

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Аннотация

В работе показан обзор международных стандартов, касающихся трибологии, скетч-тестирования и инструментального индентирования. Одновременная реализация методов исследований и испытаний различных типов материалов, таких как металлы, полимеры, композиты, покрытия различной природы и морфологии на одной приборной платформе.

Ключевые слова: Международные стандарты, линейный износ, сила трения стойкость к царапанию, инструментальное индентирование, приборы.

Введение

Современный мир немислим без использования плёнок и функциональных покрытий, используемых для различных целей и на различных изделиях, от мягких полимерных, лакокрасочных и декоративных до твёрдых алмазоподобных и керамических, от низкотемпературных до жаропрочных. Также, случившийся за последние десятилетия бум открытия новых функциональных материалов и покрытий практически во всех областях науки и техники требует от учёных и инженеров не только измеримых характеристик покрытий, но и прогнозирования их физико-механических свойств в реальных условиях эксплуатации изделий, в основе которых лежит ТРЕНИЕ, как основа трибологического исследования трущихся пар.

Для определения комплекса физико-механических свойств покрытий и материалов, будь то износ, включая время его жизни, адгезия или когезия к подложке или субстрату, а также топография поверхности, до недавнего времени существовало множество различных приборов. Каждый отдельный прибор узкой направленности реализовал свою отдельную функцию по исследованию износа при различных нагрузках (Трибометры), изучения стойкости к царапанию (Скетч-тестеры), измерения твёрдости (Твёрдомеры), определения износа при высокочастотных вибрациях покрытий или материалов (Фреттинг машины) и изучения топографии поверхности (Профилометры).

Современные исследовательские комплексы позволяют исследователю при помощи сменных модулей реализовать практически все известные трибологические схемы контакта, а также проводить испытания на стойкость к царапанию и измерять твёрдость не только материала, но и покрытия, в том числе имеющего нанометровую толщину.

Обзор стандартов проведения испытаний

Для фактического подтверждения результатов измерений и испытаний в области физико-механических свойств поверхности требуется соблюдение определённых норм и стандартов, но, к сожалению, в настоящее время в нашей стране нормативная база стандартов, по направлению трение и износ достаточно

разрознена и является устаревшей, однако мировая тенденция показывает развитие стандартов и норм, дающих исследователю информационную основу в направлении трения и износа.

Например, классическую трибологическая схема трущихся пар типа «Шар-Диск» и «Штифт-Диск» упоминается в 4-х стандартах ASTM G99, G132, DIN 50324. Применение схемы типа «кольцо-колодка» или «вал-колодка» указано не только износа, но и для исследования смазочных материалов в стандартах ASTM G77, D2509, D2714. Классическую же 4-х шариковая машину трения описывает уже 7 методов, применимых к определению свойств различных материалов: ASTM D2266, D4172, D5183, D2596, D-2783, and DIN 51350, IP 239,300. Такие методики и нормы объединены в одном многофункциональной платформе MFT-5000 (RTEC Instruments) реализующей нагрузки до 10 кН и обладающей максимальными возможностями. Однако исследователю не всегда требуются максимальные нагрузки что вполне объяснимо при работе с мягкими материалами, например полимерами или их комбинацией с металлами.

Для решения не менее сложных задач, стоящих перед исследователем, но при меньших нагрузках в зоне контакта трущихся тел компания RTEC Instruments предлагает систему SMT-5000 Surface Materials Tester позволяющую проводить исследования и испытания согласно стандартам, указанным в таблице 1.

Таблица 1 Список стандартов, допускающих трибологические испытания при нагрузках до 200Н

Метод	Стандарт ASTM	Стандарт ISO
Трибология	ASTM G99, ASTM G132, ASTM G133, ASTM F732	ISO 20808, ISO 7148, ISO 18535
Скретч-тест	ASTM C1624, ASTM G171, ASTM D7027, ASTM D7187	ISO 20502, ISO 19252, ISO 1518
Инструментальное индентирование	ASTM E2546, ASTM B933, ASTM D785, ASTM E140	ISO 14577, ISO 6508, ISO 6507, ISO 4516

На рисунках ниже показаны схемы реализации испытаний покрытий и материалов согласно некоторым стандартам.

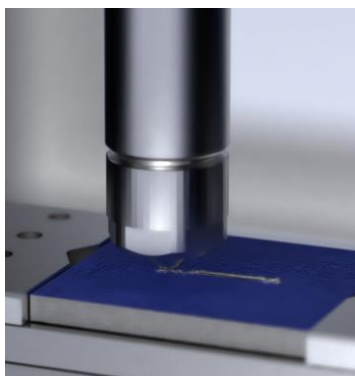


Рисунок 1 – Схема проведения испытания на линейный износ по ASTM G133
Стандартный метод испытаний на износ при линейном возвратно-поступательном

скольжении / Стандартный метод испытаний на истирание штифта и шарика по плоскости.

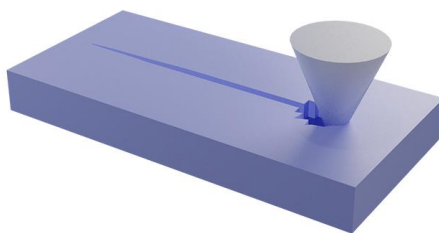


Рисунок 2 – Схема проведения испытания на линейный износ по ASTM C1624
Стандартный метод испытаний стойкости к царапанию и механических видов разрушения керамических покрытий с помощью количественного однотоочечного скретч теста.

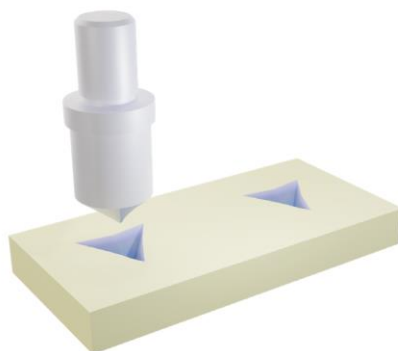


Рисунок 3 – Схема проведения испытания на линейный износ по ASTM G133
Металлические материалы — инструментальное индентирование для определения твердости и параметров материалов

Описание системы SMT-5000

Платформа имеет следующую конструкцию:

Моторизованный столик X-Y с ходом 150x200 мм, разрешением по перемещению 0.25 мкм и скоростью перемещения до 50 мм/сек, расположенный под модулями нагрузки и визуализации, обеспечивает перемещение образца в ходе испытания, а также перемещает его от модуля испытания до модуля визуализации.

Отдельные вертикальные манипуляторы для перемещения по вертикали сменных модулей Вертикальной нагрузки Fz и силы трения Ft (Z1) и силы трения и Модулей визуализации (Z2).

Модули вертикальной нагрузки позволяют проводить исследования износа и коэффициента трения для определения срока службы и долговечности поверхностей, а также проводить измерительное царапание и измерение твёрдости с нагрузками от нескольких мН до 100-200 Н.

Сменные датчики позволяют одновременно контролировать и управлять вертикальной нагрузкой и фиксировать силу трения, что даёт исследователю возможность легко отслеживать изменение коэффициента трения при различных конфигурациях нагрузки, скорости и геометрии контакта.

Режим «он-лайн» управления вертикальной нагрузкой и прямое управление скоростью перемещения образца позволяют исследовать трибологические свойства материала в широком диапазоне параметров испытаний, таких как скорость износа, статическое трение и динамическое трение при низкоскоростном возвратно-поступательном движении.

Оснащение верхнего сменного модуля вертикальной нагрузки и силы трения алмазным индентором позволяет превратить линейный Трибометр в Скретч-тестер

и проводить измерительное царапание для оценки адгезии покрытия или плёнки к субстрату в следующих диапазонах вертикальных нагрузок до 1 Н, до 50 Н и до 200 Н. При этом в ходе проведения царапины по поверхности задаются следующие параметры: начальная и конечная нагрузка, длина царапины, а регистрируются: сила трения и коэффициент, глубина, акустическая эмиссия в зависимости от времени или по длине царапины. После сканирования царапины при помощи конфокального микроскопа, в программном обеспечении происходит наложение изображения царапины на все графики данных по длине царапины, что позволяет сопоставить видимые разрушения поверхности с измеренными параметрами. Длина царапины ограничена только ходом X-Y столика и размерами образца.

Оснащение системы SMT-5000 сменными модулями приложения к образцу вертикальной нагрузки посредством инденторов Роквелла, Виккерса, Берковича и одновременной регистрацией глубины проникновения индентора в материал превращает платформу в систему измерения твёрдости покрытий и материалов методом Инструментального индентирования в диапазоне от 1 мН до 200 Н, что в квазистатическом или динамическом режиме приложения нагрузки к индентору позволяет измерить Модуль упругости Е, Твёрдость Н, Ползучесть/релаксацию напряжения, трещиностойкость за одно измерение! При проведении такого типа измерений исследователь получает зависимость вертикальной нагрузки от глубины погружения индентора в материал как при увеличении, так и при снятии нагрузки.

Каждый из функциональных модулей изучения Трибологии, проведения Скретч-теста и измерения твёрдости методом Инструментального Индентирования можно оснастить специальными камерами и приспособлениями для проведения испытаний в различных условиях эксплуатации изделий и материалов:

- При температуре от -30°C до $+500^{\circ}\text{C}$.
- Испытания в жидкостях, маслах, смазках.
- Реализации и моделирования условий коррозии в процессе износа.

Вышеописанные модули, приспособления и устройства, которыми может комплектоваться система сменные, то есть, сняв один измерительный или функциональный модуль и, установив другой, можно полностью изменить функционал машины. При этом, имея универсальное программное обеспечение для всех методов измерений, система SMT-5000 представляет собой универсальный инструмент с практически неограниченными возможностями для исследований в областях Трибологии, Измерительного царапания и Индентирования.

Включение профилометра высокого разрешения в комплект данной установки позволит определить износ поверхности как функцию времени и вертикальной силы.

Конструкция прибора и некоторые алгоритмы его работы отражены в патентах [1,2]. Для достижения поставленной цели использовали современные САПР программы...

Примеры исследований

В университете Циньхуа, Китай проводили исследование о комбинированном влиянии образования пограничного слоя и сглаживания поверхности при трении и изучали скорость износа смазываемых точечных контактов при нормальных процессах приработки [3].

Австралийские ученые разработали новую смазку на водной основе с добавкой наночастиц для проката стали [4].

Трибокоррозию тонких стеклянных плёнок на основе оксида циркония исследовали учёные из США [5].

Трибологические свойства композитов на основе СВМПЭ с различной морфологией встречной поверхности также исследовали в Шанхайском университете [6].

Влияние толщины покрытия на износостойкость покрытия Inconel 625 исследовали учёные из Южной Африки [7].

В университете Калифорнии, США, исследовали срок службы сухой смазывающей пленки MoS₂, легированной никелем [8].

Механическое поведение напылённых тонких плёнок алюминия при высоких нагрузках скольжения также исследовали африканские учёные [9].

Влияние содержания углерода на структуру и трибокоррозионные свойства покрытий TiSiCN на Ti6Al4V исследовали китайские учёные [10].

Исследование консистентной смазки самосмазывающихся подшипниковых материалов 60 NiTi было выполнено американскими учёными [11].

Заключение

Прибор платформенного исполнения со сменными модулями имеет следующие возможности: задавать и изменять вертикальную нагрузку в зоне контакта и одновременно фиксировать силу трения при трибологических исследованиях; изменять вертикальную нагрузку в ходе измерительного царапания и фиксировать силу трения и др. параметры, что даёт возможность определить стойкость покрытия к царапанию, нагрузку при которой происходит его разрушение, а также оценить адгезионные или когезионные свойства покрытий; определять зависимость погружения индентора в материал от прилагаемой нагрузки, что позволяет определять твёрдость и модуль упругости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Patent US 10,775,247 B1
2. US Pat. US 010132733B2
3. Zhang Y., Kovalev A., Meng Y. Combined effect of boundary layer formation. // Friction, 2018, V. 6 (3). P. 274–288
4. Wu H., Jia F., Li Z., Novel water-based nanolubricant with superior tribological performance in hot steel rolling. // Int. J. Extrem. Manuf. 2020. V.2. Art 025002.
5. Wanga W., Mraiedb H., Diyatmikac W. Effects of nanoscale chemical heterogeneity on the wear, corrosion, and tribocorrosion resistance of Zr-based thin film metallic glasses. // Surface & Coatings Technology/ 2020, V. 402. Art. 126324.
6. Wang Y., Yin Z, Li H. Tribological behaviors of UHMWPE composites with different counter surface morphologies. // Materials Science and Engineering. 2017. V.272. Art. 012022.
7. Phiri R., Oladijo O., Maledi N., Akinlabi E. Effect of Coating Thickness on Wear Performance of Inconel 625 coating. // Materials Science and Engineering 2018. V 423. Art. 012159
8. Vellore A., Garcia S., Walters N., et all. Ni-doped MoS₂ Dry Film Lubricant Life // Advanced Materials Interfaces 2020 preprint.
9. Mwema F., Akinlab E., Oladijo O., Mechanical Behavior of Sputtered Aluminium Thin Films under High Sliding Loads. // Key Engineering Materials 2019, Vol. 796, pp 67-73.
10. Wanga Y., Lia J., Danga C., Wanga Y, Zhub Y., Influence of carbon contents on the structure and tribocorrosion properties of TiSiCN coatings on Ti6Al4V. // Tribology International. 2017. V. 109. P. 285–296.

11. Vellore A., Walters N. Martini A. Grease Lubrication of Self-Mated 60NiTi Bearing Materials. // Frontiers in Mechanical Engineering. 2019. V. 5. Article 13.

Y.V.Mogilnikov
Scientific Co.Ltd., Saint Petersburg, Russia, y.mogilnikov@sntf.ru

MODERN METHODS AND DEVICES FOR RESEARCHING TRIBOLOGICAL AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS

Abstract

The paper presents an overview of international standards related to tribology, sketch testing and instrumental indentation. Simultaneous implementation of these methods of research and testing of various types of materials, such as metals, polymers, composites, coatings of various nature and morphology on a single instrument platform.

Keywords: International standards, linear wear, friction force, scratch resistance, instrumental indentation.