

---

---

**Нанотехнологии. Руководство по  
методам нано- и  
микротрибологических измерений**

*Nanotechnologies – Guidance on methods for nano- and microtribology  
measurements*

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

[ISO/TR 11811:2012](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4ebfa17c-a200-4418-9169-f3639b48ec6d/iso-tr-11811-2012)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4ebfa17c-a200-4418-9169-f3639b48ec6d/iso-tr-11811-2012>

Ответственность за подготовку русской версии несёт GOST R  
(Российская Федерация) в соответствии со статьёй 18.1 Устава ISO

---

---



Ссылочный номер  
ISO/TR 11811:2012(R)

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO/TR 11811:2012

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4ebfa17c-a200-4418-9169-f3639b48ec6d/iso-tr-11811-2012>



**ДОКУМЕНТ ЗАЩИЩЕН АВТОРСКИМ ПРАВОМ**

© ISO 2012

Все права сохраняются. Если не указано иное, никакую часть настоящей публикации нельзя копировать или использовать в какой-либо форме или каким-либо электронным или механическим способом, включая фотокопии и микрофильмы, без предварительного письменного согласия ISO, которое должно быть получено после запроса о разрешении, направленного по адресу, приведенному ниже, или в комитет-член ISO в стране запрашивающей стороны.

ISO copyright office  
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20  
Tel. + 41 22 749 01 11  
Fax + 41 22 734 09 47  
E-mail copyright @ iso.org

Web [www.iso.org](http://www.iso.org)

Опубликовано в Швейцарии

## Содержание

Страница

Предисловие.....	iv
Введение .....	v
1 Область применения .....	1
2 Термины и определения .....	1
3 Значение и применение.....	2
4 Сущность метода.....	2
5 Аппаратура и материалы .....	2
5.1 Испытательные системы.....	2
5.2 Параметры испытания .....	5
6 Проведение испытания .....	9
6.1 Различные типы испытаний .....	9
6.2 Техника обследования поверхности.....	13
7 Воспроизводимость, повторяемость и пределы испытаний .....	14
8 Протокол испытания.....	14
Библиография.....	15

IT-1 STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

[ISO/TR 11811:2012](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4ebfa17c-a200-4418-9169-f3639b48ec6d/iso-tr-11811-2012)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4ebfa17c-a200-4418-9169-f3639b48ec6d/iso-tr-11811-2012>

## Предисловие

Международная организация по стандартизации (ISO) является всемирной федерацией национальных организаций по стандартизации (комитетов-членов ISO). Разработка международных стандартов обычно осуществляется техническими комитетами ISO. Каждый комитет-член, заинтересованный в деятельности, для которой был создан технический комитет, имеет право быть представленным в этом комитете. Международные организации, правительственные и неправительственные, имеющие связи с ISO, также принимают участие в работах. Что касается стандартизации в области электротехники, то ISO работает в тесном сотрудничестве с Международной электротехнической комиссией (IEC).

Проекты международных стандартов разрабатываются в соответствии с правилами Директив ISO/IEC, Часть 2.

Основной задачей технических комитетов является разработка международных стандартов. Проекты международных стандартов, принятые техническими комитетами, рассылаются комитетам-членам на голосование. Для опубликования их в качестве международного стандарта требуется одобрение не менее 75 % комитетов-членов, принимающих участие в голосовании.

В исключительных случаях, когда ТК собрал информацию, отличную от той, которая обычно публикуется как международный стандарт (современное состояние в отрасли, например), этот ТК может вынести решение простым большинством голосов о публикации технического отчета. Технический отчет носит целиком и полностью информативный характер и не подлежит пересмотру до тех пор, пока содержащиеся в нем данные не перестанут считаться актуальными или полезными.

Необходимо учитывать возможность того, что некоторые элементы настоящего документа могут быть объектом патентных прав. ISO не несет ответственности за определение каких-либо или всех таких патентных прав.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4ebfa17c-a200-4418-9169-f3639b48ec6d/iso-11811-2012>  
ISO/TR 11811 был подготовлен Техническим комитетом Европейского комитета по стандартизации (CEN), CEN/TC 352, *Нанотехнологии*, совместно с Техническим комитетом ISO, ISO/TC 229, *Нанотехнологии*, в соответствии с Соглашением о техническом сотрудничестве между ISO и CEN (Венское Соглашение).

## Введение

Оценивание износа и трения в системах, где происходит взаимодействие на наноуровне, приобретает все большее значение. Существует две основные области применения. Во-первых, в биомедицинских приборах на основе микроэлектромеханических и нанозлектромеханических технологий, MEMS и NEMS, где общие рабочие характеристики прибора могут определяться трибологическими проблемами. Также справедливо, что в большинстве случаев трибологические характеристики контактов макроуровня зависят от сочетания событий, которые случаются вблизи контактов неровностей поверхности на микро и наноуровне, которые реально происходят при соприкосновении двух поверхностей.

Развитие испытаний в нанотрибологии обеспечивает способ сбора информации и понимание этих маломасштабных контактов. Это понимание затем можно использовать для моделирования характеристик приборов на микромасштабном уровне и обеспечить базу для будущих моделей износа при скольжении.

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

[ISO/TR 11811:2012](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4ebfa17c-a200-4418-9169-f3639b48ec6d/iso-tr-11811-2012)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4ebfa17c-a200-4418-9169-f3639b48ec6d/iso-tr-11811-2012>



# Нанотехнологии. Руководство по методам нано- и микротрибологических измерений

**ВНИМАНИЕ!** — Электронный файл данного документа содержит цветные фотографии, которые считаются полезными для правильного понимания документа. Поэтому пользователям следует учитывать это и при распечатке документа пользоваться цветным принтером.

## 1 Область применения

Настоящий Технический отчет устанавливает технику оценивания трибологических характеристик контактов при скольжении поперечным размером от нескольких нанометров (нм) до 10 мкм, и при приложенной нагрузке от 50 мкН до 100 мкН. В Техническом отчете описаны процедуры выполнения таких измерений и представлено руководство по влиянию некоторых параметров на результаты испытаний. Сюда не вошли существующие методы сканирующей зондовой микроскопии (SPM), такие как микроскопия сил трения и микроскопия атомных сил (AFM).

## 2 Термины и определения

В настоящем документе используются следующие термины и определения.

### 2.1

#### **износ wear**

повреждение твердой поверхности, обычно сопровождающееся постепенной потерей материала, за счет относительного движения этой поверхности относительно соприкасающейся с ней поверхностью или веществами

[ASTM G40]

### 2.2

#### **сила трения frictional force**

противодействующая сила, направленная по касательной к границе раздела между двумя телами, когда под действием внешней силы одно тело перемещается или стремится к перемещению относительно другого тела

[ASTM G40]

### 2.3

#### **коэффициент трения coefficient of friction**

$\mu$   
 $f$

безразмерная величина, отношение силы трения,  $F$ , между двумя телами к нормальной силе,  $N$ , прижимающей эти тела друг к другу

[ASTM G40]

ПРИМЕЧАНИЕ 1  $\mu = F/N$ .

ПРИМЕЧАНИЕ 2  $\mu \geq 0$ .

### 3 Значение и применение

Настоящий Технический отчет обеспечивает руководство по выполнению микро- и нанотрибологических испытаний, уделяя особое внимание вероятному влиянию условий испытания и параметров испытания на получаемые результаты. В данном Техническом отчете не задается конкретный диапазон условий испытания, которые следует использовать. Подходящие условия для испытания следует выбрать после рассмотрения возможного их применения для оцениваемых материалов.

### 4 Сущность метода

Трибологические испытания проводятся в испытательных системах, которые предназначены для прижимания одного образца к другому с контролируемой относительной силой, при этом вынуждая их двигаться одно относительно другого под контролем. Традиционно испытания на скольжение/качение выполняются на образцах, у которых площади номинального контакта имеют размеры нескольких миллиметров или больше при испытательных нагрузках порядка 1 Н или больше. В данном Техническом отчете описываются трибологические испытания, в которых площади контакта имеют размеры от нескольких нанометров (нм) и 100 мН<sup>1</sup>, и нагрузки прикладываются от 50 мкН до 100 мкН.

С помощью этих испытаний можно измерить износ и трение. Главной целью испытания является получение данных о трибологических характеристиках материалов на микро- и макромасштабном уровне. Такую информацию можно использовать для развития и понимания механизмов в наномасштабе, которые определяют характеристики трения и износа материалов и зависимость этих механизмов от структуры материала.

Сферы применения этих измерений следующие:

- приборы, которые на микро- и наномасштабном уровне измеряют контакты при скольжении/качении, и
- имитация контактов на микро- и наномасштабном уровне, которые лежат в основе всех макромасштабных трибологических контактов.

### 5 Аппаратура и материалы

#### 5.1 Испытательные системы

##### 5.1.1 Типичная геометрия зонда и образца

Обычно для контакта с плоским образцом (см. 5.2.11) используется зонд с четко определенной геометрией. Зачастую в испытаниях, в которых воспроизведены такие особенности, как форма контакта и геометрические параметры, такие как радиус кривизны верхушки контактирующего выступа, который в реальной задаче находится в контакте, важно имитировать реальные контакты. Предполагаемая геометрия контакта, например, остроконечный конус, не всегда будет правильной для масштаба контакта, используемых в испытаниях, описанных в данном Техническом отчете. Геометрия реального контакта почти всегда имеет закругленную форму на самом конце контактного зонда. Если необходимо провести серию испытаний, также важно учесть повторяемость геометрии зонда, так чтобы условия контакта можно было повторить от одного испытания к следующему. Другие подробности относительно проб приводятся в данном Техническом отчете.

<sup>1</sup> Должно быть мкм

Хотя слова "зонд" и "образец" используются в данном подразделе и во многих местах по тексту данного Технического отчета, следует подчеркнуть, что может возникнуть износ и повреждение, как зонда, так и образца.

### 5.1.2 Держатель образцов

Образец и зонд надо держать крепко и точно определенным образом, так чтобы происходило только заданное перемещение образцов. Часто предпочитают зажимать образцы механическим способом, но в некоторых случаях для удерживания образца на месте можно использовать клей, например, если используются шарики в качестве зонда и их необходимо присоединить к держателю. Если используется клей, важно чтобы толщина клеевого слоя была минимальна, чтобы снизить эффект любого зависящего от времени течения в клее, а также уменьшить влияние пониженной за счет клея жесткости. Кроме того, если используется клей, следует выдержать достаточный период времени, чтобы клей застыл полностью, развилась максимальная прочность склейки, а также рассеялись все экзотермические эффекты до начала испытания.

### 5.1.3 Генерация движения

Относительное перемещение, генерированное между зондом и образцом, может достигаться либо движением образца, либо движением зонда. В любом случае, генерированное движение должно быть четко определено и воспроизводимо, так чтобы можно было проводить повторяющиеся проходы. Небольшие смещения по вертикали и нагрузки, которые прикладываются в ходе испытания, означают, что особая внимательность требуется, чтобы неравномерности в самом движении не привели к наведенным показаниям применяемой нагрузки.

Дополнительное внимание также следует уделить сведению к минимуму флуктуации движения и другие эффекты за счет колебаний почвы, изменений температуры окружающей среды и воздушных потоков (вызванных работой вентиляционных систем, оператора и лабораторного оборудования, что упоминается как возможные источники).

Движение можно формировать разными способами. Можно использовать пьезоэлектрические приводы, но они имеют ограниченный диапазон (обычно 100 мкм). Можно также использовать исполнительные электроприводы, звуковые катушки или шаговые электродвигатели с коэффициентом передачи, придающим требуемую прецизионность движению. В любом случае важно иметь независимую меру смещения.

Также важно спроектировать предметный столик и приводные системы так, чтобы свести к минимуму вторичные (наведенные) сигналы в z-движении и x-y движении, такие как гистерезис или обратный ход.

Чтобы придать необходимое x-y движение, а также грубое z-движение и подвести зонд ближе к образцу, требуется три координаты перемещения. Направление движения по оси z должно быть перпендикулярно направлению движения в плоскости x-y.

В испытаниях можно использовать различные типы движения. Самым обычным является знакопеременное движение, возвратно-поступательное в одном линейном направлении. Вариантом движения такого типа является случай, когда требуется однонаправленное движение, так чтобы движение происходило в одном направлении с отрывом (от опорной плоскости) перед началом обратного движения, с повторением контакта, получая неоднократный контакт в одном и том же направлении. Движение по окружности также довольно обычно, когда плоский образец просто крутится приводом.

### 5.1.4 Приложение нормальной силы

Приложение нормальной силы можно обеспечить несколькими различными способами.

Простейшим методом является применение статической нагрузки. Это пассивный способ, но необходимо следить, чтобы наведенные сигналы о нагрузке, например, паразитное трение, не генерировались нагружающим механизмом. Паразитное трение – это трение, генерированное в

элементах нагружающего механизма, так что фактически приложенное усилие отличается от требуемого усилия.

Другим общим методом генерирования приложенной нормальной силы является применение сжатия упругого элемента для генерации силы, когда нормальная сила определяется измерением изменения размера при сжатии упругого элемента. Изменение размера при сжатии упругого элемента можно измерить датчиками смещений, например, волоконно-оптическими сенсорами, устройствами, чувствительными к отклонению светового пучка, или емкостными устройствами. Важно, чтобы диапазон и прецизионность датчиков смещений совпадали с отклонением упругого элемента в нагружающей системе, так чтобы можно было достичь требуемого разрешения и диапазона нагрузки. Системы можно проектировать таким образом, чтобы можно было использовать взаимозаменяемые упругие элементы для получения различных разрешений и диапазонов нагрузки.

В системе управления как в открытом, так и в замкнутом контуре величина силы контролируется напрямую, и контролируемые данные необходимо фильтровать соответственным образом в отношении шума и всплесков значений.

Системы нагружения, использующие упругий элемент для генерирования прикладываемой нагрузки, можно использовать без управления изменениями нагрузки, но в случае использования образца с неплоской или шероховатой поверхностью, или когда происходит износ зонда или образца, нежелательные изменения возникают в приложенной нагрузке. По этой причине, управление изменениями нагрузки часто используется так, чтобы достигаемая нагрузка была сопоставима с требуемой нагрузкой и позицией нагружающего механизма, регулируемого механизмом обратной связи, зачастую пьезоактуатором, чтобы реальная нагрузка совпадала с требуемой нагрузкой.

Для этого используется система управления в открытом или замкнутом контуре. При управлении в замкнутом контуре выполняется непосредственное сравнение между реальной и требуемой нагрузкой с генерированием разностного сигнала, который используется для приведения в действие пьезоактуатора для достижения требуемой нагрузки. Здесь преимущество заключается в скорости, а сложность может возникнуть при регулировании параметров контроля в закрытом контуре, так чтобы не наблюдалось случайных сигналов в обратной связи и управлении (типа неравномерных колебаний).

Открытая система управления (без обратной связи) состоит в управлении внешним компьютером, производящим сравнение и отсылку команд в систему нагружения, так чтобы получить требуемую нагрузку. Недостаток такого подхода заключается в том, что время отклика двигателя может быть продолжительным.

Полезная техника, которая может облегчить испытания на образцах со сложной формой поверхности, заключается в осуществлении предварительного сканирования поверхности образца под небольшой нагрузкой, и регистрация вертикального положения измерительного зонда в процессе этого предварительного сканирования. Такую измеренную форму впоследствии можно использовать для измерения пути, сокращающего степень контроля обратного движения, который требуется для улучшения управления нагружением.

### 5.1.5 Измерение трения

Измерение трения обычно осуществляется посредством измерения отклонения упругого элемента с помощью датчиков смещения или тензометрических датчиков, расположенных непосредственно на упругом элементе. Если осуществляется измерение отклонения, то для этой цели можно использовать оптико-волоконные сенсоры, датчики отклонения пучка света или емкостные устройства. В отношении малых значений трения, которые наблюдаются для некоторых материалов, совпадение диапазона и прецизионности датчиков смещений с отклонением упругого элемента в системе нагружения, так чтобы можно было достичь требуемых разрешения и диапазона нагрузок, еще важнее, чем контроль приложенной нагрузки.

В этом отношении важно обеспечить, чтобы оси двух измеренных сил ( $N$  и  $F$ ) оставались взаимно перпендикулярными в процессе измерения.

### 5.1.6 Измерение износа в реальном времени

В принципе, измерение износа в реальном времени можно осуществить посредством измерения относительного смещения образца и зонда. Это достигается такими же датчиками, как и датчики измеряющие трение, оптиковолокonné датчики, датчики отклонения светового луча или емкостные устройства. В то же время, очень незначительные смещения, которые могут происходить в испытаниях, означают, что генерированные вторичные сигналы, например, при тепловом расширении механического хода между двумя образцами, или неровности предметного столика мешают точному измерению в реальном времени.

Можно попытаться измерить относительное смещение (смещение одного образца относительно другого за счет износа), но сделать это сложно, когда один образец движется относительно другого.

### 5.1.7 Температурный контроль

Некоторые испытательные системы имеют возможности выполнения испытаний при контролируемой температуре. Необходимо осторожно подходить к конструкции испытательных систем для испытаний при контролируемой температуре. Важно нагревать или охлаждать и образец и зонд, так чтобы на результаты испытаний не повлияли неожиданные температурные градиенты. Не менее важно обеспечить отсутствие влияния на средства измерения нагревания или охлаждения; здесь может потребоваться экстензометрия, которая затруднена для небольших нагрузок и малых размеров контакта. Измерение температуры следует организовать таким образом, чтобы была уверенность, что измеряется реальная температура образцов, обычно достигаемая посредством правильного размещения термопар вблизи образцов. Особый вопрос стоит для движущегося образца, когда жесткость отводов термопары может повлиять на измерение трения.

## 5.2 Параметры испытания

### 5.2.1 Общие положения

Поведение материалов при трибологических контактах в большой степени зависит от широкого диапазона значений различных параметров испытаний. По мере уменьшения масштаба контакта от макромасштаба доминирование различных факторов изменяется так, что такие факторы, как капиллярные силы, становятся критическими за счет присутствия жидкостей при трибологическом контакте. Типичные параметры испытания, которые необходимо рассмотреть, включают следующие:

- геометрия контакта;
- приложенная нагрузка;
- тип движения;
- относительная скорость;
- устойчивость испытательной системы;
- граница раздела материалов;
- материал зонда;
- материал образца;
- чистота поверхности;
- топография и шероховатость поверхности;
- окружающая среда.