

На правах рукописи

НАХИМОВИЧ ЕЖИ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗНАШИВАНИЯ И
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ОПОР КАЧЕНИЯ**

Специальность 05.02.04 - Трение и износ в машинах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург, 2002

Работа выполнена в Белостокском политехническом институте (Польша)

Научный консультант – заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Погодаев Леонгард Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
Федин Юрий Александрович

доктор технических наук, профессор
Климов Евгений Николаевич

доктор технических наук
Лысенков Павел Михайлович

Ведущая организация – институт проблем машиноведения РАН

Защита состоится «15» октября 2002 г. в 14 час на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, лабораторно-аудиторный корпус, кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением».

С диссертационной работой можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета д.т.н., профессор

В.Н.Востров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Материальной основой стабильного развития общества является высококачественная техника (механизмы, машины, агрегаты, технологическое оборудование, автоматические линии и т.п.), создаваемая для осуществления процессов производства и удовлетворения непродовольственных потребностей людей.

Развитие современных машин направлено на повышение их производительности, надежности, конкурентоспособности и эффективности, снижение материалоемкости, энергопотребления, вредного воздействия на человека и природу.

Как показывает мировой опыт, достижение заданного уровня большинства машин и механизмов невозможно без обеспечения необходимых эксплуатационных свойств узлов трения. Это требует проведения теоретических изысканий и большого объема всесоронних исследований триботехнических показателей материалов и подвижных сопряжений.

Актуальность проблемы повышения надёжности различных машин и механизмов с течением времени не только не снижается, а наоборот неуклонно возрастает. На работы по восстановлению изношенных деталей, обеспечению работоспособности подвижных соединений в тяжёлых условиях эксплуатации, снижению интенсивности различных видов изнашивания оборудования в технически развитых странах ежегодно расходуется до 4...5% национального дохода.

Такое положение связано не только с ужесточением режимов эксплуатации различного оборудования и машин, но также с отсутствием во многих случаях расчётных методов обоснованного выбора износостойких конструкционных и смазочных материалов, защитных покрытий и наплавов, а также способов химико-термической обработки по достаточно объективным критериям для конкретных условий работы трибосопряжений; эффективных методик оптимизации режимов эксплуатации оборудования, обеспечивающих наибольшую долговечность ведущих деталей.

Практика эксплуатации машин показывает, что реализация любой конструкторской идеи без учета трибологических требований стало основным сдерживающим фактором на пути продления ресурса оборудования и его безотказной эффективной работы.

В работе приведены результаты моделирования процессов изнашивания трибосопряжения «вал-игольчатый подшипник», при изменении зазоров в сопряжении, наплаваемых на вал материалов, а также смазочных материалов и присадок при трении качения с проскальзыванием.

Во всех перечисленных выше случаях оказалось возможным получить удовлетворительные модели ведущих процессов, определяющих долговечность деталей рассматриваемого трибосопряжения с учетом масштабных уровней внешнего нагружения материалов.

Проведенные автором эксперименты позволяют, если не исключить, то значительно сократить объем испытаний на изнашивание при выборе износостойких материалов трибосопряжений «вал-игольчатый подшипник». Работы в этой области будут продвигаться более успешно, если развивать аналитические методы достоверной оценки износа, способной дать дополнительную информацию для решения этой сложной проблемы.

Цель работы. Целью настоящих исследований является повышение износостойкости и прогнозирование долговечности наплавленных различными материалами валов, работающих в паре с игольчатым подшипником в условиях применения смазочных материалов с различными присадками.

Для достижения поставленной цели последовательно решались следующие задачи:

- Создание методик, разработка и изготовление стенда для экспериментального исследования пары трения «вал-игольчатый подшипник», установления закономерностей процессов изнашивания деталей опор качения и построения моделей изнашивания.
- Выявление роли конструктивных, материаловедческих и эксплуатационных факторов на износостойкость деталей опор качения.
- Разработка моделей изнашивания деталей опор качения и установление условия перехода от нормального изнашивания вала к развитой повреждаемости.
- Количественная оценка изменения долговечности деталей в зависимости от зазора в сопряжении, вида наплавленного на вал материала и смазочной композиции.

- Разработка критерия работоспособности жидких смазочных материалов в трибосопряжении и основ методики оценки и контроля их качества.
- Разработка рекомендаций по повышению износостойкости и долговечности опор качения коробок перемены передач тракторов.

Методы решения поставленных задач. Целевая установка диссертации определила алгоритмическую последовательность выполнения исследований и реализована по следующей схеме: основные закономерности изнашивания → частные структурно-энергетические модели изнашивания → методы прогнозирования скорости изнашивания и долговечности деталей; способы оптимизации условий эксплуатации опор качения.

Поставленные задачи решались методами теоретических и экспериментальных исследований процесса трения качения с проскальзыванием игольчатых подшипников; проверка результатов производилась в реальных условиях на конкретных изделиях.

Состав экспериментальных исследований определялся из анализа условий удовлетворения технологическим и эксплуатационным требованиям, предъявляемым к деталям трибосопряжения «вал-игольчатый подшипник», работающего в конкретных условиях нагружения. Большой объем и разнохарактерность экспериментальных работ потребовали применения ряда известных, а также разработки новых методик и методов, которые изложены в работе.

В основу обработки и анализа результатов экспериментов положена следующая схема: изучение статистических характеристик распределения экспериментальных данных, регрессионный анализ, выбор математической формы связи для факторной модели процесса, качественный анализ экспериментальных зависимостей. Математическая обработка результатов однофакторных экспериментов при исследовании износостойкости материалов, наплавов и деталей проводилась на ПЭВМ.

Личное участие автора состоит в получении научных результатов, отраженных в опубликованных работах (в том числе и в соавторстве); разработке и изготовлении стенда для экспериментального исследования пары трения «вал-игольчатый подшипник» и методик исследования; изучении закономерностей

стей изнашивания и разработке моделей для прогнозирования долговечности и износостойкости деталей опор качения; разработке критерия работоспособности жидких смазочных материалов в трибосопряжении; разработке практических методов повышения ресурса трибосопряжения «вал-игольчатый подшипник».

Достоверность научных положений, рекомендаций и выводов, содержащихся в диссертации, подтверждается:

- корректным использованием фундаментальных законов природы; известных теорий и концепций изнашивания материалов и деталей трибосопряжений; современных компьютерных средств обработки экспериментальных данных; проверенных технических средств и приборов;
- сопоставлением выполненных исследований с имеющимися результатами в этой области;
- представительностью использованного статистического материала по износу деталей опор качения;
- удовлетворительным совпадением теоретических и экспериментальных данных.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- изучены закономерности влияния конструктивных факторов (радиальный зазор в подшипнике, шероховатость сопрягаемых поверхностей), материаловедческих факторов (материалы наплавки валов, микротвердость поверхностных слоев) и смазочных композиций (масел и присадок) на процесс изнашивания деталей пар трения «вал-игольчатый подшипник»;
- разработаны модели изнашивания деталей трибосопряжения «вал-игольчатый подшипник», учитывающие параметры нагружения, исходный зазор в сопряжении, материал поверхности трения и условия смазки;
- установлено наличие трех основных уровней изнашивания (микро-, мезо- и макро) вала, игловок и опорной поверхности игольчатых подшипников и условие перехода от нормального изнашивания вала к развитой повреждаемости;
- разработана методика экспериментальных исследований и принцип действия стенда, позволяющего воспроизвести все основные виды изнашивания опор качения, встречающиеся в условиях эксплуатации различных тех-

нических средств: от малоинтенсивного механо-химического (окислительного) изнашивания до процессов разрушения материалов при фреттинге и поверхностной усталости, протекающих с весьма высокой интенсивностью;

- установлена возможность количественной оценки долговечности деталей опор качения по данным поверхностной усталости материалов, полученным из анализа их испытаний на изнашивание;

- дано теоретическое обоснование процесса и установлены условия деструкции смазочного слоя в подшипнике и перехода к фреттингу;

- дано обоснование метода прогнозирования работоспособности смазочных материалов в сопряжении по акустическому сопротивлению.

На защиту выносятся:

- основные закономерности изнашивания деталей трибосопряжения «вал-игольчатый подшипник» при испытании на специальном стенде в режиме качения с проскальзыванием с учетом зазора в сопряжении и физико-механических свойств материалов деталей в условиях применения смазочных материалов с различными присадками;

- углубленный анализ критериев повреждаемости и износостойкости деталей исследуемого трибосопряжения в связи с многомасштабностью внешнего разрушения, физико-механическими свойствами материалов деталей трибосопряжения и применяемых смазочных композиций;

- модели изнашивания материалов деталей опор качения и условие перехода от нормального изнашивания вала к развитой повреждаемости;

- методика экспериментальных исследований и принцип действия стенда, позволяющего воспроизвести все основные виды изнашивания опор качения;

- гипотеза о возможности количественной оценки долговечности трибосопряжения «вал-игольчатый подшипник» по данным поверхностной усталости материалов, полученным из анализа их испытаний на изнашивание в зависимости от смазочного материала;

- критерии работоспособности жидких смазочных материалов в трибосопряжении и обоснование метода оценки их долговечности по акустическому сопротивлению.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- изготовлен стенд для проведения исследований закономерностей изнашивания опор качения различных технических средств;
 - созданы основы проектирования износостойких пар трения «вал-игольчатый подшипник» с учетом конструктивных параметров, конструкционных и смазочных материалов.
 - сокращается время и снижаются расходы на проведение дорогостоящих экспериментальных исследований износостойкости и долговечности деталей опор качения;
 - появляется возможность дать количественную оценку долговечности трибосопряжения «вал-игольчатый подшипник» при изменении зазора в сопряжении, параметров качества изготовленных деталей, смазочных композиций и обосновать основные требования к материалам деталей сопряжения;
- появляется возможность использовать ЭВМ для расчета долговечности трибосопряжений «вал-игольчатый подшипник».

Реализация результатов работы. Результаты исследований поведения конструкционных материалов, наплавов, смазочных материалов и композиций, трибосопряжений «вал-игольчатый подшипник» реализованы на ряде предприятий Польши, а также включены в отдельные разделы кафедральных лекционных курсов по основам конструирования машин и деталям машин Белостокского политехнического института, применены в студенческих дипломных проектах; по материалам диссертации опубликовано 29 печатных работ, получено 4 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Результаты диссертационной работы Нахомовича Е. целесообразно использовать в условиях мелкосерийного, серийного и массового производства на предприятиях автомобиле- и тракторостроительной, станкостроительной, подъемно-транспортной, приборостроительной промышленности России и Польши, например, АО «Редуктор», АО «Кировский завод», АО «Арсенал» и др.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на Международных, Польских и расширенных вузовских научно-технических конференциях и школах: на III Международной конференции Белостокского политехнического института и Минского политехнического института (г.Белосток, 1974); на заседаниях XIV, XV, XVI, XVIII, XIX

и XXI осенних трибологических школ Польской Академии наук (г. Новы Сонч, 1985; г.Поляньчик, 1987; г.г.Пила-Тучно,1988; г.Колобжег,1992; г.г. Ченстохова-Кокотек, 1994; г.Лудь-Артурувек,1996); на конференции УСХА «Промышленные методы сельскохозяйственного производства» (г.Киев, 1987); на Трибологической конференции «EUROTRIB» (Будапешт, 1991); на трибологической конференции в Братиславе (Чехословакия, 1991); на научно-технической конференции Тернопольского политехнического института (Тернополь,Украина, 1992); на научно-технической конференции Минской Политехнической академии (Минск, 1992); на III и V Международных симпозиумах украинских инженеров-механиков (Львов, 1997 и 1999); на I и II Международных Симпозиумах по транспортной триботехнике (СПб, 2001 и 2002); на конференции СПбГТУ «Технология ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций» (СПб, 2002) и других.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 29 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация представлена в форме рукописи, состоящей из введения, шести глав, основных выводов, списка использованных источников из 268 наименований и приложений. Работа изложена на 375 страницах основного машинописного текста, включающего 98 рисунков и 23 таблицы.

Автор считает необходимым отметить, что оформлению результатов теоретических и экспериментальных исследований, выполненных им на протяжении 1972...2002 г.г., в том числе и в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве между Белостокским политехническим институтом и Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом, как диссертации во многом способствовали советы и критические замечания д.т.н., проф. СПбГПУ С.Г.Чулкина и выражает ему искреннюю благодарность.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности выбранной темы исследований.

В первой главе дан краткий анализ современных представлений и подходов при оценке износостойкости и долговечности трибосопряжений. Показаны преимущества моделирования процессов изнашивания трибосопряжений и прогнозирования их долговечности на основе энергетических подходов. Дан анализ особенностей изнашивания и повышения долговечности деталей пар трения качения с проскальзыванием, а также пути повышения их ресурса.

Энергетические модели (критерии) с различной полнотой и успехом использовали при описании различных процессов трения и изнашивания: Л.И.Бершадский, Э.Д.Браун, Г.Виттвер, Г.Греггер, Ю.Н.Дроздов, Б.И.Костецкий, И.Ларсен-Бадзе, Л.И.Погодаев, В.С.Попов, Э.Рабинович, Дж.С.Спринжер, А.Тирувенгадам, В.В. и С.В.Федоровы, Г.Фляйшер, А.В.Чичинадзе, В.В.Шульц и многие другие исследователи.

Энергетические модели, учитывающие обычно сразу несколько параметров внешнего нагружения и характеристик материалов, позволяют во многих случаях достаточно правдоподобно отразить влияние процессов в зоне трибоконтакта на поведение изнашиваемых материалов.

Особенностью структурно-энергетического подхода при исследовании изнашивания трибосопряжений, впервые предложенного проф. Л.И. Погодаевым и развитого в работах его учеников и последователей: В.Б.Хмелевской, Ю.Н.Цветкова, Н.Ф., Голубева, С.Г.Чулкина и др., является использование потоковых характеристик,

В настоящее время преобладает мнение о том, что изнашивание материалов происходит в результате суммирования повреждений под воздействием спектра импульсов различной интенсивности. Очевидно, что интенсивность внешнего воздействия будет определяться средним значением энергии импульсов, их частотой и продолжительностью, а также масштабным фактором.

В качестве критериев износостойкости материалов представляется возможным использовать как физико-механические характеристики (критическую скорость, критическое давление, удельную энергоемкость, критическую плотность потока мощности деформации и др.), так и теплофизические (скрытую теплоту плавления, плотность потока энтропии, критическую плотность тепловой энергии, энергию активации элементарных атомно-молекулярных перегруппировок и др.). На каждом масштабном уровне внешнего нагружения

энергия активации ведущих процессов повреждаемости коррелирует с соответствующей внутренней (запасенной) энергией $E_{уд}^*$.

В рассматриваемой работе по соображениям методического характера подробному исследованию и модернизации подвергнут механический критерий износостойкости проф. Погодаева Л.И. - $W_{кр}^*$.

Особо следует подчеркнуть необходимость учета многомасштабности разрушения материалов при различных видах изнашивания, подчиняющихся синергетическим особенностям возникающих диссипативных структур и закономерностям фрактальной механики разрушения.

Проведенный анализ изнашивания трибосопряжения «вал-игольчатый подшипник» и методов повышения его ресурса методами ХТО, наплавки и введения присадок в смазочный материал в различных условиях контактного взаимодействия показал, что их особенности должны быть учтены при разработке конкретных моделей изнашивания.

Вторая глава посвящена методике проведения исследований процессов изнашивания опор качения при использовании различных конструкционных и наплавочных материалов, смазочных материалов и композиций.

Для проведения исследований использовались следующие экспериментальные установки и технологическое оборудование.

Механические свойства поверхностных слоев, упрочненных различными наплавками, исследовались на интерференционном глубиномере, разработанном Е.С. Берковичем и сотрудниками ИМАШ.

Механические характеристики определялись как для исходного состояния поверхностных слоев, так и после нормального механохимического процесса трения и изнашивания.

Для качественного исследования структурного состояния поверхностных слоев трущихся материалов использовался металлографический анализ (оптическая, электронная микроскопия).

Для исследования процессов трения и изнашивания трущихся деталей машин в условиях, отвечающих эксплуатационным, путем их воспроизведения в лабораторных условиях, был спроектирован и изготовлен испытательный стенд (рис.1).

Корпус установки I прикреплен к основанию и закрыт сверху плитой 2

(рис.1а). В корпус вмонтированы игольчатые подшипники II и 12, в которых вращается вал коробки передач трактора 3 с соединительной гильзой 4.

Исследуемым узлом трения является игольчатый подшипник II и шейка вала 15. Привод вала 3 состоит из электродвигателя 8 мощностью 3,5 кВт, ременной передачи 7 и зубчатой передачи 6. Полное передаточное число между валом электродвигателя и валом 3 коробки передач составляет 1,42. Это позволяет получить максимальную скорость вращения подшипников, равную 2000 мин⁻¹. На валу 3 смонтирована передвижная соединительная гильза 4, уменьшающая стрелу прогиба при максимальной нагрузке 15000 Н до 0,105 мм. С редукционной гильзой шарнирно соединен сервомотор 5, входящий в систему нагрузки установки. В зависимости от положения сервомотора нагружения относительно подшипника II можно регулировать распределение нагрузки на подшипники II и 12. Нагрузка, независимо от перемещения сервомотора, регулируется изменением положения шпонок 9, связанных с сервомотором. Перемещение шпонок осуществляется тяговым болтом 13. Измерение температуры поверхности исследуемого узла трения производится термопарой 14, соединенной с датчиком температуры. Измерение коэффициента трения производится рычажным устройством. С исследуемым валом соединен счетчик оборотов, позволяющий определить путь трения. Смазка трибосопряжения производится маслом, залитым в корпус установки

Температура поверхности шейки вала измерялась при помощи термоэлемента *NiCr - Ni* и милливольтметра (см.рис.1б).

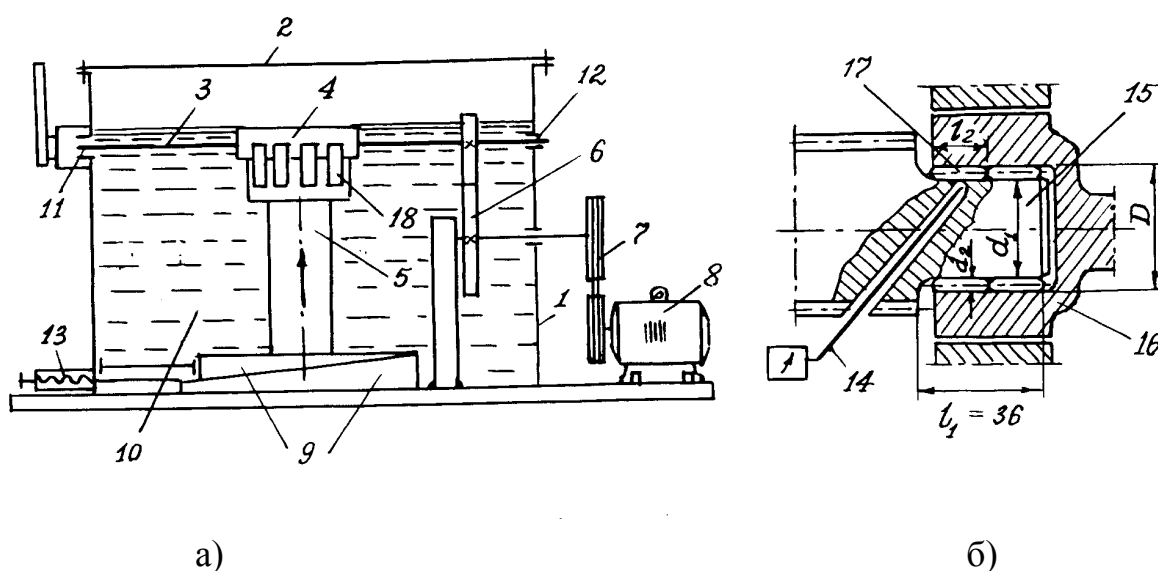


Рис.1. Кинематическая схема испытательного стенда (а) и узел трения с системой измерения температуры (б)

Нагрузка измерялась при помощи тензометрических датчиков, наклеенных на шпонку, вмонтированную в плиту сервомотора, т.е. определялась статическая нагрузка, вызванная перемещением шпонок. В измерениях использовались тензометрические датчики в системе полного моста, тензометрический мост и шлейфовый осциллограф.

Разработанная конструкция стенда (рис.1а) и выбранные режимы испытаний позволяли воспроизвести при работе трибосопряжений различные виды изнашивания - от малоинтенсивного механохимического (окислительного) до фреттинг-коррозии и усталостного изнашивания, протекающих с весьма высокой интенсивностью, т.е. воспроизвести все виды повреждений опор качения, встречающиеся в условиях их эксплуатации в машинах и механизмах. Конструкция стенда обеспечивала легкий доступ к трибосопряжениям: на поверхностях трения в процессе испытаний можно оперативно определять износ, температуру, микротвердость, шероховатость, характер изнашивания и вид образующихся вторичных структур. Переход от одного вида изнашивания к другому при соответствующем изменении нагружения подшипника достигался изменением исходного зазора между контактирующими деталями: телами качения и сменными валами, рабочая поверхность которых подвергалась различным видам упрочнения.

По мере увеличения исходного зазора в пределах от 0,065 мм до 0,5 мм трибосистема имела возможность самонастраиваться, а поверхности трения структурно приспособлялись в изменяющихся условиях внешнего нагружения. Таким образом, воспроизводилась работа подшипников в натуральных условиях по мере изнашивания сопряженных деталей. При этом первоначальное контактное давление и скорость скольжения на стенде не изменяли, поэтому ужесточение условий нагружения при увеличении исходного зазора происходило вследствие возникновения автоколебаний в трибосистеме и соответствующих дополнительных динамических контактных давлений.

В третьей главе приведены результаты моделирования изнашивания опор трения с энергетических позиций.

При моделировании на стенде процесса изнашивания трибосопряжения «вал-игольчатый подшипник» установлены кинематические зависимости и

закономерности его изнашивания в натуральных условиях при различных зазорах между сопряженными деталями (рис.2).

Определены условия перехода от окислительного изнашивания (ОИ) к фреттинг-процессам разрушения поверхности (ФИ), представляющие собой наибольший научный и практический интерес, и выбрана для дальнейшего анализа взаимосвязь критических параметров ($U_{кр}$ и $h_3^{кр}$) с условиями нагружения, смазывания и комплексом физико-механических свойств изнашиваемых материалов.

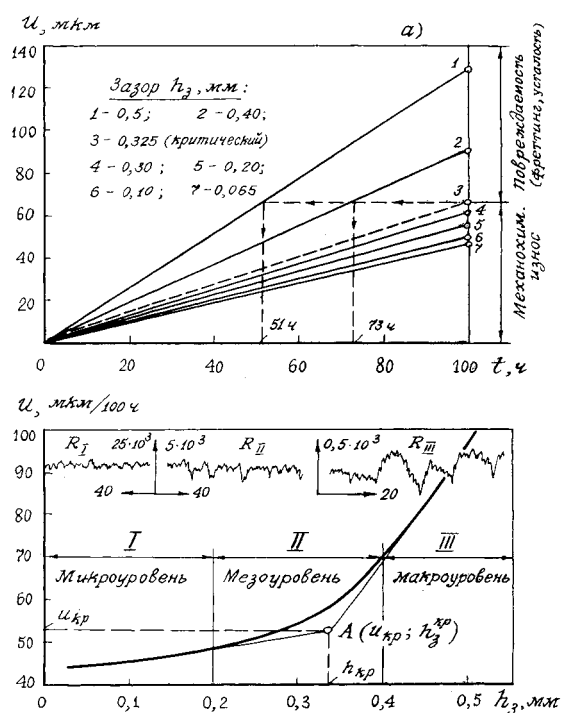


Рис.2. Кинематические зависимости изнашивания игольчатого подшипника в натуральных условиях при различных зазорах между сопряженными деталями (а); износ шейки вала в подшипнике в зависимости от исходного зазора при испытаниях на стенде (б); вал из стали 15ХГМ (цем., з.); ролики (иголки) – сталь ШХ15; $p = 9,5$ Мпа; $v_{ск} = 2,93$ м/с; смазка: масло SAE 85W/90 с присадкой ПЗ; R_{I-III} - шероховатость поверхности износа.

Установлено, что переход от ОИ к ФИ сопровождается ступенчатым увеличением $v_{изн}$ деталей (рис.3).

Анализ морфологии продуктов изнашивания позволил выявить три основных уровня изнашивания игольчатых подшипников (микро-, мезо- и макроуровень) в зависимости от исходного зазора в трибосопряжении вал (внутреннее кольцо)-тела качения (см.рис.2б). Профилограммы рельефа поверхностей трения, соответствующие трем масштабным уровням изнашивания косвенно подтверждают существование значительных различий в механизмах атомно-молекулярных перегруппировок и необратимых структурных изменений, определяющих в итоге интенсивность процессов изнашивания материалов на различных масштабных уровнях. Полученные эмпирические зависимости (1-3)

между относительной износостойкостью и относительной шероховатостью поверхности позволяют оценить влияние рельефа поверхности на интенсивность изнашивания на каждом из трех масштабных уровней изнашивания:

$$(v_{изн})_{отн I-II} \cong R_{отн I-II}^{0.15} \quad (1) \quad (v_{изн})_{отн I-III} \cong R_{отн I-III}^{0.41} \quad (2)$$

$$(v_{изн})_{отн II-III} \cong (R_{отн II-III})^{0.5} \quad (3)$$

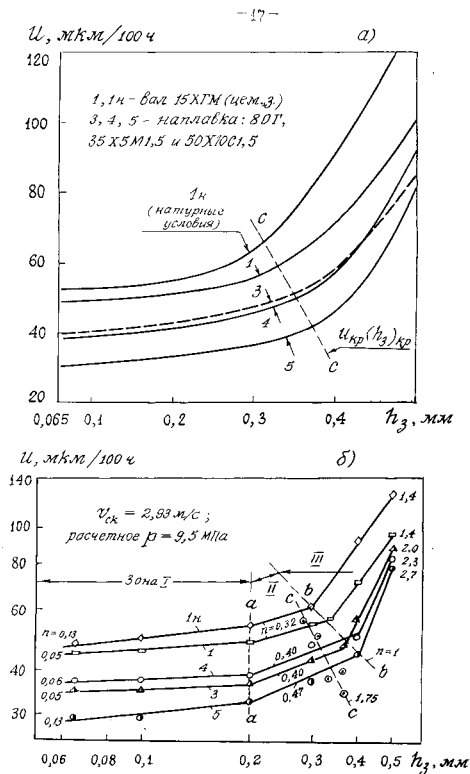


Рис.3. Зависимость износа шейки вала от исходного зазора в подшипнике: а – график $U(h_3)$ в осях с равномерными шкалами; б – то же в осях с логарифмическими шкалами. Смазка маслом 4 кл. вязкости с антифрикционной присадкой ПЗ

Взаимосвязанное дискретное изменение характеристик износостойкости материалов и шероховатости поверхностей трения является одним из основных признаков масштабных переходов. Так, например, данные, приведенные в строке 6 табл.1, указывают на практически одинаковое пятикратное изменение показателя степени n в уравнении $U(h_3)^n$ при переходе сначала с I уровня на II, а затем со II уровня на III.

Таким образом, установлено, что при оценке надежности опор качения необходимо учитывать особенности их изнашивания на различных масштабных уровнях внешнего нагружения.

При изменении исходного зазора в пределах от 0,065 до 0,5 мм износостойкость вала, наплавленного сплавом 50ХЮГС1,5 оказалась на 60% выше износостойкости цементованного вала (5 вариант табл.1). Две другие наплавки (вар. 3 и 4 табл.1) превзошли по износостойкости штатное трибосопряжение в

среднем только на 40%.

Проведенный анализ износостойкости трибосопряжений в связи с переходными процессами на мезоструктурном уровне позволил установить взаимосвязь критического зазора и износа от микротвердости изнашиваемых материалов: по мере ужесточения условий внешнего нагружения, происходящего при увеличении исходного зазора h_3 между валом и телами качения в игольчатых подшипниках, зависимость критических зазоров от микротвердости изнашиваемых материалов дискретно возрастает. При этом увеличение роли микротвердости при масштабных переходах характеризует показатель степени при H_μ , значение которого в среднем возрастает: от нуля при переходе I-II ($h_3 \leq 0,2$ мм) до 1,0 при I - III зазор изменяется при этом в пределах от 0,2 мм до 0,3...0,4 мм и до 1,5 при II-III ($h_3 \geq 0,3... 0,4$ мм). В свою очередь критический зазор $h_{3\text{ I-III}}$ согласно опытным данным существенно влияет на износ $U_{кр\text{ I-III}}$, так как при увеличении зазора износ уменьшается в соответствии со степенной зависимостью. Из полученных выражений вытекает важная квадратичная зависимость износа от микротвердости.

Результаты анализа поведения изнашиваемых материалов на различных масштабных уровнях изнашивания позволяют сделать вывод о целесообразности обеспечения в изнашиваемых материалах оптимального сочетания твердости и запаса пластичности, поскольку при ужесточении условий внешнего нагружения положительное влияние на износостойкость пластических свойств и наклепа циклически деформируемых объемов деталей возрастает, а значение повышенной твердости, как одного из основных противоизносных критериев, соответственно уменьшается.

Полученные в результате анализа эмпирические зависимости изнашивания материалов (4 и 5) характеризуют собой условия перехода от нормального окислительного изнашивания к развитой повреждаемости, близкой к предельной:

$$\frac{U_{\text{I-III}}}{U_{h_3=0.5\text{мм}}} = \frac{3,3 \cdot 10^3}{H_\mu} \quad (4) \quad \text{и} \quad \frac{U_{\text{I-III}}}{U_{h_3=0.5\text{мм}}} = \frac{25.4}{H_{\mu 0}^{0.45}} \quad (5)$$

Исследование влияния упругих и пластических свойств поверхностей трения на износостойкость материалов позволило выявить, что благоприятное влияние на износостойкость материалов оказывают повышенная энергоемкость

Таблица 1

Результаты испытаний игольчатых подшипников на износостойкость в условиях граничного трения на стенде со смазкой SAE 85W/90 при давлении $\rho = 9,5$ МПа и скорости $v = 2,92$ м/с. Трибосопряжение: вал (15ХГМ цем.) – иголки (ШХ15 з.); $t_{опыта} = 100$ ч.

№ п/п	Материал вала Смазочная композиция (СК)	Износ мкм/100ч Зазор $h_z^{кр}$, мм		Характеристики					
		СК: масло + присад- ка	Смазка маслом без при- садки	Энергоемкость		Микро- твер- дость Н, МПа* 10^{-1}	Пла- стич- ность $h_{пл}$	Упру- гость $h_{упр}$	Ползу- честь $h^*_{пз}$
				Структур- ная	Термиче- ская				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Вал – сталь 153ГМ цем.; Смазка: SAE 85W/90 без при- садки	60/ 0,325 Исп. в натуре	56/ 0,325	7,32	0,45	480	58,7	39,8	3,1 (1,5)
2	Вал – сталь 153ГМ цем.; Смазка: SAE 85W/90 + Асогох 88 (ПЗ)	55/ 0,335	–	7,80	0,49	480	58,7	39,8	3,1 (1,5)
3	Вал – наплавка DS – 82 (82Г; Cr, Ni, Cu=0,1...0,15%). СК: та же	41,5/ 0,36	47,5/ 0,32	10,0	0,75	600	53,4	45,8	3,2 (0,8)
4	Вал – наплавка DUR – 650 IG (35X5M1,5; W + V=0,5%). СК: та же	46,5/ 0,41	45,3/ 0,325	10,4	0,69	550	55,2	43,2	3,3 (1,6)
5	Вал – наплавка ПП – АН 140 (50X10ГС1,5). СК: та же	38,5/ 0,39	40/ 0,30	12,2	0,99	630	52,4	47,3	2,9 (0,3)

деформируемых объемов E_{nl} и соответственно - более высокие значения величины наклепа $k_{\Delta H}$ при более низких показателях степени n при износе в уравнениях износа в жестких условиях внешнего нагружения, когда при изнашивании проявляются механизмы малоциклового поверхностной усталости. Можно полагать, что существует оптимальное соотношение между энергетическими характеристиками – работой упругих деформаций за вычетом затрат на ползучесть $A_{упр}^{отн}$, деформацией разрушения к моменту образования продуктов изнашивания e_0^2 и E_{nl} , обеспечивающее в конкретных условиях внешнего нагружения наиболее благоприятную структуру и долговечность материалов.

Анализ показал, что в условиях фреттинга и малоциклового поверхностной усталости материалов контактные давления возрастают и примерно в два раза превышают первоначальные.

Математический анализ условий работы исследуемого трибосопряжения и их влияния на показатели трения и изнашивания позволил сделать заключение о правомерности выделения при восстановлении деталей наплавкой трех основных факторов, влияющих на показатели трения и износа – исходного зазора в сопряжении, материала поверхности трения и условий смазки.

Четвертая глава посвящена практическому использованию энергетического критерия и триботехнических характеристик при определении износостойкости и долговечности трибосопряжения «вал-игольчатый подшипник».

Структурно-энергетический подход при моделировании работоспособности подшипников качения позволил установить существование особенностей в поведении материалов на микро-, мезо- и макроструктурном уровнях изнашивания и неодинаковую энергоёмкость материалов на различных масштабных уровнях внешнего нагружения и соответствующие предсказуемые различия в математических моделях процессов изнашивания.

Установлено существование взаимосвязи между механическими, акустическими и термодинамическими (тепловыми критериями)

$$W_{кр}^* \sim (\rho c)_m^3 \sim q^{3/2}, \quad (6)$$

позволяющей в конкретных условиях внешнего воздействия на материалы прогнозировать их поведение и принимать решения о целесообразности их практического использования.

Выявлена устойчивая корреляция между износостойкостью материалов и энергетическим критерием $W_{кр}^*$, между износом и упругой и пластической со-

ставляющими критерия $W_{кр}^*$ и соответствующими критическими скоростями при упругом $U_{упр}$ и вязком $U_{вл}$ разрушении.

Основные результаты выполненной работы проанализированы в связи с неизменно проявляющимися при большинстве видов изнашивания (в том числе и при изнашивании игольчатых подшипников) эффектами, связанными с масштабными (структурными) переходами. Принятые условия стендовых испытаний подшипников и комплекс физико-механических свойств исследуемых материалов систематизированы в работе по степени их влияния на износ с учетом масштабных переходов с одного уровня изнашивания на другой.

Ниже показано влияние масштабов на шероховатость и морфологию поверхностей трения, на относительную интенсивность изнашивания материалов и на зависимость их износа на трех уровнях изнашивания от следующих характеристик (табл.2).

В работе впервые методически обосновано построение графиков поверхностной усталости материалов по результатам их испытаний на износостойкость (рис. 4 и табл.3).

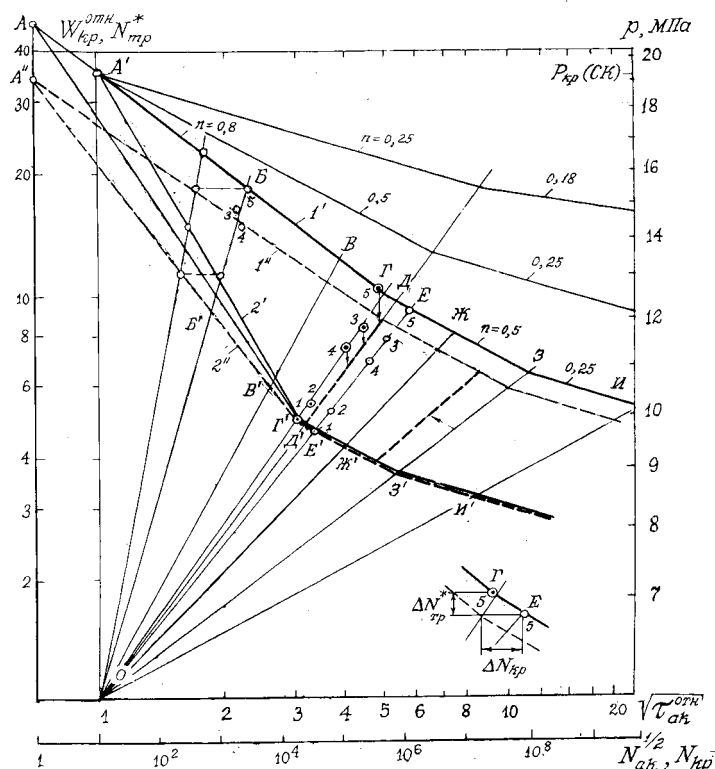


Рис.4. Кривые поверхностной усталости при изнашивании вала в опорах качения, упрочненного цементацией (т.1 и 2) и наплавкой (т.3-5)(табл.1). Смазывание трибосопряжений маслом SAE 85W/90 с присадкой ПЗ (сплошные линии) и без ПЗ (пунктир).

Влияние масштабов на исследуемые показатели на трех уровнях изнашивания

№ п/ п	Перечень исследуемых показателей		
	I уровень изнашивания (микроструктурный)	II уровень изнашивания (мезоструктурный)	III уровень изнашивания (макροструктурный)
1	Микротвердость, измеренная на поверхности шейки вала до начала изнашивания $H_{\mu 0}$ и при достижениях наибольшего наклепа в процессе изнашивания H_{μ}		
	$H_{\mu 0}^{-2}; H_{\mu}^{-2,4}$	$H_{\mu 0}^{-1,3}; H_{\mu}^{-2}$	$H_{\mu 0}^{-0,82}; H_{\mu}^{-1,0}$
2	Работа упругих $A_{\text{упр}}$ и пластических $A_{\text{пл}}$ деформаций		
	-	$A_{\text{упр}}^{-1,0}; A_{\text{пл}}$	$A_{\text{упр}}^{-0,5}; A_{\text{пл}}^{-0,5}$
3	Условия внешнего нагружения по влиянию на относительную интенсивность изнашивания $n = \lg U / \lg h_3$ на различных масштабных уровнях		
	1,0	4,65	23,9
4	Относительная шероховатость поверхностей трения		
	$U = \text{const}_{I,II,III} h_3^n; n = \exp(0,014 R_z^{\text{отн}}); \text{const} \left\{ \begin{array}{l} I = 4,6 \cdot 10^2 \\ II = 13,5 \cdot 10^3 \\ III = 13,7 \cdot 10^8 \end{array} \right\}$		
	$(R_z^{\text{отн}})^{0,33}$	$(R_z^{\text{отн}})^{1,39}$	$(R_z^{\text{отн}})^{2,4}$
	При $R_z^{\text{отн}} = 1,0$	114	228
5	Удельная энергоёмкость $E_{\text{уд}}$ ($\text{Дж} \cdot 10^{-6} / \text{мм}^2$), энтропийный критерий S^* ($\text{Дж} / \text{см}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{с}$) и $(v_{\text{кр}})_{\text{отн}}$		
	-	$E_{\text{уд}}^{-1,1}; (S^*)^{-0,8}$ и $(v_{\text{кр}})_{\text{отн}}^{-2} \sim (H_{\mu}^{\text{отн}})^{-2}$	-
6	Структура изнашиваемых материалов		
	тонкие вторичные структуры преимущественно в виде окислов	грубые вторичные структуры, следы схватывания, микросколы при $\times 8000$	продукты фреттинг коррозии, очаги поверхностной усталости и схватывания, микросколы $\times 8000$
7	Относительная критическая плотность мощности деформации		
	$k_{W^*_{\text{кр}}}^{-(0,8 \dots 1,0)}$	$k_{W^*_{\text{кр}}}^{-(0,5 \dots 0,67)}$	$k_{W^*_{\text{кр}}}^{-0,33}$
8	$k_{W^*_{\text{кр}}}$ при испытании малогабаритных высокоскоростных приборных подшипников и зубчатых колес после электроэрозионной обработки зубьев		
	$(k_{W^*_{\text{кр}}})_{\text{ср}}^{-0,92}$		$(k_{W^*_{\text{кр}}})_{\text{ср}}^{-0,44}$
9	$k_{W^*_{\text{кр}}}$ 37 марок сталей различных классов при гидроэрозии (экспериментальные данные И.Н.Богачева и Дж.Хоббса)		

	-	$(k_{W^*kp})_{cp}^{-1,0} \sim k_{\nu kp}^{-3} \sim k_{\dot{u}}^{-3}$	-
10	Зависимость критической скорости удара ν_{kp} (м/с) от упрочнения сталей $\Delta\sigma = \sigma_b - \sigma_T$ МПа: $\nu_{kp} = k_1 \exp(k_2 \Delta\sigma)$ (k_1 и k_2 – опытные константы)		
	$\nu_{kp}: \leq 230;$ $\Delta\sigma^{max}: \sim 420$	$\sim 190...400;$ ~ 480	≤ 1500 ~ 630
11	Соотношения, полученные в результате анализа графиков поверхностной усталости материалов:		
	а) долговечность N_{kp} в зависимости от контактного давления		
	$p_i^{-(8...12)}$	p_i^{-6}	$p_i^{-(2,7...3,0)}$
	б) долговечность N_{kp} в зависимости от мощности трения		
	$N_{mp}^{-(2,7...4)}$	N_{mp}^{-2}	$N_{mp}^{-(0,9...1,0)}$
	в) аккумуляционный период накопления повреждений $(\tau_{ak})_{отн}$ в зависимости от энергетических критериев и контактных давлений		
	$(W_{kp}^*/N_{mp})^4$	$(W_{kp}^*/N_{mp})^2$	W_{kp}^*/N_{mp}
	$(p_{kp}/p_i)^{12}$	$(p_{kp}/p_i)^6$	$(p_{kp}/p_i)^3$

Результаты анализа кривых поверхностной усталости $N_{kp}^*(N_{kp})$ или $p_i(N_{kp})$, а также непосредственно связанных с ними характеристик энергоемкости изнашиваемых материалов $W_{kp}^*(N_{ak})$ или $p_{kp}(N_{ak})$, систематизированы в табл.3.

Процессы накопления (суммирования) повреждений при многократных внешних воздействиях на поверхность материалов формально позволяют рассматривать процессы изнашивания с позиций усталости. При этом, пожалуй, единственное, что объединяет поверхностную усталость, а точнее - квазиусталость, с объемной усталостью более крупных деталей - это наличие аккумуляционного периода накопления повреждений до возникновения трещины. Закономерности дальнейшего роста трещин при изнашивании и при объемной усталости различны, т.к. протекают на разных масштабных уровнях и приводят к различным последствиям: при изнашивании происходит слияние микротрещин и послойное образование продуктов изнашивания определенной крупности; при объемной макроусталости происходит разрушение детали.

Тем не менее, при изнашивании представляется возможным построить диаграмму поверхностной усталости материала, с помощью которой в зависимости от внешней энергии, например, энергии (мощности) трения, можно предсказать период времени до начала изнашивания τ_{ak} , т.е. до начала образования продуктов изнашивания, и соответствующую этому периоду относительную износостойкость материала.

Очевидно, что каждому значению τ_{ak} на диаграмме усталости будет соответствовать определенная плотность потока внешней энергии, достаточная для разрушения материала после истечения периода времени, равного τ_{ak} . Энергетический критерий долговечности (износостойкости) в этих условиях будет составлять некоторую часть от $W_{кр}^{max}$ и определяться коэффициентом χ , связанным с наклоном кривой усталости к оси времени, неодинаковым на разных масштабных уровнях, внешнего нагружения.

Данные п.п.1-7, 10 (для мезоструктурного уровня) и 11 в табл.2 получены при стендовых испытаниях игольчатых подшипников

Проведенный анализ кривых поверхностной усталости материалов при изнашивании вала в опорах качения, упрочненного цементацией и наплавкой, позволил установить основные характеристики усталостного изнашивания на различных масштабных уровнях. Установлено также, что увеличение исходного зазора в трибосопряжений адекватно снижению числа циклов до разрушения, а увеличение износа соответствует росту контактного давления. Усталостная долговечность материалов при масштабных переходах ступенчато изменяется. При этом показатель степени при переходе от более жестких к менее жестким условиям нагружения каждый раз удваивается.

Выполненный анализ указывает на то, что наибольшие значения энергетического критерия $W_{кр}^{max}$, критического давления $p_{кр}^{max}$ и критической скорости удара $v_{кр}^{max}$ могут быть реализованы только на макроуровне нагружения.

Из анализа процесса изнашивания получена общая модель долговечности материалов при трении качения с проскальзыванием в следующем виде:

$$\tau_{ak} = const_{72} \left(\frac{W_{кр}^*}{N_{mp}} \right)_{I-III}^n = const_{73} \left(\frac{p_{кр}}{p_i} \right)_{I-III}^{3n} = const_{74} \left(\frac{v_{кр}}{v_i} \right)_{I-III}^{3n} \quad (7)$$

где константы равны единице при использовании характеристик изнашиваемых материалов в относительном виде, значения которых, при переходах III→II→I снижаются

$$\left. \begin{array}{l} \text{III – Макроуровень: } (W_{кр}^{max})_{III}; (p_{кр}^{max})_{III}^3; (v_{кр}^{max})_{III}^3; n_I=1 \\ \text{II – Мезоуровень: } (W_{кр}^*)_{II}; (p_{кр}^*)_{II}^3; (v_{кр}^*)_{II}^3; n_{II}=2 \\ \text{I – Микроуровень: } (W^*)_I; (p_{кр})_I^3; (v_{кр})_I^3; n_I=4 \end{array} \right\} \quad (8)$$

В (8) ∇ - знак уменьшения в направлении сверху вниз.

Таблица 3

Основные характеристики усталостного изнашивания игольчатых подшипников.

Масштабный уровень	Вариант пары трения	№ п/п	Основные зависимости			Обозначение линий на рис.4
			$N_{mp}^*(N_{kp})$ и $N_{kp}(p_i)$		$(W_{kp}^*)^{omn}(N_{ak}^{omn})$ и $N_{ak}^{omn}(p_{kp})$	
			Масло с присадкой	Масло без присадки	Масло с присадкой	
1	2	3	4	5	6	7
III Макроструктурный	5	1	$N_{mp}^* \sim 1/N_{kp}^{0,8}$	$N_{mp}^* \sim 1/N_{kp}^{0,71}$	$U \sim 1/H_{\mu}^{1,5}$ $(W_{kp}^*)^{omn} = const_{61}(N_{ak}^{omn})^{\frac{1}{2}n}$ При переходе II-III n=1,85 $(W_{kp}^*)^{omn} = const_{62}(N_{ak}^{omn})^{0,93}$	AG; AG (пунктир) – СК без присадки
		2	$N_{kp} \sim 1/p_i^{3,75}$	$N_{kp} \sim 1/p_i^{4,2}$		
	1	3	$N_{mp}^* \sim 1/N_{kp}^{1,86}$	$N_{mp}^* \sim 1/N_{kp}^{1,63}$		AG'; AG' (пунктир) – СК без присадки
		4	$N_{kp} \sim 1/p_i^{1,61}$	$N_{kp} \sim 1/p_i^{1,84}$		
	1 – 5 (средн.)	5	$N_{kp} \cong const_{63}/p_i^{2,7}$	$N_{kp} = const_{64}/p_i^{3,0}$		$N_{ak} = const_{65} \cdot p_{kp}^{3,24}$
II Мезоструктурный	1 – 5	6	$N_{mp}^* \sim 1/N_{kp}^{0,5}$	$N_{mp}^* \sim 1/N_{kp}^{0,5}$	$U_{II-I} \sim H_{\mu}^{-2}; (W_{kp}^*)^{omn} \sim (N_{ak}^{omn})^{1/2}$ $N_{ak} = const_{68} \cdot p_{kp}^{6,0}$	ГЗ; ГЗ (пунктир) – СК без присадки
		7	$N_{kp} = const_{66}/p_i^{6,0}$	$N_{kp} = const_{67}/p_i^{6,0}$		
I Микроструктурный	1 – 5	8	$N_{mp}^* \sim 1/N_{kp}^{0,25}$	$N_{mp}^* \sim 1/N_{kp}^{0,25}$	$(W_{kp}^*)_{II-I}^{omn} \sim (N_{ak}^{omn})^{0,375...0,25}$ $N_{ak}^{omn} = const_{71} \cdot p_{kp}^{8...12}$	ЗИ (5) З'И' (1)
		9	$N_{kp} = const_{69}/p_i^{12}$	$N_{kp} \cong const_{70}/p_i^{12}$		

На основании исследований сформулированы основные требования к материалам, учет которых повысит износостойкость и долговечность оборудования:

1) следует стремиться к повышению критерия износостойкости $W_{кр}^*$, который, в свою очередь, сдвигает кривую усталости $N_{mp}(N_{кр})$ на графике вверх, что обеспечивает материалу при $p_i = const$ большую долговечность, особенно если будет достигнуто оптимальное соотношение между $(W_{кр}^*)_{упр}$ и $(W_{кр}^*)_{пл}$ частями;

2) следует увеличивать аккумуляционный период накопления повреждений в тонком деформируемом слое, поскольку $\tau_{ак}$ определяет характер и положение на графике $U(t)$ кинетической кривой изнашивания материала, а в итоге - его износостойкость;

3) точность сборки опор качения должна быть такой, чтобы зазоры в трибосопряжениях в течение гарантированного периода эксплуатации находились в пределах 0,1...0,2 мм и преобладали режимы нормального механохимического (окислительного) изнашивания, протекающего с невысокой интенсивностью;

4) крайне нежелательные масштабные I→II→III переходы (микро→мезо→макроуровень) резко интенсифицируют: динамику внешнего нагружения, волновые процессы переноса энергии в деформируемых объемах и малоцикловое разрушение материалов при поверхностной усталости. Скорость изнашивания материалов в среднем возрастает на II и III масштабных уровнях соответственно в 1,5 и 3,0 раза.

В пятой главе приведены результаты исследования влияния масел и смазочных композиций на износостойкость и поверхностную усталость материалов опор качения.

Наиболее важные результаты данной части работы, посвященной исследованию влияния масел и антифрикционных присадок на износ трибосопряжений заключаются в следующем.

В принятых условиях испытаний наименьший износ материалов наблюдался при использовании масла средней вязкости, равной $17 \text{ мм}^2/\text{с}$, при изменении температуры в зоне трения в пределах от 90 до 120°C для различных трибосопряжений. При использовании масла оптимальной вязкости наиболь-

шую износостойкость показал вал, наплавленный ПП-АН 140, а наименьшую - цементованный вал из стали 15ХГМ. Наиболее значительное влияние масла с оптимальной вязкостью марки SAE 85W/90 на снижение износа материалов проявилось при повышенных исходных зазорах в трибосопряжениях, равных 0,3 и 0,4 мм.

Впервые по данным износных испытаний материалов построена вязкостно-температурная характеристика масла SAE 85W/90, имеющая вид степенной зависимости

$$\nu = 6,2 * 10^3 / T^{1,3} \quad (\nu - \text{мм}^2/\text{с}; T, \text{ } ^\circ\text{C}). \quad (9)$$

Впервые для условий смазки трибосопряжении маслом с оптимальной вязкостью построены зависимости относительного износа материалов от температуры в зоне трения и энергетических критериев износостойкости $S^{*отн}$ и $(W_{кр}^*)^{отн}$ (рис.5).

Установлены квадратичные зависимости относительного износа от энергетических критериев, которые указывают на то, что вязкость масел в "чистом" виде влияет в основном на усталостную долговечность материалов, т.е. на продолжительность периода $\tau_{ак}$.

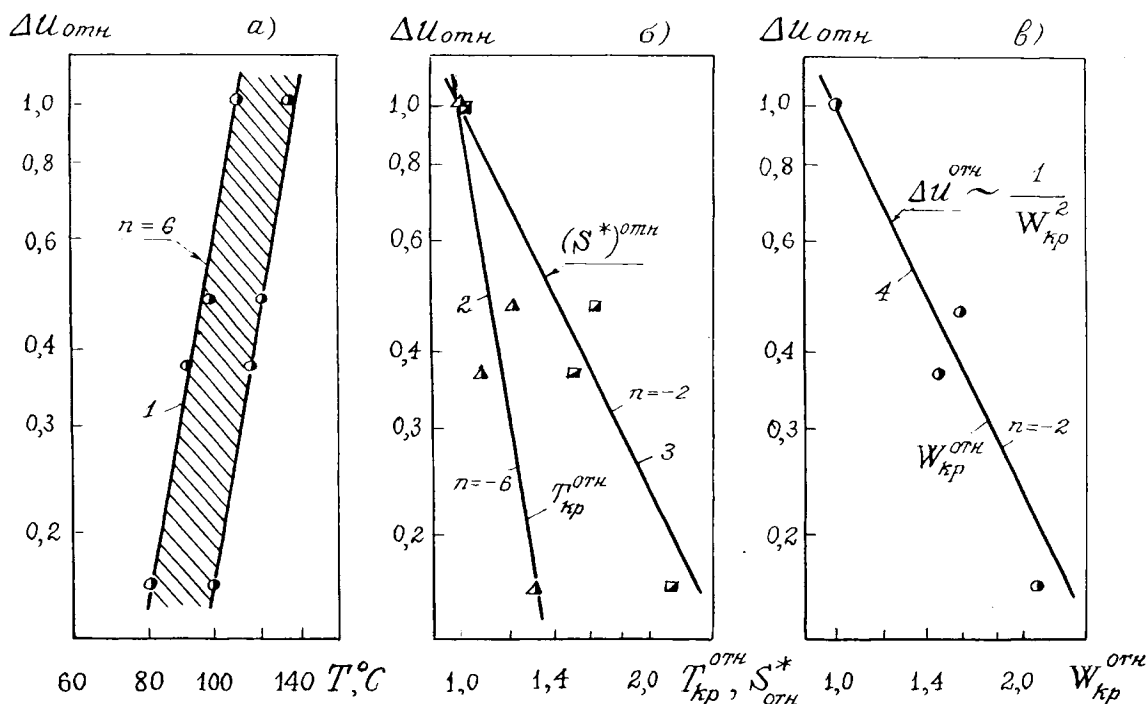


Рис.5. Зависимость относительного износа $\Delta U_{1-4}^{отн}$ (рис.5.4) от температуры в зоне трения (а); от критической температуры при масштабных переходах $T_{кр}^{отн}$ и энтропийного критерия $(S^*)^{отн}$ – кривые 2 и 3 на рис. б и от энергетического критерия (в).

Установлено, что при учете влияния температурно-вязкостной характеристики масла на относительный износ материалов имеет место зависимость $\Delta U_{отн} \sim (W_{кр}^*)^{отн}$ совпадающая с ранее полученной аналогичной зависимостью для мезоструктурного уровня изнашивания материалов.

Сравнительная оценка влияния присадок на износ вала, упрочненного ХТО, и наплавками, позволила установить, что наибольшая износостойкость и работоспособность трибосопряжений достигается при оптимальном соотношении структуры и свойств смазочной пленки и поверхностного слоя деформируемого (изнашиваемого) материала. Подобная модель поведения жидких смазочных материалов (ЖСМ) в условиях трибоконтакта с поверхностями сопряженных деталей в изменяющихся условиях нагружения, например, при переменной плотности мощности трения, указывает на целесообразность рассмотрения процессов разрушения (эрозии) материалов и деструкции (продавливания, растекания, нарушения сплошности и т.п.) ЖСМ в зоне контакта с единых структурно-энергетических позиций. Наиболее эффективной присадкой к маслу с оптимальной вязкостью оказалась присадка ПЗ, содержащая диалкилдитиофосфат цинка (1,49%); соль нафтосульфоновой кислоты (1,0%); нитрованное парафиновое масло (0,5%) и хлорпарафин (0,01%).

Установлен практически важный результат использования СК, содержащих противоизносные (противозадирные) присадки, заключающийся в обеспечении требуемой работоспособности трибосопряжения в более жестких условиях нагружения, которые по инструкциям не допускаются в условиях эксплуатации. Добавление присадки в масло существенно повышает работоспособность трибосопряжений, смещая переход от нормального механохимического изнашивания к более интенсивному изнашиванию при фреттинге, пропорционально приращению критического зазора в область увеличения зазоров. Добавление присадки ПЗ в масло SAE 85W/90 снизило износ материалов при зазоре 0,2 мм в среднем на 14,8%, а при зазоре 0,4 мм - на 28,2%;

Установлено, что влияние смазочных материалов на работоспособность трибосопряжений наиболее заметно сказывается на более износостойких материалах, в данном случае – на наплавке ПП-АН 140 во всем диапазоне изменения исходного зазора и соответствующего давления или плотности мощности трения, а также на менее износостойких материалах (цементованный вал), но

только в жестких условиях внешнего нагружения, т.е. в макрообласти при больших исходных зазорах в трибосопряжении. Наибольшее снижение износа вала - 22% при зазоре 0,2 мм и 42% при зазоре 0,4 мм, было достигнуто в случае применения наплавки ПП-АН 140. Вал с наплавкой ПП-АН 140 при смазке маслом SAE 85W/90 с присадкой ПЗ обеспечивает работоспособность трибосопряжении при зазоре, в два раза превышающем зазор в штатном (натурном) варианте игольчатых подшипников. Добавление в масло присадки ПЗ допускает работу трибосопряжений при больших критических зазорах (на мезоуровне) без снижения износостойкости деталей.

Вал, упрочненный наплавкой ПП-АН 140, превосходит штатный вал с цементованной поверхностью по допускаемому (на мезоуровне) критическому зазору на 20%, а по износостойкости на 58%. Добавление в масло присадки ПЗ увеличивает продолжительность τ_{ak} в 1,4 раза для штатного трибосопряжения и в 1,8 раза для упрочненного наплавкой ПП-АН 140 при работе в жестких режимах внешнего нагружения.

При моделировании процессов изнашивания, материалов в связи с масштабными переходами целесообразно использовать энергетические критерии износостойкости в акустической и ударноволновой модификации. Анализ показал, что деструкция жидких смазочных материалов (ЖСМ), определяющая существование режима жидкостного трения, может быть смоделирована на основе структурно-энергетического подхода. Поведение ЖСМ при смене режимов трения аналогично поведению твердого тела при упругом деформировании на различных масштабных уровнях и может быть описано условием изменения модуля сдвига

$$G \sim (W_{кр}^{ynp})^{1/3; 1; 2} \sim (c/V_m)^{1; 3; 6} \quad (10)$$

в зависимости от критической плотности потока энергии при распространении упругой акустической волны деформации $W_{кр}^{ynp}$ со скоростью звука c в молярном объеме V_m ЖСМ.

Дискретное изменение показателей степени в (10) при переходах от одного режима трения к другому подтверждено опытами И.М.Елманова при совпадении теоретических в (12) и соответствующих опытных значений показателей степени с точностью до одной десятой.

Разработка методов оценки и контроля качества ЖСМ по структурно-энергетическим критериям, в частности, по акустическому сопротивлению,

представляет собой новое перспективное научное направление.

Результаты выполненных исследований и приведенные в работе сопоставления создают предпосылки их обобщения на высшие кинематические пары при решении вопросов, связанных с надежностью трибосопряжений.

ОБЩИЕ ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан и изготовлен новый стенд для натуральных исследований пары трения «вал-игольчатый подшипник» с целью установления закономерностей процессов изнашивания деталей опор качения и построения моделей изнашивания.
2. Впервые разработаны модели изнашивания материалов деталей трибосопряжения «вал-игольчатый подшипник», установлено наличие трех основных уровней изнашивания (микро-, мезо и макро) игольчатых подшипников и условие перехода от нормального изнашивания вала к развитой повреждаемости.
3. Созданы основы проектирования износостойких пар трения «вал-игольчатый подшипник» с учетом конструктивных параметров, конструкционных и смазочных материалов.
4. Впервые разработан подход к количественной оценке изменения долговечности деталей опор качения по данным поверхностной усталости материалов, полученным из анализа их испытаний на изнашивание в зависимости от смазочного материала.
5. Впервые установлены условия деструкции смазочного слоя в подшипнике и перехода к фреттингу; созданы основы прогнозирования работоспособности смазочных материалов и композиций в трибосопряжении по акустическому сопротивлению.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ АВТОРА ПО РАЗДЕЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Нахимович Е., Погодаев Л.И. Моделирование процессов изнашивания и прогнозирование долговечности опор качения. – СПб: Изд-во СПбГТУ,

2002, 130 с.

2. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Нахимович Е. Моделирование износостойкости и долговечности опор качения //Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2002. - № 3. - С.55-65.
3. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Нахимович Е. Влияние присадок к смазочным маслам на износостойкость трибосопряжений // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2002. - № 4.
4. Нахимович Е. Основные факторы, влияющие на изнашивание и повреждаемость поверхности трения //Сборник трудов Первого Международного симпозиума по транспортной триботехнике. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001, с.16-17.
5. Нахимович Е. Применение наплавки для восстановления изношенных деталей //Сборник трудов Первого Международного симпозиума по транспортной триботехнике. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001, с.140-143.
6. Нахимович Е. Влияние исходного зазора в сопряжении на износ вала с учетом масштабных факторов //Сборник трудов Второго Международного симпозиума по транспортной триботехнике. – СПб: Изд-во «Нестор», 2002, с.74-84.
7. Нахимович Е. Влияние смазочных композиций на износостойкость деталей опор качения //Сборник трудов Второго Международного симпозиума по транспортной триботехнике. – СПб: Изд-во «Нестор», 2002, с.314-318.
8. Нахимович Е. Стенд для моделирование повреждений опор качения //Сборник трудов Второго Международного симпозиума по транспортной триботехнике. – СПб: Изд-во «Нестор», 2002, с.224-229.
9. Нахимович Е. Влияние присадок к маслам на износостойкость опор качения //Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций: Материалы практической конференции. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2002, с.225-228.
10. Нахимович Е. Стенд для исследования износостойкости и долговечности игольчатых подшипников //Технологии ремонта, восстановления, упрочне-

ния и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций: Материалы практической конференции. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2002, с.229-233.

11. Чулкин С.Г., Нахимович Е. Состояние решения задач по повышению долговечности и износостойкости материалов и деталей машин //Машинознание. – Львов. - №9. – 2001. – с.36-39.
12. Нахимович Е., Качински Р. Механизм разрушения верхнего слоя конструкционных материалов в экстремальных условиях работы //Труды V Международного симпозиума украинских инженеров-механиков. – Львов: 1999, с.234-239.
13. Нахимович Е. Анализ нагружаемости элементов подшипника колес трактора //Труды конференции «Инженерия подшипника». – Гданьск, 1996, с.337-339.
14. Нахимович Е. Методы повышения долговечности шейки вала для подшипников скольжения //Труды XXI осенней трибологической школы. – Лудь-Артурувек, 1996, с.78-84.
15. Нахимович Е., Саевич Э. Трибологические характеристики подшипников ходовых колес. - //Труды XVII конференции основ деталей машин. – Люблин, 1995, с.633-638.
16. Нахимович Е. Трибологические свойства поверхностного слоя полрошковых сплавов //Труды XVIII осенней трибологической школы. – Колобжег, 1992, с.236-241.
17. Нахимович Е. Исследование порошковых сплавов в трибологических системах //Труды трибологической конференции «ЭУРОТРИБ». - Будапешт, 1991. – с.467-473.
18. Нахимович Е. Технологические и эксплуатационные средства для повышения долговечности деталей машин //Труды конференции. – Братислава, 1991, с.134-141.
19. Нахимович Е. Влияние технологических и эксплуатационных параметров на трибологические характеристики подшипников //Труды XIV конференции основ деталей машин. – Познань-Кекж, 1989, с.234-239.

- 20.Нахимович Е., Саевич Э. Влияние загрязнений смазки частицами SiO₂ на износ подшипникового сплава L6 //Труды XVI Осенней Трибологической Школы ПАН. – Пила-Тучно, 1988, с.210-213.
- 21.Нахимович Е. Методы повышения долговечности деталей машин. //Труды Конференции УСХА «Промышленные методы сельскохозяйственного производства». – Киев, 1987, с.45-47.
- 22.Нахимович Е. Исследование долговечности игольчатых подшипников с химическими добавками до смазки //Труды XV Осенней трибологической школы. – Поляньчик, 1987, с.98-103.
- 23.Нахимович Е. Исследование трибологических параметров материала TE 18 //Труды XIV Осенней трибологической школы. – Новый Сонч, 1985, с.77-83.
- 24.Нахимович Е. Технологические и эксплуатационные средства повышения долговечности внешнего слоя деталей машин //Труды XIV Осенней трибологической школы. – Новый Сонч, 1985, с.89-93.
- 25.Нахимович Е. Определение критической величины зазора в сопряжении вал-игольчатый подшипник //Сборник научных трудов Украинской сельскохозяйственной академии. – Киев, 1984, №4, с.67-72.
- 26.Нахимович Е., Жамойда С. Некоторые износные проблемы смешивания минеральных удобрений //Сборник научных трудов БПИ. – Белосток, №5, 1976, с.34-38.
27. Нахимович Е. , Ворона М., Гураль В. Влияние конструкционных и технологических параметров на характер износа элементов машин //Труды III Конференции БПИ и Белорусского политехнического института, 1974, с.66-69.
- 28.Нахимович Е. , Ворона М., Гураль В. методика исследование предельных значений износа элементов сельскохозяйственных машин //Труды III Конференции БПИ и Белорусского политехнического института, 1974, с.42-47.
- 29.Нахимович Е. , Гураль В., Жамойда С. Сравнительный анализ износа выбранных элементов сельскохозяйственных машин //Труды III Конференции БПИ и Белорусского политехнического института, 1974, с.79-84.