

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 532.61:544.72

Поступила в редакцию 20.10.2017
Received 20.10.2017

А. Я. Григорьев

*Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь*

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Аннотация. Процессы, протекающие при контакте твердых тел, отличаются своим многообразием, зависимостью от масштаба рассматриваемой области и значений действующих сил. Изучение таких процессов требует комплексного подхода к приборному и методическому обеспечению проводимых исследований. Для установления механизмов, протекающих в нанометровых зазорах между телами, разработан прибор для измерения межмолекулярных и капиллярных сил, описана его конструкция и принцип работы. Представлены технические решения для измерения сил трения при малых нагрузках и определения субмикронных величин износа. Описаны методы изучения действующих при фрикционном взаимодействии механизмов изнашивания по морфологии частиц износа и локальных повреждений поверхностей трения. Изложены методы описания их текстуры и формы, позволяющие визуализировать сходство и различие анализируемых объектов. Рассмотрены методы диагностики и оценки текущего состояния узлов трения, основанные на классификации по морфологическим типам повреждений поверхностей и фрагментов их разрушений. Приведен метод оценки параметрической эквивалентности натуральных и лабораторных испытаний на трение и износ, позволяющий сравнивать данные, полученные в разных условиях, и устанавливать причину их расхождения. Возможности метода продемонстрированы на примере оценки действующих факторов космического пространства в рамках планируемого эксперимента по изучению трения на Международной космической станции.

Ключевые слова: приборы, адгезия, трение, износ, поверхности трения, частицы, трибоиспытания, космическая трибология

Для цитирования. Григорьев, А. Я. Приборы и методы исследований контактного взаимодействия твердых тел / А. Я. Григорьев // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 53–67.

A. Ya. Grigoriev

V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Science of Belarus, Gomel, Belarus

DEVICES AND METHODS OF INVESTIGATIONS OF CONTACT INTERACTION OF SOLIDS

Abstract. The processes occurring in the contact of solids differ in their variety, their dependence on the scale of the region under consideration and the values of the acting forces. The study of such processes requires a comprehensive approach to the instrumental and methodological support of research. To establish the mechanisms that take place in nanometer gaps between solids, an instrument for measuring intermolecular and capillary forces has been developed; its design and operating principle have been described. Technical solutions for measuring frictional forces at low loads and measuring submicron wear values are presented. The methods for studying wear mechanisms at friction with terms of the morphology of wear particles and local damage of friction surfaces are described. The methods of diagnostics and estimation of the current state of friction units based on the classification of surface damages and fragments of their fractures by morphological types are considered. A method of estimating the parametric equivalence of full-scale and laboratory tests for friction and wear is given, which opens the possibility of comparing the data obtained under different conditions and establishing the cause of their discrepancy. The capabilities of the method are demonstrated by an example of acting space factors estimation in the framework of the planned experiment on friction study at the International Space Station.

Keywords: devices, adhesion, friction, wear, friction surface, wear particles, tribotesting, space tribology

For citation. Grigoriev A. Ya. Devices and methods of investigation of contact interaction of solids. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnich navuk = Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 53–67 (in Russian).

Введение. Практически все процессы передачи энергии в машинах и механизмах протекают при контактном взаимодействии их деталей. Расширение диапазона скоростей и нагрузок, при которых работают эти детали, как в области сверхмалых, так и больших величин, потребовало

решения новых задач по обеспечению их функциональности. Так, с появлением сверхточных механических и электромеханических гироскопов, сервомеханики накопителей на жестких магнитных дисках, устройств микро- и нанопозиционирования, микроэлектромеханических систем возникла проблема обеспечения работоспособности подобных устройств из-за влияния межмолекулярного притяжения поверхностей их деталей [1]. Это, в свою очередь, потребовало измерения сил, действующих в малых зазорах субмиллиметровых деталей контактов и узлов трения, решения проблемы смазки и уменьшения сил адгезии между ними.

Эксплуатация узлов трения в условиях низкой или высокой температуры, при больших давлениях и в открытом космическом пространстве невозможна без изучения влияния на фрикционное взаимодействие комплекса экстремальных факторов [2]. В силу экстремальности проведение имитационных испытаний по всему комплексу таких факторов не всегда возможно, что требует поиска методических решений обеспечения параметрической эквивалентности результатов лабораторных испытаний и натурального поведения трибосистем. Сходная проблема возникает и при масштабировании результатов триботехнических исследований [3].

Значительные трудности в изучении механизмов контактного взаимодействия вызывает то, что зона их протекания недоступна для средств объективного контроля. Сложившаяся в настоящее время практика исследований в данной области основана на методах анализа морфологии поверхностей трения и частиц износа [4]. Классификация частиц и поверхностей по морфологическим видам позволяет устанавливать характер протекания процессов деградации трибосистем, оценивать их текущее состояние и решать диагностические задачи. Развитие вычислительной техники и методов обработки изображений позволяет уйти от субъективных методов принятия решений, однако требует разработки представительных способов описания морфологии шероховатых поверхностей и частиц износа.

Решение этих и многих других подобных задач невозможно без создания адекватной приборной базы и соответствующих методик исследований. В данной работе рассмотрены приборы и методы, созданные в отделе трибологии Института механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси для изучения механизмов контактного взаимодействия на крайних значениях шкал размеров исследуемых объектов, действующих между ними сил и значений внешних условий.

Измерение поверхностных сил. Измерение аттракционного взаимодействия реальных объектов является одной из наиболее сложных экспериментальных задач. Малые значения сил и расстояний, на которых они проявляются, выдвигают целый ряд специфических требований к измерительной аппаратуре. Первые успешные измерения, инициированные развитием теории молекулярного взаимодействия твердых тел, были проведены в середине 1950-х годов [5, 6]. Поскольку основной целью этих экспериментов являлась проверка теории, то после ее верификации интерес к соответствующим методикам значительно снизился, возобновившись вновь лишь в связи с развитием прецизионной техники, микромеханики и нанотехнологий. Решение практических задач в этой области потребовало детальных исследований аттракционного взаимодействия технических поверхностей.

Представление о технических поверхностях как о молекулярно-гладкой однородной фазе далеки от действительности – они шероховаты, негомогенны, на них всегда присутствуют пленки различной природы, электрические заряды, участки с остаточной намагниченностью. Поэтому при исследовании технических объектов практически невозможно выделить отдельные компоненты адгезионного взаимодействия и последнее определялось как результат действия всех аттракционных сил. Естественно ожидать, что значения работы адгезии для таких поверхностей будут существенно выше, чем для ювенильных.

Первые эксперименты по измерению притяжения реальных объектов были осуществлены с помощью динамометра с силоизмерителем на основе емкостного датчика [5]. Метод заключался в определении минимального расстояния устойчивого равновесия между силой притяжения двух твердых тел и упругим сопротивлением плоских пружин известной жесткости, на которых эти тела были закреплены. Результаты, полученные Б. В. Дерягиным с сотрудниками, основывались на использовании горизонтальных весов с отрицательной обратной связью [6]. В дальнейшем этот подход с различными вариациями применялся многими исследователями.

В настоящее время большинство экспериментальных исследований по изучению поверхностных сил осуществляется с помощью AFM и SFA. Измерения с помощью AFM проводятся по схеме, идентичной предложенной Дж.-Т. Овербеком и М.-Дж. Спарнаем [5]. Сила взаимодействия измеряется между образцом и иглой с радиусом закругления, составляющим несколько десятков нанометров, закрепленной на упругой консоли с известной жесткостью. Анализ формы кривых подвода-отвода позволяет определить силу адгезии в системе «игла – поверхность» и упругие свойства материала. Разработанный Я.-Н. Израелашвили и Д. Тэйбором поверхностно-силовой прибор SFA [7] в свою очередь является развитием схемы весов с обратной связью, предложенных И. И. Абрикосовой и Б. В. Дерягиным [6].

Для измерений молекулярного взаимодействия технических поверхностей в Институте механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси разработан адгезиометр, основанный на использовании схемы вертикальных торсионных весов с отрицательной обратной связью [8]. Измерительная часть контактного адгезиометра представляет собой вертикально расположенную рамку 1 (рис. 1, а), подвешенную на струне 2. На одном плече рамки расположен держатель пробного тела 3, на втором плече – постоянный магнит 4, помещенный между полюсами электромагнита 5. К рамке крепится зеркало 6, отражающее пучок света от источника 7 на фотоприемник 8. При силовом воздействии на пробное тело 3 рамка 2 с зеркалом 6 поворачивается, изменяя количество света, падающего на фотоприемник 8. Сигнал с фотоприемника поступает в электронный блок 9, который регистрирует и изменяет ток в катушке электромагнита 5 до значения, обеспечивающего обратный поворот рамки 1 в исходное равновесное положение. Таким образом, любое изменение действующих на пробное тело сил компенсируется соответствующим изменением тока в катушке электромагнита 5, обеспечивая неизменное положение рамки. Ток в катушке 5 прокалиброван, что в итоге позволяет измерить действующие силы между пробным телом и образцом 10, расположенным на столике 11.

Столик 11 перемещается винтовой парой 12 с помощью шагового двигателя 13 или вращением ручки 14. Точное перемещение производится пьезоэлементом 15, путем подачи на его обкладки напряжения от блока 9. Блок 9 соединен с компьютером 16, осуществляющим контроль процесса измерения и регистрации информации.

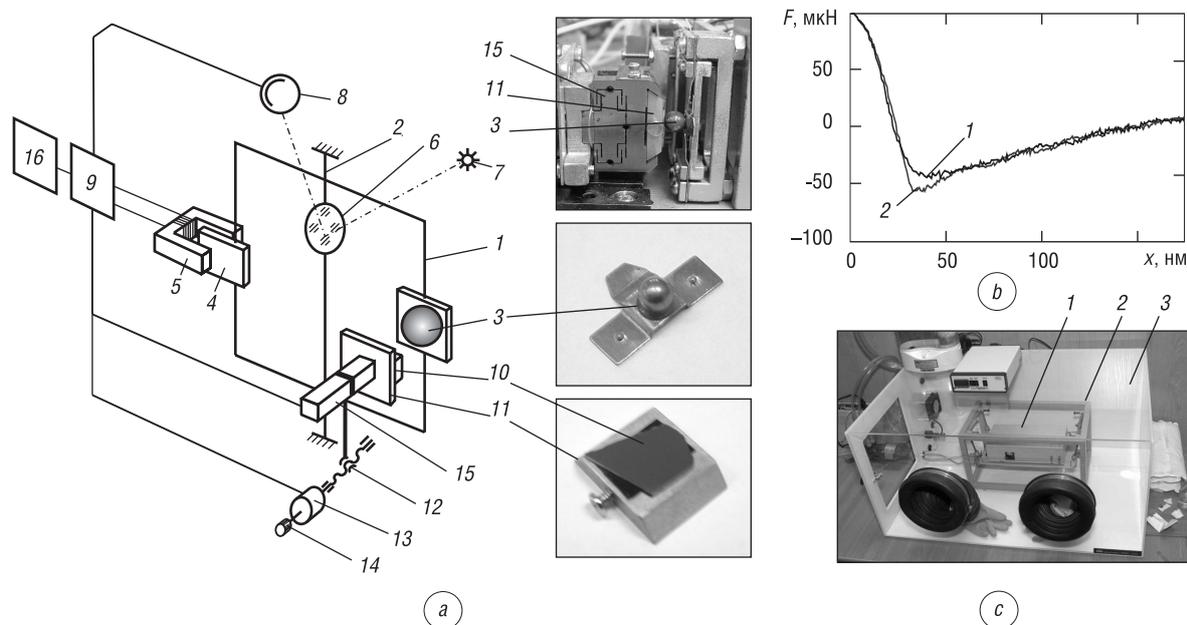


Рис. 1. Измерение поверхностных сил: а – принципиальная схема прибора, б – характерная зависимость силы межмолекулярного взаимодействия поверхностей от расстояния между ними, в – общий вид установки (обозначения см. по тексту)

Fig. 1. Measurement of surface forces: а – schematic diagram, б – typical force-distance dependencies of intermolecular interaction of surfaces, в – general view of the device (the tags explained in text)

Таблица 1. Рабочие характеристики адгезиометра

Table 1. Operating parameters of adhesion meter

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых сил, мкН	$10^1 \div 10^4$
Диапазон перемещений образца, нм	$10^1 \div 10^4$
Размеры образца, мм, не более	$20 \times 20 \times 5$
Размер пробного тела (сфера), мм	$0,2 \div 5$

В исходном положении образец и пробное тело (шарик) находятся на расстоянии, исключающем их взаимное влияние друг на друга. Пьезоэлемент 15 «растянут» (на него подано максимальное электрическое напряжение), и в этом положении ток, протекающий в катушке электромагнита 5, принимается равным нулевой силе взаимодействия образцов. Далее образец 10 с помощью шагового двигателя 13 подводится к пробному телу до достижения заданной по условиям эксперимента начальной контактной нагрузки. Измерительный цикл начинается по достижении требуемой нагрузки или после заданного времени выдержки путем отвода образца 10 с помощью пьезоэлемента 15. В процессе отвода сила взаимодействия образцов меняется, рамка 2 поворачивается, что соответствующим образом компенсируется током в катушке электромагнита 5. По достижении заданного расстояния между шариком и образцом, цикл измерений проводится в обратной последовательности – при сближении образца и шарика. Результатом эксперимента являются две зависимости (рис. 1, *b*), характеризующие силовое взаимодействие при отводе 1 и подводе 2 образца к пробному телу.

Для защиты от вибраций прибор 1 размещался на платформе, подвешенной на четырех упругих элементах в рамке 2 (рис. 1, *c*). Вся эта конструкция помещалась в камеру контроля влажности 3. Основные характеристики прибора приведены в табл. 1.

Данный прибор позволил оценить эффективность применения мономолекулярных покрытий в качестве аналога граничных смазок для прецизионных малогабаритных узлов трения и развить представления о механизмах трения фрикционных пар при нагрузках, соизмеримых с силами адгезионного взаимодействия [9]. Важным результатом в области исследования контактного взаимодействия твердых тел явилось решение с помощью данного прибора задачи дифференциации вкладов в адгезионное взаимодействие капиллярного эффекта и ван-дер-ваальсовых сил, которое выполнил О. Ю. Комков [10]. Впервые были получены данные о соотношении этих составляющих при разных температурах в области контакта (рис. 2).

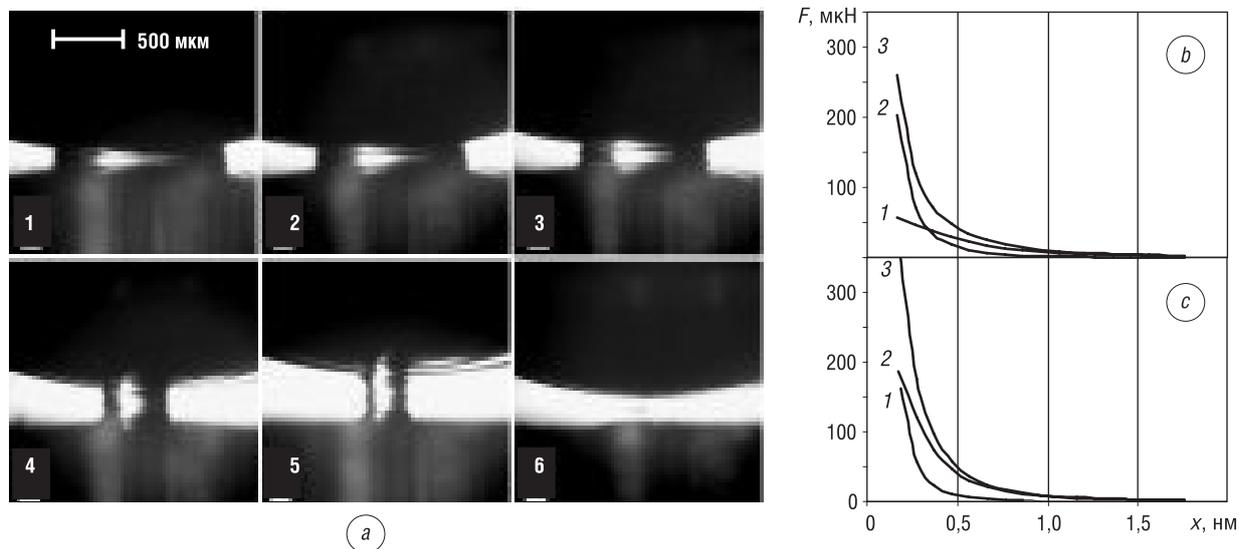


Рис. 2. Исследования капиллярных сил: *a* – стадии (1–6) изменения формы мениска между сферой и плоской поверхностью при увеличении расстояния между ними; *b*, *c* – дифференциальные зависимости сил приконтактного взаимодействия поверхностей при различной температуре: 32,4 °C (*b*) и 48,8 °C (*c*); 1 – капиллярные силы, 2 – межфазное взаимодействие поверхностей на воздухе, 3 – сумма сил 1 и 2

Fig. 2. Capillary forces investigation: *a* – stages (1–6) of the change in the shape of the meniscus between the sphere and the flat surface with increasing distance between them; *b*, *c* – differential dependencies of near contact interaction of surfaces at different temperatures: 32.4 °C (*b*) and 48.8 °C (*c*); 1 – capillary forces, 2 – interphase interaction of surfaces on air, 3 – sum of forces 1 and 2

Оценка сил трения при малых нагрузках. Измерение сил трения при нагрузках, характерных для прецизионного контакта, – от единиц до нескольких сотен микроньютонов – имеет ряд особенностей из-за влияния сил межмолекулярного взаимодействия поверхностей. При трении из-за неоднородности свойств поверхностных слоев эти силы могут резко изменяться, что может приводить к кратным изменениям нормальной нагрузки и сил трения (рис. 3). Фактически это делает невозможным изучение процессов трения в данном диапазоне нагрузок.

Как показывают эксперименты, для того чтобы это влияние было несущественным, нормальная нагрузка должна быть приблизительно на два порядка выше значений сил межмолекулярного взаимодействия. В настоящее время приборы, обеспечивающие проведение испытаний с нагрузками от единиц до нескольких сотен миллиньютонов, получили очень широкое распространение. По своим характеристикам они могут быть отнесены к классу миллитрибометров. Их продвижению способствовало появление малогабаритных прецизионных узлов трения, материалы которых необходимо испытывать в миллиразмерном диапазоне нагрузок и скоростей. Для обеспечения возможности сертификации таких материалов в Институте механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси разработан миллитрибометр МТУ-2К7 [11].

Прибор предназначен для измерения сил (коэффициентов) трения материалов и покрытий в контакте со сферическим контртелом при их возвратно-поступательном относительном движении. Испытания могут проводиться как в условиях сухого трения, так и при трении в среде смазочного материала. Скорость скольжения выбирается из интервала 0,1–10 мм/с. Длина трассы трения регулируется от 1 до 10 мм. Диапазон устанавливаемых при испытаниях нормальных нагрузок составляет 10–1000 мН. Шарик-контртело может иметь диаметр от 1 до 5 мм. Контролируемые диапазоны изменений нагрузки и диаметра шарика обеспечивают давление, достаточное для испытаний практически всех классов материалов – от полимеров до металлов, в условиях от упругого до пластичного состояния в контакте. Это существенно расширяет область применения прибора, позволяя использовать его для экспрессной оценки триботехнических свойств материалов узлов трения общего назначения.

Конструктивно миллитрибометр состоит из двух основных блоков – силоизмерительного модуля 1 и привода возвратно-поступательного движения 2, расположенных на основании 3 (рис. 4, а).

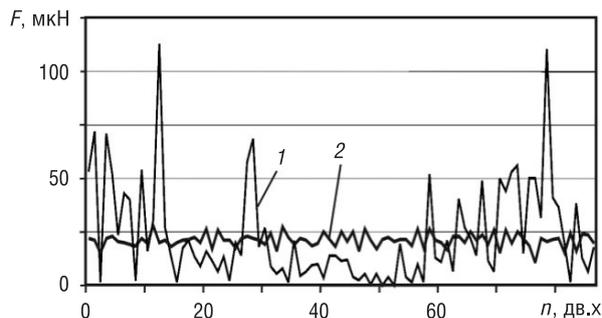


Рис. 3. Зависимость силы трения от пути трения при разных нагрузках: 1 – нагрузка 200 мкН, 2 – 500 мкН

Fig. 3. Dependences of friction force on friction path length when different loads: 1 – load of 200 мкН, 2 – 500 мкН

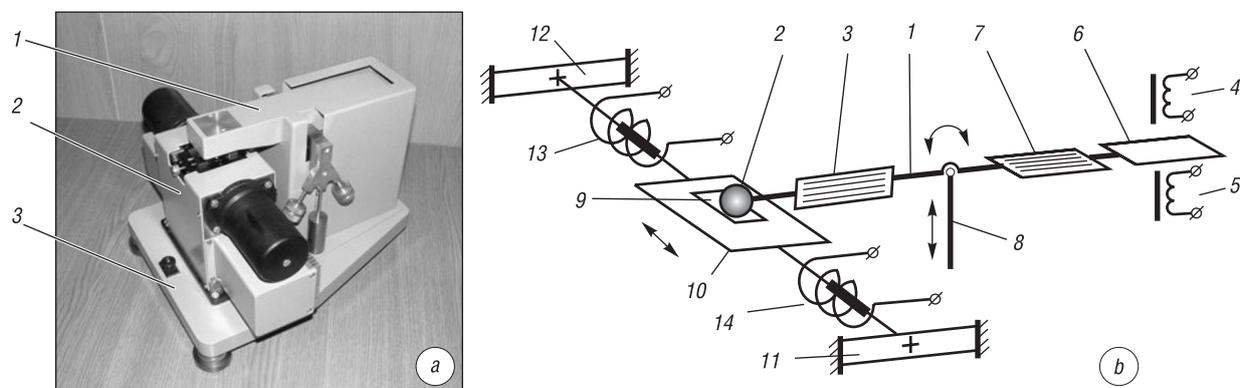


Рис. 4. Конструкция миллитрибометра МТУ-2К7: а – общий вид прибора, б – принципиальная схема (обозначения см. по тексту)

Fig. 4. Design of millitribo-meter MTU-2K7: а – general view, б – basic setup (the tags explained in text)

Силоизмерительный блок выполнен в виде коромысла 1 (рис. 4, *b*), на одном конце которого установлено сферическое контртело 2 и датчик сил трения 3. Усилие нормальной нагрузки обеспечивается электромагнитами 4 и 5, взаимодействующими с якорем 6, расположенным на противоположном от контртела конце консоли. Контроль нормальной нагрузки осуществляется датчиком 7. Обратная связь от датчика 7 заведена на вход схемы управления силой тока в катушках 4 и 5, что обеспечивает постоянство нагрузки в ходе испытаний, компенсируя ее возможные изменения из-за неплоскостности образца, погрешностей его установки или неравномерности износа.

Весь силоизмерительный блок базируется на штоке подъемного механизма 8, с помощью которого производится подвод индентора к образцу 9 и его отвод по окончании испытаний. Такое решение позволяет исследовать образцы с различной толщиной (до 20 мм) и облегчает их установку. Образец 9 фиксируется на столе 10, расположенном на упругом пантографе, который образован пружинными шарнирами 11 и 12 (показано схематически). Применение направляющих изгиба позволяет избежать появления таких негативных явлений, как скачкообразный характер перемещения при малых скоростях движения, а также шума и вибраций, присущих традиционно используемым направляющим скольжения и качения. Возвратно-поступательное движение стола обеспечивается электромагнитами 13 и 14.

Испытания проводятся в автоматическом режиме. Управление осуществляется с помощью специальной программы, позволяющей ввести требуемые по условиям эксперимента значения нагрузки, скорости скольжения, длины единичного хода и требуемого пути трения. В ходе эксперимента программа регистрирует данные, поступающие с микротрибометра, и формирует файл протокола эксперимента. Испытания прекращаются по достижении заданного пути трения или превышении некоторого заранее установленного предельного коэффициента трения (обычно единицы).

Разработанная методика аттестации позволяет проводить поверку прибора в лабораторных условиях с использованием стандартного набора гирь 0,01–100 г и электронных весов класса точности «Высокий–II» (ГОСТ 24104-01) с верхним пределом измерений не ниже 100 г и дискретностью 0,001 г.

Измерение субмикронного износа. Износ материалов при испытаниях на микротрибометрах обычно не превышает несколько микрон, а для металлов, керамики и металл-металлоидных покрытий он может быть настолько мал, что дорожка трения не обнаруживается визуально и не определяется профилометром. Использование атомно-силовой микроскопии также не всегда продуктивно, поскольку ширина следа трения (200–500 мкм) существенно превышает размер его поля измерений. Для определения субмикронных значений износа наибольшее распространение получил метод, основанный на использовании интерференционных микроскопов. Эти приборы позволяют не только проводить измерения высот неровностей с разрешением порядка 10 нм, но и получать оптическое изображение анализируемого участка поверхности. Однако самый распространенный в отечественных лабораториях прибор такого типа МИИ-4 не отвечает современным требованиям – в нем не поддерживается возможность регистрации цифровых изображений; процедура измерений, проводимая с помощью опто-механического микрометра, сложна и часто приводит к ошибкам. Тем не менее современные средства вычислительной техники и периферийных устройств позволяют модернизировать этот прибор, приспособив его к решению требуемых задач. В частности, один из вариантов такой системы был разработан в Институте механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси [12].

Система предназначена для измерения малых (от 0,01 до 1 мкм) линейных износов материалов и покрытий после триботехнических испытаний, регистрации изображений поверхностей трения и частиц износа, оценки высот неровностей и линейных размеров различных неоднородностей. Общий вид системы представлен на рис. 5, а ее основные технические характеристики приведены в табл. 2.

Все функции анализа изображений и интерференционных картин реализованы в виде программной системы, представленной на рис. 6. Интерфейс программы состоит из двух окон. Окно 1 предназначено для вывода изображений, формируемых оптической системой прибора и камерой, а панель 2 – для управления системой.

Окно 1 поддерживает два режима отображения информации: вывод видеопотока и регистрация кадра. В режиме регистрации текущее изображение видеопотока фиксируется, производится расчет масштабной шкалы 3 и разблокируются управляющие элементы 4–7, используемые для разметки интерференционной картины поверхности. Поддерживается функция измерения размеров наблюдаемых объектов, для чего указатели начала координат 8 и манипуляторы «мышь» 9 устанавливаются в соответствующих точках изображения. На рис. 6 они размещены по краям дорожки трения, ширина которой представлена в области 10 окна панели управления 2. Панель управления 2 служит для задания режимов формирования 11 и регистрации 12 изображений, анализа интерференционной картины 13 и вывода результатов измерений и информационных параметров – метрики наблюдаемого изображения отображаются в области 14, а результаты измерений высот выводятся в поле 15.

Измерения производятся относительно нерабочего участка поверхности либо искусственно созданных баз – царапин или отпечатков индентора. Результаты измерений выводятся в файл протокола в виде пар координат. Последовательное определение отклонений поверхности по выбранной интерферометрической полосе позволяет восстановить профиль поверхности с разрешением (расстоянием между отсчетами) порядка 2 мкм.

При анализе износа после триботехнических испытаний образцов по схеме сфера/плоскость возникает возможность оценки напряженно-деформированного состояния материалов в зоне трения. На рис. 7 представлена схема профиля дорожки трения, образованной сферическим индентором.

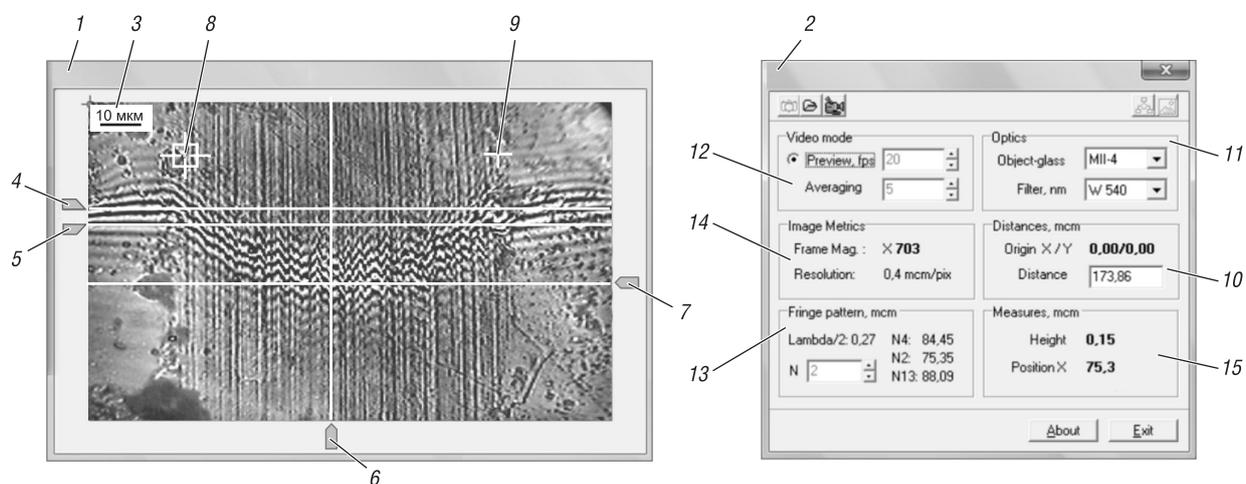


Рис. 6. Программный интерфейс оптического профилометра (обозначения см. по тексту)
 Fig. 6. Software interface of optical profilometer (the tags explained in text)

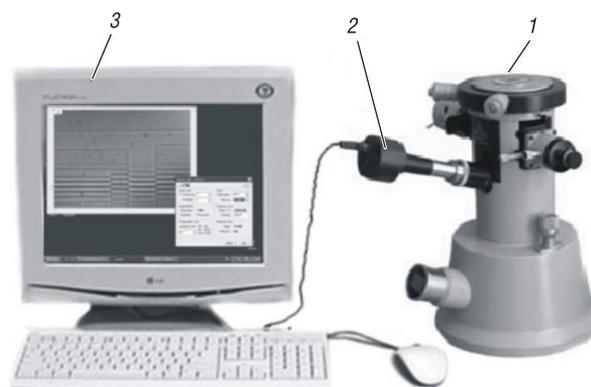


Рис. 5. Оптический профилометр: 1 – интерферометр, 2 – цифровая камера, 3 – блок управления и анализа результатов

Fig. 5. Optical profilometer: 1 – interferometer, 2 – digital camera, 3 – block of control and results analysis

Таблица 2. Рабочие характеристики оптического профилометра ПОИ-08
 Table 2. Operating parameters of optical profilometer POI-08

Параметр	Значение
Диапазон измерений, мкм	0,01–1,0
Горизонтальное разрешение, мкм	2
Поле зрения, мкм	320×320
Оптическое увеличение, крат	120
Размер кадра (Ш×В), пиксел	1280×720
Формат пиксела	BGR

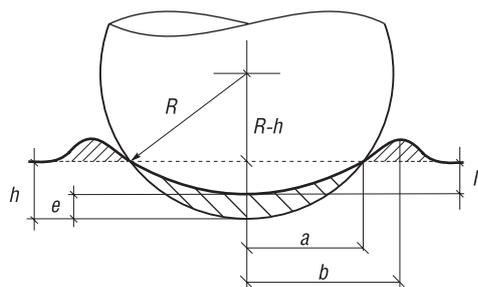


Рис. 7. Схема анализа дорожки износа плоской поверхности сферическим индентором (обозначения см. по тексту)

Fig. 7. Wear analysis scheme of friction path of spherical indenter on plate (the tags explained in text)

Глубина h дорожки шириной $2a$, образованная индентором с радиусом R и рассчитываемая по формуле $h = R - (R^2 - a^2)^{1/2}$, не всегда соответствует износу I , который формируется не только удалением материала, но и за счет увеличения площади контакта тел при упругой деформации. Тогда величина $e = h - I$ определяет упругое восстановление изношенного материала после снятия нагрузки, а соотношение $\psi = b/a$ характеризует долю пластического деформирования материала в процессе износа [5]. При $\psi = 1$ гребни по краям дорожки отсутствуют и материал изнашивается в результате своего разрушения в зоне трения. Чем выше значение ψ , тем больше материала выдавливается по сторонам.

Компонента коэффициента трения, обусловленная пластическим оттеснением, может быть оценена как $f_{\text{п}} \approx 4a/3\pi R$ [6], а связанная с упругими деформациями – как $f_y \approx f_{\text{п}}/\psi$. Таким образом, достаточно простой анализ геометрических параметров дорожки трения позволяет получить информацию об упругопластическом поведении изнашиваемого материала в зоне трения.

Оценка механизмов изнашивания по частицам износа. Проблема изучения трения и изнашивания заключается еще и в том, что процессы в зоне контакта двух тел недоступны непосредственному наблюдению. Морфология поверхностей трения и частиц износа в данном случае является единственным источником информации о механизмах контактного взаимодействия.

В настоящее время широкое распространение получили предложенные И. В. Крагельским феноменологические модели изнашивания [13]. С их помощью установление действующих механизмов изнашивания производится по результатам классификации морфологии поверхностей трения и наследующих особенности их строения частиц износа (рис. 8).

Так, отделение тонких слоев материала и формирование областей отслаивания и выкрашивания связывается с усталостным изнашиванием, которое протекает в условиях циклического упругого контакта. Вальцевание, оттеснение и пропахивание поверхности, сопровождающиеся

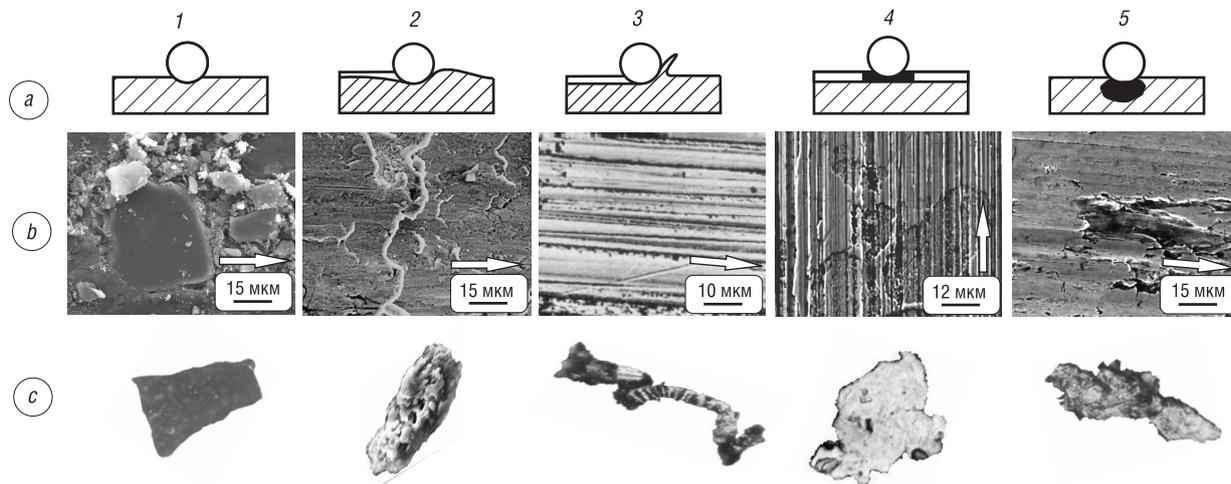


Рис. 8. Разрушение поверхностей при трении: *a* – виды разрушения фрикционных связей по И. В. Крагельскому: 1 – упругий контакт, 2 – пластический контакт, 3 – микрорезание, 4 – адгезионное разрушение пленки, 5 – когезионное разрушение материала; *b* – поверхности трения, соответствующие схемам *a* (стрелками обозначено направление движения контртела); *c* – частицы износа, соответствующие видам разрушения поверхностей трения, представленным на изображениях *b*: 1 – усталостный тип, 2 – блочный, 3 – стружковая частица, 4 – ламинарная, 5 – жесткого скольжения (схватывания)

Fig. 8. Surface damage under friction: *a* – kinds of friction-bond damage per I. V. Kragelskii: 1 – elastic contact, 2 – plastic contact, 3 – microcutting, 4 – adhesive damage of the film, 5 – cohesive damage of material; *b* – friction surfaces corresponding to schemes *a* (the arrows indicate the direction of counterbody movement); *c* – wear particles corresponding to types of friction-surface damage shown in images *b*: 1 – fatigue type, 2 – block type, 3 – chop, 4 – laminar, 5 – rigid sliding (seizure)

отделением краев образующихся гребней и сворачиванием ролов, свидетельствует о пластическом деформировании поверхностного слоя при превышении допустимой нагрузки и разрыве смазочной пленки, появление частиц износа в виде стружки, возникновение линейчатого рельефа из неровностей с острыми гранями – о микрорезании и абразивном изнашивании. Дефекты в виде глубинных вырывов, отслоения тонких пленок, присутствие в смазочном материале ламинарных частиц изнашивания, усталостно-блочных частиц и частиц жесткого скольжения указывают на адгезионное и когезионное взаимодействие контактирующих поверхностей. Таким образом, анализ частиц износа и поверхностей трения позволяет оценить режимы эксплуатации трибосопрежения, состояние смазочного материала, выявить нежелательные процессы в функционировании трибосистем и своевременно принять меры по их устранению [14].

Первоначально методы диагностики текущего состояния узлов трения по морфологии частиц износа были основаны на экспертном визуальном контроле. В настоящее время успехи в развитии вычислительной техники, методов обработки и анализа изображений позволили автоматизировать решение этой задачи, и морфологический анализ поверхностей трения и частиц износа получил широкое распространение в решении практических проблем трибологии.

Ключевым моментом в реализации рассматриваемых методов является введение понятия морфологии поверхностей трения и частиц износа, которая определяется как совокупность характеристик их текстуры, формы и цвета. Существуют различные подходы к описанию этих понятий: сравнительный, параметрический и использования инвариантных представлений. Однако наиболее перспективным, по нашему мнению, является подход, основанный на параметризации визуального содержания морфологических признаков [15].

В основе этого подхода лежит предположение о том, что представительное описание морфологии возможно лишь с помощью оценок, отражающих визуальное содержание анализируемых объектов. Его реализация основана на введении структурного элемента – минимальной визуально воспринимаемой области анализируемого объекта. Считается, что особенности расположения структурных элементов друг относительно друга на малых расстояниях определяют локальные морфологические свойства объектов, а на больших – глобальные свойства. Существуют различные подходы к реализации данного подхода, один из которых основан на использовании гистограмм совместной встречаемости (ГСВ).

Для описания текстуры с помощью ГСВ в качестве структурного элемента выбирается участок поверхности T_i (рис. 9), положение которого характеризуется азимутальным направлением градиента G_i и расстоянием P_i от центра координат (рис. 9, а). Взаимное положение двух текстурных элементов (T_1, T_2) задается расстоянием между ними ρ и разницей направлений их градиентов g . Для получения инвариантного описания поверхности рис. 9, б, основанного на ГСВ (рис. 9, с), подсчитывается число пар текстурных элементов с определенными

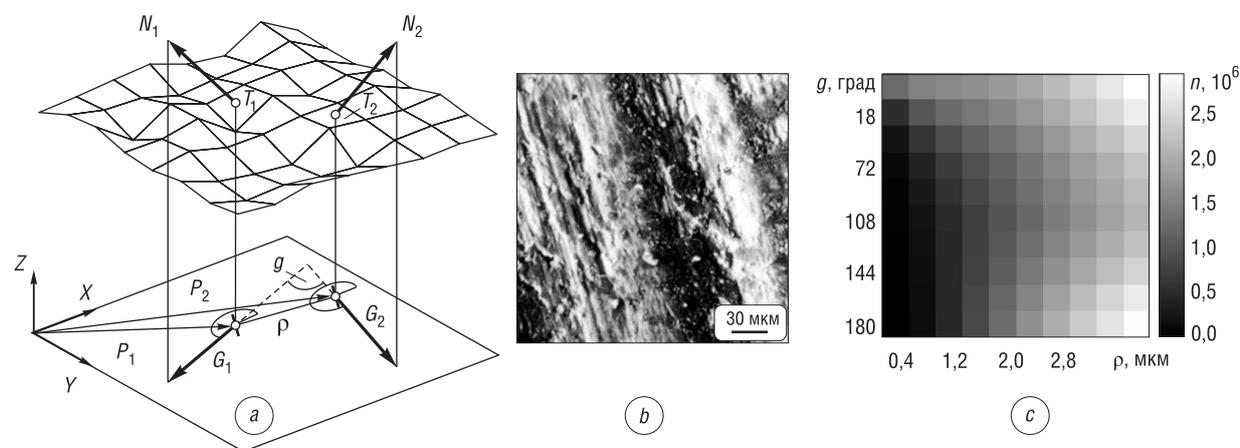


Рис. 9. Параметризация визуального содержания текстуры и формы: а – схема определения структурных элементов текстуры, б – объект анализа (поверхность трения), с – ее ГСВ (обозначения см. по тексту)

Fig. 9. Parameterization of visual content of texture and shape: а – schemes for determination of structural elements of texture; б – object of analysis (friction surface); с – its matrix of co-occurrence (MCO) (the tags explained in text)

значениями ρ и g , присутствующими на анализируемом участке поверхности. Для этого допустимо использовать как высотно-кодированные, так и полутоновые изображения (рис. 9, *b*), полученные различными методами микроскопии по схеме верхнего освещения. Аналогичным образом можно описать и характеристики цвета и формы.

При соответствующем нормировании ГСВ не зависят от масштаба и положения объекта в поле зрения. Каждый из элементов ГСВ можно рассматривать в качестве признака. Однако поскольку элементы ГСВ определяют участки поверхности или контура, то появляется возможность сравнения объектов с визуализацией их сходства или различия. Суть этой методики заключается в отметке на изображениях сравниваемых объектов участков, элементы ГСВ которых имеют близкие или существенно разные значения. В первом случае это позволяет визуализировать сходство, а во втором – различие объектов. На рис. 10 представлены результаты выполнения этих задач.

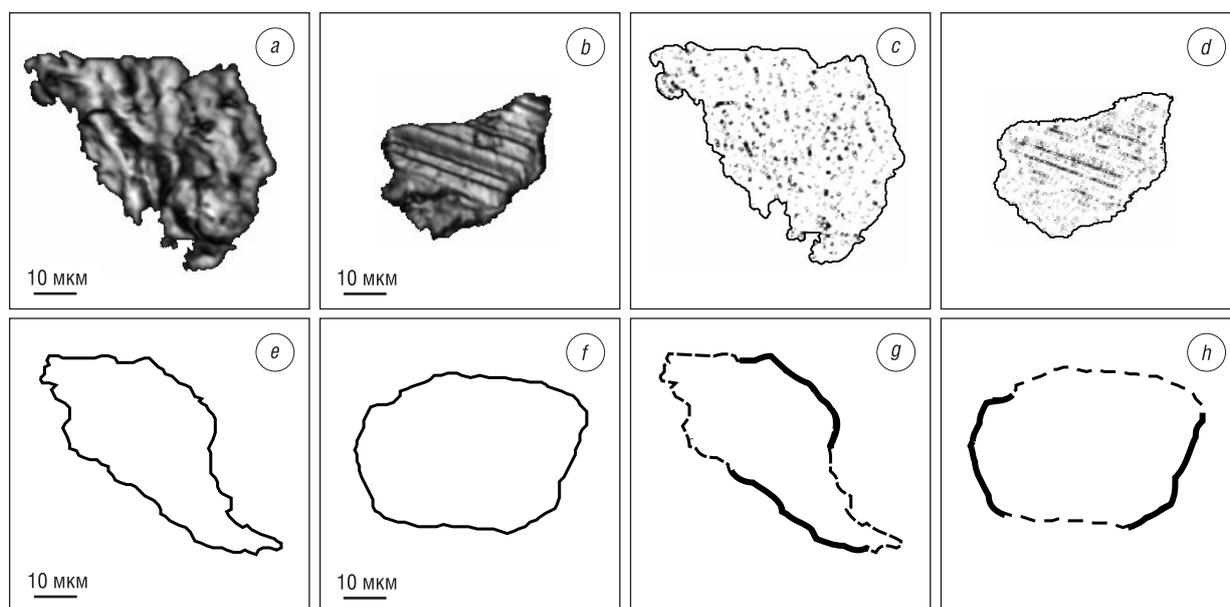


Рис. 10. Результаты автоматического сравнения сходства/различия морфологии частиц: *a, b, e, f* – изображения и контуры сравниваемых частиц; *c, d* – отличия текстур частиц *a* и *b* (выделены уникальные, не встречающиеся на другой частице элементы текстур); *g, h* – сходство контуров частиц *e* и *f* (выделены сегменты контуров, имеющие наибольшее сходство)

Fig. 10. Results of automatic definition of similarity/dissimilarity of particle morphology: *a, b, e, f* – images and contours of compared particles; *c* and *d* – distinctions in the textures of particles *a* and *b* (unique unmet in other particles texture elements are isolated); *g* and *h* – contour similarity of particles *e* and *f* (the segments of the contours most similar are isolated)

Значения ГСВ можно рассматривать как координаты некоторой точки в многомерном пространстве. Положение точек в этом пространстве отражает сходство отображаемых ими объектов – чем ближе расположены точки, тем меньше различие их координат-признаков и тем больше соответствующие объекты «похожи» друг на друга и наоборот. Близкие по своим морфологическим признакам классы объектов группируются в кластеры, и задача классификации сводится к определению положения объектов относительно границ кластеров.

При числе признаков менее трех положение точек в пространстве может быть отображено графически, и выявление границ классов в этом случае не представляет сложностей. Для большего числа признаков используют методы, позволяющие осуществить проецирование точек из исходного многомерного пространства на плоскость. Проецируя морфологические признаки частиц износа и поверхностей трения, можно построить карту состояний трибосистемы, которая позволяет судить о ее текущем состоянии и действующих механизмах изнашивания. Рассмотрение такой карты (рис. 11), полученной проецированием 14-мерного пространства морфологических признаков различных участков поверхности трения, показало, что диагностируе-

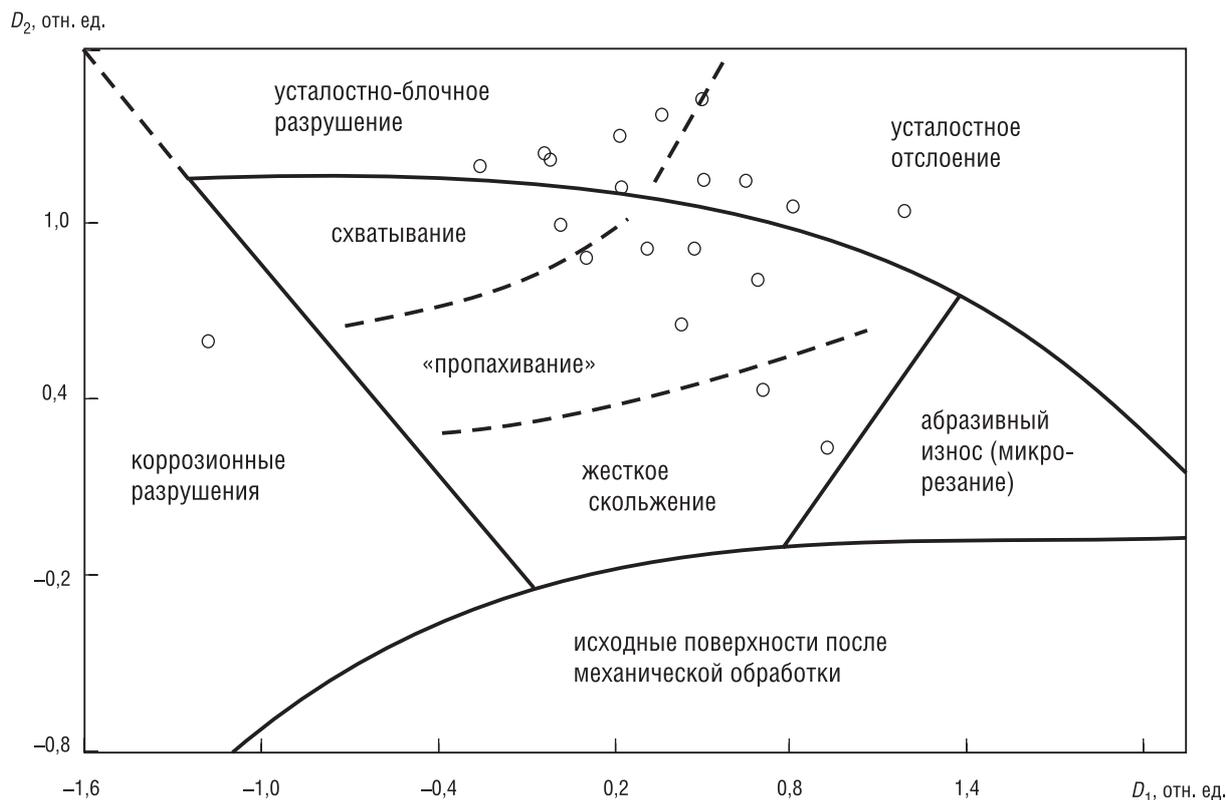


Рис. 11. Карта морфологических классов поверхностей трения и частиц износа, соответствующих различным механизмам эксплуатационной деградации узлов трения. D_1 и D_2 – функциональные размерности плоскости проецирования

Fig. 11. Map of morphological classes of friction surfaces and wear particles corresponded to different mechanisms of friction units operating degradation. D_1 and D_2 – functional dimensions of projecting plate

мая трибосистема работает в жестких режимах. Последующий анализ позволил выявить причину этого, связанную с деградацией смазочного материала.

Оценка эквивалентности результатов триботехнических испытаний. Одной из важных проблем трибологии является масштабирование и оценка параметрической эквивалентности результатов триботехнических испытаний. Прежде всего это касается возможности переноса данных, полученных на образцах одного масштаба, на другой – больший или меньший, и сравнения результатов лабораторных и натурных исследований. В частности, последняя задача возникла при подготовке космического эксперимента «Трибокосмос» [16], в ходе которого планируется осуществить триботехнические испытания различных материалов в условиях открытого космоса на борту Международной космической станции.

Для проведения эксперимента в НАН Беларуси при участии академических учреждений – Института механики металлополимерных систем им. В. А. Белого, Объединенного института машиностроения, Физико-технического института, а также НПО «Планар» был изготовлен бортовой трибометр (рис. 12, а) – устройство, позволяющее проводить испытания материалов на трение и износ в условиях действия факторов космического пространства (ФКП).

В ходе эксперимента предполагается провести ряд наземных испытаний тех же материалов. Наземные испытания будут проводиться по двум схемам. Первая схема основана на максимальном приближении к условиям работы бортового трибометра – это так называемые имитационные испытания в криовакуумной камере на идентичном бортовому приборе (рис. 12, б), вторая предполагает проведение исследований в стандартных физических условиях.

Целью проведения наземных исследований является:

расширение параметрической базы эксперимента, то есть дополнение результатов космического эксперимента данными, полученными в ходе наземных испытаний;

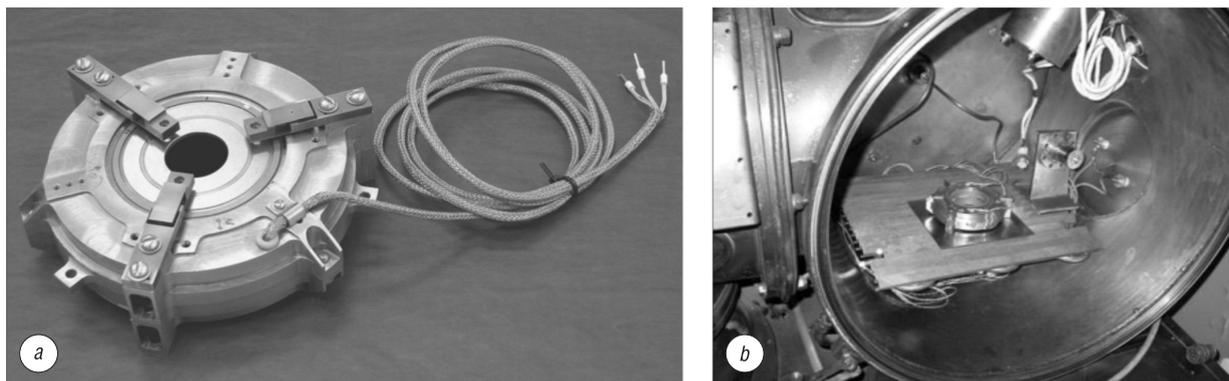


Рис. 12. Оборудование для проведения испытаний материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве и наземных условиях: *a* – бортовой трибометр, *b* – трибометр в камере имитационных криовакуумных испытаний

Fig. 12. Devices for materials test on friction and wear in open space and ground-based conditions: *a* – on-board tribometer, *b* – tribometer in the imitation cryogenic vacuum chamber

оценка влияния факторов космического пространства на триботехнические характеристики антифрикционных и износостойких материалов.

В соответствии с данной схемой наземный эксперимент проводится по расширенной программе, которая предусматривает реализацию полнофакторного эксперимента (при всех возможных нагрузочно-скоростных режимах), регистрацию целого ряда дополнительных параметров (измерение раздельного износа диска и инденторов, трибоакустической эмиссии, работы выхода электронов и др.) и проведение постэкспериментальных исследований образцов, включающих изучение морфологии частиц износа и следов трения, микрорентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализа и другие современные методы изучения поверхностных слоев твердых тел.

При идентичности условий проведения наземных и бортовых испытаний данная схема исследований позволяет расширить параметрическую базу космического эксперимента. Однако обеспечение такой идентичности подразумевает моделирование ФКП, контроль которых в полном объеме в ходе бортовых испытаний по техническим причинам невозможен. Таким образом, возникает задача обеспечения параметрической эквивалентности наземного эксперимента в условиях неполной информации об условиях проведения бортовых испытаний. Для ее решения использован подход, аналогичный анализу параметров морфологии поверхностей трения в многомерном пространстве признаков.

Каждый параметр трибосистемы может быть представлен как координата некоторой точки в многомерном пространстве признаков. Изменения этих параметров в ходе эксперимента образуют гиперлинию, каждая точка которой соответствует определенному состоянию испытуемой трибосистемы. В данное пространство допустимо отобразить несколько трибосистем, причем с разными наборами контролируемых параметров. Для упрощения задачи многомерное пространство состояний трибосистем можно отобразить в двумерное. Если линии анализируемых экспериментов совпадают, то их приемлемо считать эквивалентными. В [17] показано, что если гиперлинии в какой-либо точке не совпадают, то можно установить причину такого несовпадения, решая соответствующую систему уравнений. Таким образом, возникает возможность установления влияния неконтролируемых параметров или расхождения известных.

Продемонстрируем этот метод задачей определения параметрической эквивалентности нормированных параметров модельных наземного и бортового экспериментов. Представленные зависимости несколько отличаются на участке приработки пары трения (рис. 13, *a*). Необходимо выявить возможные причины наблюдаемого расхождения.

При бортовом эксперименте не известна температура внутри трибометра; кроме того, температура в приконтактной зоне в начале бортового эксперимента несколько выше, чем наземного (табл. 3). Исходя из этого проверялось предположение о влиянии начальной температуры T_c бортового трибометра на результаты эксперимента.

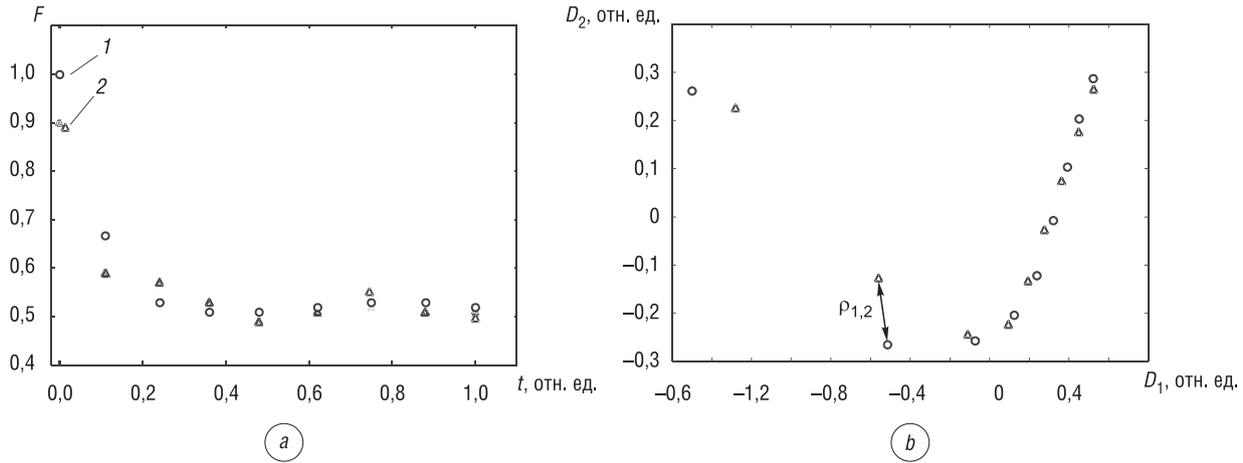


Рис. 13. Результаты эксперимента на трение: *a* – зависимость силы трения F от времени t (нормированное значение), регистрируемой при бортовых (1) и наземных (2) испытаниях; *b* – результат отображения состояния бортовой трибосистемы в редуцированное признаковое пространство D_1 – D_2 наземных испытаний

Fig. 13. Results of friction test: *a* – friction force F on time t dependencies (normalized values), registered in on-board (1) and ground-based (2) tests; *b* – result on-board tribosystem condition mapping to reduced D_1 – D_2 feature space of ground-based test

На рис. 13, *b* показано совместное редуцированное параметрическое пространство состояний наземной и бортовой трибосистем. Видно значительное расхождение между состояниями систем в начале эксперимента. Далее, выбрав точки, расположенные на расстоянии $\rho_{1,2}$, решаем следующее уравнение относительно температуры бортовых испытаний:

$$\left((D_1^{(1)} - D_1^{(2)})^2 + (D_2^{(1)} - D_2^{(2)})^2 \right)^{1/2} = \rho_{1,2}$$

где D – уравнения координат редуцированного пространства состояний наземной системы в точке, соответствующей расстоянию $\rho_{1,2}$ (рис. 13, *b*).

Полученное значение $T_c = 1,04T_e$ свидетельствует, что температура окружающей среды при бортовых испытаниях T_c была несколько выше, чем температура при наземных T_e . Такой результат можно интерпретировать как возможный действующий фактор. Для проверки этого необходимо скорректировать условия наземных испытаний (повысить температуру в имитационной камере) и провести эксперимент еще раз.

Т а б л и ц а 3. Модельные параметры бортового и наземного испытаний на трение, отн. ед.
T a b l e 3. Modeled parameters of on-board and ground-based friction test, rel. units

Время	Бортовой эксперимент			Наземный эксперимент			
	Сила трения	Линейный износ	Температура образца	Сила трения	Линейный износ	Температура образца	Температура внутри трибометра
0,00	1,00	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00
0,11	0,68	0,57	0,43	0,59	0,51	0,38	0,87
0,24	0,53	0,85	0,77	0,57	0,75	0,77	0,95
0,36	0,51	0,925	0,92	0,53	0,81	0,94	0,99
0,48	0,51	0,935	0,95	0,49	0,89	0,96	0,99
0,62	0,52	0,94	0,98	0,51	0,92	0,99	0,98
0,75	0,53	0,96	0,98	0,52	0,93	1,00	0,97
0,88	0,53	0,97	1,00	0,51	0,94	1,00	0,98
1,00	0,52	1,00	0,99	0,51	0,95	1,00	0,99

Заключение. Контактные явления, протекающие при взаимодействии твердых тел, обусловлены реализацией многочисленных физико-механических процессов. Многообразие их проявлений и взаимозависимость требуют комплексного подхода к решению исследовательских задач в этой области. С одной стороны, современные тенденции в области приборостроения и точной механики направлены на уменьшение размеров исполнительных механизмов и их узлов. С другой – все более широкое распространение получают изделия, функционирующие в экстремальных условиях. Расширение диапазонов нагрузок, скоростей и условий работы технических объектов требует не только применения новых материалов и оригинальных конструкций, но и пересмотра значимости механизмов контактного взаимодействия, оказывающих влияние на эксплуатационные характеристики конечных изделий и их узлов. Это в свою очередь диктует необходимость разработки и использования новых приборов и методов исследований.

Список использованных источников

1. Handbook of Micro/Nano Tribology / ed. by B. Bhushan. – New York: CRC Press, 2000. – 628 p.
2. Дроздов, Ю. Н. Трение и износ в экстремальных условиях / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Павлов, В. Н. Пучков. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
3. Myshkin, N. K. Importance of Scale Factor in Tribology / N. K. Myshkin, A. Ya. Grigoriev // *BaltTrib' 2013: VII International Scientific Conference, Kaunas, 14–15 November 2013: Proceedings*. – Kaunas: Aleksandras Stulginskis University, 2013. – P. 165–168.
4. Stachowiak, G. W. Characterization and classification of wear particles and surfaces / G. W. Stachowiak, P. Podsiadlo // *Wear*. – 2001. – Vol. 249, № 3–4. – P. 194–200.
5. Overbeek, J. T. Surface force measurement / J. T. Overbeek, M. J. Sparnaay // *Proc. of Nederlandse Akademie van Wetenschappen*. – 1951. – Vol. 54. – P. 387–396.
6. Абрикосова, И. И. Прямое измерение молекулярного притяжения в функции расстояния между поверхностями / И. И. Абрикосова, Б. В. Дерягин // *Журн. эксперимент. и теорет. физики*. – 1951. – Т. 21, № 8. – С. 945–950.
7. Israelachvili, J. N. Intermolecular and Surface Forces / J. N. Israelachvili. – New York: Acad. Press., 1991. – 348 p.
8. Измерение аттракционного взаимодействия технических поверхностей / А. Я. Григорьев [и др.] // *Трение и износ*. – 2003. – Т. 24, № 4. С. 405–412.
9. Григорьев, А. Я. Трение мономолекулярных самособирающихся покрытий щеточного типа / А. Я. Григорьев, И. Н. Ковалева, Н. К. Мышкин // *Трение и износ*. – 2008. – Т. 29, № 6. – С. 596–603.
10. Комков, О. Ю. Влияние жидкостного мениска на величину поверхностных сил / О. Ю. Комков // *Трение и износ*. – 2007. – Т. 28, № 1. – С. 21–32.
11. Возвратно-поступательный миллитрибометр МТУ-2К7 / А. Я. Григорьев [и др.] // *Трение и износ*. – 2014. – Т. 35, № 6. – С. 664–669.
12. Григорьев, А. Я. Система измерения субмикронных значений линейного износа материалов на базе микроинтерферометра МИИ-4 / А. Я. Григорьев // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2015. – Т. 20, № 1. – С. 90–93.
13. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 426 с.
14. Roylance, V. J. Ferrography – then and now / V. J. Roylance // *Tribology International*. – 2005. – Vol. 38. – P. 857–862.
15. Мышкин, Н. К. Морфология: текстура, форма и цвет поверхностей трения и частиц износа в задачах трибодиагностики / Н. К. Мышкин, А. Я. Григорьев // *Трение и износ*. – 2008. – Т. 29, № 3. – С. 252–259.
16. Эксперимент «Трибокосмос» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.energia.ru/rus/iss/poisk/poisk_09.html – Дата доступа: 18.10.2017.
17. Equipments and materials for tribotesting in open space on International Space Lab / N. K. Myshkin [et al.] // *Tribology in Industry*. – 2011. – Vol. 33, № 1. – P. 43–47.

References

1. Bhushan B. (ed.) *Handbook of Micro/Nano Tribology*. New York, CRC Press, 2000. 628 p. DOI: 10.1201/9781420050493
2. Drozdov Ju. N., Pavlov V. G., Puchkov V. N. *Friction and wear under extreme conditions*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 224 p. (in Russian).
3. Myshkin N. K., Grigoriev A. Ya. Importance of scale factor in tribology. *BaltTrib' 2013: VII International Scientific Conference, Kaunas, 14–15 November 2013: Proceedings*. Kaunas, Aleksandras Stulginskis University, 2013, pp. 165–168.
4. Stachowiak G. W., Podsiadlo P. Characterization and classification of wear particles and surfaces. *Wear*, 2001, vol. 249, no. 3–4, pp. 194–200. DOI: 10.1016/s0043-1648(01)00562-2
5. Overbeek J. T., Sparnaay M. J. Surface force measurement. *Proceedings of Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, 1951, vol. 54, pp. 387–396.
6. Abrikosova I. I., Derjagin B. V. Direct measurements of molecular attraction as a function of distance between surfaces. *Zhurnal eksperimental'noi i tekhnicheskoi fiziki = Journal of Experimental and Technical Physics*, 1951. vol. 21, no. 8, pp. 945–950 (in Russian).

7. Israelachvili J. N. *Intermolecular and surface forces*. New York, Acad. Press., 1991. 348 p.
8. Grigoriev A. Ya., Dubravina A. M., Kovalev A. V., Kavaliouva I. N., Komkov O. Yu., Myshkin N. K. Measurement of contact adhesion and attraction between the engineering surfaces. *Journal of Friction and Wear*, 2003, vol. 24, no. 4, pp. 51–58.
9. Grigoriev A. Ya., Kovaleva I. N., Myshkin N. K. Friction of brushlike self-assembled monomolecular coatings. *Journal of Friction and Wear*, 2008, vol. 29, no. 6, p. 434–440. DOI: 10.3103/s1068366608060044
10. Komkov O. Yu. Influence of liquid meniscus on surface forces. *Journal of Friction and Wear*, 2007, vol. 28, no. 1, pp. 19–31. DOI: 10.3103/s1068366607010035
11. Grigoriev A. Ya., Gutsev D. M., Zozulya A. P., Kavaliouva I. N., Kudritskii V. G., Myshkin N. K., Semenyuk M. S. Reciprocating MTU-2K7 Millitribometer. *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol. 35, no. 6, pp. 455–459. DOI: 10.3103/s1068366614060063
12. Grigoriev A. Ya. System for measurement of submicron values of linear wear of material based on micro-interferometer MII-4. *Materialy, tehnologii, instrumenty = Journal of Materials, Technology and Tools*, 2015, vol. 20, no. 1, pp. 90–93 (in Russian).
13. Kragel'skii I. V., Dobychin M. N., Komalov V. S. *Fundamentals of friction and wear*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 426 p. (in Russian).
14. Roylance B. J. Ferrography – then and now. *Tribology International*, 2005, vol. 38, pp. 857–862. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.03.006
15. Myshkin N. K., Grigoriev A. Ya. Morphology: texture, shape, and color of friction surfaces and wear debris in tribo-diagnostics problems. *Journal of Friction and Wear*, 2008, vol. 29, no. 3, pp. 192–199. DOI: 10.3103/s1068366608030070
16. *Experiment «Tribocosmos»*. Available at: https://www.energia.ru/rus/iss/poisk/poisk_09.html (Accessed 18 October 2017).
17. Myshkin N. K., Grigoriev A. Ya., Basiniuk V. L., Mardasevich A. I., Kudritsky V. G., Kavaliouva I. N. Equipments and materials for tribotesting in open space on International Space Lab. *Tribology in Industry*, 2011, vol. 33, no. 1, pp. 43–47.

Информация об авторе

Григорьев Андрей Яковлевич – доктор технических наук, профессор, директор Института механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси (ул. Кирова, 32А, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: aygri@tut.by

Information about the author

Andrei Ya. Grigoriev – D. Sc. (Engineering), Professor, Director of V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Science of Belarus (32A, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: aygri@tut.by