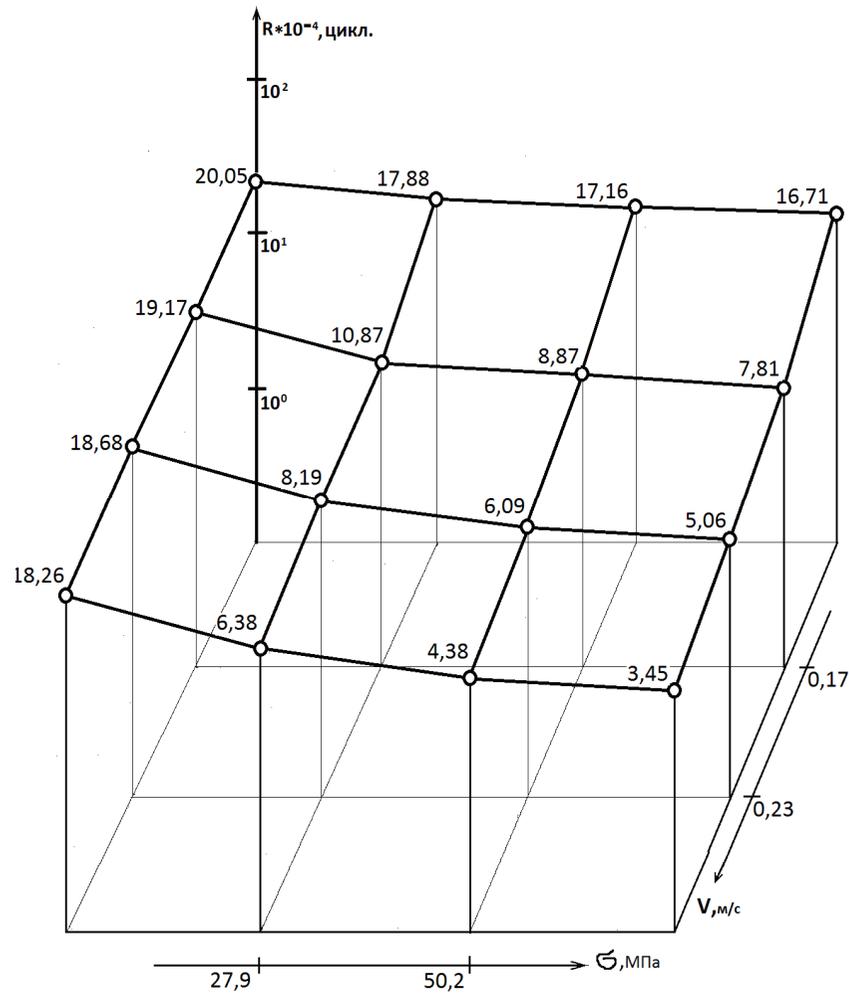
$$I = 1,324 \cdot 10^{-2} \sigma^{2,336} V^{0,933 \ln \sigma - 1,496}. \quad (4.13)$$

Обе модели адекватны, обеспечивают выполнение расчетов с погрешностью не более 3%.

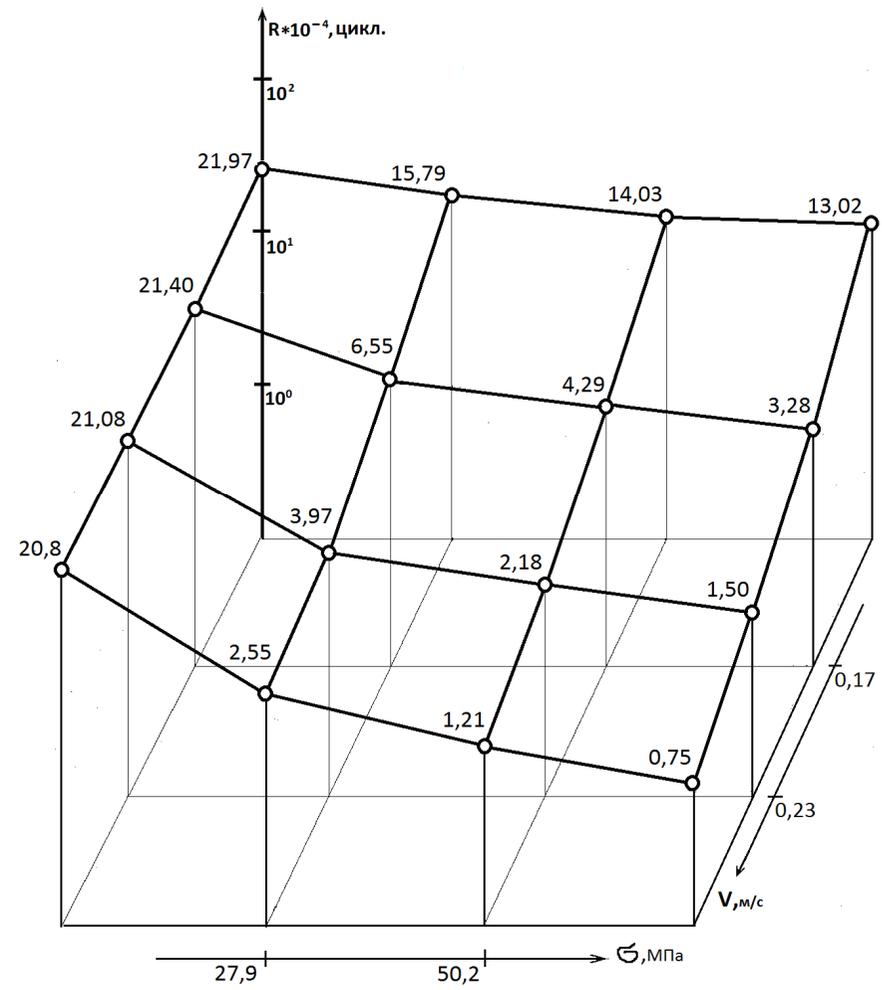
Более интенсивное изнашивание при наибольшем нагружении характерно для масла МС-20. В области относительно низких нагрузок различие в износостойкости отмечается в пределах ошибки эксперимента.

Основным показателем эффективности выполнения трибосистемой своих функций является ее ресурс, определяемый в заключительном блоке исследований. Ресурс исследуемых металлополимерных трибосистем оценивали в собственном времени системы – циклах нагружения.

Структура моделей и вид соответствующих графиков полностью аналогичны. Однако количественное различие для двух применяемых минеральных масел весьма существенно.



а)



в)

Рис. 4.13 Ресурс металлополимерных трибосистем с полимерным композиционным покрытием в жидкой смазочной среде: а) – турбинном масле марки Тп22-С, в) – авиационном масле марки МС-20

Величина ресурса покрытия растет со снижением нагрузочно-скоростных режимов. Так, для нагрузки 5,4МПа больший ресурс в среде вязкого авиационного масла в 1,10; 1,12; 1,13 и 1,14 раза (в соответствии с градациями скорости на рис.4.13) превышает ресурс в маловязком турбинном. А при нагрузке 72,8МПа наоборот - ресурс в среде турбинного масла превосходит МС-20 в том же порядке в 1,28; 2,38; 3,37 и 4,60 раза. Это свидетельствует о существенности влияния на ресурс металлополимерного трибосопряжения правильного выбора жидкого смазочного материала. Следует предпочитать менее вязкие масла, более легко отжимаемые из полимерного композита. Модели ресурса металлополимерных трибосистем при работе в жидких смазочных средах имеют следующий вид:

для турбинного масла марки Тп22-С

$$R_T = 139,15 \sigma^{-1,265} V^{0,79 - 1,195 \lg \sigma}, \quad (4.14)$$

для авиационного масла марки МС-20

$$R_a = 1233,16 \sigma^{-2,456} V^{1,6 - 2,255 \lg \sigma}. \quad (4.15)$$

Модели адекватны, их погрешность не превышает 2%. Значимость смешанных взаимодействий свидетельствует о температурном влиянии; величина показателя степени у напряжений – об абсорбционном упрочнении при малых нагрузках. В связи со значительным диапазоном изменений ресурса (три порядка) используются полулогарифмические координаты.

Анализ результатов выполненного экспериментального блока позволяет сделать ряд выводов, характеризующих в основном граничное трение исследуемой металлополимерной трибосистемы в режиме самосмазывания.

- Наибольшее влияние на снижение интенсивности изнашивания и ресурс в жидких смазочных средах в исследованном диапазоне факторов оказывают контактные напряжения (на 20,1% больше скорости скольжения).

- В этой же области исследований большее влияние на снижение

износостойкости и ресурса оказывает более вязкое масло МС-20 (на 46,6% большее, чем Тп22-С).

- Абсорбционное повышение жесткости полимерных покрытий имеет место только в ограниченной области контактных напряжений ($< |10...12|$ МПа).
- Трение в безззорном радиально-упорном подшипнике в исследованной области нагружения протекает в основном в режиме самосмазывания и граничного трения с очень небольшими спонтанно возникающими промежутками жидкостного трения.

Описанные экспериментальные исследования металлополимерных пар трения проводились с подшипниковыми втулками с композиционным полимерным покрытием, выполненным на основе каркаса из ткани атласного плетения, имеющего 100% фторопластовых нитей на рабочей поверхности, и контртелами из стали 45. Представляет интерес опробовать те же эксплуатационные условия на антифрикционном покрытии с каркасом из ткани саржевого плетения с выводом на рабочую поверхность прочных полиамидных нитей. Кроме того, целый ряд металлополимерных пар трения имеют контртела из других машиностроительных материалов: подшипниковой и нержавеющей сталей, легкого и прочного титанового сплава.

Влияние на триботехнические характеристики материала контртел и композиционных антифрикционных покрытий исследовалось при средних режимах: контактных напряжениях равных 24.2 МПа и скорости скольжения равной 0,2 м/с. Полученные результаты представлены в виде столбчатых диаграмм на рис. 4.14.

На рис. 4.14,а сравниваются величины ресурса трибосистем с композиционным покрытием на основе ткани атласного плетения в среде авиационного масла МС-20 и контртелами из различных материалов. Наибольший ресурс обеспечивается в паре покрытие – нержавеющая кислотоупорная сталь.

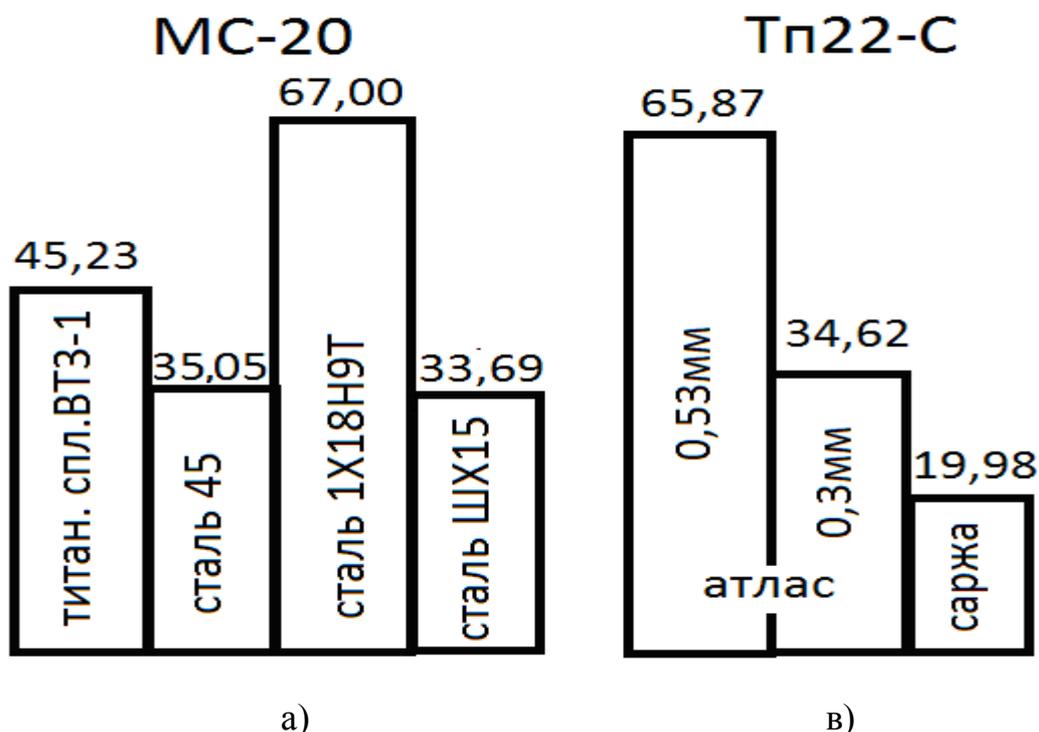


Рис. 4.14 Ресурс (10^4 цикл) металлополимерных трибосистем с контртелами из разных материалов а) и с разными антифрикционными покрытиями в)

На рис. 4.14,в приведены данные ресурса пар трения с контртелом из стали 45 и антифрикционным композиционным покрытием, выполненным на основе разных тканых полуторослойных каркасов в масле Тп22-С: атласов, толщиной 0,534, и 0,229мм и саржи, толщиной 0,455мм.

Оба типа масел обеспечивают одиннадцатый класс износостойкости, при ее варьировании в пределах $(2,91-5,56) \times 10^7$. Высокий ресурс пары с контртелом из нержавеющей кислотоупорной стали 1X18H9T очевидно связан с инертностью ее поверхности и низкой теплопроводностью.

Разная толщина покрытий (атлас на рис. 4.14,в), несмотря на одинаковое плетение ткани, привела к различному объему фторопласта в композите в связи с использованием для тонкой ткани более тонких нитей. Такая ткань хуже демпфирует и имеет, пропорционально количеству фторопласта, меньший ресурс в режиме самосмазывания. Однако, эта ткань незаменима для малогабаритных трибосистем и применяется в малогабаритных шарнирных подшипниках.

Таблица 4.6 Триботехнические параметры металлополимерных пар трения с композиционным покрытием в среде жидких смазочных материалов ($\sigma = 24,2$ МПа; $V = 0,2$ м/с)

Пара трения		Жидкий смазочный материал	Приработка		Стационарный период					
Каркас покрытия	Материал контртела		Время t, мин	Износ h, мм	Коэффициент трения, f	Температура T, °C	Скорость изнашивания. $V_n \times 10^{-3}$ мм/мин	Интенсивность изнашивания $I \times 10^{-7}$	Ресурс R $\times 10^{-4}$ цикл	Износостойкость
Ткань «Атлас», толщиной $\delta=0,534$ мм	Тит.спл. ВТЗ-1	Авиационное масло МС-20	10	0,030	0,039	71	0,29	0,27	45,23	$3,76 \times 10^7$
	Сталь ШХ15		15	0,017	0,044	78	0,40	0,35	33,69	$2,80 \times 10^7$
	Сталь 1Х18Н9Т		15	0,017	0,044	89	0,20	0,18	67,00	$5,56 \times 10^7$
	Сталь 45		15	0,026	0,046	66	0,38	0,34	35,05	$2,91 \times 10^7$
	$\delta=0,229$ мм	Турбинное масло Тп - С	15	0,026	0,058	90	0,20	0,18	65,87	$5,47 \times 10^7$
	Ткань «Саржа» $\delta=0,455$ мм		15	0,026	0,037	57	0,20	0,19	34,62	$5,27 \times 10^7$
			15	0,017	0,057	71	0,58	0,52	19,98	$1,94 \times 10^7$

Иная структура саржевой ткани с полиимидными нитями на рабочей поверхности в условиях эксперимента (режим самосмазывания) обеспечивала трибосистемы гораздо меньший ресурс. Это может быть объяснено чувствительностью полиимидных нитей к жидкому смазочному материалу.

Весь комплекс триботехнических параметров для трибосистем, сравниваемых на рис. 4.14 сведен в таблицу 4.6

Приведенные в таблице 4.6 величины коэффициента трения свидетельствуют о работе исследованных трибосистем в режиме граничной смазки используемыми маслами или адгезионным переносом фторопласта при самосмазывании [77].

Выше было сказано, что в процессе трибоиспытаний периодически возникал кратковременный гидродинамический режим трения. В связи с тем, что исследуемый радиально-упорный подшипник представлял собой конус, беззазорно входящий в коническую (10^0) втулку, для обеспечения гидродинамического режима было, необходимо создать радиальный зазор. Когда этот зазор возникал случайно, в случае осевого перемещения вала благодаря вибрациям или в результате специального его смещения оператором, возникал устойчивый гидродинамический режим. Однако при последующих остановках и пусках гидродинамика отсутствовала.

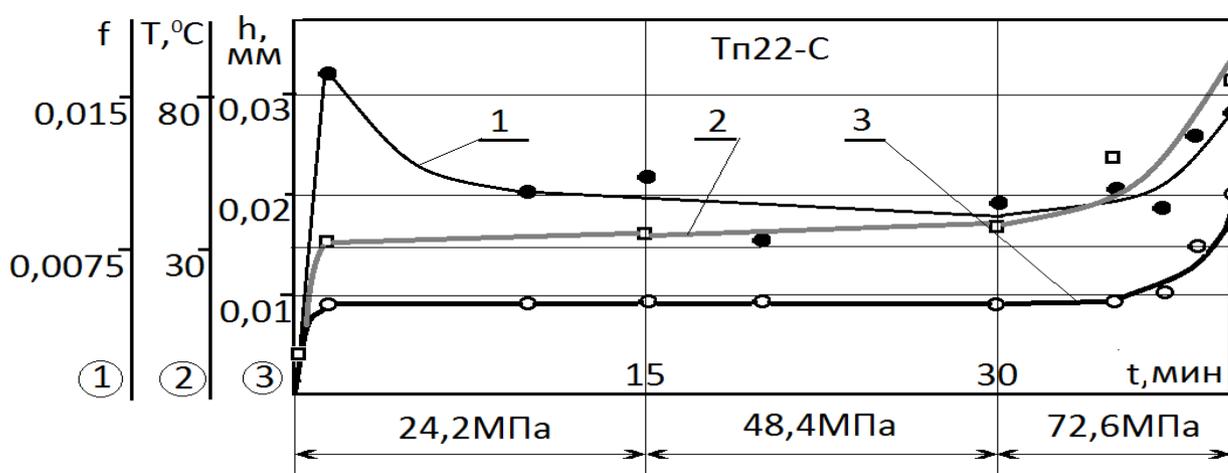


Рис.4.15 Гидродинамический режим трения подшипника (сталь 45 – покрытие на основе ткани атласного плетения, $V = 0,2$ м/с)

Для возникновения гидродинамического клина требуемый зазор был создан искусственно в результате выполнения в покрытии подшипниковой втулки двух канавок. Установленный таким образом радиальный зазор обеспечил возникновение гидродинамического клина и устойчивый гидродинамический режим смазывания (рис. 4.15).

Полученный устойчивый гидродинамический режим характеризуется после 2-х минутной приработки колебаниями коэффициента трения в пределах 0,007 – 0,014 независимо от ступенчатого увеличения нагрузки в три раза до 72,6МПа. Причем, величина износа стабильна и не превышает 0,009мм, что является, скорее всего, не собственно износом, а суммой деформации ползучести и уменьшением толщины покрытия в результате отжатия из него масла. Температура смазочного материала находится в пределах 30 – 40⁰С.

Следует отметить, что момент ступенчатого нагружения трибосистемы сопровождался некоторой динамикой, вызывающей кратковременное повышение коэффициента трения. На 36-й минуте испытаний скорость скольжения была плавно повышена до 0,68м/с, что вызвало повышение температуры и рост коэффициента трения до 0,017, т.е. режим гидродинамического трения нарушался. Это можно объяснить снижением вязкости смазочного материала. Испытания были прекращены.

В дальнейшем также самостоятельное всплытие вала на гидродинамическом клине обеспечивалось осевыми масляными канавками в покрытии подшипниковой втулки. Поскольку частичное удаление покрытия, снижая площадь контакта, повышает величину нормальных напряжений, установление минимальной ширины канавок было выполнено экспериментально. Стабильное всплытие вала на гидродинамическом клине обеспечивается двумя, расположенными напротив друг друга масляными канавками шириной 3,0 – 3,2мм.

Таблица 4.7 Параметры трения и изнашивания в режиме гидродинамического смазывания

Смазочный материал	Режимы		Трибопараметры			Изменение трибопараметров во времени, t, мин						
	σ , МПа	n , мин ⁻¹	Наименование	Обозначение	Размерность	0	3	6	15	30	45	55, 60
МС-20	5,4	390	Коэф. трения	f	—	—	0,036	0,011	0,01	0,01	0,009	0,01
			Износ	h	мм	----	0,026	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
			Температура	T	°C	26	41	42	47	52	56	60
			Кинемат. вязкость	ν	сСт	730	270	255	180	130	95	83
			Интенсив. изнашив.	I	—	5,61·10 ⁻⁹						
			Ресурс	R	циклы	214,58·10 ⁻⁴						
Тп22-С	24,2	250	Коэф. трения	f	—	—	—	—	0,008	0,007	0,007	0,007
			Износ	h	мм	---	---	0,007	0,009	0,009	0,009	0,009
			Температура	T	°C	28	—	43	49	53	55	56
			Кинемат. вязкость	ν	сСт	56	—	27	23	19	17	16
			Интенсив. изнашив.	I	—	3,62·10 ⁻⁹						
			Ресурс	R	циклы	332,7·10 ⁻⁴						

Используя полученные результаты, были изготовлены образцы радиально-упорных подшипниковых втулок с двумя диаметрально расположенными продольными масляными канавками шириной 3,5 мм. Экспериментальные исследования подобных трибосистем показали удовлетворительные результаты. В подшипниках стабильно устанавливался гидродинамический режим смазывания при различной вязкости смазочного материала, контактной нагрузке и скорости скольжения (Таблица 4.7).

Эксперименты ставились на образцах втулок с антифрикционным покрытием на основе ткани атласного плетения и контртелами из стали 45. Графическая интерпретация результатов представлена графиками на Рис.4.16 и Рис.4.17.

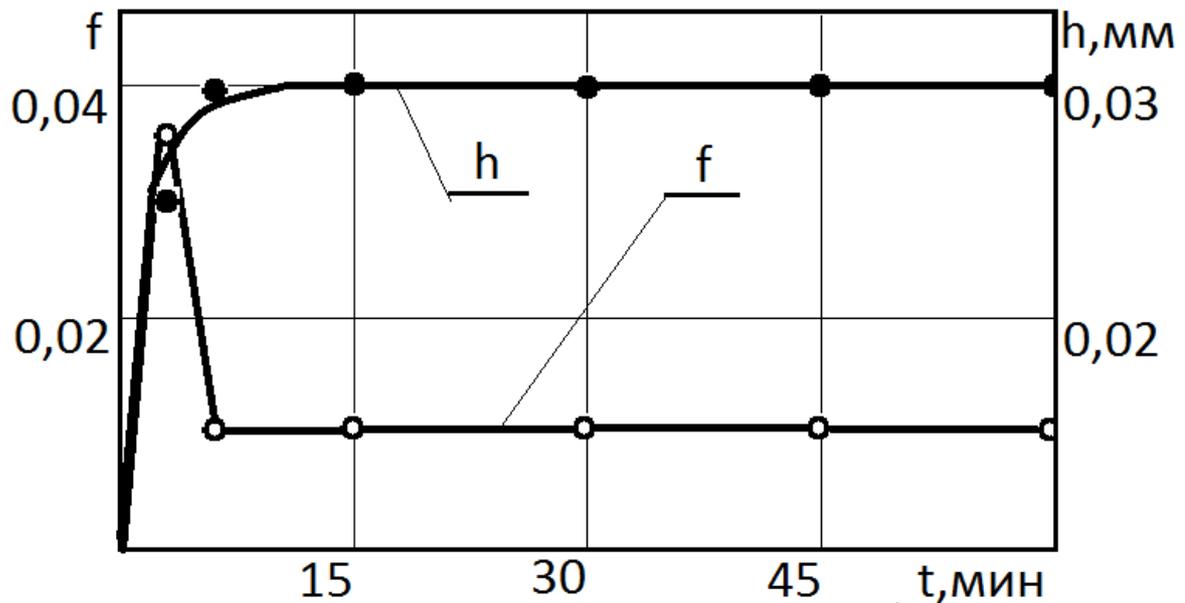


Рис. 4.16 Гидродинамический режим трения (МС-20, $\sigma=5,4\text{МПа}$, $n=390\text{мин}^{-1}$)

Сравнение главных триботехнических характеристик исследованных металлополимерных трибосистем сведено в таблицу 4.8. Сравнение параметров, полученных при работе пар трения в гидродинамическом режиме, проводилось для трибосопряжений, работающих как в режиме самосмазывания в воздушной среде, так и при граничной смазке маслами МС-20 и Тп22-С.

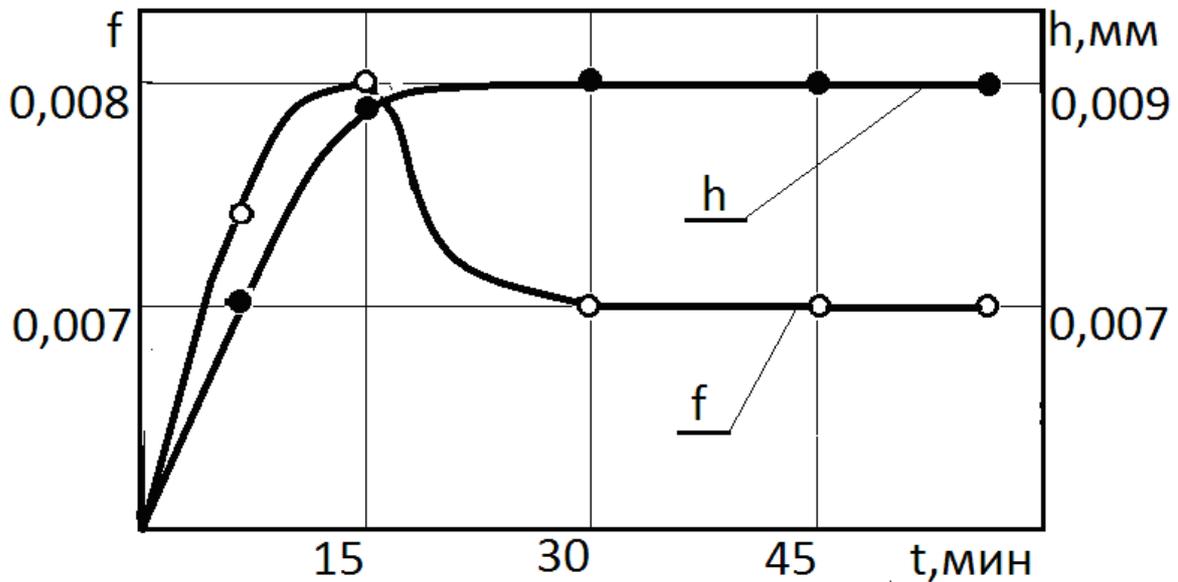


Рис. 4.17. Гидродинамический режим трения (Тп22–С, $\sigma=24,2\text{МПа}$, $n=250\text{мин}^{-1}$)

Таблица 4.8 Эффективность металлополимерных трибосистем при гидродинамическом режиме смазывания

Среда	Режим смазывания при трении						Рост ресурса при гидродинамическом режиме в сравнении с	
	Граничный			Гидродинамический				
	Ресурс R, 10^{-4} цикл.	Износостойкость 10^7	Класс	Ресурс R, 10^{-4} цикл.	Износостойкость 10^{-8}	Класс	граничным (масло)	самосмазыванием (воздух)
Воздух	50,94	4,23	11	----	----	12	----	----
МС-20	35,05	2,91		214,6	1,78		в 6,12 раз	в 4,21 раза
Тп22-С	65,87	5,47		332,7	2,76		в 5,05 раз	в 6,53 раза

Данные, приведенные в таблице для гидродинамического режима смазывания, соответствуют непрерывной работе трибосистемы в этом режиме. При учете реального режима работы с ПВ = 25% рост ресурса необходимо уменьшить примерно в 1,5 - 2 раза.

Таким образом, применение специальных безззорных радиально-упорных подшипников, с двумя осевыми канавками и блокированием несущей полимерной поверхности от действия жидких смазочных материалов в нерабочее время, а также во время пусков и выбегов, позволило реализовать гидродинамический режим трения, что обеспечило

повышение допустимой скорости и в несколько раз увеличило их ресурс, в сравнении с обычной эксплуатацией в режиме самосмазывания или граничного трения.

4.4 Выводы

1. Установлены основные закономерности взаимодействия адгезива антифрикционных покрытий с жидкими смазочными средами, определяющие адгезионную прочность покрытий.
2. Получен комплекс расчетных моделей адгезионной прочности полимерных композиционных покрытий разного состава и структуры в жидких смазочных средах различной вязкости (при 20⁰С 100...1244сСт) в зависимости от температуры и времени экспозиции.
3. Выявлен эффект абсорбционного повышения жесткости полимерных фторопластсодержащих покрытий в жидких смазочных материалах и нагрузочный предел реализации этого эффекта.
4. Получена обобщенная модель изменения жесткости ряда различных полимерных покрытий рассматриваемого класса, эксплуатируемых в жидких смазочных средах.
5. Определены основные триботехнические параметры металлополимерных трибосистем с композиционным покрытием, работающих в режиме как граничного, так и гидродинамического смазывания.
6. Разработана и исследована конструкция безззорных радиально-упорных подшипников скольжения, обеспечивающая их устойчивую работу в режиме гидродинамики, что в 4,2...6,5 раз повышает ресурс подшипников при увеличении скорости скольжения в 3 раза.

Глава 5. Промышленные испытания

В данном разделе приводятся результаты, подтверждающие работу рассматриваемой трибосистемы в условиях граничного (самосмазывание) и жидкостного (гидродинамического) трения, а также итоги промышленных испытаний разработанных подшипников.

5.1 Сравнение теоретических и экспериментальных результатов

Выяснив в теоретической части работы, что дополнительная, поднимающая шейку вала сила, зависит от ширины канавок и вязкости жидкого смазочного материала (см. главу 2), была выполнена серия экспериментов для установления величины этих канавок.

Глубина канавок соответствовала толщине полимерного покрытия, равнялась примерно 0,50 – 0,55мм и не изменялась в дальнейшем. Ширина канавок в первом эксперименте равнялась 1,5мм и в последующих увеличивалась на 1мм. При этом использовалось маловязкое турбинное масло марки Тп22-С.

Увеличение ширины канавок автоматически приводило к уменьшению рабочей контактной поверхности подшипниковой втулки, то есть к росту нормальных контактных напряжений, что является отрицательным фактором. Следовательно, было необходимо установить минимальную ширину канавок, обеспечивающую режим гидродинамического трения. Таким образом, стояла задача оптимизации по двум взаимоисключающим критериям: нагрузки на подшипник и коэффициенту трения.

Величина последнего была выбрана в качестве критерия, свидетельствующего о наступлении жидкостного трения. Коэффициент трения при гидродинамическом смазывании по данным И.В. Крагельского не должен превышать 0,01 [77]. Однако для рассматриваемых радиально-упорных подшипников с эквидистантными (в исходном периоде граничного трения самосмазыванием фторопластом) рабочими поверхностями величина

коэффициента трения может увеличиваться по данным [9,45,51] до 0,03 – 0,05. По величине коэффициента трения и устанавливался тип смазывания, имеющийся в исследуемой трибосистеме.

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 5.1. Здесь же представлены величины нагрузочно-скоростных режимов, а также кинематическая вязкость используемых жидких смазочных материалов с учетом повышения температуры, генерируемой в процессе трения. Величина вязкости рассчитана линейной интерполяцией

Таблица 5.1 Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	Марка смазочного материала	Режимы нагружения		Температура, $T, ^\circ\text{C}$	Кинематическая вязкость ν , сСт	Коэффициент трения f	Время t , мин
		Контакт. напряж. σ , МПа	Скорость скольж. V , м/с				
1	Турбинное масло Тп22-С	24,2	0,2	30 - 38	50 - 34	0,007 –	15
2		48,4					
3		72,6				0,007	6
4		24,2		35			
5	Авиационное масло МС-20	5,4	0,3	33	325	0,10	60

Анализ табличных данных показывает, что в исследуемой трибосистеме при указанных режимах нагружения в широком диапазоне вязкости жидких смазочных материалов наблюдается устойчивое гидродинамическое смазывание.

Для оптимизации ширины канавок в подшипниковой втулке рассчитаем уменьшение ее контактной площади и соответственное увеличение нормальных напряжений. Результаты представлены на графике совместно с величиной коэффициента трения, определенного для «номинальных» контактных напряжений, равных 48,4МПа и скорости скольжения 0,2м/с при работе трибосистемы в турбинном масле. Расчет площадей ведем для экспериментальных образцов (см. раздел 3.3).

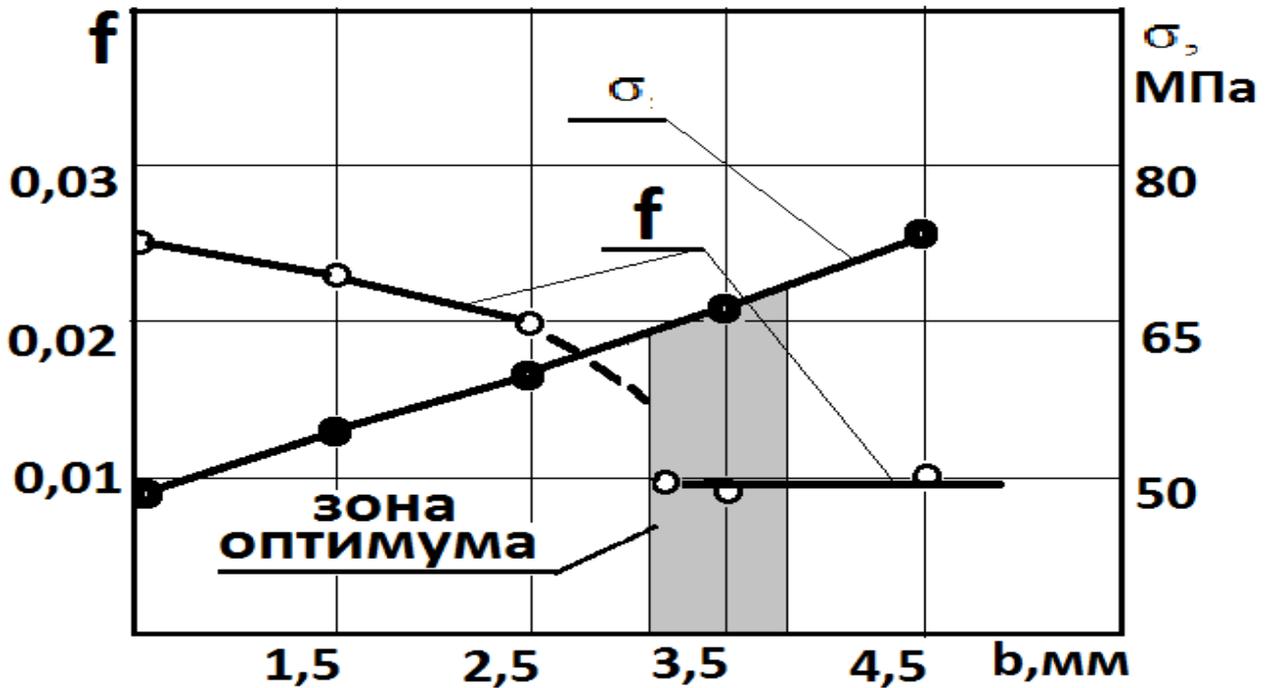


Рис. 5.1. Оптимальные размеры канавок

На левом отрезке кривой среднего коэффициента трения, до ширины канавок величиной 2,5мм, его уровень соответствует величине принятых режимов нагружения и граничному режиму трения в условиях самосмазывания фторопластом [73]. Некоторое снижение коэффициента трения на этом участке соответствует росту контактных напряжений в связи с наличием канавок [50,53].

Начиная с ширины канавок равной 3мм происходит всплытие контртела и коэффициент трения резко падает до величин 0,007 – 0,014. Это является экспериментальным подтверждением теоретических выводов и доказательством перехода трибосопряжения от граничного к гидродинамическому трению при оптимальной ширине канавок.

5.2 Промышленные испытания

Промышленные испытания универсальных (работающих в граничном и жидкостном режимах смазывания) радиально-упорных подшипников

скольжения с полимерными композиционными покрытиями и специальными канавками проводились в условиях Лопастного завода ОАО «Роствертол».

Технологическим объектом, на котором устанавливались подшипники, являлся специальный станок для внутреннего ленточного шлифования лонжерона лопасти несущего винта вертолета МИ-26. Лопасти несущего винта (Рис.5.2) имеют прямоугольную форму в плане и переменную толщину аэродинамического профиля с размером хорды 0,8 м.

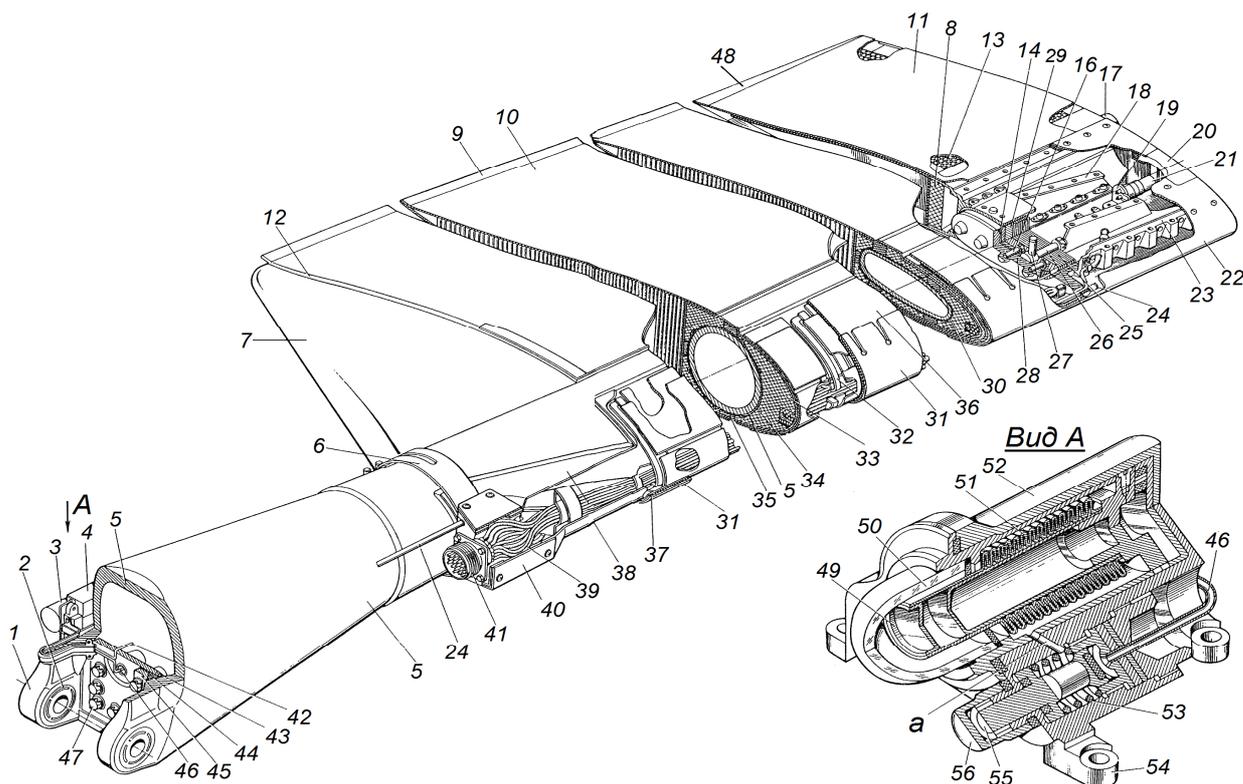


Рис. 5.2. Общий вид лопасти несущего винта вертолета Ми-26
(лонжерон - позиция 5)

Длина лопасти от оси стыковочных отверстий до законцовки составляет 14,3 м. Вес лопасти – 378 кг. Основным силовым элементом лопасти является, выполненный из стали 40 ХН2МА-Ш – «селект», цельновысаженный стальной лонжерон с двумя проушинами в комлевой части, которые служат для стыковки лопасти с втулкой несущего винта. Лонжерон имеет переменное сечение, изменяющееся от круглого у комля к каплевидному овалу с уменьшающейся толщиной стенки по мере приближения к законцовке.

Исключительно высокие требования к усталостной прочности лонжерона определяют следующие операции технологического маршрута. Пескоструйная, контроль формы, правка, термическая обработка с целью снятия остаточных напряжений, фрезерование проушины наконечника, сверление и растачивание стыковочных отверстий, служащих для крепления лопасти к втулке несущего винта, ленточное шлифование наружной и внутренней поверхностей трубы лонжерона, плоско-шлифовальная обработка наружной и внутренней поверхностей проушины, контроль на отсутствие прижогов, обезуглероживания, взвешивание, определение статического момента, динамическое упрочнение поверхности (снаружи – ротационным и изнутри гидropескоструйным способом). Все перечисленные операции выполняются на производственных мощностях Лопастного завода ОАО «Роствертол».

К числу наиболее ответственных относятся операции ленточного шлифования для удаления поверхностных дефектов, снижения высотных параметров шероховатости. Операции производятся на специальном станке (см. рис. 5.3). Обработка наружной и внутренней поверхностей производится отдельно.



а)



б)

Рис. 5.3. Специальный станок для ленточного шлифования лонжерона
а) вращающаяся головка, б) редуктор .

Для снижения нежелательного скручивания лонжерона и преодоления сил резания со стороны абразивной ленты лонжерон устанавливается в 4-х люнетах, а его движение осуществляется четырьмя головками, расположенными вдоль лонжерона на расстоянии примерно 3,5 метра (см. Рис. 5.3,а).

Ленточное шлифование обеспечивается протягиванием ленты вдоль лонжерона со скоростью 2-2,5 м/сек. Прижатие абразивной ленты к шлифуемой поверхности обеспечивается сжатым воздухом, который подается в специальный прижимной мешок (Рис. 5.4). Перемещение мешка и его возвратно-поступательное движение вдоль лонжерона вместе с форсункой для подачи СОТС осуществляется тросом. Обработка внутренней поверхности лонжерона по линиям «верх» и «низ» производится отдельно, что требует переустановки с изменением взаимного положения лонжерона, ленты и прижимного мешка.



Рис. 5.4. Прижимной мешок, обеспечивающий рабочий контакт абразивной ленты к внутренней шлифуемой поверхности лонжерона

При шлифовании лонжерон совершает возвратно-качательные движения вокруг своей оси с амплитудой около 30 градусов, что обеспечивает равномерность обработки лентой шириной 100 мм. Период качаний составляет около 20 сек.

Понижение частоты вращения привода от 900 об/мин до требуемой 3 об/мин осуществляется с помощью четырехступенчатой системы, включающей редукторы первой ступени (Рис. 5.3), которые выполнены легкоъемными, что обусловлено необходимостью их частого регламентного

обслуживания, цепную передачу на редуктор третьей ступени, собственно, сам редуктор, открытую зубчатую передачу и механизм преобразования вращательного движения в качательное (Рис. 5.5).

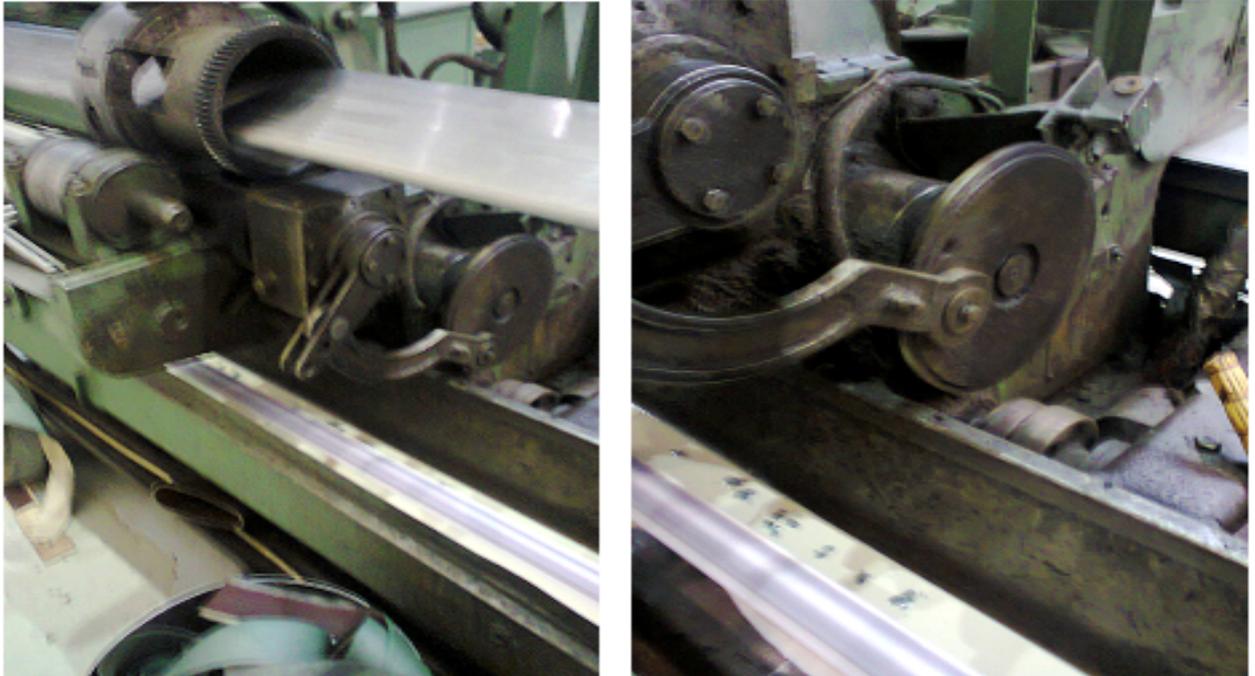


Рис. 5.5. Механизм, обеспечивающий качательное движение лонжерона.

Норма времени на обработку внутренней поверхности одного лонжерона составляет 6 часов, куда входит также время на замену абразивной ленты (4-6 комплектов лент на 1 лонжерон). Общая трудоемкость с учетом подготовительно-заключительного времени составляет 8 часов. Согласно технологическому процессу после операции внутреннего шлифования производится визуальный контроль качества обработки, выполняемый с помощью специального перископа. При обнаружении устранимых дефектов операция ленточного шлифования повторяется.

Регламентное техническое обслуживание станка, включая редукторы 1, 2 и 3-й ступени производится после обработки 2-3 комплектов лонжеронов лопастей (8 лопастей в комплекте), но не реже 1 раза в 2 месяца. В перечень регламентных работ входит контроль состояния зубчатых передач, замена жидкого смазочного материала и радиально-упорных подшипников

редукторов первой ступени. Этот редуктор характеризуется следующими параметрами: передаточное отношение $900/75=12$; мощность 1500 Вт.

Необходимость обеспечения непрерывности технологического процесса заставляет иметь не менее одного резервного комплекта редукторов первой ступени (Рис. 5.6).



Рис. 5.6. Резервные редукторы привода вращения лонжеронов

В тех случаях, когда предприятие имеет значительный объем заказов (лопасть несущего винта является изделием с ограниченным ресурсом), производится загрузка всех установленных на участке станков для ленточного шлифования. Остановка станков для выполнения регламентных работ является крайне нежелательной. Это обстоятельство обосновывает необходимость совершенствования конструкции трибоузлов описываемых редукторов.

Установленные экспериментальные подшипники скольжения с композиционным покрытием имеют размеры полностью соответствующие штатным подшипникам.

Контрольная разборка редуктора после 2-х месячной эксплуатации показала, что рабочая поверхность полимерного покрытия имеет сглаженную

композиционную структуру без каких-либо следов нарушения целостности или отслоения. Расчет ресурса экспериментальных подшипников по величине износа показал, что их ресурс превышает штатные подшипники на 25 – 27%. В настоящее время испытания продолжаются.

Таким образом, результаты промышленных испытаний разработанной трибосистемы с антифрикционным полимерным композиционным покрытием оцениваются удовлетворительно.

Заключение.

В диссертации решена поставленная научно-техническая проблема повышения для подшипников с фторопластсодержащими композиционными покрытиями эксплуатационной скорости скольжения и ресурса.

По результатам исследований могут быть сформулированы следующие выводы.

1. В результате обобщения и анализа доступной технической информации выявлена последовательность кинетических этапов взаимодействия материала покрытий из фторопластсодержащих полимерных композитов с жидкими смазочными материалами: смачивание матричных участков поверхности, проникновение жидкости по капиллярам в тело композита, образование агрегатов в результате капиллярной конденсации, диффузия в матричное связующее и полиимидные волокна.
2. Основываясь на анализе результатов решения уравнения Навье – Стокса для установившегося течения тонкого слоя вязкой несжимаемой жидкости в поперечном сечении осевой канавки подшипниковой втулки, доказана принципиальная возможность использования пика гидродинамического давления для перехода подшипника от граничного к жидкостному трению.
3. Численно-аналитическое решение уравнения Рейнольдса для плоской осесимметричной задачи, а также построение и анализ трехмерной конечноразмерной модели течения вязкой несжимаемой жидкости подтвердили возможность прогнозируемых закономерностей и установили характер распределения гидродинамического давления в радиальном и осевом сечениях маслоподдерживающих канавок.
4. Результаты проведенных экспериментальных исследований адгезии антифрикционных покрытий на стальном и латунном субстрате позволили установить работоспособность покрытий и зависимость величины остаточной, после их выдержки в смазочной среде, адгезионной прочности от времени экспозиции, вязкости жидкого смазочного материала и температуры.

5. Экспериментальные исследования вязкоупругих свойств полимерных покрытий позволили выявить эффект абсорбционного повышения их контактной жесткости в масляных средах, зависимость этого эффекта от вязкости среды, а также впервые определена предельная величина нагрузки (10 – 12,5 МПа), блокирующая этот эффект. Кроме того, установлена величина составляющей зазора трибосопряжения, определяемая величиной ползучести покрытия (в среднем 11% при 5МПа и 24% при 70МПа).
6. По результатам экспериментальных исследований получен комплекс регрессионных моделей, позволяющих определить остаточную адгезионную прочность покрытий, их вязкоупругие характеристики и триботехнические параметры в условиях граничного трения самосмазыванием фторопластом.
7. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана конструкция беззазорного (до приработки) радиально-упорного подшипника скольжения, обеспечивающая его работу в режиме граничного трения и переход к устойчивому гидродинамическому режиму, что в 4,2....6,5 раз повышает ресурс подшипника в условиях повышения скорости в 3 раза.
8. Промышленные испытания разработанных радиально-упорных подшипников скольжения с композиционным полимерным фторопластсодержащим покрытием и маслоподдерживающими канавками удовлетворительно прошли промышленные испытания на Лопастном заводе ОАО «Роствертол», обеспечив повышение ресурса трибоузла технологического оборудования на 25 – 27%.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Поскольку в диссертации проводились исследования только радиально-упорных подшипников в минеральных жидких смазочных материалах, а фторопластсодержащие покрытия применяются в самых разных конструкциях трибосистем, представляется перспективным расширить исследования для подшипников других конструкций, смазываемых синтетическими маслами, а также пластичными смазочными материалами.

Библиографический список

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский.- М.: Наука, 1976.- 276с.
2. Айнбиндер С.Б. Введение в теорию трения полимеров. / С.Б. Айнбиндер, Э.Л. Тюнина. - Рига: Зинатне, 1978.-223с.
3. Альшиц И.Я. Проектирование деталей из пластмасс : Справочник / И.Я Альшиц, Б.Н. Благов. - М.: Машиностроение, 1977.-215с.
4. Анно Д.Н.Смазка микронеровностей.- Д.Н. Анно, Д.А. Валовит, К.М. Аллен.- Сб. Проблемы трения и смазки.- 1968.- т.9.- серия F.- №2.- С 14- 17.
5. Артамонов В.Н. Трибологические характеристики сферических шарнирных подшипников скольжения с самосмазывающимся покрытием на основе ткани. В.Н. Артамонов, Ю.Н. Дроздов, // Вестник машиностроения.- 1987.- № 4.-С.10-14.
6. Аршакуни А.Л. Закономерности ползучести и длительной прочности: справочник / А.Л. Аршакуни, А.М. Ликощенко, В.Н.Киселевский и др.- М: Машиностроение, 1983.-101с.
7. Аскадский А.А. Химическое строение и физические свойства полимеров./ А.А. Аскадский, Ю.И. Матвеев.- М.: Химия, 1983.-248с.
8. Аскадский А.А. Химическое строение и физические свойства полимеров./ А.А. Аскадский.- М.: Химия, 1981.-240с.
9. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С.Ахматов.-М: Физматгиз, 1963.-472с.
10. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии./ Д. Бакли.- М.: Машиностроение, 1986.-360с.
11. Белый В.А. Адгезия полимеров к металлам / В.А.Белый, М.И.Егоренков, Ю.П. Плескачевский.- Минск: Наука и техника, 1971.- 286с.
12. Белый В.А. Металлополимерные материалы и изделия./ В.А.Белый, М.И.Егоренков, Л.С.Корецкий и др.-М.: Химия,1979.- 312с.
13. Белый В.А. Трение и износ материалов на основе полимеров./ В.А.

Белый, А.И. Свиреденок, Н.И. Петраковец и др.- Минск: Наука и техника, 1976.- 431с.

14. Бельник А.Р. Исследование процессов, происходящих в фенопластах при контакте их с агрессивными средами: Автореф. Дисс. ... канд.тех.наук.- М.: МХТИ им. Д.Менделеева, 1971.- 20с.

15. Билик Ш.М. Пары трения металл – пластмасса в машинах и механизмах./ Ш.М. Билик.- М.: Машиностроение, 1965.- 311с.

16. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики./ Л.Н.Большев, Н.В.Смирнов.- М.: 1983.- 416с.

17. Браун Э.Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе.- М: Машиностроение, 1982.-191с.

18. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов./ И.Н.Бронштейн, К.А.Семендяев.- М.: Наука, 1986.- 544с.

19. Вакула В.Л. Физическая химия адгезии полимеров.- В.Л. Вакула, Л.М. Притыкин.- М.: Химия, 1984.-222с.

20. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментальных исследований и обработки опытных данных / Г.В. Веденяпин.- М: Колос, 1965.-199с.

21. Власенко И.Б. Антифрикционные композиты в активных водных средах. // Вестник ДГТУ,2013.- т.13.-№10(60).- С.1803 – 1807.

22. Власенко И.Б. Влияние абсорбции влаги на контактную жесткость полимерного антифрикционного покрытия./И.Б. Власенко, С.Н. Шевцов, Н.Г. Снежина и др./ Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на водном транспорте. Сб.тр. V Международного симпозиума по транспортной триботехнике «Транстрибо-2013» СПб.: Гос. ун-т морского и речного флота им. адмирала С.О.Макарова, 10-11 октября 2013.- С.193-197.

23. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения./ Б.Д.Воронков.- Л.: Машиностроение, 1972.- 224с.

24. Голубев А.И. Торцевые уплотнения вращающихся валов.- А.И. Голубев. М.: Машиностроение, 1974.- 212 с.

25. Гороховский Г.А. Поверхностное диспергирование динамически

контактирующих полимеров и металла - Киев: Наукова думка, 1972.-152с.

26. Гороховский Г.А. Влияние ориентации и кристалличности на трение и износ политетрафторэтилена. Г.А. Гороховский, И.И. Агулов // Механика полимеров.- 1966.-№1.-С.123-128.

27. Горюнов Ю.В. Эффект Ребиндера / Ю.В. Горюнов, И.И. Агулов, Н.В. Перцев и др.- М.: Наука, 1966.- 128с.

28. Гузок А.Н. Повышение эксплуатационных свойств малых герметичных холодильных компрессоров за счет оптимизации микрорельефа поверхности деталей трущихся пар. А. Н. Гузок. Автореф. Дис. канд. техн. наук.- Л.-ЛТИХП, 1972.- 19с.

29. Гаманюк В.С. Износостойкость стеклопластиков в агрессивных средах / В.С. Гаманюк // Механика полимеров, 1974.- №2.- С.364 – 366.

30. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов./ Г.М.Гуняев.- М.: Химия, 1981.- 320с.

31. Гусева А.А. Технология и оборудование плосковязального и кругловязального производства.-М.: Легкая и пищевая пром-ть, 1981.-400с.

32. Джунибеков Т.М. О влиянии действия агрессивных сред на релаксацию напряжений в полимерах /Т.М. Джунибеков, Н.И. Малинин, Г.К. Строганов // Физ.-хим. механика материалов.- 1974.-№5.-С.55-57.

33. Дружинин Н.К. Выборочное наблюдение и эксперимент./ Н.К.Дружинин.- М.: Статистика, 1977.- 148с.

34. Журавлев Л.А. Адгезионная прочность полимерных антифрикционных покрытий в кислых водных средах. Л.А. Журавлев, И.Б. Власенко, С.И. Иванов.- Сб. тр. конф. «Трибология и надежность» СПб.: Санкт Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО), 11-13 сентября, 2013.- С.38 – 41.

35. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин / А.Н.Зайдель.- Л.: Наука, 1974.-108с.

36. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. // А.Д. Зимон.-М.: Химия, 1974.- 413с.

37. Зимон А.Д. Адгезия плёнок и покрытий. / А.Д. Зимон.- М.: Химия,1977.- 352с.
38. Зуев Ю.С. Разрушение полимеров под действием агрессивных сред. / Ю.С. Зуев .- М.: Химия, 1972.- 229с.
39. Истомин Н.П. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров. / Н.П. Истомин, А.П. Семенов .- М.: Наука,1984.-147с.
40. Камерова Э.А. Методика исследования влияния жидких сред на фторопластсодержащие антифрикционные покрытия. Э.А. Камерова, И.Б. Власенко, Н.Г. Снежина, П.А. Оганесян // Уральский научный вестник.- 2014.- №21 (100).- С.137 – 142.
41. Камерон А. Теория смазки в инженерном деле.- А. Камерон.- М.: Госнаучтехиздат, 1962.- 296с.
42. Каргин В.А. Краткие очерки по физикохимии полимеров. В.А. Каргин, Г.П. Слонимский. - М.: Химия, 1967.-232с.
43. Кардашов Д.А. Конструкционные клеи. Д.А. Кардашов.- М.: Химия, 1980.-288с.
44. Кардашов Д.А. Применение клеев в самолетостроении. Д.А. Кардашов // Вестник машиностроения.- 1978.-№5.-С.50-53.
45. Кащеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. В.Н. Кащеев.- М.: Машмнстроение,1978.- 213с.
46. Кноп А. Фенольные смоля и материалы на их основе. А Кноп, В. Шейб - М.: Химия, 1983.-280с.
47. Ковачич Л. Оклеивание материалов и пластмасс. Л. Ковачич.- М.: Химия, 1985.-239с.
48. Козлов П.М. Применение полимерных материалов в конструкциях, работающих под нагрузкой. П.М. Козлов.- М.: Химия, 1966.-361с.
49. Колесников В.И. Композиционные материалы для узлов трения подвижного состава на основе технических тканей и их триботехнических характеристик. В.И. Колесников, А.П. Сычев, В.Н. Кравченко, Б.М. Флек.-

Труды южного научного центра Российской академии наук: том II. Физика. Механика. Техника.- Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦРАН, 2007.- С.9 – 20.

50. Колесников В.И. Транспортная триботехника (трение и износ материалов)/ В.И.Колесников, В.В.Шаповалов, В.А.Кохановский.- Ростов н/Д: Изд-во РГУПС, 2006.- т.1.- 477с.

51. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Б.И. Костецкий.- Киев: «Техніка»,1979.- 396с.

52. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. В.А. Колтунов. - М.: Высш. шк., 1971.- 51с.

53. Кохановский В.А. Антифрикционные полимерные композиты для тяжело нагруженных пар трения. Дис....докт. техн. наук% 05.02.04.- Ростов н/Д: ДГТУ, 1995.- 352с.

54. Кохановский В.А. Антифрикционные полимерные композиты для тяжело нагруженных пар трения. Автореф. дис....докт. техн. наук% 05.02.04.- Ростов н/Д: ДГТУ, 1995.- 30с.

55. Кохановский В.А. Армирующая компонента для антифрикционных композиционных покрытий. / В.А.Кохановский// Управление, Конкурентоспособность. Автоматизация.- Ростов н/Д: ГОУДПО, 2002.-вып.1.- С.73-79.

56. Кохановский В.А. Водостойкость антифрикционных полимерных композитов / В.А. Кохановский, Ю.М. Ворожеин, Ю.Н. Пономарев и др. Материалы межд. науч. техн. конф. Инженерия поверхности и реновация изделий./Ялта-Киев: 25 – 27 мая,2004.- С.125 – 127.

57. Кохановский В.А. Вязкоупругие свойства антифрикционных покрытий в водных средах. В.А. Кохановский, И.Б.Власенко // «Трение и смазка в машинах и механизмах», 2012.- №12.- С.34-38.

58. Кохановский В.А. Деформационные свойства композиционных покрытий. В.А. Кохановский, С.И. Босый. Сб. науч. тр. «Трибология на железнодорожном транспорте». Ростов н/Д: Изд-во РГУПС, 2001.- С.86 – 90.

59. Кохановский В.А. Идентификация металлополимерных трибосистем. / В.А. Кохановский // Пластические массы, 1997.- №6.- С.28 – 32.

60. Кохановский В.А. Идентификация полимерных реологических систем./ В.А.Кохановский, Ю.Н.Пономарёв, Ю.М.Ворожеин.// Термическая обработка стали (теория, технология, техника эксперимента). Ростов н/Д: Изд-во ДГТУ, 1994.- С.121-126.

61. Кохановский В.А. Износостойкость металлополимерных трибо-систем с композиционным покрытием. / В.А.Кохановский. //Трение и смазка в машинах и механизмах, 2007.- №1.- С.13 – 19.

62. Кохановский В.А. Износостойкость полимерных покрытий в активных водных средах. В.А. Кохановский, И.Б. Власенко // «Трение и смазка в машинах и механизмах», 2013.- №11.-С. 45 – 48.

63. Кохановский В.А. Матричные материалы антифрикционных композитов./В.А. Кохановский, М.А. Мукутадзе // Вестник ДГТУ, 2001.- т.1.- №2(8).- С.51-56.

64. Кохановский В.А. Несущая способность покрытий из антифрикционных самосмазывающихся волокнитов при статических нагрузках./ В.А.Кохановский //Известия СКНЦ ВШ: Сер. Техн. науки,1987.- №2.- С.69-72.

65. Кохановский В.А. Организация и планирование эксперимента. / В.А. Кохановский, М.Х.Сергеева .-Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ,2003.-168с.

66. Кохановский В.А. Покрытия из самосмазывающихся волокнитов для подшипников скольжения./ В.А.Кохановский, А.В. Кузичев, В.А. Салион. // Вестник машиностроения,1986.- №10.- С.40-43.

67. . Кохановский В.А. Производство препрегов для антифрикционных композиционных покрытий./ В.А.Кохановский, М.А. Мукутадзе // Вестник ДГТУ, 2001.- т.1.- №4(10).- С.34-37.

68. Кохановский В.А. Работоспособность антифрикционных полимерных покрытий в водных средах. В.А. Кохановский, И.Б. Власенко // «Трение и смазка в машинах и механизмах», 2012.- №1.- С.13-15.

69. Кохановский В.А.Рациональный раскрой препрега: В.А. Кохановский. Тез. конф. «Промышленная экология» Спб.: 12-14 ноября

1997.- С.451.

70. Кохановский В.А. Свойства полимерных антифрикционных покрытий в кислых средах. В.А. Кохановский, В.В. Рубанов, И.Б. Власенко. //Вестник ДГТУ,2011.- т.11.-№10(60).- С.1803 – 1807.

71. Кохановский В.А. Соотношение зазоров в шарнирных подшипниках. В.А. Кохановский, Л.В. Красниченко // Безызносность: Межвуз. сб.науч.тр.- Ростов н/Д: РИСХМ.- 1990.-С.95-101.

72. Кохановский В.А. Структура и свойства антифрикционных волокнитов./ В.А.Кохановский.- Безызносность: сб. науч. тр. Ростов н/Д: РИСХМ, 1992.- вып.2.- С.132 – 137.

73. Кохановский В.А. Трение и изнашивание фторопластсодержащих композитов. В.А. Кохановский, Ю.А. Петров // Вестник ДГТУ.- 2009.- №1 (40).- С.30 – 35.

74. Кохановский В.А. Формирование антифрикционного композиционного покрытия./ В.А.Кохановский, Е.А.Бородин // Вестник ДГТУ, 2001.- т.1.- №3 (9).- С.155-159.

75. Кохановский В.А.Эволюция контактных параметров металлополимерных трибосистем. / В.А.Кохановский, Ю.А.Петров.// Вестник ДГТУ, 2004.- т.4.- №3(21).- С.332-337.

76. Кравченко В.Н. Исследование кинематики образования плёнки фрикционного переноса антифрикционного самосмазывающегося композита на основе волокон политетрафторэтилена (ПТФЭ) методом рентгеноэлектронной спектроскопии./ В.Н.Кравченко, А.Т.Казаков, В.И.Колесников и др. // Динамика и прочность подвижного состава.- Ростов н/Д: Изд-во РИИЖТа, 1986.- №185.- С.75-80.

77. Крагельский И.В. Коэффициенты трения / И.В.Крагельский, И.Э.Виноградова. - М: Машгиз, 1962.-220с.

78. Крагельский И.В. Трение и износ. / И.В. Крагельский.- М.: Машиностроение, 1968.- 467с.

79. Кужаров А.С. Исследование триботехнических свойств различных

текстильных структур на основе волокнистого политетрафторэтилена./ А.С.Кужаров, В.Г.Рядченко, В.О.Гречко и др. // Трение и износ, 1986.- т.7.- №5.- С.945-950.

80. Кужаров А.С. Композиционные антифрикционные покрытия на основе волокон политетрафторэтилена./ А.С.Кужаров, В.Г.Рядченко. // Безызносность.- Ростов н/Д: Изд-во РИСХМа, 1992.- вып.2.- С.140-147.

81. Кутьков А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия. А.А. Кутьков-М.: Машиностроение, 1976.-152с.

82. Ланкастер У.К. Образование третьего тела и износ сухих подшипников на основее ПТФЭ- волокон. / У.К.Ланкастер.- Образование третьего тела и износ сухих подшипников на основе ПТФЭ – волокон./ У.К.Ланкастер.// Проблемы трения и смазки.-1980.- С.114- 124.

83. Латишенко В.А. Диагностика жесткости и прочности материалов. В.А. Латишенко. -Рига: Зинатне, 1968.-320с.

84. Леонов А.П. Влияние жидких сред на ползучесть при растяжении некоторых полимерных материалов А.П. Леонов, Р.Д. Степанов, О.Ф. Шлёнский и др. // Пластические массы, 1974.- №3.- С.61 – 62.

85. Липатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. / Ю.С.Липатов.- М.: Химия, 1977.- 304с.

86. Макаров В.Г. Исследование атмосферной и химической стойкости некоторых фенольных стеклопластиков применительно к условиям нефтехимических производств: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- М.: МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, 1972.-17с.

87. Макаров В.Г.Разрушение стеклопластиков в агрессивных средах / В.Г, Макаров, В.В. Зулин, М.Г. Ярцев // Пластические массы.- 1971.-№8.- С.49-51.

88. Малинин Н.М. Прикладная теория пластичности и ползучести./ Н.М.Малинин .- М.: Машиностроение, 1968.- 400с.

89. Малкин А.Я. Методы измерения механических свойств полимеров./ А.Я. Малкин, А.А. Аскадский, В.В. Коврига./ М.: Химия, 1978.- 336с.

90. Масленников К.И. Химические волокна: Словарь-справочник. К.И. Масленников.- М.: Химия, 1973.-189с.
91. Машков Ю.К. Динамика процесса трения в металлополимерных трибосистемах // Долговечность трущихся деталей машин./ Ю.К. Машков, А.И. Блесман.- Вып.4.- М.: Машиностроение, 1990.-С.244-253.
92. Металлополимерные материалы и изделия / В.А.Белый, М.И. Егренок, Л.С.Корецкий и др. Под ред. В.А.Белого.- М.: Химия, 1979.- 312с.
93. Мирзоев Р.Г. Пластмассовые детали машин и приборов. Р.Г. Мирзоев.-М.; Л.: Машиностроение, 1971.-364с.
94. Мустафаев В.А. Холодное течение и плавление пластиков при тяжелых режимах трения./ В.А. Мустафаев, Ю.Я. Подольский, В.В. Виноградов // Механика полимеров.- 1965.-№5.-С.813-818.
95. Мэнсон Дж. Полимерные смеси и композиты. Дж. Мэнсон, Л. Сперлинг / Пер. с англ. под ред. Ю.К. Годовского.- М.: Химия, 1979.-439с.
96. Мюллер П. Таблицы математической статистики./ П.Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм./ М.: Финансы и статистика, 1982.- 272с.
97. Петрова А.П. Термостойкие клеи. А.П. Петрова.- М.: Химия, 1977.- 200с.
98. Петрова А.П. Закономерности миграции низкомолекулярных веществ из полимерных пластиков в жидкие среды./ А.П. Петрова. // Пластические массы, 1976.- №12.- С.34 – 35.
99. . Писаренко Г.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Г.С. Писаренко., Н.С. Можаровский./ Киев: Наукова думка, 1983.- 492с.
100. Погосян А.К. Трение и износ наполненных полимерных материалов. / А.К.Погосян.- М.: Наука, 1977.- 138с.
101. Попова М.В. Влияние диффузии жидкости на жёсткость образцов полиформальдегида при изгибе / М.В.Попова, Р.Д.Степанов, О.Ф.Шлёнский // Механика полимеров, 1974.- №6.- С.1124 – 1127.
102. Применение антифрикционных органоволокнитов в

направляющих / Г.П.Барчан, В.А.Кохановский, К.В.Осипов и др. // Трение и износ в машинах: Тез.докл. Всесоюз. науч. техн. конф.- Челябинск: УДНТП, 1979.-С.67-68.

103. Производство и применение термо- и жаростойких волокон в СССР и зарубежом: Сер. Обзоры по отдельным производствам химической промышленности.- М.: НИИТЭХИМ, 1972.-Вып.19.-83с.

104. Промышленные полимерные композиционные материалы / М.Ричардсон, Д.Филипс, В.Харрис и др. Под ред. М.Ричардсона.- М.: Химия, 1980.-472с.

105. Пружанский Л.Ю. Исследование методов испытаний на изнашивание. Л.Ю. Пружанский .-М.: Наука, 1978.-112с.

106. Работнов Ю.М.Механика деформируемого твердого тела. Ю.М. Работнов.- М.: Наука, 1979.-744с.

107. Ржаницин А.Р. Теория ползучести. А.Р. Ржаницин.- М.: Стройиздат, 1968.-416с.

108. Рузавин Г.И. Методы научного исследования. - Г.И.Рузавин.- М.: Мысль, 1974.-237с.

109. Рядченко Ю.В. Технологические деформации подшипниковой втулки. Ю.В. Рядченко, М.А. Мукутадзе. Сб. науч. тр. Межд. науч.-практ. конф. «Научные исследования и их практическое применение. Системное состояние и пути развития». / Одесса: НИИ ПКТИ Морфлота Украины.- 1-15.10.2005.- С.21-22.

110. Сборник технических условий на клеящие материалы. Сост. М.И.Смирнова. Под ред. Д.А. КардвшоваЛ.: Химия,1975 .- 464с.

111. Свойства химических волокон и методы их определения / Э.А. Немченко, Н.А.Новиков, С.А.Новикова и др. - М.: Химия, 1973.-215с.

112. Сигал М.Б., Кознорова Т.Н. Синтетические волокна из дисперсий полимеров. М.Б. Сигал, Т.Н. Кознорова.- М.: Химия, 1972.-125с.

113. Синатрев А.Н. К механизму фрикционного переноса и самосмазывания ПТФЭ. А.Н. Синатров, В.А. Смуругов, В.Г. Савкин. //

Трение и износ.-1991.-Т.12.-№6. С.1023-1027.

114. Синяков Г.И. Исследование трения и изнашивания смазываемых поверхностей с системой микроканалов. 05.02.04.- дис. канд. техн. наук.- Донецк: 1979.- 166с.

115. Ситамов С. Влияние жидких сред и вида напряжённого состояния полимеров на их прочность и долговечность./ С.Ситамов, А.И.Хукматов // Пластические массы, 1986. - №9 .- С.25 – 27.

116. Снеговский Ф.П. Повышение работоспособности поршневых пар насосов.- Ф.П. Снеговский, Г.И. Синяков // Проблемы трения и изнашивания, 1977.- №12.- С.19-22.

117. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента /А.А. Спиридонов, Н.Г. Васильев .-Свердловск: Изд-во УПИ, 1985.-149с.

118. Стерлинг Л. Взаимопроникающие полимерные сетки и аналогичные материалы. Л. Стерлинг / Пер. с англ.- М.: Мир, 1984.-327с.

120. Технология изготовления клееных конструкций. Под ред. М. Боднара.- М.: Мир, 1975.-445с.

121. Товарные нефтепродукты, свойства и применение. Справочник; под ред. В.М. Школьников.-М: Химия, 1978.-472с.

122. Триботехнические возможности крупногабаритных подшипников с покрытием на основе волокон ПТФЭ / А.С.Кужаров, В.Г. Рядченко, В.О.Гречко и др. // Трение и износ.- 1986.-Т.7.-№1.-С.123-128.

123. ТУ 062-53-92 / 2 -85. Подшипники радиальные с трикотажным рукавом.- Новочеркасск, ОКТБ “Орион”, 1985.-21с.

124. Тынный А.Н. Прочность и разрушение полимеров при воздействии жидких сред. А.Н. Тынный.- Киев: Наукова думка, 1975.-206с.

125. Уржумцев Ю.С. Прогностика деформативности полимерных материалов. Ю.С. Уржумцев, Р.Д. Максимов.- Рига: Зинатне, 1975.-416с.

126. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. Дж. Ферри.- М.: И.Л., 1963.- 535с.

127. .Фрейдин А.С. Прочность и долговечность клеевых соединений.

А.С. Фрейдин.- М.: Химия, 1981.-272с.

128. Фрейдин А.С. Свойства и расчет адгезионных соединений. А.С. Фрейдин, Р.А. Турусов.- М.: Химия, 1990.-255с.

129. Фрикционный перенос полимеров и его связь с молекулярными процессами в зоне контакта / В.А.Смуругов, В.В.Биран, А.Б.Купчинов и др. // Трение и износ.- 1990.-Т.11.-№3.-С.521-525.

130. Фторопласты: Каталог.- Черкассы: Изд-во НИИТЭХИМ, 1983.- 210с.

131. Фторполимеры. Под ред. Л.А. Уоло / Пер. с англ., под ред. И.Л. Кнунянца.- М.: Мир, 1975.-448с.

132. Фурне Ф. Синтетические волокна. Ф. Фурне.- М.: Химия, 1970.- 687с.

133. Хохлов А.А. Свойства поликарбоната к воздействию агрессивных сред. А.А. Хохлов, Н.Н. Павлов, В.А. Саде.// Пластические массы, 1976.- №10.- С.26 – 27.

134. Черский И.Н. Прогнозирование долговечности и оптимизация подшипников и уплотнений из полимерных и композитных материалов / И.Н.Черский, В.А.Моров // Механика полимеров, 1980.-№6.-С1094-1102.

135. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства.- Ю. Г. Шнейдер. Л.: Машиностроение, 1972 .- 240 с.

136. Ясь Д.С. и др. Испытания на трение и износ. / Д.С .Ясь, В.Б. Подмоков, Н.С. Дяденко.- Киев: Техника, 1971.-138с.

137. Aeronautical catalogue. Les applications du roulement. / Aeronautical Division, ADR.-Ivry-sur-Seine, 1976.-133р.

138. Allaire P.E., Flack R.D. Design of Journal Bearings for Rotating Machinery // Proc. of the 10th Turbomachinery Simposium, Texas A & M University, 1980, pp. 25-45.

139. Arkles B., Geracaris S., Goudhue R. Wear Characteristics of Fluoropolymer Composites.// Adv. Polym.Frict. and Wear. Part 2.-N.Y.-Lond., 1974. -

P.663-688.

140. Craig W.D., Initial Wear of PTFE lined bearings. // Lubrication Engineering.- 1966.-v.22.-'15.-P.160.

141. Die wartungsfreie Gelenklager mit den zwei roten Schutzringen / Katalog HUNGER DFE.- Sciten, 1981.-November.-46s.

142. Eling R., van Ostayen R., Rixen D. Dynamics of Rotors on Hydrodynamic Bearings // Proc. on COMSOL Conference, Rotterdam, Oct, 24-25, 2013, 7 p.

143. Gleitlager aus Fasermaterial. // Production.- 1971.-Bd.10.-№5.-S.65-68.

144. Hollander A.E., Lancaster J.K. An application of topographical analysis to the wear of polymers. // Wear.- 1973.-'25.-P.155-170.

145. Ina Elges. Gelenklager, Gelenkkopfe. Maßkatalog K227D./ Ausgabe Juli, 1980.-103s.

146. Lancaster J.K. On the initial stages of wear of dry-bearing composites. // Running - in Progress in Tribology: 8-th Leed Lyon Symposium, 8-11 September, 1981.-Paper11., 1982.-P.33-46.

147. Lancaster J.K. Third body formation and the wear of PTFE fibrbased dry bearings./ J.K. Lancaster, P.Play, M.Godet e.a.// Trans. ASME, Lubric. Technol., 1980.- Vol.102.- N2.- P.236-246.

148. Lhymn Chang. Microscopy Study of the frictional wear of polytetrafluorethylene. // Wear.- 1986.-v.107.-'2.-P.95-105.

149. Pat. 4.108.381 USA. Rocket nozzle bearing seal / P.C. Sottosanti ,W.H. Baker, W.T.Dolling (USA) Thiokol Corporation (USA).- '803487; filed. 06.06.77; publ. 22.08.78; HKU 308-238.-5p.

150. San Andres L. Modern Lubrication Theory// Texas A&M University, 2010/- 240p.

151. The plain bearing: Handbook / Lear-Siegler Inc. - Santa Ana, California, 1976.-39p.

152. Uetz H., Hakenjos V. Gleitreibunguntersuchungen mit polytetrafluorethylen bei hin-und hergehender Bewegung // Bautechnik.- 1967.-Bd.44.-№5.-

S.159-166.

153. Welz H.U. Eigenschaften von PTFE-kompositionen und deren Anwendungsmöglichkeiten beim verschleißschutz. // Schmierungstechnik.-1982.-Bd.13.-S.179-182.

154. Zeidan F,Y., Herbage B.S. Fluid film fundamentals and failure analysis // Proc. of the 28th Turbomachinery Symposium, Texas A & M University, 1999, pp. 161-186

Приложение



Ростовский вертолетный
производственный комплекс
Открытое акционерное общество
«РОСТВЕРТОЛ»

ул. Новаторов, 5, г. Ростов-на-Дону, Россия, 344038
Тел.: (863) 297-72-21, 297-78-77
Факс: (863) 293-00-39, 245-05-35
e-mail: rostvertol@rostvert.ru
ОКПО 07515014, ОГРН 1026102899228
ИНН/КПП 6161021690/997850001

№

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель Управляющего директора,
доктор технических наук

М.Б. Флек
2014г.



АКТ

промышленных испытаний подшипника скольжения

Настоящий акт составлен по результатам промышленных испытаний специальных радиально-упорных подшипников скольжения с полимерным самосмазывающимся покрытием, разработанных коллективом специалистов Донского государственного технического университета (ДГТУ) и Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), в период с 6 октября по 13 декабря на Лопастном заводе ОАО «Роствертол».

Основание для проведения испытаний – письмо проректора ДГТУ по НИР и ИД от 18.03.2014.

Цель испытаний – установить ресурс подшипников скольжения с полимерным композиционным покрытием и специальным профилем опорной поверхности в редукторе привода вращения заготовки лонжерона на станке для внутреннего ленточного шлифования.

Объект испытаний – экспериментальные радиально - упорные подшипники скольжения с самосмазывающимся полимерным композиционным покрытием и специальным профилем для возможности работы в условиях граничного трения при самосмазывании и жидкого гидродинамического режима (конструкция и технология изготовления В.А. Кохановского, Э.А. Камеровой). Подшипники устанавливались в редукторе первой ступени привода вращения заготовки лонжерона на специальном станке для внутреннего ленточного шлифования. Установочные размеры опытных подшипников полностью соответствуют штатным подшипникам.

Периодичность регламентного технического обслуживания редуктора (мощность 1,5кВт, передаточное отношение 12) не реже 1 раза в 2 месяца, Регламентные работы включают контроль состояния, замену подшипников и смазки,

Методика испытаний. Опытные подшипники были установлены на два редуктора. Испытания опытных подшипников проводились при работе станка в соответствии с директивным технологическим процессом. Общая трудоемкость шлифования внутренней поверхности одного лонжерона с учетом подготовительно-заключительного времени - 8 часов, включая технологическое время на обработку одного лонжерона - 6 часов. Прогноз истощения ресурса опытных подшипников производился по износу полимерного композиционного покрытия больше 45% толщины, т.е. 0,2 мм на любом из трех диаметров вдоль опорной поверхности. Измерения производились перед установкой подшипника в редуктор и после его контрольной разборки.

Результаты испытаний. Исследование состояния экспериментальных подшипников после контрольной разборки при выполнении штатных регламентных работ производилось в условиях ЦЗЛ. Результаты исследования показали полное отсутствие отслоений покрытия и следов нарушения его поверхности. Износостойкость подшипников по сравнению с штатными повысилась в среднем на 25-27%. Испытания продолжаются.

От ДГТУ

От ОАО «Роствертол»

Д.т.н., проф.

Начальник НИО

В.А. Кохановский

Ю.Б.Рубцов

Инженер

Ведущий специалист ЦЗЛ

Э.А. Камерова

Л.В.Чинчян