

12. Испытания по методу Райхерта: сайт компании "Моденжи" г. Брянск: 2023. <https://modengy.ru/about/>.
13. ASTM D 2782–20. Standard test method for measurement of extreme-pressure properties of lubricating fluids (Timken method), doi: <https://doi.org/10.1520/D2782-20>.
14. Абрамов, А.Н. Модернизированная машина трения / А.Н. Абрамов, В.Ю. Шолом, Д.Г. Тюленев, К.А. Абрамов, С.М. Пилюгин // Транспортное машиностроение. -2023. -№ 12. -С. 10-19.
15. Патент 2808556 Российская Федерация, МКП: G01N 19/02. Устройство для определения противозадирных и антифрикционных свойств смазочных материалов. / В.Ю. Шолом, А.Н. Абрамов, А.В. Шолом, К.А. Абрамов и др.; заявитель и патентообладатель ООО «ХТЦ УАИ». Заявлено 19.04.2023. Опубл. 29.11.2023. Бюл. № 34.

Abramov K.A., Tyulenev D.G., Abramov A.N., Pilyugin S.M., Gilmanov T.I.  
Self-supporting creative center of the Ufa Aviation institute,  
Ufa, Russia, Abramov@rosoil.ru

## FRICITION AND WEAR TEST RIG

### Abstract

An improved design of a friction machine protected by a patent of the Russian Federation for determining the anti-scuffing, anti-friction and anti-wear properties of structural and lubricating materials is presented. In a friction machine, the radial force on the friction unit (roller-ring or bar-ring) is generated by a smooth loading mechanism, and the evaluation of extreme pressure lubricants is determined at the moment of setting of the rubbing specimens, as a result of which the shaft of the electric motor stops. As a result of the modernization of the machine, it is now possible to measure the friction force, the normal load and calculate the coefficient of friction. The results of comparative tests on an upgraded friction machine and a four-ball friction machine for cutting fluids are presented.

*Keywords:* friction machine; anti-scuffing properties; anti-friction properties; force measuring sensor; smooth loading mechanism; setting load; friction coefficient.

УДК 621.3

doi: 10.18720/SPBPU/2/id24-229

Л. В. Ефремов  
Институт проблем машиноведения РАН,  
195221, Санкт-Петербург, Россия, levlefr@mail.ru

## ИЗМЕРЕНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### Аннотация

В докладе показаны методы измерений неровностей, возникающих на поверхности деталей как при их изготовлении (например, шероховатости), так и при испытаниях и эксплуатации (например, контактно-усталостные, коррозионные, кавитационные, ударные и другие естественные повреждения). Эту проблему предложено решать на мониторе обычного цифрового микроскопа, оснащенного источником светового луча, совпадающего с оптической осью прибора. Разработаны

алгоритмы анализа характерных изображений неровностей и методы их оценки с помощью инструмента ImageJ.

*Ключевые слова:* Изображение, поверхность, неровность, повреждения, шероховатость

### **Введение**

Надежная работа машин и другой техники во многом зависит от состояния поверхности их деталей, что обуславливает широкое распространение исследований методов трибоиспытаний их износостойкости [1– 8]. Данная работа посвящена другой, но не менее важной проблеме – измерению неровностей поверхности. К этому понятию можно условно отнести две группы явлений. Во-первых — это технологические неровности, образованные при изготовлении или испытаниях изделий. К ним, например, относится шероховатость поверхности [9-11]. Измерение последней выполняется либо по эталонным образцам, либо с помощью профилометров и других специальных приборов. В данной работе ставится задача упростить оценку шероховатости с приемлемой точностью только по увеличенной фотографии внешнего вида неровностей.

Ко второй группе неровностей относятся повреждения, обнаруживаемые при ремонтах или авариях техники и возникающие из-за различных естественных процессов и случайных нагрузок.

На рисунке 1 показан вид некоторых характерных повреждений: 1 и 2 - контактно-усталостные повреждения (раковины), 3 - фреттинг-коррозия, 4 - точечная коррозия, 5 – кавитация.

В отличие от процесса изнашивания, который оснащен необходимыми средствами и методами измерения, такие виды поверхностных повреждений оцениваются субъективно визуальным осмотром [12]. Отсюда следует вторая задача этого труда – обоснование метода количественной оценки естественных повреждений путем их увеличенного фотографирования.

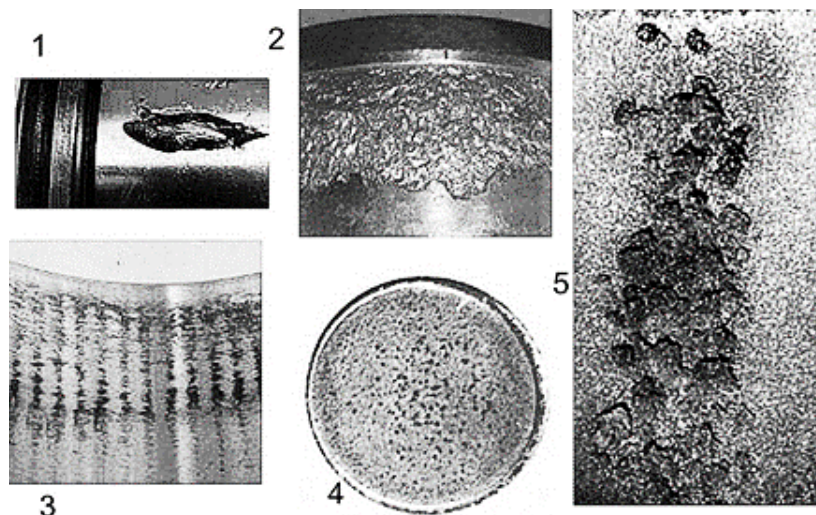


Рисунок 1 - Примеры некоторых характерных повреждений

### **Методы и материалы**

Из выше сказанного следует, что целью настоящего исследования является разработка методов измерения неровностей двух видов – шероховатости и естественных повреждений, что позволит следить за их развитием по мере технического обслуживания техники и проверять эффективность устранения

дефектов.

При решении этих проблем использовались следующие инструменты.

Цифровой микроскоп [13], оснащенный одним источником светового луча, совпадающего с оптической осью (рисунок 2). Микроскоп устанавливается на штативе, который позволяет осуществлять фотографирование как в вертикальном (a), так и в наклонном (b) положении под углом  $\varphi$ .

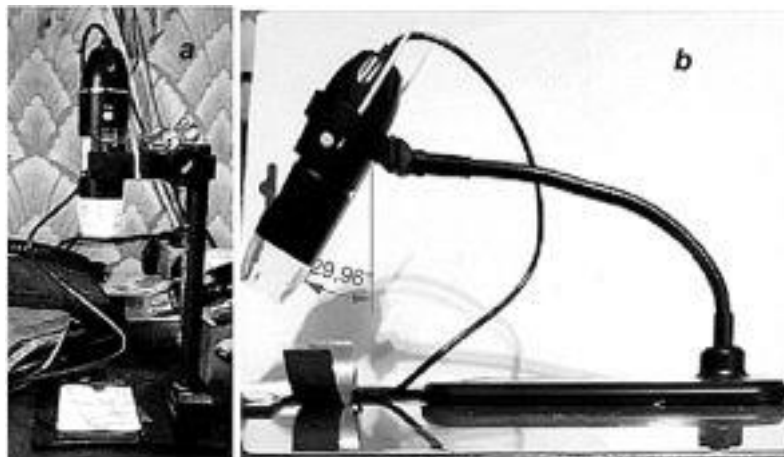


Рисунок 2 - Цифровой микроскоп

Программный пакет ImageJ для анализа и обработки научных изображений [14] (рисунок 3).

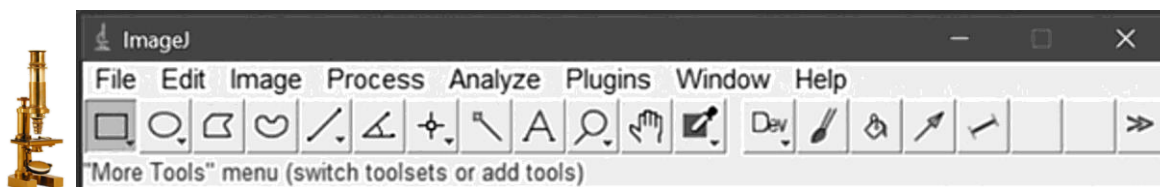


Рисунок 3 - Программный пакет ImageJ

ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики [10], который использован как источник исходных данных для корреляционного анализа.

Математический редактор, например, MATHCAD, для составления алгоритмов анализа результатов измерения.

### **Результаты и обсуждение исследований шероховатости**

Объектом исследования послужили следующие эталонные образцы шероховатости. Для точения: Rz20, Rz40 и Rz80. Для фрезерования: Rz10, Rz20, Rz40 и Ra3.2 (Rz12.8).

Вертикальное и наклонное фотографирование образцов выполнялось по программе микроскопа с разрешением до  $1920 \times 1440$  и увеличением более 150 раз. Для обеспечения точности измерение шага снимки направлялись в пакет ImageJ, в котором имеется возможность построить график профиля линейного выделения неровности по команде Analyze – Plot Profile. На рисунке 4 приведены примеры этой операции для образцов Rz20 при токарном точении (рисунок 4.1) и фрезеровании (рисунок 4.2).

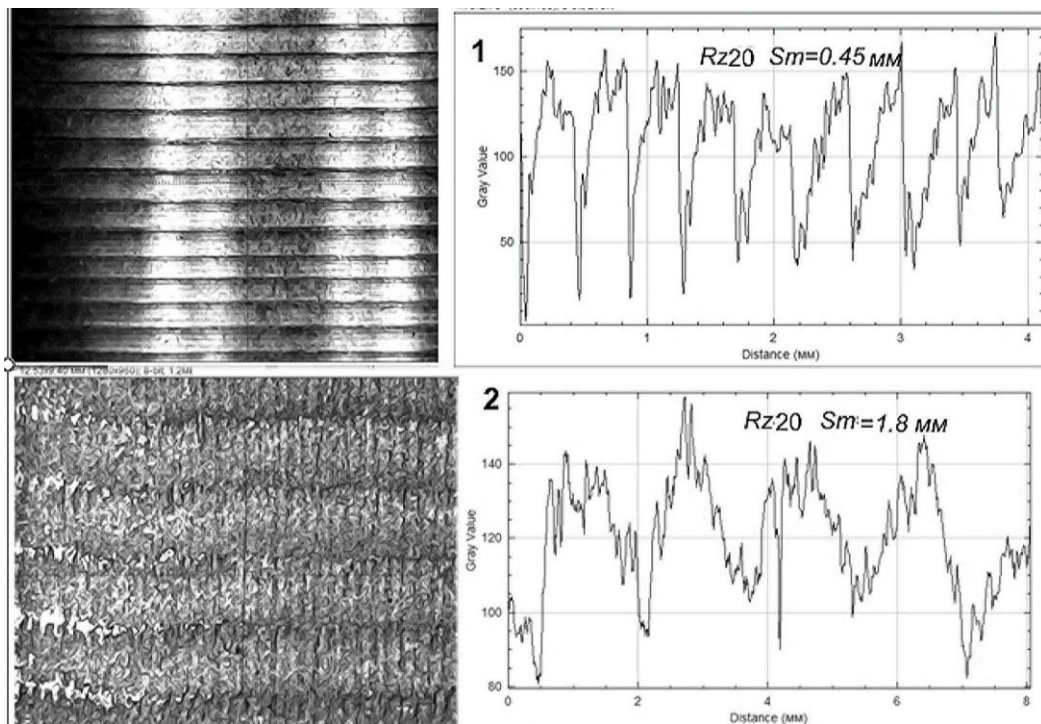


Рисунок 4 - Графики профиля линейного выделения шероховатости

Проблему удалось решить путем удачной попытки найти корреляционную зависимость шероховатости от шага неровности по паспортным данным о Rz образцов и результатам измерения для них шага Sm. Более того, были установлены допустимые границы полученных функций по требованиям ГОСТ 2789-73 [10], где Rz, мкм–варианты минимальной и максимальной границы диапазона шероховатости, L, мм–базовая длина,  $Sm=L/5$  мм – шаг неровности. Далее по этим данным определены две коррекционные зависимости Rzmin от Sm и Rzmax от Sm. Зависимости тако же вида получены по результатам измерения шага Sm указанных выше образцов при точении и фрезеровании.

Контрольное построение кривых зависимости Rz от Sm в логарифмических координатах (рисунок 5а) подтвердило, что все они могут быть аппроксимированы степенными функциями вида (1).

$$Rz(Sm) = a Sm^b \quad (1)$$

Отметим, что на рисунке 5 применены следующие обозначения кривых: 1 и 2 – минимальная и максимальная граница допустимого диапазона Rz по ГОСТ [10], 3 – образцы для точения и 4 – образцы для фрезерования.

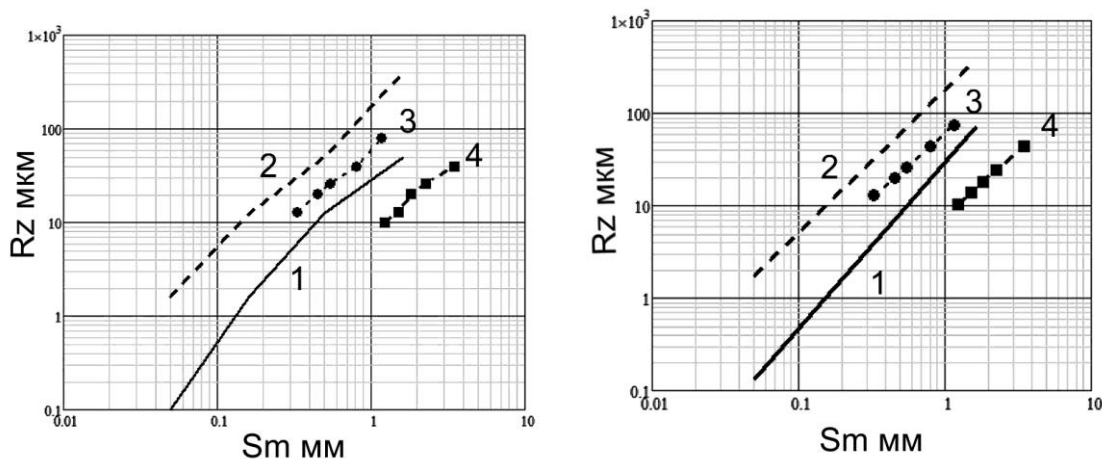


Рисунок 5 - Графики фактических (а) и теоретических (б) функций Rz от Sm

Таблица 1 – Параметры а и b функции (1) для кривых на рисунке 5

Кривая рис 8		a	b	Corr (Sm)
№	Назначение			
1	Граница max	180	1,55	0,997
2	Граница min	30	1,8	0,989
3	Точение	61	1,4	0,992
4	Фрезеровка	8	1,4	0,994

Используя метод наименьших квадратов [15], в таблице 1 рассчитаны параметры а и b функции (1) с высоким коэффициентом корреляции ( $\approx 0.99$ ) для всех кривых на рисунке 5.а и 5.б.

Завершая описание исследований по измерениям, шероховатости целесообразно обратить внимание на возможность не только рассчитывать параметр  $R_z$ , но и проверять его соответствие требованиям ГОСТ [10]. На рисунке 5 видно, что параметры течения соблюдают эти требования, поскольку кривая 3 располагается между кривыми 1 и 2, что нельзя сказать о кривой 4 для фрезерования по причине большой толщины фрезы.

### Результаты и обсуждение исследований естественных повреждений

Далее предлагается метод количественной оценки размеров повреждений с использованием программного пакета ImageJ [14].

Объектом исследования в данном случае является пятно повреждений установленного размера (в пиксель<sup>2</sup>), состоящего из элементов, условно называемые частицами. Для количественной оценки рассматриваемой неровности ставится задача определения количества, матожидания и процентной доли площади максимальных по размеру частиц в пятне повреждений при условии, что коэффициент вариации их размеров  $K_v < 1$ . Такая формулировка задачи исследования и методика ее решения в пакете ImageJ предлагается впервые, иллюстрируется рисунками 6, 7, 8 и состоит из следующих операций.

Создать файл с изображением неровности с помощью электронного микроскопа (рисунок 3).

Установить в программный пакет ImageJ файл с изображением неровности по команде «File– Open» (рисунок 6.а).

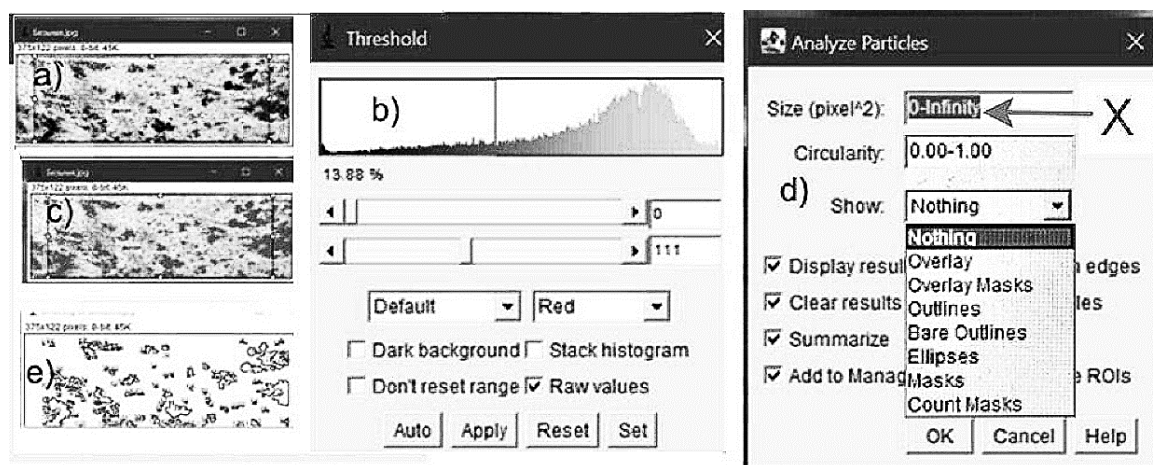


Рисунок 6 - Программа обработки пятна повреждения

Присвоить файлу формат изображения 8-bit по команде «Image–Type» и вызвать программу обработки изображений (рисунок 6.б) по команде «Image–Adjust–Threshold», что должно привести к покраснению исследуемых частиц

(рисунок 6.с).

Вызвать программу решения основных задач исследования (рисунок 6.d) по команде «Analyze– Analyze Particles» с окном исследуемого диапазона размера площади частиц X в пиксель<sup>2</sup>. Следующие действия разбиты на два этапа

Первый этап выполняется при варианте X от 0 до ∞ с целью оценки начального коэффициента вариации Kv. На рис 6е видно, что в этом случае наблюдается большое количество частиц разных размеров, Как будет показано далее (рисунок 7,а), с этим связано ненормальное превышение СКО = CD = 100,6 величины математического ожидания mean = 43,9 и получение коэффициента вариации  $Kv = CD/mean = 100,6/43,9 = 2,29 > 1$ .

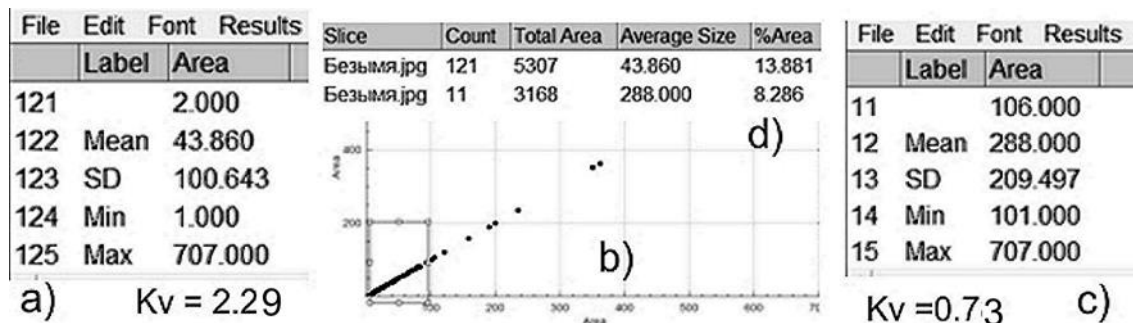


Рисунок 7 - Результаты обработки пятна повреждений

Отметим, что расчёт указанных параметров выполнен по команде «Results– summarize» таблицы рисунка 7.а.

а) Исправление ненормальной ситуации осуществляется на втором этапе исследования с целью определения наиболее опасных максимальных частиц за счет корректировки границ диапазона X. Для этого рекомендуется после расчёта таблицы на рисунке 7.а построить график рисунка 7.б по команде «Results – Plot» и отсечь от первоначальной выборки частиц мелкозернистого «мусора» ниже  $X_{min} = 100$ . После подстановки этой величины в диапазон X и расчёта для неё параметров по команде «Results – summarize» в таблице рисунка и 7.с получаем следующее: число исследуемых частиц сократилось с 121 до 11, СКО = CD = 209,5, mean = 288 и  $Kv = CD/mean = 209,5/288 = 0,73 < 1$ , что и требовалось доказать.

б) Основные результаты расчёта указанных параметров и процентной доли площади активных частиц в пятне «%Area» представлены в таблице рисунка 7.d, которая образуется одновременно с расчётом таблиц 7.а и 7с.

с) На этом оценку характеристики пятна повреждений по правилам ImageJ можно считать завершённой и в отчёт о её выполнении целесообразно включить итоговую таблицу 2 и сравнительные карты активных частиц, изображенных в виде эллипсов на рисунке 8 по команде «Show–Ellipses» на рис 6d.

Таблица 2 – Результаты оценки характеристики пятна повреждения

Slice	Xmin	Count	Total Area	Mean	SD	Kv	Min	Max	% Area
Исходная	0	121	5307	43.86	100.64	2.29	1	707	13.9
Без «мусора»	100	11	3168	288.00	209.50	0.73	101	707	8.28

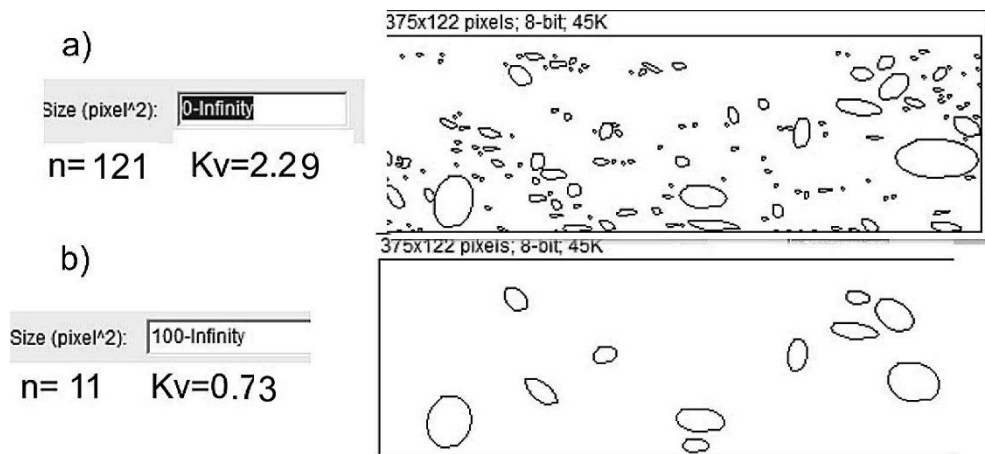


Рисунок 8 - Сравнение характеристик пятна повреждений в зависимости от диапазона размера частиц

К указанным характеристикам пятна максимальных частиц повреждения предлагается добавить рисунок 9 с функциями распределений вероятности отказов  $\alpha(t)$ , плотности вероятности  $f(t)$  и интенсивности отказов  $\lambda(t)$ , которые определяются по правилам закона распределения Вейбулла [15]. Предлагаемые функции позволяют более корректно оценивать максимальные частицы пятна повреждения по сравнению с параметрами  $mean$  и  $Kv$ , которые используются как исходные данные для расчёта указанных функций.

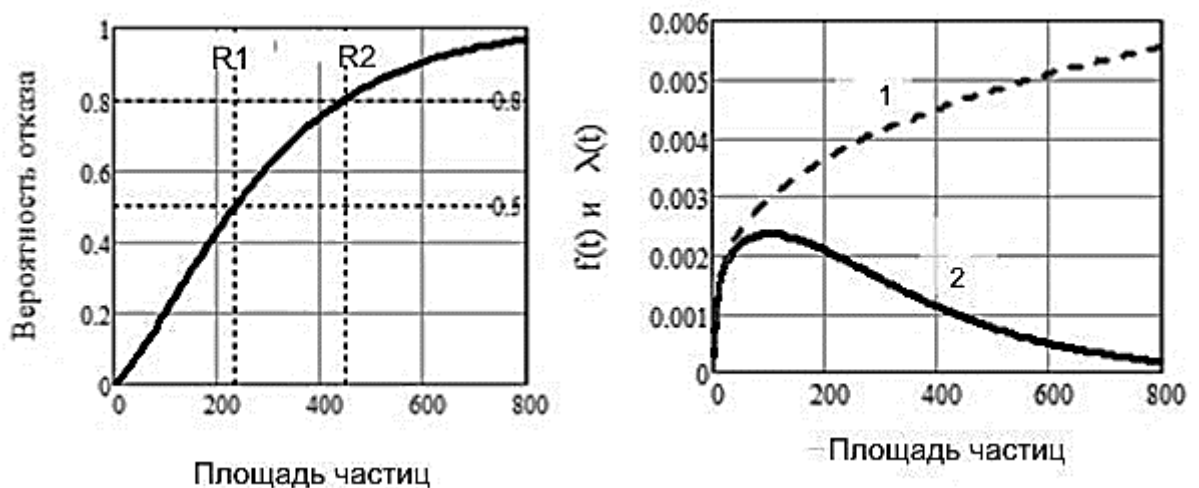


Рисунок 9 - Вероятностные показатели пятна повреждений. R1 – медианный ресурс, R2 – 80 процентный ресурс, 1 – функция  $\lambda(t)$  и 2 – функция  $f(t)$

### Заключение

В докладе показаны методы измерений неровностей двух видов: шероховатость и естественные повреждения. Проблему оценки шероховатости методом фотографирования лучевым электронным микроскопом удалось решить путем корреляционного анализа зависимости образца шероховатости  $Rz$  от измеряемого шага неровности  $Sm$ . Одновременно были установлены допустимые границы полученных функций по требованиям ГОСТ 2789-73 с учётом минимальной и максимальной границы диапазона шероховатости  $Rz$ , мкм при базовой длине  $L$ , мм неровностей. Обоснованная методика имеет полное программное обеспечение в редакторе MATHCAD, которое может быть использовано для разработки приложений для различных эталонных образцов  $Rz$  и  $Ra$ .

Исследования по второму направлению выполнялись по программам пакета ImageJ с целью количественной оценки характеристик естественного повреждения. К таким характеристикам относятся абсолютный и относительный размер пятна повреждений, состоящее из элементов, условно называемые частицами. Задача решалась в зависимости от допустимого диапазона размера частиц который впервые предложено определять по условию достижения коэффициента вариации  $K_v < 1$ . Это позволило отсеять большое количество мелкозернистых частиц и оставить для расчёта искомым характеристикам пятна повреждений только наиболее опасные максимальные частицы. Завершить данное исследование рекомендуется расчетом распределений вероятности по закону Вейбулла по данным о математическом ожидании максимальных частиц. Описанный способ может найти широкое применение для количественной оценки любых повреждений по результатам увеличенного фотографирования, что позволит следить за их развитием по мере технического обслуживания техники и проверять эффективность устранения дефектов

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 124041500009-8).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Friction & Wear Test System. LPR Global Inc. 344 Bloor Street W. Unit 607, Toronto, ON Canada M5S 3A7. <https://isk.yandex.ru/i/hB1-3YuxHaGvcw>
2. Крагельский И. В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. доп. М., изд-во «Машиностроение», 1968, 480 стр.
3. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. «Техника», 1970, 396 с
4. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев, Наук, думка, 1979. 188 с.
5. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники Учебник. - М.: Инфра- М, 2014.
6. Сафонов Б.П., Лысюк А.Я., Лукиенко Л.В. Лабораторные работы по курсу "Основы трения и изнашивания элементов трибомеханических систем оборудования" / РХТУ им. Д.И.Менделеева. Новомосковский институт. - Новомосковск: 2000. - 26 с.
7. 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;— М.: К55. РАСАНД, 2012. — 512 с.
8. Хрущов М.М. и Беркович Е.С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз - М.: Изд-во Академии наук, 1959.-217 с.
9. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Алгоритмы диагностики пар трения скольжения. — СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2023. – 220 с.
10. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики
11. Мусалимов В.М. DGC-анализ случайных профилей поверхностей //Изв. вузов. Приборостроение. 2021.Т64, №6.С.498-502.DOI:10.17586/0021-3454-2021-64-6-498-502.
12. Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». Классификатор дефектов и повреждений подшипников качения «ЦВТ-22». 2007
13. Цифровой микроскоп Wi-Fi с подсветкой электронный — купить в интернет-магазине по низкой цене на Яндекс Маркете ([yandex.ru](https://yandex.ru))
14. Программа ImageJ для работы с научными изображениями (<https://imagej.nih.gov/ij/>)
15. Ефремов Л. В. Практика вероятностного анализа надежности техники с



L. V. Efremov

Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,  
199178, St. Petersburg, Russia, levlefr@mail.ru

## MEASUREMENT OF SURFACE IRREGULARITIES OF MACHINE PARTS

### Annotation

The report shows methods for measuring irregularities that occur on the surface of parts both during their manufacture (for example, roughness) and during testing and operation (for example, contact fatigue, corrosion, cavitation, shock and other natural damage). It is proposed to solve this problem on the monitor of a conventional digital microscope equipped with a light beam source that coincides with the optical axis of the device. Algorithms for analyzing characteristic images of irregularities and methods for evaluating them using the ImageJ tool have been developed.

*Keywords:* Image, surface, unevenness, damage, roughness

УДК 621.892

doi: 10.18720/SPBPU/2/id24-230

С.М. Пилюгин, А.Н. Абрамов, С.А.Саранцева, А.И.Голубков  
ООО «Хозрасчетный творческий центр Уфимского авиационного института»,  
Уфа, Россия, pilyugin@rosoil.ru

## МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОРАСТВОРИМЫХ СОЖ ПРИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОПК

### Аннотация

Предложена методика комплексной оценки эффективности смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) включающая триботехнические, физико-химические и охлаждающие свойства. Приведены результаты внедрения СОЖ на предприятиях ОПК. Показаны результаты выполнения работ по импортозамещению СОЖ на предприятиях военно-промышленного комплекса (ОПК). Представлены результаты сравнительных испытаний импортных смазочных материалов в сравнении с отечественными СОЖ «Росойл». Показано, что СОЖ «Росойл» не уступают импортным аналогам по основным эксплуатационным характеристикам.

*Ключевые слова:* смазывающе-охлаждающие жидкости; металлообработка; импортозамещение, критерии оценки применимости СОЖ.

### Введение

В настоящее время большое внимание уделяется совершенствованию технологии механической обработки, увеличению производительности и точности обработки деталей машин, повышению стойкости инструмента. На машиностроительных и металлургических предприятиях широко применяется импортное оборудование. Наиболее характерна ситуация, когда оборудование в состоянии поставки комплектуется всей необходимой оснасткой, инструментом и