

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВА-  
ТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

Тикалов Андрей Владимирович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ  
МАТЕРИАЛОВ НА МАШИНЕ ТРЕНИЯ

Шифр специальности 15.02.04 – Трение и износ в машинах

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
профессор,  
Ефремов Леонид Владимирович

Научный доклад

Санкт-Петербург 2019

## Содержание

Введение	3
1 Объекты и задачи исследования	9
1.1 ВАРИАНТЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ПАР ТРЕНИЯ	9
2 Метод искусственных баз	
10	
2.1 ВЫБОР ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЛУНОК	10
3 Метод виброакустического контроля	15
3.1 ПРИБОРЫ ДЛЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА МАШИНЕ ТРЕНИЯ	15
3.2 ЗАВИСИМОСТЬ СКЗ ОТ НАГРУЗКИ И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА	17
4 Прогнозирования периода приработки цилиндрической пары трения методом вак	19
5 Методы исследования абразивного изнашивания материалов на машине трения	22
5.1 УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ВКЛАДЫШЕЙ НА МАШИНЕ ТРЕНИЯ	22
6 Метод «хорды»	24
Литература	33

## Введение

### Актуальность работы

В науке о трении и износе актуальное значение имеет повышение точности, достоверности и эффективности экспериментальных исследований на машине трения, например, типа СМЦ-2. В работе рассматривается несколько актуальных направлений решения этой общей проблемы.

Первое направление связано с целесообразностью совершенствования оригинального метода искусственных баз (МИБ) предложенного профессором Хрущовым М.М., путем приведения его в соответствии с современным уровнем приборного и программного обеспечения. В результате удалось разработать более точный и технологичный способ измерения изображения лунки любой формы с применением цифрового микроскопа и программой распознавания образов. Для пересчёта полученных таким образом искусственных баз в глубину износа решалась взаимосвязанная проблема выбора простейшего режущего инструмента. Рассчитанные износы в точке измерений позволили создать аналитические и графические алгоритмы для оценки и анализа износостойкости (ИС) или интенсивности изнашивания (ИИ) при испытаниях как при граничном трении (со смазкой), так и при абразивном изнашивании в зависимости от поставленных задач. Особое внимание уделено влиянию человеческого фактора на погрешность измерения с применением статистических методов.

Ко второму актуальному направлению работы относится обоснование нового метода бесконтактного виброакустического контроля (ВАК) изнашивания образцов при испытаниях на машине трения. Эту задачу впервые удалось решить с помощью штатного вибрметра СМ-21, оснащенного трехдиапазонным фильтром частот (состоящего из низкочастотной (НЧ), среднечастотной (СЧ) и высокочастотной (ВЧ) полос) для оценки среднеквадратичного значения ускорения (СКЗ) в  $\text{м/с}^2$  или в децибелах дБА. Актуальное значение имеет корректное доказательство

выбора диапазона ВЧ (1.8...10 кГц), который однозначно характеризует состояние трибосопряжений. Приведены примеры зависимости СКЗ от фактора пары трения. Доказана зависимость изменения значения СКЗ от частоты вращения и от нагрузки. Виброакустические испытания проводились одновременно с измерением ИИ. Кроме того, один раздел диссертации посвящён прогнозированию времени проработки узла трения по тренду СКЗ от максимума к минимуму с учётом сглаживания поверхности из-за пластической деформации.

Впервые выполнялись уникальные исследования абразивного изнашивания вкладышей многослойных подшипников с помощью специального нажимного устройства в контакте со абразивными шкурками (АШ) разной зернистости, которые последовательно наклеивались на вал. Измерения ИИ при трении АШ различной зернистости при прохождении слоев вкладышей подтвердили, что ИИ пропорциональна размеру зерна и обратно пропорциональна твердости образца. Обнаружен колебательный процесс изменения ИИ по мере перехода от менее твёрдого к более твёрдому слою вкладыша, что объясняется периодическим упрочнением каждого слоя при переходе с последующим повышением твердости. Аналогичные тенденции наблюдались в процессе измерения СКЗ в диапазоне ВЧ по мере износа детали по всей толщине изнашиваемого вкладыша.

Наиболее актуальной проблемой являлось развитие алгоритма для нового метода сравнительного тестирования ИС материалов на основе измерения хорды окружности диска при его врезании в плоскую поверхность образца испытываемого материала. После пересчёта длины хорды в стрелку износа с использованием первого члена ряда Тейлора геометрической функции можно получить абсолютную и относительную ИС за назначенное время испытания. Этот метод условно назван универсальным методом хорды, который отличается от патента RU 2 526 223 С2 целевой направленностью.

## Степень разработанности темы

Все цели и задачи, поставленные в диссертации полностью решены и имеют корректное программное обеспечение, доступное для независимого применения. Основные актуальные результаты опубликованы в рецензируемых журналах. Наибольший интерес для широкого применения имеют алгоритмы метода хорды для сравнительного тестирования материалов на машине трения.

## Цели и задачи

Основной целью работы является разработка эффективных методов и средств для повышения точности и достоверности оценки ИС на серийной машине трения.

В процессе работы по достижению этой цели были поставлены и решены следующие основные задачи:

1. На основе исходного варианта МИБ проф. Хруцова М.М. разработать несоизмеримо более технологичный, точный и менее трудоемкий способ измерения изображения искусственной базы (лунки) любой формы (а не только в виде щели) с применением современного цифрового микроскопа и программами тарировки и распознавания образов. На основании серии испытаний изучить различные инструменты для нарезания лунок с разработкой функций зависимости глубины лунки (износа) от изображения искусственной базы с учетом геометрии режущего инструмента. Выбрать для практического применения наиболее простой и точный инструмент.

2. По результатам измерения износов и данным о параметрах и условиях испытаний (нагрузка, частота вращения, диаметр ролика и др.) разработать алгоритмы (методики) оценки ИИ и ИС в редакторах MATHCAD и (или) EXCEL.

3. Обосновать новый метод бесконтактного виброакустического контроля (ВАК) изнашивания образцов при испытаниях на машине трения с помощью

штатного виброметра СМ-21. Он должен быть оснащен программой с трехдиапазонным фильтром частот в составе: низкочастотной (НЧ), среднечастотной (СЧ) и высокочастотной (ВЧ) полос для оценки СКЗ ускорения в  $\text{м/с}^2$ . Прежде всего необходимо корректно доказать выбор диапазона ВЧ (1.8...10 кГц), который однозначно характеризует процесс трения в трибосопряжении. Выполнить анализ зависимости СКЗ от состояния пары трения. Доказать зависимость СКЗ от частоты вращения и от нагрузки.

4. Разработать методику прогнозирования времени проработки узла трения по тренду СКЗ от максимального значения к минимальному с учётом сглаживания поверхности из-за пластической деформации.

5. Разработать конструкцию узла трения для изучения абразивного изнашивания деталей типа вкладышей подшипников (включая многослойные) с использованием абразивных шкурок разной зернистости.

6. Провести комплекс испытаний на абразивное изнашивание многослойных вкладышей при разной зернистости АШ с целью проверки зависимости ИИ, СКЗ и твёрдости материала каждого слоя от зернистости АШ, глубины износа и времени испытаний.

7. Обосновать алгоритмы серийного тестирования относительной ИС материалов по длине хорды, полученной путем врезания окружности ролика (вала) в плоскую поверхность прямоугольного образца в виде бруска испытываемого материала.

### Научная новизна

Результаты решения всех задач работы являются новыми, среди которых можно особо выделить следующие научные темы:

1. В предлагаемом варианте МИБ применены современные цифровые микроскопы с программой распознавания образов, позволяющих оценить размеры изображений фотографий лунок любой формы, а не только щелеобразной.

2. Обоснованы функции для оценки износа по данным о размере искусственной базы с учётом характеристик режущего инструмента. Это позволило выбрать наиболее технологичный инструмент для нарезания лунок.

3. Применен ряд Тейлора для доказательства приемлемой точности оценки износа по простейшей формуле первого члена этого ряда.

4. Применён трехдиапазонный фильтр спектра частот виброметра СМ-21 для измерения СКЗ ускорения вибрации во время испытаний пар трения. Доказано, что трибологические свойства исследуемой пары трения характеризуется СКЗ высокочастотным диапазоном фильтра (1.8...10 кГц), что является основным критерием ВАК в этой работе.

5. Создана методика измерения абразивного изнашивания деталей типа вкладышей подшипников скольжения, а также смоделирована и разработана конструкция, состоящая из держателя образца и набора АШ разной зернистости. Наиболее важное научное и практическое значение имеет исследование зависимости ИИ, ИС и твёрдости слоёв многослойного подшипника от зернистости АШ.

6. Обоснованы универсальные алгоритмы оценки абсолютной и относительной ИС при тестировании любых материалов (а не только полимерных) с помощью принципа измерения хорды врезания окружности ролика (вала) в плоскую поверхность прямоугольного образца испытываемого материала.

### Теоретическая и практическая значимость работы

К теоретически и практически значимым можно отнести следующие результаты исследований:

– повышение точности предлагаемого варианта МИБ за счёт применения современных инструментов, оптический аппаратуры и программы распознавания образов;

- разработка алгоритмов в составе МИБ для оценки ИИ и ИС в реакторах MATHCAD и EXCEL;
- использование виброметра с трехдиапазонным фильтром частот для оценки состояния узла трения по СКЗ виброускорения в полосе высоких частот 1.8 – 10 кГц;
- изучена зависимость продолжительности приработки пары трения от тренда СКЗ виброускорения на высокочастотном диапазоне фильтра, применение наклеенных на диск АШ разной зернистости для исследования абразивного износа образцов;
- исследование процессов абразивного изнашивания многослойных вкладышей подшипников с учётом зависимости ИИ от зернистости АШ и твёрдости слоев при пластической деформации;
- разработаны и применены алгоритмы сравнительной оценки ИС (тестирование) любых материалов с использованием принципа врезания ролика в плоскую поверхность небольшого образца (метод хорды);
- проверить эффективность алгоритмов метода хорды путем сравнительной оценки и анализа относительной ИС ряда разнотипных материалов.

### Апробация результатов

Основные результаты диссертации прошли апробацию в виде выступлений с научными докладами на конференциях: научно-практическая конференция XIV «Неделя науки СПбПУ», секция «Трибоматериаловедение, конструирование и компьютерное моделирование», г. Санкт-Петербург, 2016 г.; международная научная конференция «New Materials and Technologies in Mechanical Engineering», г. Санкт-Петербург, 2019 г.; VIII Конгресс молодых ученых, университет ИТМО, секция научной школы «Проблемы надежности и точности машин и приборов», г. Санкт-Петербург, 2019 г.



## 1 Объекты и задачи исследования

### 1.1 Варианты исследуемых пар трения

В работе рассматривается несколько направлений изучения трения и износа деталей машин на примере колодок и вкладышей подшипников скольжения. Схемы вариантов исследуемых пар трения показаны на рисунке 1.

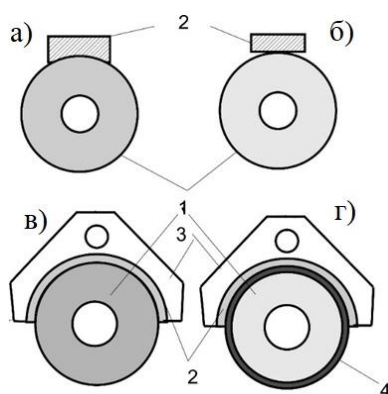


Рисунок 1 Схемы вариантов экспериментальных пар трения а, б, в, г. Обозначения: 1 – ролик, 2 – колодка или полувкладыш подшипник, 3 – держатель, 4 – абразивная шкурка

На рисунке 1а представлен вариант пары трения, которая состоит из вращающегося ролика 1 и нажимной колодки 2 с рабочей поверхностью по форме поверхности ролика. В этом случае изнашивающим элементом являлась торцевая поверхность ролика, на которой нарезались лунки. Эти испытания проводились при переменных нагрузках и частотах вращения при сухом и граничном трении.

На рисунке 1б представлен вариант пары трения, которая также состоит из вращающегося ролика 1 и нажимной колодки (бруска) 2, но с плоской рабочей поверхностью. Такая конструкция предусматривает использования в качестве колодки напильника. В этом случае изнашивающим элементом являлась торцевая поверхность ролика, на которой нарезались лунки. Испытания проводились со смазкой при переменных нагрузках и частотах вращения.

Варианты пар трения (рисунок 1в и 1г) применялись для испытаний вкладышей подшипников скольжения, которые устанавливались в гнездо жесткого держателя 3 для имитации условий работы пары трения «вкладыш подшипника скольжения-ролик». В этом случае лунки нарезались на поверхности вкладыша. Вариант в, как правило, предусматривал испытание пары трения со смазочным материалом.

## 2 Метод искусственных баз

### 2.1 Выбор инструмента для нарезания лунок

При решении задачи выбора инструментов для нарезания лунок было испытано более 10 инструментов (рисунок 2). Глубина лунки определяется по формуле (1).

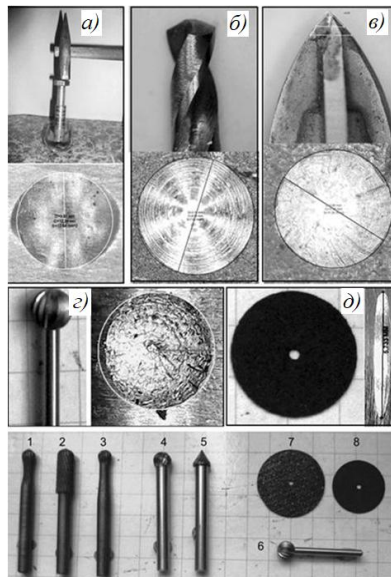


Рисунок 2 Инструменты и вид лунок, образованных: а – ударным способом, путем вдавливания шарика; б - высверливанием при помощи сверла при  $\varphi = 118^\circ$ ; в – выскабливанием сверлом для керамики; г – фрезерованием шарообразной мини фрезой диаметром 7,8 мм; е – надрезом мини болгаркой. Инструменты: 1-3 – шарошки, 4-5 – фрезы, 6 – шарообразная мини фреза, 7-8 – мини болгарки диаметром 22,5 и 24 мм

$$h_i = \frac{D}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{d_i}{D} \right)^2} \right) = r \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{l_i}{2r} \right)^2} \right) \quad (1)$$

Можно доказать, что эта формула полностью подтверждает методику Хрущева М. М. Для этого применено ее разложение в ряд Тейлора (Маклорена) в редакторе MathCAD (2).

$$h_i = r \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{l_i}{2r} \right)^2} \right) \text{series } l_i, 6 \Rightarrow \frac{l_i^2}{8r} + \frac{l_i^4}{128r^3} + \frac{l_i^6}{1024r^5} + \dots \quad (2)$$

Приемлемо малая погрешность от 0,01 до 0,1% обеспечивается уже при первом члене ряда (при отброшенных остальных членах), что соответствует формулам и как по методике Хрущева М. М. Для оценки глубины лунок, образованных заостренными инструментами с углом  $\varphi$  получена формула (3), которая применяется в расчетах при выборе сверла (рисунок 2б) или пера (рисунок 2в) в качестве основного инструмента.

$$h_i = \frac{l_i}{2} \text{ctg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3)$$

Алгоритм расчета в редакторе MathCAD представлен на рисунке 3.

Испытания были начаты с проверки метода отпечатка индентором в виде шарика диаметром 10 мм. Подтверждено образование небольшого вспучивания вокруг отпечатка и разные его размеры в значимости от направления пути трения. Поэтому этот способ не рекомендован для практического использования так же, как и применение алмазной четырехгранной призмы твердомера по Виккорсу.

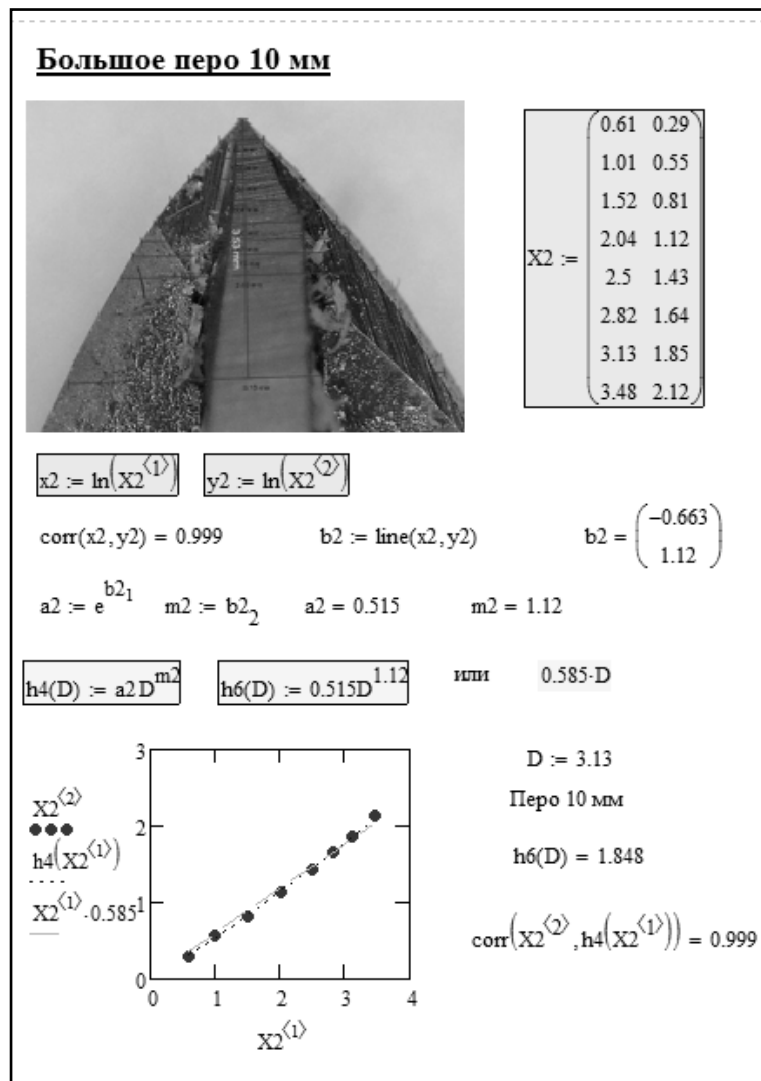


Рисунок 3 Скриншот обоснования формулы (3) в редакторе MathCAD

Наиболее высокое качество лунки получено от стандартного сверла по ГОСТ 10902-77 диаметром 3...10 мм с углом заточки  $118^\circ$  за счет строго вертикального расположения инструмента на сверлильном станке.

В зависимости от ожидаемого диапазона глубины износа диаметр круглой лунки должен составлять 2.5...4.5 мм, а длина щели при надрезе мини болгаркой - до 6 мм. При этом начальный входной параметр лунки  $l$  устанавливается произвольно, поскольку износ определяется по разнице глубин лунки  $h$  между настоящим и предыдущим замером.

Очевидно, что предложенные и рассмотренные выше способы

несоизмеримо проще, дешевле и технологичнее методов нарезания лунок по требованиям ГОСТ 27860-88. Это утверждение станет более убедительным после рассмотрения методов обработки результатов измерений.

Расчет износа при образовании лунки вдавливанием или фрезерованием с инструментом в виде шара рассчитывается по формуле

$$h_i = \frac{D}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{l_i}{D} \right)^2} \right), \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр инструмента, мм.

Расчет износа при образовании лунки диском от диска поперек пути трения

$$h_i = \frac{l_i^2}{4D} \quad (5)$$

Расчет износа при образовании лунки диском вдоль пути трения

$$h_i = \frac{l_i^2}{8} \left( \frac{2}{D} \pm \frac{1}{R} \right) \quad (6)$$

Таблица 1 Зависимость глубины лунки от параметра  $l$

Способ	Инструмент	Глубина лунки при параметре $l$ , мм				
		1	2	3	4	5
Отпечатка	Шар $D=10$ мм	0.0251	0.101	0.2303	0.4174	0.6699
Отпечатка	Призма $\varphi=136^\circ$	0.143	0.286	0.428	0.571	0.714
Вырезания	Фреза $D=8$ мм	0.0322	0.1304	0.3	0.5519	0.9067
Вырезания	Шарошка 6 мм	0.042	0.1716	0.4019	0.7639	1.3417
Вырезания	Болгарка $r=12$ мм	0.0104	0.0417	0.0941	0.1678	0.2633
Вырезания	Диск $r=16$ мм	0.0078	0.0313	0.0705	0.1255	0.1965
Вырезания	Сверло при $\varphi=118^\circ$	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
Отпечатка	Керн $\varphi=90^\circ$	0.4195	0.8391	1.2586	1.6782	2.0977

Способ	Инструмент	Глубина лунки при параметре $l$ , мм				
		1	2	3	4	5
Вырезания	Перо керамика 10 мм	0.5	1	1.5	2	2.5
Вырезания	Фреза $\varphi = 60^\circ$	0.866	1.7321	2.5981	3.4641	4.3301

Основная цель применения рассматриваемых расчетных программ в редакторах MathCad заключается в определении ИИ исследуемого объекта. В работе рассматривается два варианта оценки ИИ.

Первый вариант заключается в определении интервальной ИИ  $JJ_i$  (мм/км) для каждого  $i$ -го сеанса

$$Js_i = \sum_{i=0}^i J_{i-1} + J_i \quad (7)$$

Второй вариант предусматривает расчет суммарной ИИ  $JJ_i$  по формуле (8) с учетом суммарных значений износа и времени в период до  $i$ -го сеанса.

$$JJ_i = 1000 Js_i / (S(n)T_i) \quad (8)$$

Строятся векторы переменных данных, т.е. времени сеансов и результаты измерения диаметра лунок, что позволяет получить искомые результаты расчета износов и ИИ, а также суммарный износ и время испытаний. Результаты итоговых расчетов сведены в таблице 2.

Таблица 2 Результаты итоговых расчетов параметров износа при образовании лунок сверлом

Исходные данные			Результаты расчета			
Сеанс, №	Время, мин	Диаметр, мм	Износ, мм	ИИ, мм/км	Сумм. время, мин	Сумм. износ, мм
0	0	3.661	0	0	0	0
1	5	3.324	0.101	0.43	5	0.101
2	5	3.088	0.071	0.301	10	0.172
3	5	2.944	0.043	0.184	15	0.215

### 3 Метод виброакустического контроля

#### 3.1 Приборы для виброакустического контроля на машине трения

Одновременно с испытаниями пар трения с применением новой методики МИБ использовался метод бесконтактного виброакустического контроля (ВАК), который является достаточно достоверным, но более простым и дешёвым по сравнению с методом акустической эмиссии. Цель метода ВАК заключалась в изучении процесса изнашивания элементов пар трения при всех схемах их компоновки (рисунок 1).

Для решения задач метода ВАК был выбран и приобретен виброметр СМ-21 (рисунок 23) фирмы ВАСТ (Виброакустические системы и технологии).

Прибор оснащён программами с несколькими вариантами частотных диапазонов (таблица 3). Как видно из таблицы 3, основным преимуществом этого прибора является наличие в его программе упрощённого трехдиапазонного фильтра, состоящего из трех участков частотного диапазона: низкочастотный (НЧ) 50...300 Гц, среднечастотный (СЧ) 0,3...1,8 кГц и высокочастотный (ВЧ) 1.8...10 кГц., значения которых одновременно отображаются на табло прибора.



Рисунок 4 Виброметр SM-21: 1– прибор с информационным табло; 2 – акселерометр с магнитным держателем

Таблица 3 Параметры обрабатываемые виброметром SM-21

Название	Диапазон частот, Гц	Единицы измерения	Параметры
Низкие частоты (НЧ)	2-1000	Ускорение, м/с <sup>2</sup>	СКЗ/Пик/Размах
	10-1000	Скорость, мм/с	СКЗ/Пик/Размах
	10-2000	Перемещение мкм	СКЗ/Пик/Размах
Высокие частоты (ВЧ)	6.4 - 25 кГц	Ускорение, м/с <sup>2</sup>	СКЗ
	10 - 25 кГц		Пик
	15 - 25 кГц		Пик-фактор
Одновременно:		Ускорение, м/с <sup>2</sup>	СКЗ
низкая частота (НЧ)	50-300 Гц	(дБА);	
Средняя частота (СЧ)	0.3-1,8 кГц	Скорость, мм/с	
Высокая частота (ВЧ)	1,8-10 кГц	(дБА)	

В случае необходимости, преобразование значений СКЗ виброускорения с м/с<sup>2</sup> в децибелы (дБА) выполнялось по формуле



$$La = 120 + 20 \log a \quad (9)$$

### 3.2 Зависимость СКЗ от нагрузки и частоты вращения вала

Для подтверждения возможности ВАК оценивать вид и природу исследуемого процесса изнашивания пары трения были изучены зависимости СКЗ в полосе ВЧ от частоты вращения вала и нагрузки при проведении испытаний. Исходными данными послужили матрицы с результатами измерения СКЗ в зависимости от нагрузки и частоты вращения. Для иллюстрации выбраны характерные пары трения рисунок 1а и 1б, построив корреляционные зависимости СКЗ от частоты вращения рисунок 5а и от нагрузки рисунок 5б. Аналогичные результаты будут рассмотрены при изучении абразивного изнашивания.

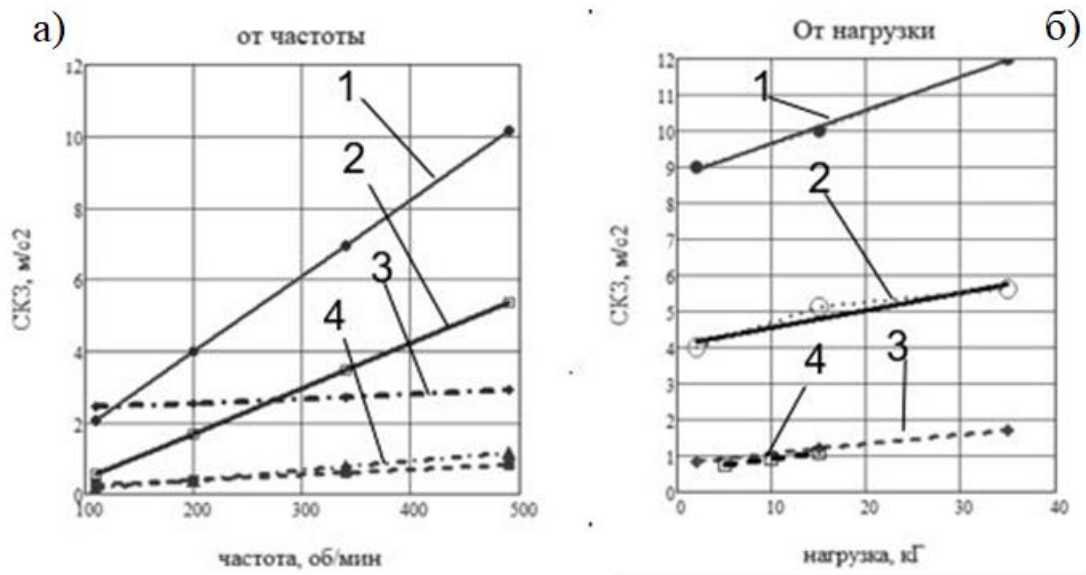


Рисунок 5 Корреляционные зависимости СКЗ от частоты вращения вала (а) и нагрузки (б)

В обоих случаях удалось применить линейную регрессию типа  $Y=A + B X$  с высокой оценкой коэффициента корреляции по оператору  $corr(X,Y)$  в редакторе MATHCAD. Уравнение регрессии СКЗ  $SI(n)$  ( $m/c^2$ ) от частоты вращения  $n$

(об/мин) имеет вид (10), где параметры  $a_n$ ,  $b_n$  и  $corr$  рассчитываются по алгоритму для каждой пары трения. Как было отмечено, исходными данными послужили измерения СКЗ на полосе ВЧ для четырех скоростей вращения (100, 200, 300 и 500 об/мин) при среднем уровне нагрузки 15 кгс.

$$S1(n) = a_n + b_n n \quad (10)$$

Такая же методика применена и для линейной регрессии (32) зависимости СКЗ  $S2(g)$  ( $m/c^2$ ) от нагрузки  $g$  (кгс). Ее параметры  $ag$ ,  $bg$  и  $corr$  приведены в таблице 13.

В блоке формул (11) показаны:  $X$  - гармонические колебания перемещения, первая производная  $X$  - скорость колебаний  $V$  и вторая производная  $X$  - ускорение  $U$ , а также функция круговой частоты  $\omega$ .

*Исходные трехдиапазонные измерения*

СКЗ ускорения  $U$ ,  $m/c^2$   $a$

СКЗ скорости  $V$ ,  $mm/c$   $b$

*Расчетные параметры*

Амплитуда колебаний  $\alpha = V^2/U$ ,  $mkm$   $c$  (11)

Перемещение  $P = 2\alpha$ ,  $mkm$   $d$

Частота  $N = \frac{1000U}{2\pi V}$ , герц  $e$

УФТ  $utf = P N = 1000 V/\pi = 318.3 V$   $f$

Формулы блока (11) положены в основу программы в редакторе MathCAD. Анализ этих зависимостей позволил сделать предположение, что УФТ зависит не только от СКЗ ускорения  $U$ , но и от скорости  $V$ , перемещения  $P$  и частоты колебаний  $N$ .

#### 4 Прогнозирования периода приработки цилиндрической пары трения методом ВАК

Исходные данные для решения этой задачи получены путем испытаний на машине трения вкладыша подшипника диаметром  $d = 0,05$  м., при нагрузке 3 кгс и частоте вращения  $n = 300$  об/мин. В качестве объекта исследования, который подвергался изнашиванию в режиме граничной смазки, использовался полувкладыш подшипник автомобильного двигателя. Он имеет трехслойное антифрикционное покрытие с твердостью поверхности  $HV < 60$ , что позволило ускорить время приработки.

Описываемое исследование отличается тем, что одновременно с определением интенсивности изнашивания выполнялось измерение СКЗ виброметром СМ-21.

Для периодического измерения износа на поверхность трения с помощью сверла наносилось 9 начальных лунок диаметром от 2,5 до 3 мм. Общее время испытаний было разбито на 5 сеансов продолжительностью от 15 до 40 мин. Кроме интенсивности изнашивания и других параметров при каждом сеансе записывалось значение СКЗ в трех полосах частот, но для расчета использовались только записи для полосы ВЧ.

Сводные результаты измерений приведены в таблице 4, а расшифровка обозначений приведена в таблице 5.

Таблица 4 Вектора результатов испытаний на машине трения

Столбец	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Дата	i	n	t	S	JJ	$\alpha v$	$\Sigma S$	$\Sigma h$	h	K	$\Sigma t$
10.04.17	1	300	15	0.707	61	0.62	0.707	0.043	0.043	1414	15
17.04.17	2	300	20	0.942	33	0.43	2.356	0.098	0.054	606	35
17.04.17	3	300	20	0.942	7.97	0.25	4.948	0.118	0.021	385	55
24.04.17	4	300	40	1.881	5.7	0.1	9.425	0.144	0.026	223	95
02.05.17	5	300	35	1.65	1.4	0.08	15.551	0.152	0.009	163	130

Таблица 5 Обозначения параметров таблицы 4

Столбец	Обозначение	Размерность	Параметр
1	$i$	-	Номер сеанса
2	$n$	об/мин	Частота вращения (опытная)
3	$t$	мин	Продолжительность сеанса (опытная)
4	$S$	км	Путь трения за сеанс (расчетная)
5	$JJ$	мм/1000 км	Интенсивность изнашивания (опытная)
6	$\alpha v$	м/с <sup>2</sup>	СКЗ в высокочастотном диапазоне
7	$\Sigma S$	км	Суммарный путь трения
8	$\Sigma h$	мм	Суммарный износ (расчетный)
9	$h$	мм	Износ за сеанс (опытная и расчетная)
10	$K$	1/1000 км	Условный коэффициент, JJ/h
11	$\Sigma t$	мин	Суммарное время до конца сеансов

В первых пяти столбцах таблицы 4 записаны основные параметры. Столбец 6 содержат замеры СКЗ для полосы ВЧ  $\alpha v$ . В столбцах 7...11 приведены расчетные вектора некоторых дополнительных расчетных величин: суммарный путь трения  $\Sigma S$ , суммарный износ  $\Sigma h$ , мм, износ за сеанс  $h$ , мм, условный коэффициент  $K = JJ/h$ , 1/км и суммарное время до конца сеанса  $\Sigma t$ , мин.

Имеется возможность найти корреляционные связи между векторами таблицы 4 для прогнозирования процесса приработки поверхностей пары трения полувкладыш подшипника-ролик со смазочным материалом.

В первую очередь определим функцию  $R(\alpha v)$  зависимости времени приработки от СКЗ по данным векторов  $\alpha v$  (столбец 6) и  $t$  (столбец 11) с применением метода наименьших квадратов. В блоке формул (12) получены значения при помощи специальных операторов редактора MathCAD.

$$\begin{array}{l}
 Y = A + B X \\
 Y = \log(t); X = \log(\alpha v) \\
 f = \text{line}(X, Y) \rightarrow A = 1.02, B = -0.996 \\
 R(\alpha v) = 10^{1.02} / \alpha v^{0.996} \approx 10 / \alpha v \\
 kk = \text{corr}(R(\alpha v), t) = 0.992
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 a \\
 b \\
 c \\
 d \\
 e
 \end{array} \right\} (12)$$

Блок формул (12) начинается с уравнения регрессии,  $a$  зависимости времени проработки  $t$  от СКЗ  $\alpha v$  с применением логарифмической анаморфозы  $b$ . В выражении 12d показана искомая функция  $R(\alpha v)$  для расчета времени проработки путем перевода логарифмической функции в степенную. Рассчитанный по формуле 12e коэффициент корреляции 0,992 подтверждает хорошее согласия полученной функции с опытными данными.

На рисунке 6 показаны эмпирические и теоретические кривые, построенные по алгоритму блока формул 12. Отметим высокий коэффициент корреляции эмпирических и теоретических данных.

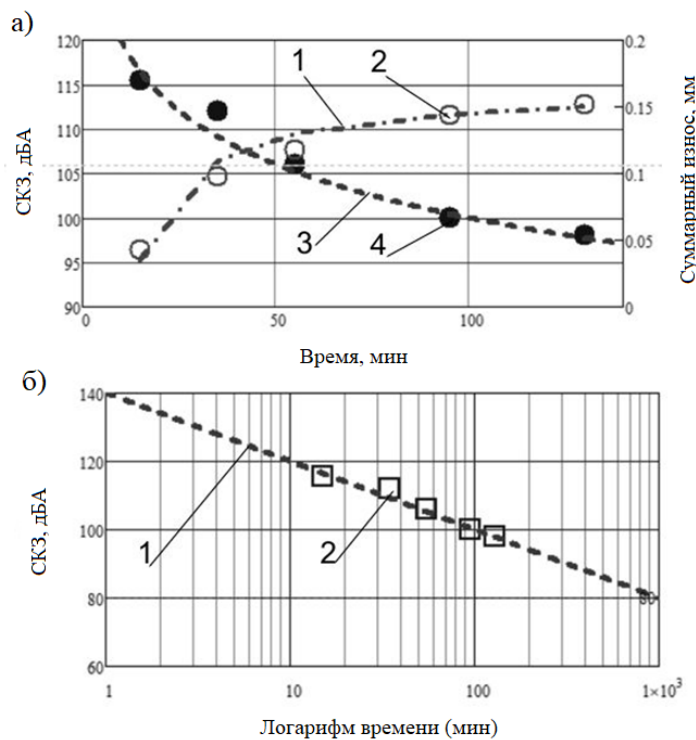


Рисунок 6 Зависимости СКЗ ускорения и интенсивности изнашивания (а) и вибрации (б) от времени проработки

## 5 Методы исследования абразивного изнашивания материалов на машине трения

### 5.1 Устройство для исследования абразивного изнашивания вкладышей на машине трения

Исследование абразивного изнашивания состоит из двух этапов. На первом этапе изучалось изнашивание вкладышей трехслойных подшипников диаметром 50 мм и шириной 19 мм с целью выявления закономерностей влияния типа абразивной шкурки (АШ) и материала слоев вкладыша подшипника на интенсивность изнашивания. На втором этапе использовались макеты вкладышей из разных материалов тех же размеров для уточнения методики тестирования износостойкого материалов по результатам испытаний образца с помощью МИБ и ВАК.

Изложение сущности испытаний начнем с результатов работ на первом этапе. Для приближения этих испытаний к условиям работы реальных объектов была разработана более жесткая конструкция нажимного устройства рисунок 7а, куда устанавливался подшипник от двигателя автомобиля с нанесенными на его поверхность круглыми лунками при помощи сверла (рисунок 7б). При наладочных испытаниях на вкладыше нарезалось 9 лунок.

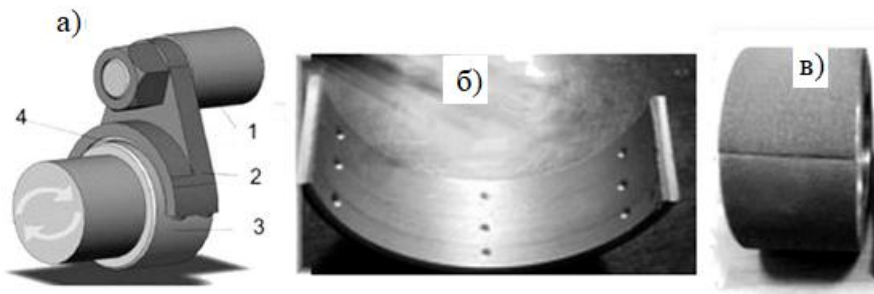


Рисунок 7 Модель пары трения (а): 1–нажимное устройство, 2 – корпус, 3–вал, 4–вкладыш; б) вкладыш с лунками; в) вал с наклеенной абразивной шкуркой

Уникальность этих испытаний заключалась в том, что вкладыши имеют

трехслойную конструкцию. Слой 1 — это антифрикционный слой скольжения (баббит), он имел начальную твердость менее 50 НВ (кгс/мм<sup>2</sup>) и начальную толщину 0,3 мм. Второй слой 2 — это материал на медной основе с начальной твердостью 85 – 90 НВ и толщиной 0,35 мм. Слой 3 — это связующий слой. Слой 4 принадлежит основе и не подвержены нанесению лунок.

На рисунке 8 представлены результаты испытаний графически, из которых виден переход от одного слоя к другому как при исследовании ИИ (рисунок 8а), так и при исследовании СКЗ виброускорения (рисунок 8г)

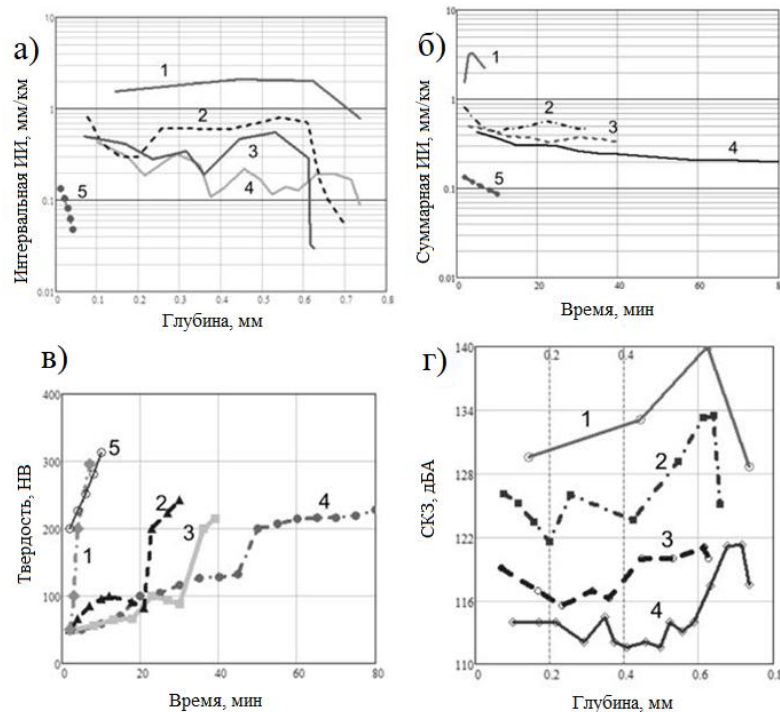


Рисунок 8 Результаты измерений ИИ от времени (а) и глубины износа (б), твердости (в) и СКЗ (г) от глубины износа. Абразивные шкурки: 1 – АШ80, 2 – АШ150, 3 – АШ1230, 4 – АШ600 и 5 – стальная оболочка с валом (без АШ) со смазкой

К сказанному следует добавить, что наряду с измерениями ИИ при разных АШ была испытана пара трения при смазке, состоящая из голого стального вала (без АШ) и стальной оболочки подшипника (без слоев). Как видно из рисунка 8а и

8б в этом случае ИИ стала меньше, чем у всех пар трения с АШ с тенденцией снижения по глубине и по времени. По-видимому, здесь также происходит увеличение твердости или снижение шероховатости. Интересно отметить, что кривая твердости 5 этой пары при граничном трении на рисунке 8в практически совпала с кривой 1 для абразивного изнашивания с АШ80 при сухом трении. Это, как будет рассмотрено ниже, открывает некоторые пути для совершенствования методики ускоренных испытаний на машине трения.

## 6 Метод «Хорды»

Конструкция узла трения для метода «Хорды» показана на рисунке 9.

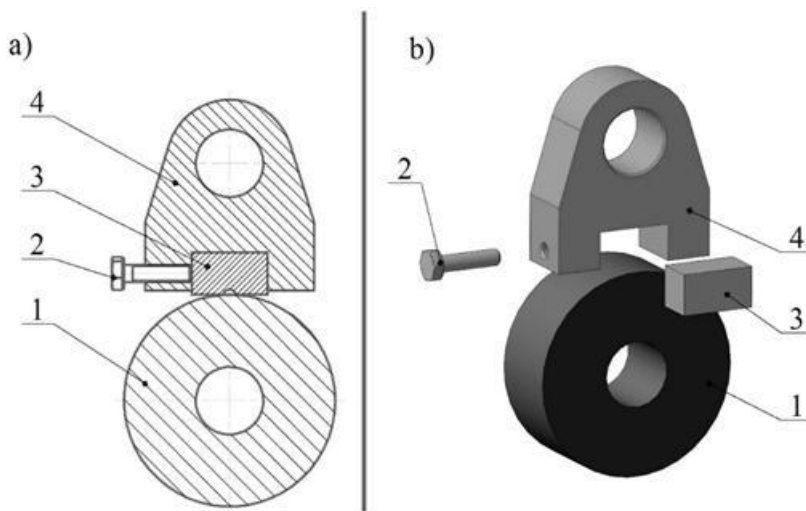


Рисунок 9 Элементы устройства для испытаний образцов материалов с колодкой в виде бруска: а – формат 2d. б – формат 3d, 1– ролик, 2 – болт для фиксации бруска, 3–брусок, 4 – держатель

Метод хорды представляет собой методику испытаний пары трения с целью оценки относительной ИС образцов любых материалов, изготовленных в виде бруска размером 10x10x18 мм.

Исходными данными для оценки ИИ и (или) ИС является измерение хорды кругового сегмента, образованного при врезании ролика 1 (рисунок 10) в плоскость бруска 2 по мере его износа за время  $T$ .



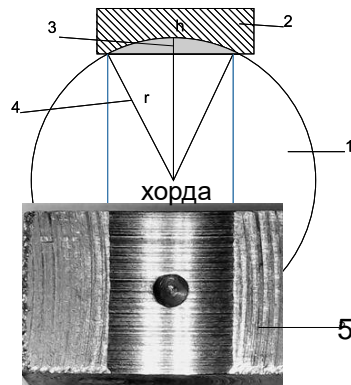


Рисунок 10 Схема образования хорды на поверхности бруска: 1– ролик, 2 – брусок, 3– сектор от пересечения диска с бруском, 4 – радиус хорды, 5 – изображение сектора на поверхности бруска

Полный алгоритм расчета ИС методом хорды представлен в таблице 6.

Таблица 6 Алгоритм оценки ИС материалов методом хорды

Записать результаты	
Время $T$ , мин	
Длина хорды - $L$ , мм	
Расчет	
Износ	$I_z = L^2 / (4000 D)$ , мм
Интенсивность износа	$J_j = I_z / (1000 p D n T)$ , мм/км
Удельное давление	$p = P / L H$ , кгс / мм <sup>2</sup> = 9.8 МПа
Твердость от наклепа	$HB_i = HB_1 J_{j_1} / J_j$
Износостойкость	$J_s = 1 / J_j$ , км/мм
Центральный угол	$J = 2 \arccos[(r - I_z) / r]$ , рад
Площадь сектора	$f = \frac{r^2}{2} (J - \sin(J))$ , м <sup>2</sup>
Масса продуктов износа	$m = f H g$ , кг

Испытания показали, что границы хорды сегмента  $L$  хорошо видны под

микроскопом или визуально (при больших размерах хорды).

Метод применяется для оценки ИС как при граничной смазке, так и при абразивном изнашивании. В последнем случае следует установить на ролик шкурку АШ600. В таблице 7 приведены результаты специальных испытаний ряда материалов на износостойкость.

Таблица 7 Результаты экспериментального определения ИС

Действие	Дано		Расчет по формулам алгоритма таблицы 6				
	T	L	Iz	Jj	p	НВ	Js
Размерность	мин	мм	мм	мм/км	кгс/мм <sup>2</sup>	кгс/мм <sup>2</sup>	км/мм
Сталь с АШ600	2.5	5.55	0.154	3.932	0.36	200	0.254
	5	6.42	0.206	2.624	0.312	299.7	0.381
	7.5	7.05	0.249	2.111	0.284	372.5	0.474
Чугун с АШ600	2	6.6	0.218	6.933	0.303	200	0.144
	4	7.1	0.252	4.012	0.282	345.6	0.249
	6	8.2	0.336	3.567	0.244	388.7	0.28
Бронза с АШ600	2.5	7.73	0.299	7.608	0.259	100	0.131
	3.5	8.79	0.386	7.027	0.228	108.3	0.142
	4.5	9.53	0.455	6.895	0.21	110.3	0.145
Алюминий с АШ600	1	6.89	0.237	15.111	0.29	50	0.066
	2	8	0.32	10.186	0.25	74.2	0.098
	3	9	0.405	8.594	0.222	87.9	0.116
Олово со смазкой	2	7.7	0.296	9.436	0.26	30	0.106
	3.5	8.9	0.396	7.204	0.225	39.3	0.139
	5	10	0.5	6.366	0.2	44.5	0.157
Чугун со смазкой	5	9.3	0.432	5.506	0.215	200	0.182
	10	12.6	0.794	5.053	0.159	217.914	0.198
	15	15	1.125	4.775	0.133	230.64	0.209

Действие	Дано		Расчет по формулам алгоритма таблицы 6				
	T	L	Iz	Jj	p	НВ	Js
Размерность	мин	мм	мм	мм/км	кгс/мм <sup>2</sup>	кгс/мм <sup>2</sup>	км/мм
Алюминий со смазкой	5	3.57	0.064	0.811	0.56	50	1.232
	10	4.07	0.083	0.527	0.491	76.939	1.897
	15	4.48	0.1	0.426	0.446	95.251	2.348
Алюминий со смазкой	5	3.62	0.066	0.834	0.552	50	1.199
	10	4.34	0.094	0.6	0.461	69.573	1.668
	15	4.8	0.115	0.489	0.417	85.315	2.045
бронза со смазкой	5	3.5	0.061	0.78	0.571	50	1.282
	10	4.07	0.083	0.527	0.491	73.952	1.897
	15	4.55	0.104	0.439	0.44	88.757	2.276
Сталь 40Х	5	2.2	0.024	0.308	0.909	200	3.245
	10	2.7	0.036	0.232	0.741	265,56	4.309
	15	2.9	0.042	0.178	0.69	345,2	5.603
Сталь констр	5	1.35	0.009	0.116	1.481	200	8.619
	10	1.5	0.011	0.072	1.333	324	13.963
	15	1.6	0.013	0.054	1.25	428	18.408

Расчет по алгоритму (таблица 6) начинается с измерения хорды  $L$  после износа в течении трех сеансов времени испытаний  $T$ . В остальных столбцах записываются результаты расчета износа  $I_z$ , интенсивности изнашивания  $J_j$ , фактического удельного давления  $p$ , фактической твердости НВ и износостойкости  $J_s$ .

Для того, чтобы грамотно оценить относительную ИС целесообразно выбрать единую продолжительность испытаний для разных вариантов пар трения (абразивная и при смазке). Следует иметь ввиду, что при абразивных испытаниях из-за большого износа хорда может увеличиваться до нескольких

миллиметров (например, при длине хорды 14 мм, износе составляет 1 мм). При испытаниях со смазкой хорда получается значительно меньше от 1,5 до 4,5 мм в зависимости от твердости материала. Однако при испытаниях с маслом образца из мягкого олова за 5 минут образовалась хорда 10 мм при износостойкости 0,139, что практически совпало с абразивными испытаниями образца алюминия.

Для нормирования единого (стандартного) времени испытаний был получен следующий общий вид степенной функции ИС от времени (формула 13). Алгоритм решения этой задачи методом наименьших квадратов показан в блоке формул таблицы 8.

$$J_s(t) = a t^b \quad (13)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные уравнения регрессии тройной выборки для каждой пары трения (таблица 9).

Таблица 8 Расчет постоянных уравнения регрессии тройной выборки для каждого материала методом наименьших квадратов

<p><i>Вектора переменных</i></p> <p><math>D^{&lt;0&gt;}</math> – вектор времени, мин,</p> <p><math>D^{&lt;6&gt;}</math> – вектор износостойкости, <math>\frac{\text{км}}{\text{мм}}</math>, или УД кгс / мм<sup>2</sup></p> <p><i>Анаморфоза (по MATHCAD)</i></p> <p><math>X = \log(D^{&lt;0&gt;}), Y = \log(D^{&lt;6&gt;}),</math></p> <p><math>aa = \text{line}(X, Y) = \begin{bmatrix} aa_0 \\ aa_1 \end{bmatrix}, a = 10^{aa_0}, b = aa_1</math></p> <p><math>J_s(t) = a t^b</math> или <math>UD(t) = a t^b</math></p>
--

При выборе стандартного времени испытаний пришлось экспериментировать при разных периодах времени (сеансах) испытаний (рисунок 11а). Затем по функциям таблицы 8 были рассчитаны кривые для всех

пар трения в диапазоне от 0 до 15 мин, что позволило выбрать общую стандартную наработку (например, 10 мин) для сравнения ИС разных материалов (рисунок 11б) (цифры на графиках соответствуют номеру материала в таблице 9).

Таблица 9 Корреляционный анализ измерений

№	Показатель Образец	ИС, км/мм				
		a	b	corr	И10	ИО10
1	Бронза АШ	0.109	0.201	0.977	0.175	0.04
2	Алюм АШ	0.067	0.519	0.987	0.221	0.05
3	Чугун АШ	0.096	0.625	0.954	0.405	0.09
4	Сталь АШ	0.151	0.57	0.996	0.561	0.13
5	Чугун М	0.149	0.125	0.994	0.199	0.044
6	Олово М	0.079	0.434	0.995	0.215	0.05
7	Алюм М	0.479	0.591	0.994	1.861	0.41
8	Алюм М	0.548	0.485	0.999	1.86	0.41
9	Бронза М	0.553	0.527	0.998	1.67	0.37
10	Сталь40 М	1.459	0.488	0.998	4.488	1.00
11	Констр. М	2.838	0.691	0.999	13.932	3.10

Отметим, что выбранные малые периоды времени измерений объясняются тем, что испытания относятся к диапазону приработки пары трения. Увеличение ИС со временем объяснилось увеличением твердости поверхности по причине наклепа от пластической деформации. Следует различать этот показатель при абразивном изнашивании и при наличии смазки. При абразивном изнашивании одних и тех же материалов износостойкость на порядок меньше значений при граничном трении. Следует отметить практически полное совпадение интенсивности изнашивания для трех марок цветных металлов (около 0,4), что указывает на их близкую твердость.

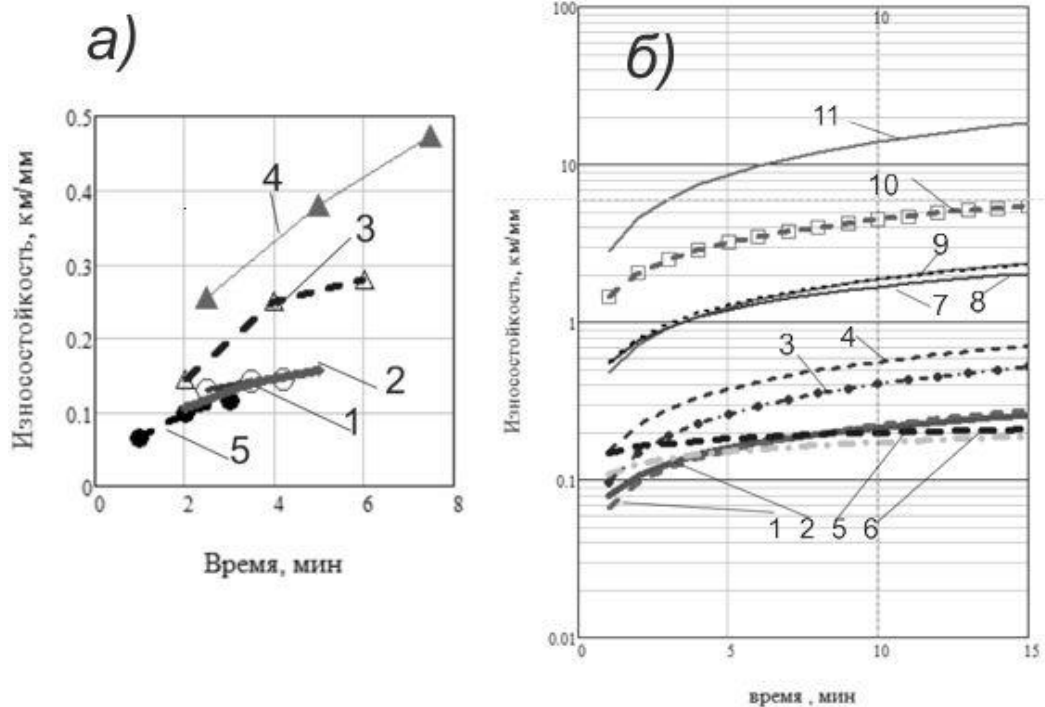


Рисунок 11 Зависимость ИС от времени при испытаниях (а) и расчетное (б)

Для наглядности на рисунке 12 построены гистограммы распределения ИС для материала пары трения. Наименьшие ИС получены для стали 3 и цветных металлов 1 и 2 при абразивном износе. При граничном трении со смазкой получены близкие значения относительной износостойкости для двух образцов алюминия 4 и 5, и бронзы 6. Интересные результаты получены при испытаниях с маслом олова и чугуна. Для них ИС имеет очень низкие значения, которые практически совпала с ИС алюминия при абразивном износе.

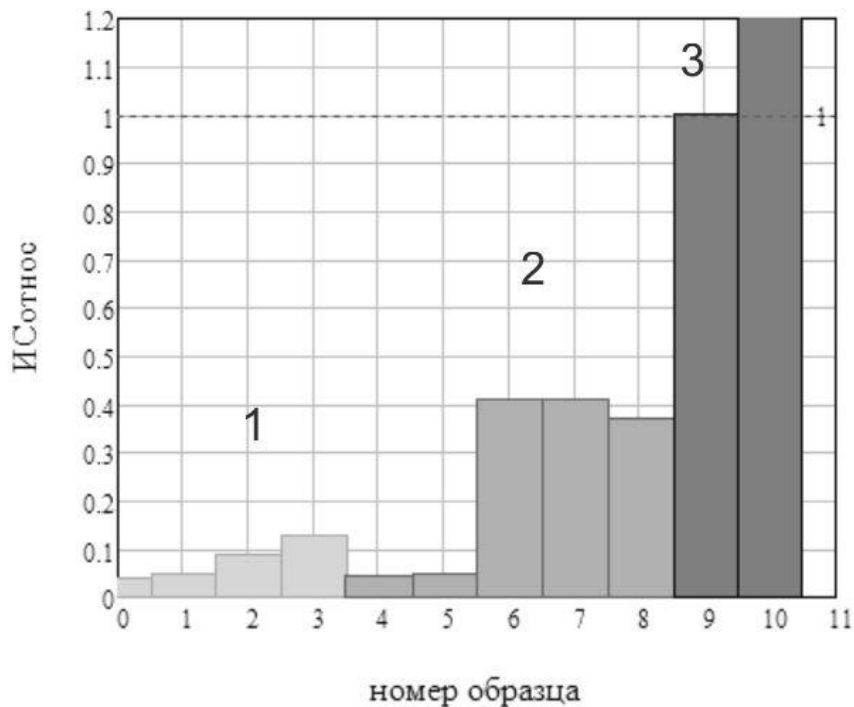


Рисунок 12 Сравнение относительной износостойкости материалов. Зона 1 (абразивный износ): 1 – бронза, 2 – алюминий, 3 – чугун, 4 – сталь. Зона 2 (граничное трение со смазкой цветных металлов) 5 – чугун, 6 – олово, 7 – алюминий, 8 – алюминий, 9 – бронза. Зона 3 (стали) 10 – сталь 40, 11 – сталь 08X18H10T.

Заметно большие ИС установлены для стали 40 (9) и конструкционной стали (11). Приведенные данные позволяют ответить на очень важный вопрос для организации ускоренных испытаний: насколько ИС при граничном трении (со смазкой) больше ИС при абразивных испытаниях? Как правило, при одной и той же наработке (10 мин) ИС при абразивном износе значительно меньше, чем при граничном трении. Однако испытания чугуна показали, что применения абразивных средств не всегда пригодно для ускорения испытаний на износ. Для узлов трения машин предпочтение надо отдать испытаниям со смазкой, при котором для настройки оптимальных эталонных показателей следует применять варьирование параметрами режимов испытаний (нагрузкой, частотой вращения и продолжительностью сеансов) с учетом прослойки в паре трения (прямой контакт, смазка, абразивный материал). Сведения о всех этих условиях должны указываться одновременно с выбором эталонного материала и результатами

оценки относительных ИИ и ИС.

Важным преимуществом рассмотренного метода хорд является его более высокая точность за счет измерения прямолинейной длины хорды (по сравнению с окружностью от сверла). Метод упрощает контроль и управление процесса измерения. Приведенные данные подтверждают эффективность оценки износостойкости методом хорды.

Рассмотренный метод хорды следует отнести к весьма эффективной операции МИБ. В качестве искусственной базы выступает отрезок хорды  $L$ , который позволяет оценить суммарный износ.



## Литература

1. Хрущов Михаил Михайлович. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы (к 120-летию со дня рождения) / Отв. ред. И. Г. Горячева; Предисл. И. Г. Горячевой; Вступ. ст. И. А. Буяновского, М. М. Хрущова (мл.). — М.: К55. РАСАНД, 2012. — 512 с.
2. Хрущов М.М. и Беркович Е.С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз - М.: Изд-во Академии наук, 1959.-217 с.
3. ГОСТ 28813-90 (ИСО 4383-81, СТ СЭВ 6901-89) Подшипники скольжения. Металлические многослойные материалы для тонкостенных подшипников скольжения
4. ГОСТ Р ИСО 4386-1-94. Государственный стандарт российской федерации.. Подшипники скольжения. Металлические многослойные подшипники скольжения. Неразрушающие ультразвуковые испытания соединения слоя подшипникового материала и основы. ГОССТАНДАРТ РОССИИ. Москва
5. Крагельский И. В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. доп. М., изд-во «Машиностроение», 1968, 480 стр.
6. Р 50-54-36-88 Обеспечение износостойкости изделий. Метод и приборы для измерений износа деталей из материалов на основе модифицированной древесины
7. ГОСТ 23.301-78 Обеспечение износостойкости изделий. Приборы для измерения износа методом вырезанных лунок. Технические требования
8. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. «Техника», 1970, 396 с
9. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: Учеб. Пособие. /СПб. СЕВЗАПУЧЦЕНТР, 2013. 152 с.
10. Ефремов Л. В., Баева Л. С., Тикалов А. В. Виброакустические испытания образцов трибосопряжений на ИС // Вестн. Астраханского

государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. 2017. № 2. С. 69—76..

11. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Виброакустический контроль изнашивания образцов цилиндрических пар трения // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 106—111.

12. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Измерение износов деталей машин в полевых условиях на основе метода искусственных баз // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 3. С. 237—242.

13. Ефремов Л.В., Тикалов А.В. Бреки А.Д. Ускоренные испытания стальных образцов на ИС методом искусственных баз // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 8. С. 671—676.

14. Заковоротный В.Л., Семенова Н.С. Виброакустическая диагностика трибосопряжений Вестник ДГТУ, 2005. Т.5. №1(23)

15. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев, Наук, думка, 1979. 188 с.

16. Ефремов Л.В. Проблемы управления надежностно–ориентированной технической эксплуатацией машин — СПб. Art-Xpress, 2015. – 206 с.

17. ГОСТ 23.301-78 Обеспечение износостойкости изделий. Приборы для измерения износа методом вырезанных лунок. Технические требования

18. Ефремов Л.В., Черняховский Э.Р. Надежность и вибрация дизельных установок промысловых судов – М.: Пищ. промышленность, 1980, 232 с.

19. Требования к простейшей системе Мониторинга. Интернет - ресурс <http://vibroexpert.ru/trebovaniyakprosteiesheiesistememonitoringa.html>

20. А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше и др.; Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. / Основы трибологии (трение, износ, смазка). 2-е изд. переработ, и доп. - М.: Машиностроение, 2001.

21. Доценко А.И., Буяновский И.А. / Основы триботехники. Учебник. - М.: Инфра- М, 2014.