

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

МОДУЛЬ 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Лекция 12.

Трение и износ. Измерение коэффициента трения. Методы оценки износостойкости материалов

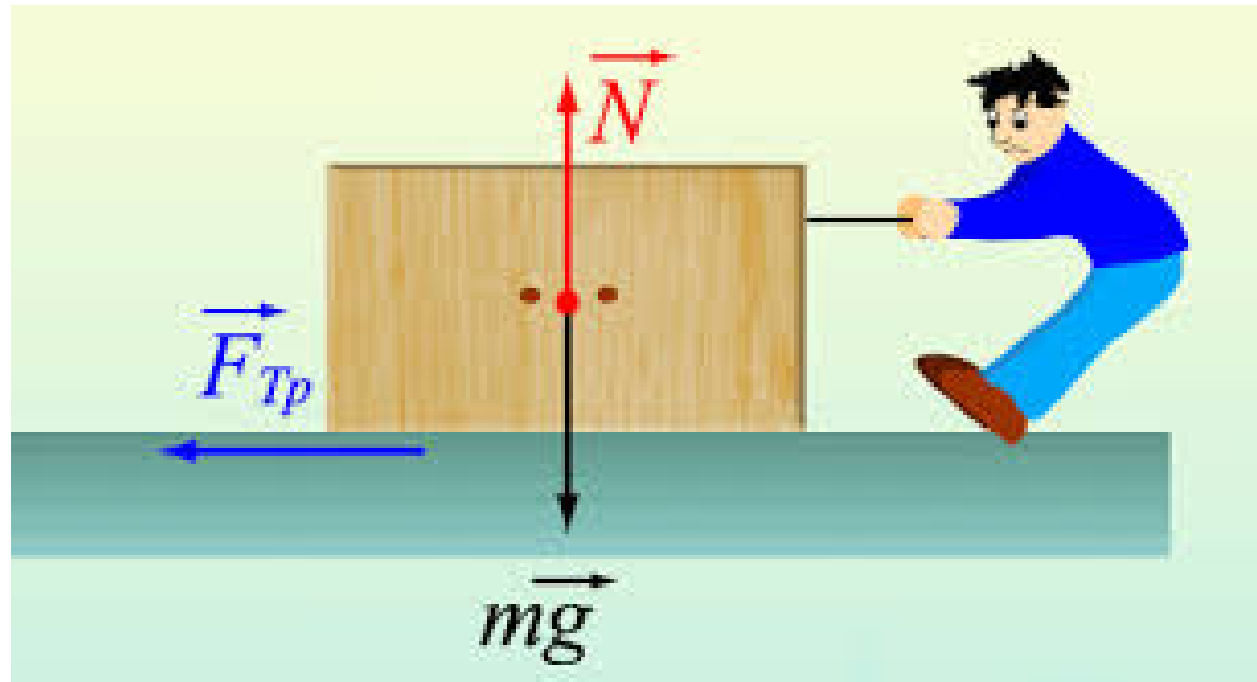
Трение (англ. *friction*) — процесс взаимодействия тел при их относительном движении (смещении), либо при движении тела в газообразной или жидкой среде.

Сила, возникающая при движении одного тела по поверхности другого, приложения к движущемуся телу и направленная против движения, называется **силой трения**

$$F = \mu N$$

μ - коэффициент трения,
 N – сила реакции опоры,

для горизонтальной поверхности $N = mg$



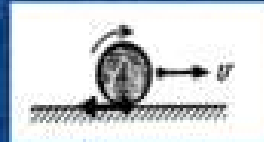
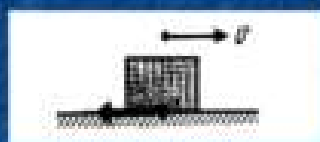
Причиной возникновения трения является **шероховатость** трущихся поверхностей и **взаимодействие** молекул этих поверхностей.

Виды трения

Трение
покоя

Трение
скольжения

Трение
качения



Сила **трения покоя** препятствует относительному смещению соприкасающихся тел. Она растет вместе с силой, стремящейся сдвинуть тело с места.

Сила, возникающая при движении одного тела по поверхности другого и направленная в сторону, противоположную движению, называется силой **трения скольжения**.

Если тело катится по поверхности другого тела, то возникающее в месте их контакта трение называют **трением качения**.

Пары материалов	покоя	скольжения
Сталь-Сталь	0.5-0.8	0,15–0,18
Резина-Сухой асфальт	0,95–1,0	0,50–0,8
Резина-Влажный асфальт		0,25-0,75
Лед-лед	0,05–0,1	0,028
Резина-Лед	0,3	0,15–0,25
Стекло-стекло	0,9	0,7

Характер фрикционного взаимодействия

- **сухое**, когда взаимодействующие твёрдые тела не разделены никакими дополнительными слоями/смазками (в том числе и твердыми смазочными материалами) — **очень редко встречающийся** на практике **случай**.
Характерная отличительная черта сухого трения — наличие значительной силы трения покоя;
- **граничное**, когда в области контакта могут содержаться слои и участки различной природы (окисные плёнки, жидкость и так далее) — **наиболее распространённый случай** при трении скольжения.
- **жидкостное (вязкое)**, при взаимодействии тел, разделённых слоем твёрдого тела (порошком графита), жидкости или газа (смазки) различной толщины — как правило, встречается при трении качения, когда твёрдые тела погружены в жидкость, величина вязкого трения характеризуется вязкостью среды;
- **смешанное**, когда область контакта содержит участки сухого и жидкостного трения;
- **эластогидродинамическое (вязкоупругое)**, когда решающее значение имеет внутреннее трение в смазывающем материале.

Определение коэффициента трения скольжения

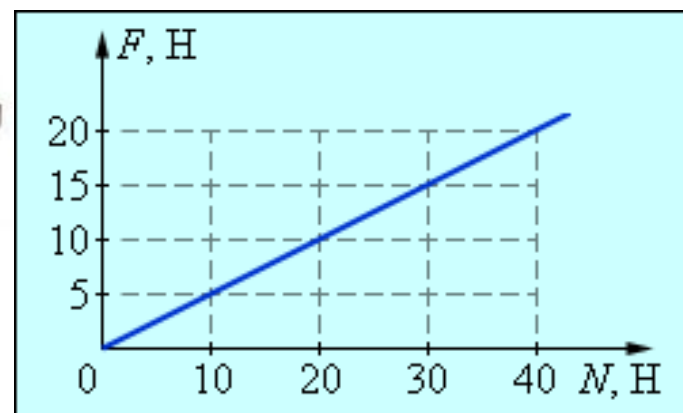
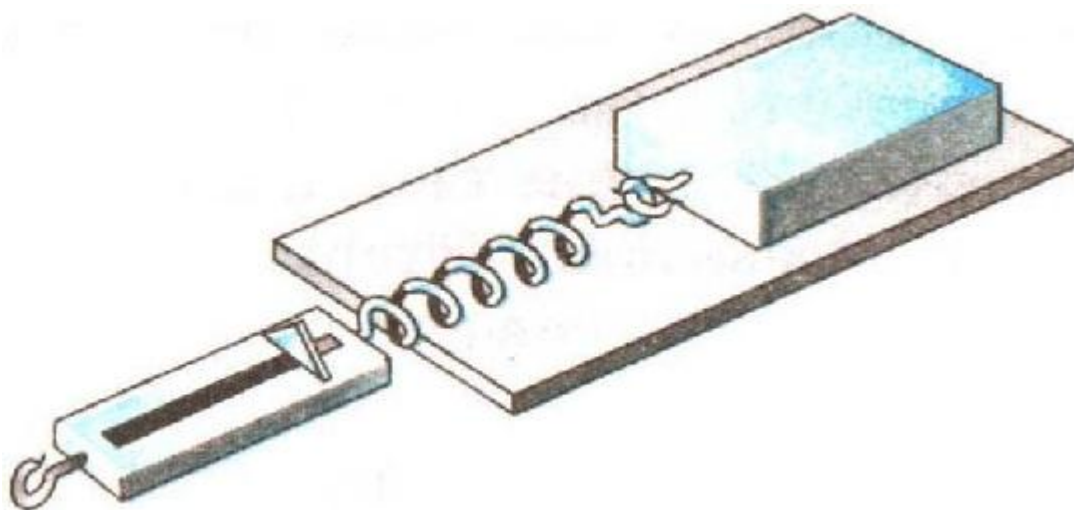


Рисунок 1. Схема измерения трения скольжения на горизонтальной опоре

$$F = \mu N$$

Трибометр

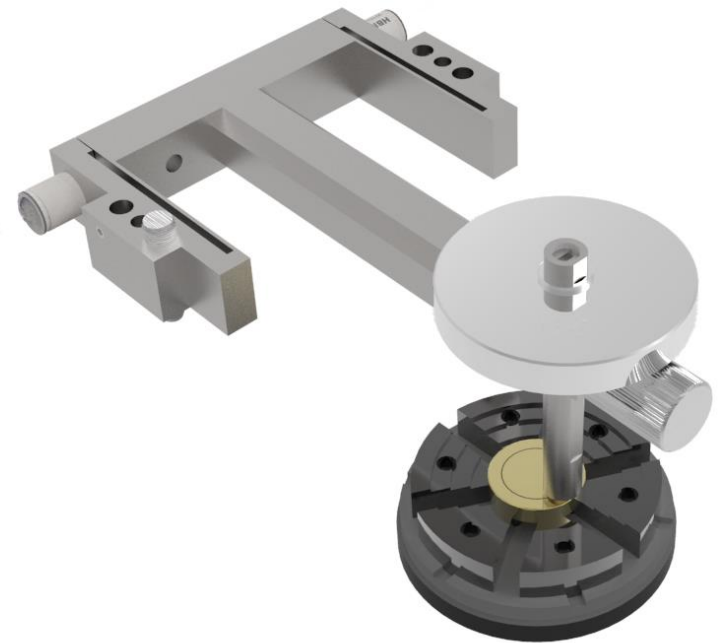
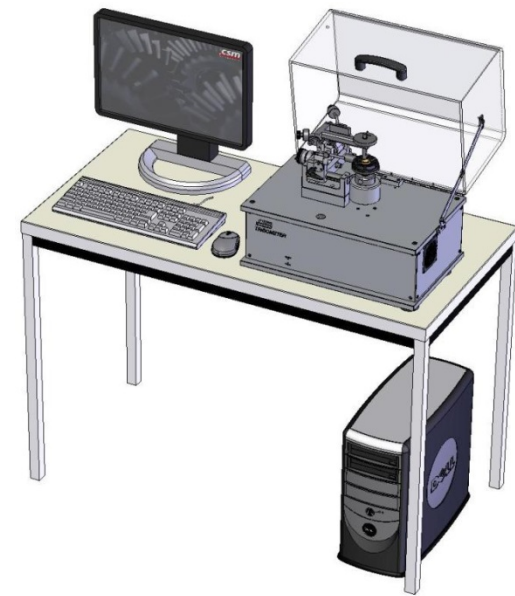


Схема измерения силы трения на TRB

Edit tribometer parameters

Acquisition parameters

Acquisition rate: 50.00 [Hz]
File size: 17.98 [MBytes]
Test duration: 8:43:35 [HH:mm:ss]

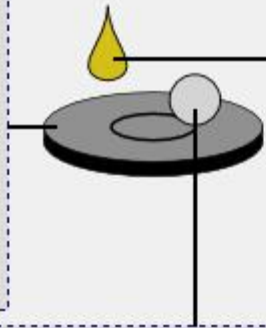
Tribological environment

Sample Temperature: 25.00 [°C]
Atmosphere: Air [%]
Humidity: 40.00

Partners

Sample

Coating: TiN
Substrate: HSS
Cleaning: Isopropanol
Supplier: CSM



Lubricant

Type:
Volume: 0.00 [ml]
Application method:

Static friction partner

Coating: -
Substrate: Al2O3
Cleaning: Isopropanol
Supplier: CSM
Dimension: 6.00 [mm]
Geometry: Ball

Tribo parameters

Measurement type

Single way Reciprocating

Load: 10.000 [N]

Friction threshold

0.50

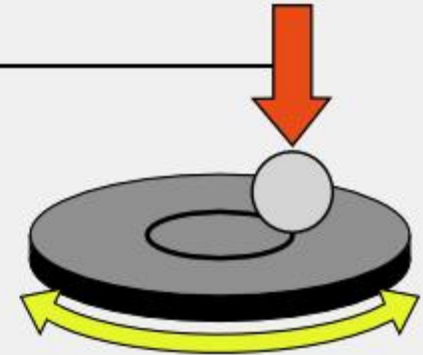
Radius

5.0 [mm]

Distance

In meters
628.3186 [m]

In laps
20000 [lap]



Linear speed

10.0000 [cm/s]

Reverse direction

Motor Speed

190.9859 [rpm]

Frequency

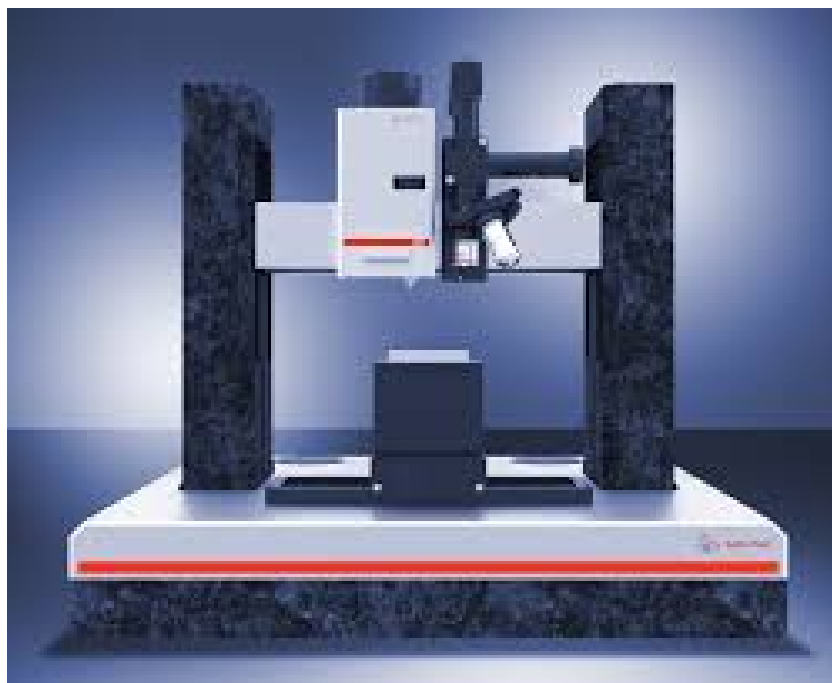
3.18 [Hz]

Max motor speed : 600.00 [rpm]

OK

Cancel

Скретч-тестер





Progressive Incremental

Scratch test

Scratch test parameters

Linear Scratch
 Type : Progressive
 Begin Load (mN) : 30
 End Load (mN) : 30000
 Loading rate (mN/min) : 59940

Scanning load (mN) : 30
 Speed (mm/min) : 6
 Length (mm) : 3
 Position X (mm) : 6.181
 Position Y (mm) : 17.663
 AESensitivity : 6
 Acquisition Rate : 30.0 [Hz]

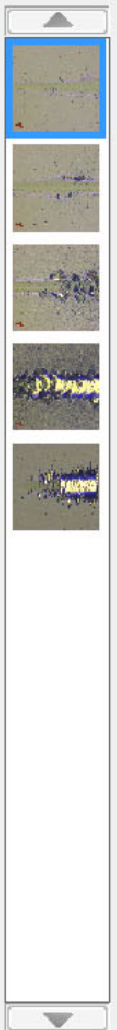
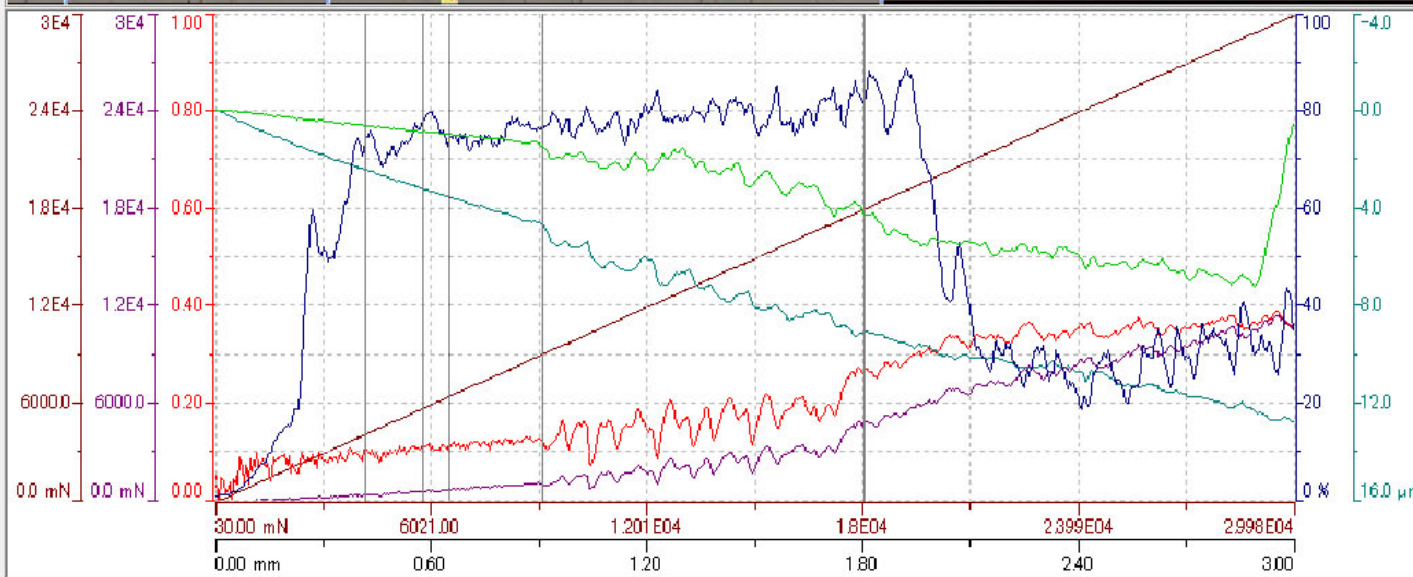
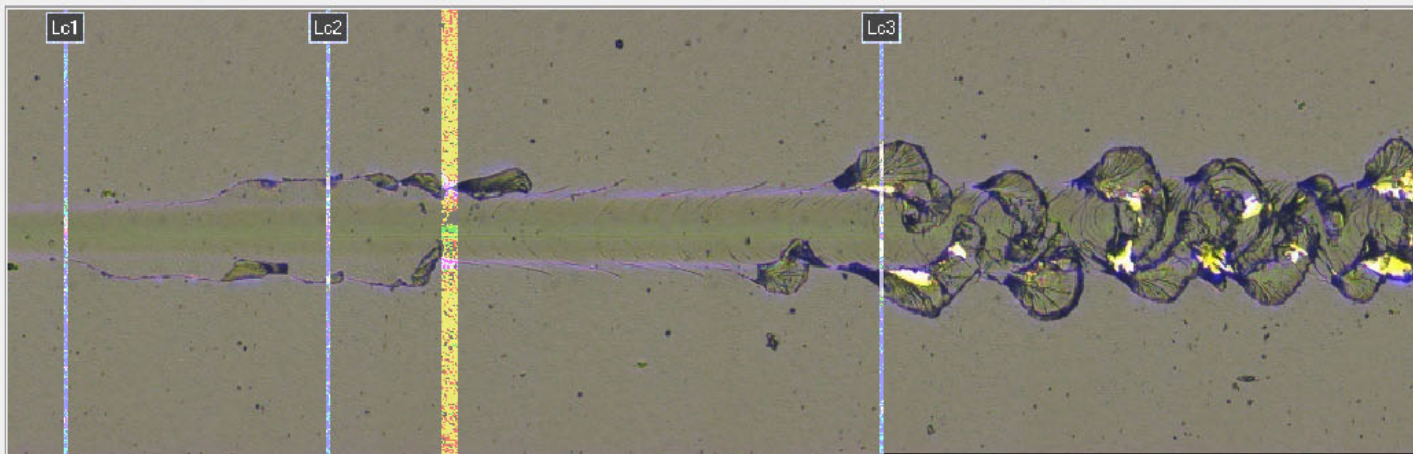
Indenter
 Type : Rockwell
 Serial number : H-156
 Material : Diamond
 Radius (µm) : 100
 + Instrument : MSTX S/N: 01-2584
 + Hardware settings
 Fn contact : 30 mN
 Fn Speed : 2000 mN/s
 Fn Remove speed : 2000 mN/s
 Approach speed : 10 %/s
 Dz sensor in standard range
 Dz range adjusted before measurement

Curves legend

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

Critical loads (mN)

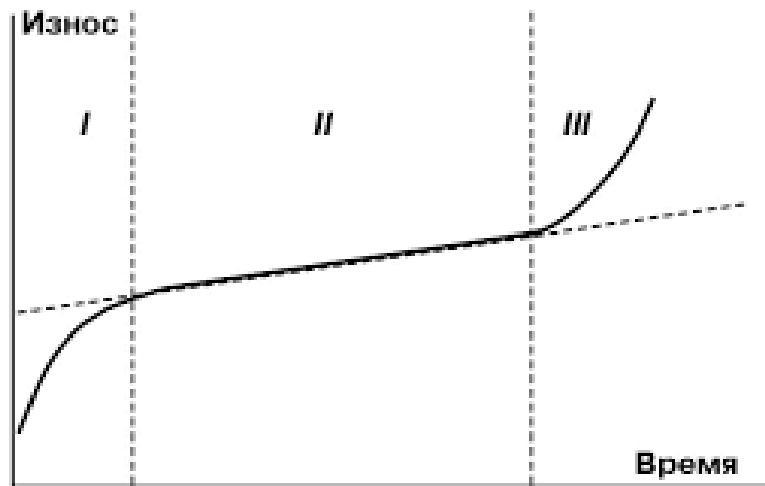
	Optical	Ft	AE	Pd
1	4121.75			
2	5716.08			
3	9041.55			
4	7987.14			
5				



Information 1

Износ — изменение размеров, формы, массы или состояния поверхности изделия или инструмента вследствие разрушения (*изнашивания*) поверхностного слоя изделия при трении.

Процесс изнашивания обычно происходит в три стадии.



На **стадии I** идет приработка сопряженных поверхностей деталей, занимающая небольшой отрезок времени. Первоначально скорость изнашивания высокая, но затем постепенно убывает.

Стадия II является наиболее продолжительной и характеризуется стационарностью процесса. Скорость изнашивания в этом случае небольшая и постоянная.

Стадия III — ускоренный износ, характеризующийся резко возрастающей скоростью износа вследствие изменяющихся условий трения из-за изменения размеров и формы трущихся поверхностей.

Трение и процесс изнашивания развиваются в микрообъемах, возникающих в зонах касания трущихся поверхностей.

В процессе трения, под действием нормальных и тангенциальных сил, поверхности двух тел будут соприкасаться своими выступами. При этом между ними будут возникать фрикционные связи.

Различают пять видов фрикционных связей. Связи *а*, *б* и *в* получаются при механическом взаимодействии, а *г* и *д* — при молекулярном.

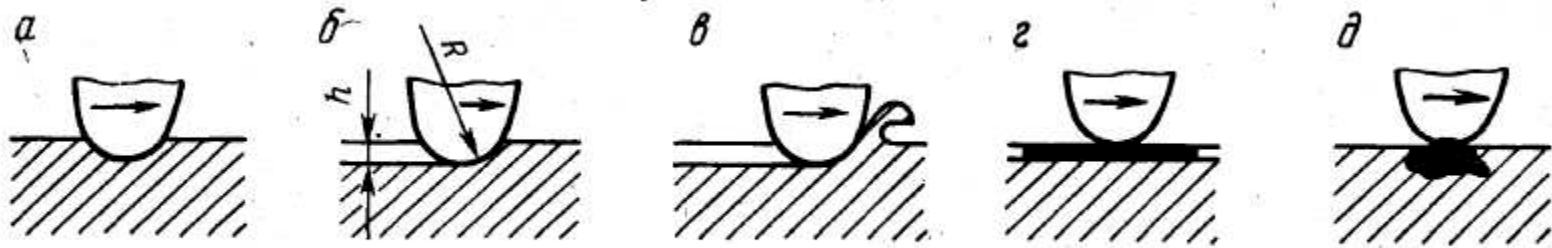


Рис. 11.3. Виды фрикционных связей

В зависимости от степени адгезии и отношения глубины внедрения h к радиусу R внедряющейся неровности и будет происходить: упругое оттеснение металла (*а*); пластическое оттеснение металла (*б*); срез внедрившимся материалом (*в*); схватывание пленок и их разрушение (*г*); схватывание поверхностей, сопровождающееся глубинным вырыванием металла (*д*).

Переход от одного вида фрикционных связей к другому зависит от температуры поверхностей трения, молекулярного взаимодействия, а также от глубины взаимного внедрения неровностей, влияющего на характер механического взаимодействия поверхностей, физико-механических свойств металлов и микрорельефа поверхностей трения.

Виды износа:

- абразивный
- газоабразивный
- гидроабразивный
- кавитационный
- адгезионный
- окислительный
- тепловой
- усталостный



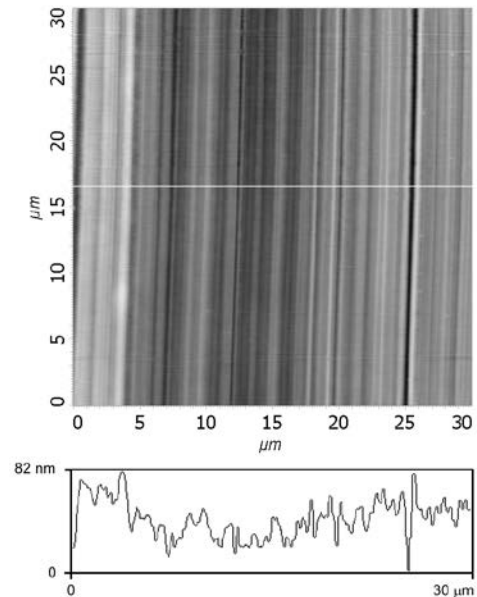
Виды износа:

- абразивный
- газоабразивный
- гидроабразивный
- кавитационный
- адгезионный
- окислительный
- тепловой
- усталостный



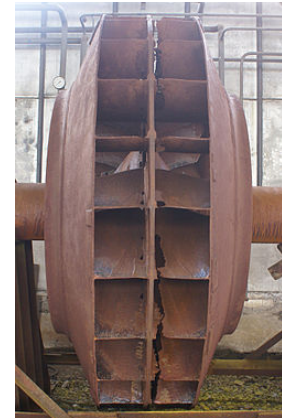
Абразивный

Сущность абразивного износа заключается в разрушении металла твердыми зернами абразива при пластическом деформировании и микрорезании трущихся поверхностей. Абразивный износ является ведущим для машин и оборудования горно-рудного производства, строительной, дорожной, почвообрабатывающей техники, инструмента производства кирпича, бетона и других строительных материалов.



Газоабразивный

Вызывается механическим действием твердых частиц, перемещаемых потоком газа. В этом случае разрушение металла происходит в результате срезания, выкрашивания, выбивания и многократного пластического деформирования его поверхностных микрообъемов. Этому виду износа подвержены лопатки пылевых вентиляторов и насосов, клапаны, корпуса и чаши загрузочных устройств доменных печей, сопла реактивных двигателей, работающих на твердом топливе и т. д.



Гидроабразивный

Гидроабразивный износ во многом сходен с газоабразивным, но носителем абразивных частиц является не газ, а жидкость. Гидроабразивному износу подвергаются рабочие колеса и улитки земснарядов и песковых насосов, лопасти и камеры гидротурбин, работающие на реках, несущих большое количество абразивных частиц, а также пульпопроводы гидротранспорта.

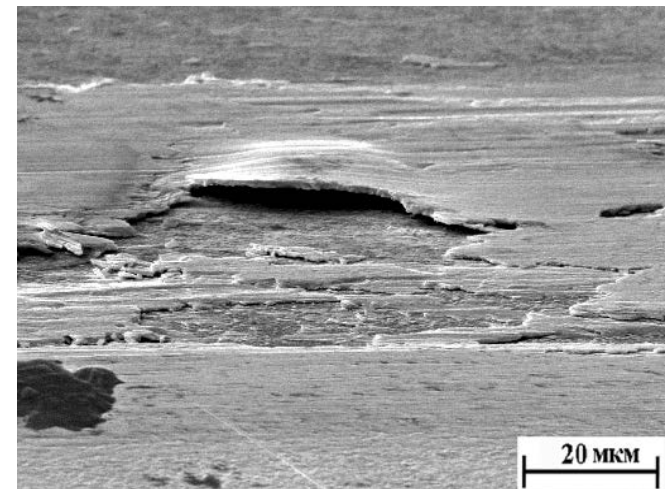
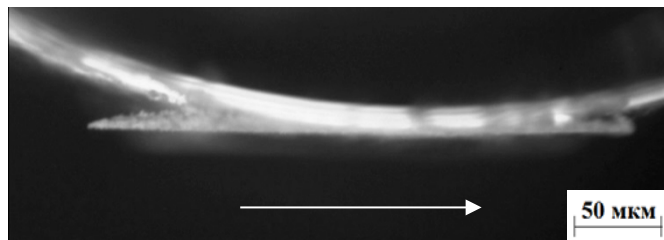
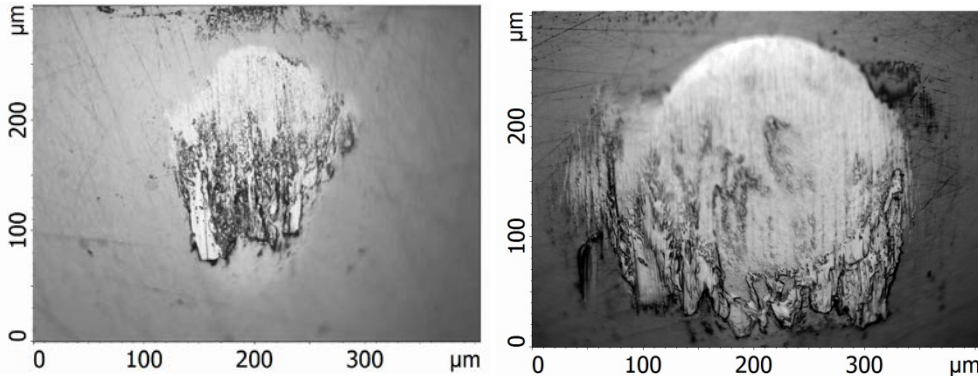
Кавитационный

Этот вид износа заключается в разрушении поверхности металла под действием ударов газовых пузырьков, образующихся в обтекающем изделие высокоскоростном потоке жидкости при перепадах давления. Кавитации подвержены гребные винты, лопасти и камеры проточного тракта гидротурбин, рабочие колеса и камеры различных гидромашин. Наличие коррозионной среды и абразивных частиц ускоряет процесс кавитационного изнашивания.



Адгезионный

Адгезионный износ при трении двух металлических поверхностей под нагрузкой происходит в условиях пластической деформации металла в точках контакта. Развитие деформации сопровождается сближением поверхностей вплоть до активизации сил сцепления между атомами контактирующих металлов и возникновением адгезии на ограниченных участках. Многократное повторение адгезионных связей с последующим их разрушением и отделением частиц металла составляет сущность адгезионного изнашивания. Этот вид износа происходит в подшипниках скольжения (коленчатые валы, оси, пальцы ковшевых цепей, ходовые части различных машин).



Тепловой

Тепловым износом называется процесс разрушения поверхностей деталей машин вследствие нагрева зоны трения до **температуры размягчения металла**. Разрушение при этом виде износа является следствием образования металлических связей: между контактирующими поверхностями, смятия, налипания и оплавления металла. Этот вид износа распространён в деталях тяжело нагруженных быстроходных машин, валки горячей прокатки, ножи для горячей резки проката, штампы для горячей штамповки, прессформы для литья под давлением, прошивной инструмент горячей прокатки труб.



Сетка разгара на дне ящичного калибра сортопрокатного валка

ФреттингОВЫЙ

ФреттингОВЫЙ износ — механический износ тел, пребывающих в контакте, в условиях малых колебательных перемещений. Достаточны относительные перемещения поверхностей с амплитудой от 0,025 мкм. Микросмещения соединённых поверхностей происходят вследствие деформаций деталей в условиях нагружения и вибраций, сопровождающих работу машин и оборудования. ФреттингОВЫЙ износ возникает, например, в заклёпочных, резьбовых, шлицевых, шпоночных и штифтовых соединениях.



Окислительный

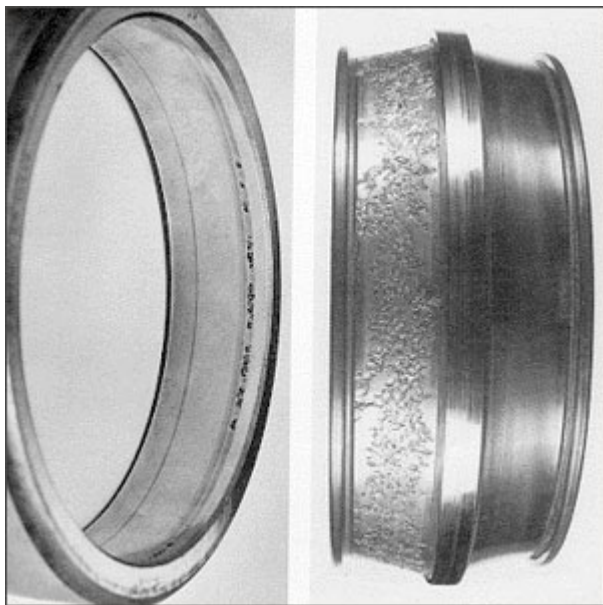
Окислительный износ возникает при наличии между трущимися поверхностями слоя смазки или другой жидкости. Он характерен образованием на поверхностях деталей окисных пленок и последующим их разрушением при взаимодействии поверхностей. Следует заметить, что окисные пленки образуются также при наличии смазки.

Скорость изнашивания при этом самая минимальная из всех видов износа.



Усталостный

Усталостный износ — это износ вследствие усталостного разрушения поверхностного слоя материала при многократном действии нагрузки, приводящем к зарождению и распространению внутри сильно деформированного слоя трещин, преимущественно параллельных поверхности, которые вызывают отделение в форме тонких чешуек материала. Усталостный износ характерен для роликов (шариков) в подшипниках качения, железнодорожных колёс и рельсов и т. п.



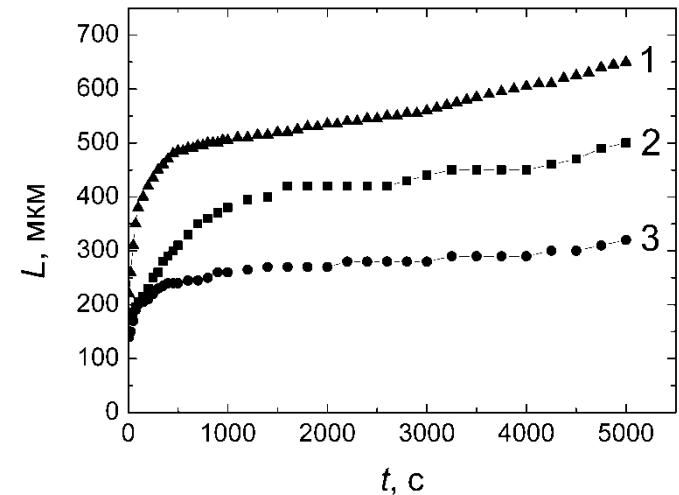
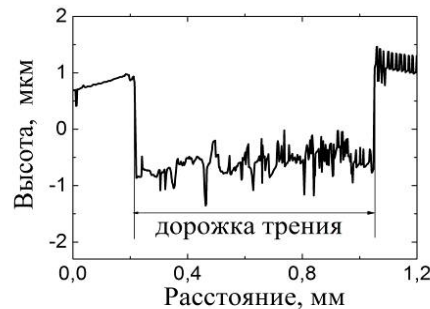
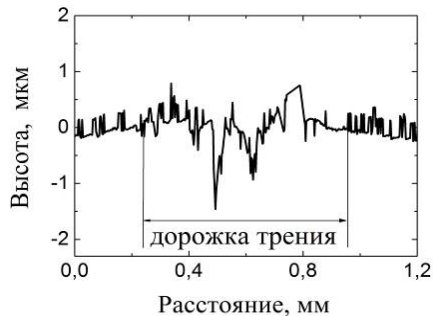
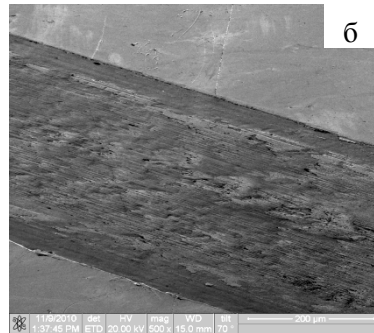
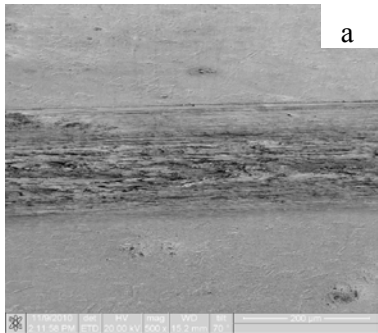
Методы оценки величины износа

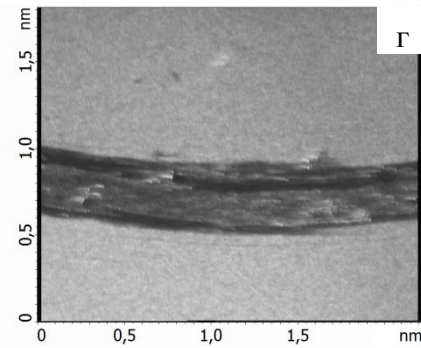
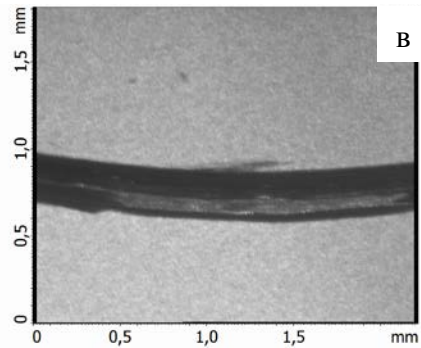
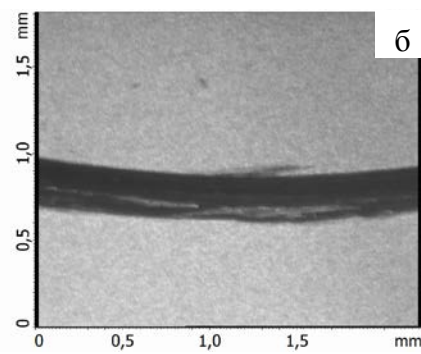
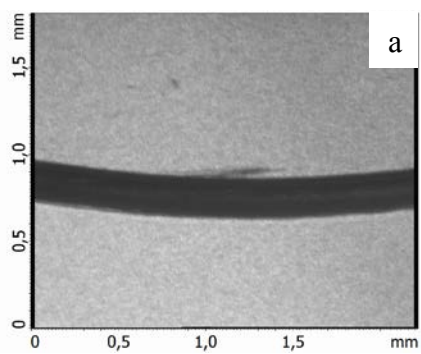
- **Метод микрометрических измерений**
- **Метод взвешивания**
- **Метод обнаружения продуктов износа в масле**
- **Метод радиоактивных индикаторов**
- **Метод встроенных датчиков**
- **Метод искусственных баз**

Метод микрометрирования

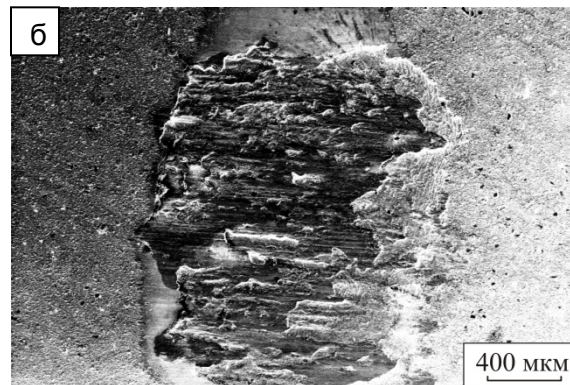
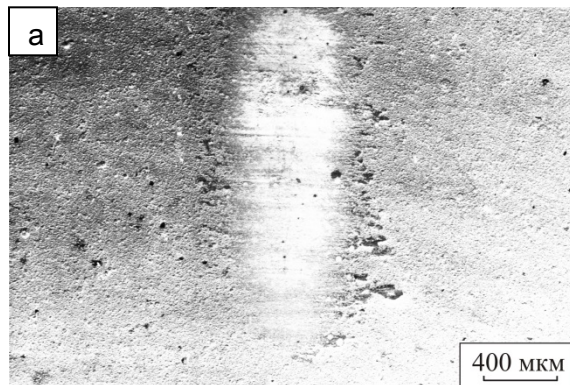
Данный метод основан на измерении детали при помощи механических контактных или каких-либо других приборов до и после испытания на изнашивание.

Наибольшее распространение при оценке величины износа методом микрометрирования получили концевые меры длины, микрометры, индикаторные нутромеры, рычажные скобы, рычажно-механические приборы, рычажно-оптические приборы, инструментальные и универсальные микроскопы.

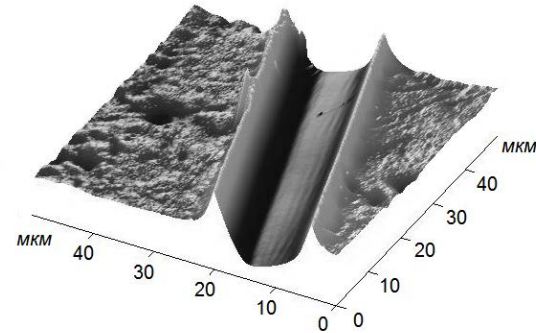
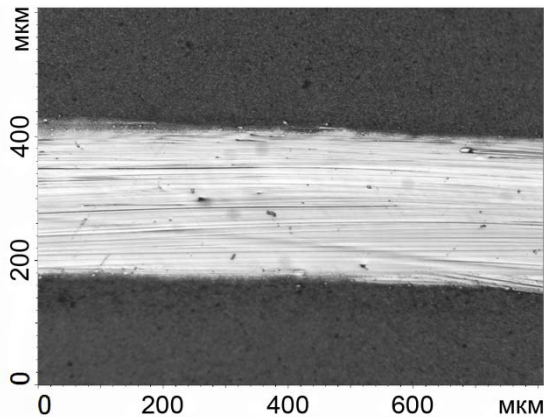




Оптические изображения дорожек трения покрытий Au-Ni при различной длительности испытаний на износ: а - 1900 с, б - 2000 с, в - 2200 с, г - 2600 с.



РЭМ-изображения поверхности двухслойного покрытия ZrYO/SiAlN после трибологических испытаний в течение 8 (а) и 16 минут (б)



Недостатками метода *микрометрирования* являются

- невозможность осуществления измерения износа в процессе работы машины,
- необходимость, как правило, частичной разборки узла или демонтажа измеряемой детали,
- громоздкость приспособлений при измерении непосредственно на машине.

Весовой метод

Определение величины линейного износа по потере веса осуществляется путем вычислений, основанных на предположении, что износ происходит равномерно по поверхности трения. В этом случае весовой износ пересчитывается в линейный по формуле:

$$R = \frac{Q}{S \cdot j \cdot L \cdot 10^{-8}}$$

где, Q - весовой износ, мг; S - площадь поверхности трения, см²; j - удельный вес, г/см³; L - путь трения, км.

Величину износа весовым методом не рекомендуется определять в тех случаях, когда изменение размеров детали произошло не только вследствие отделения частиц, но и по причине пластического деформирования.

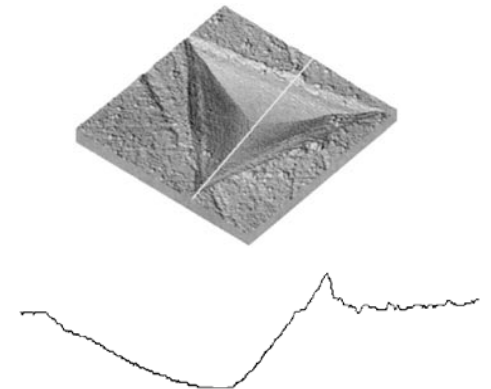
Весовой метод оказывается неприемлемым и при определении величины износа деталей из пористых материалов пропитанных маслом.

Метод искусственных баз

Измерение величины износа методом искусственных баз заключается в определении путем вычисления расстояния от поверхности трения до дна углубления, искусственно сделанного на этой поверхности, не нарушающее служебных свойств детали и имеющее глубину большую, чем ожидаемая величина линейного износа. Определив расстояние от поверхности до дна углубления (служащего искусственной базой) до и после испытаний, по разнице глубины определяют износ.

*Метод искусственных баз в зависимости от способа нанесения углублений подразделяются на метод отпечатков;
метод высверленных углублений;
метод вырезанных лунок.*

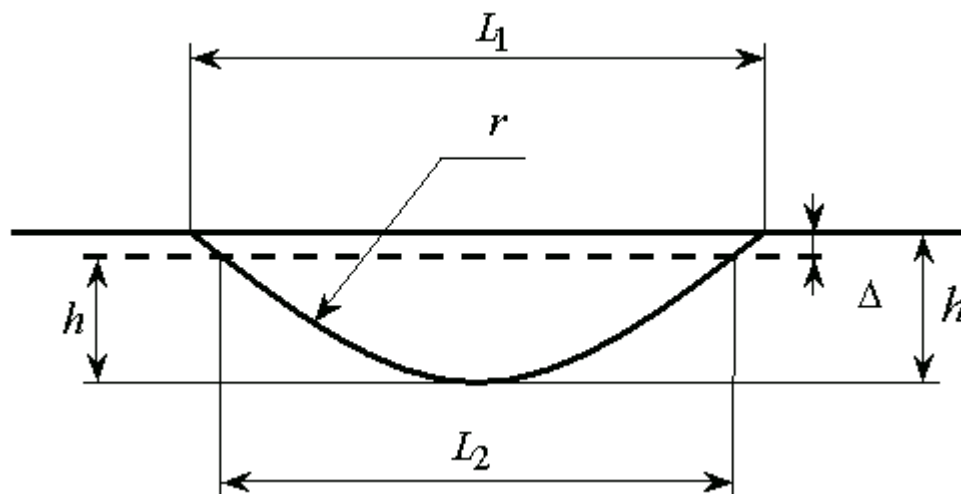
Этот метод может быть применен для измерения износа только тех деталей, на поверхности которых допускается нанесение углубления!



Вычисление **величины износа** методом лунок

$$\Delta = \frac{0,125 \cdot (L_1^2 - L_2^2)}{r};$$

где r – радиус лунки; L_1 – длина старой лунки; L_2 – длина изношенной лунки; Δ – искомый износ



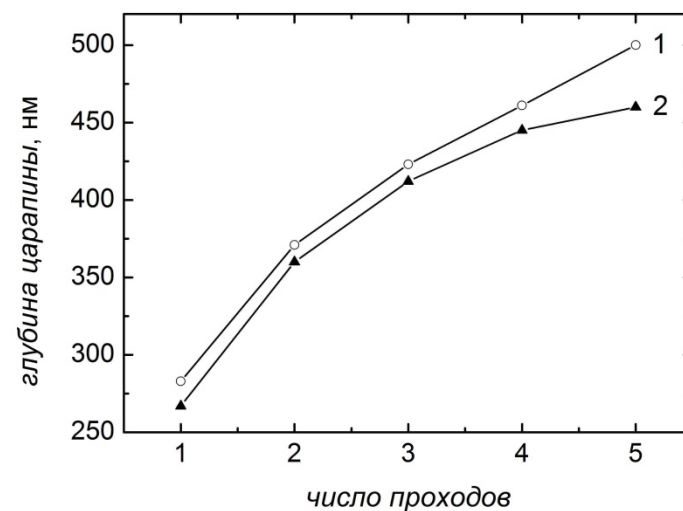
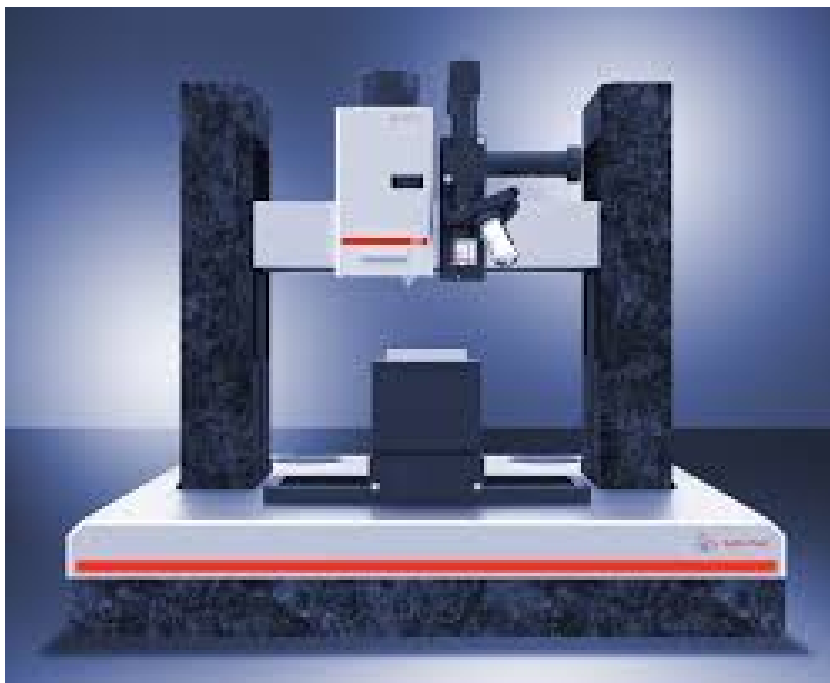
метод радиоактивных изотопов

Метод радиоактивных изотопов заключается в том, что в материал детали, износ которой требуется изучить, вводят радиоактивный изотоп. При этом вместе с продуктами износа в масло будет попадать пропорциональное им количество атомов радиоактивного изотопа.

метод спектрального анализа

который в практике носит название – метод “железо в масле”. **Метод** основан на определении содержания железа в пробе масла или другой смазывающей жидкости с помощью химического или **спектрального анализа**.

Метод многопроходного царапания



Зависимость остаточной глубины царапин на поверхности покрытий Au-Ni, нанесенных на подслои Ni (1) и Ni-B (2), от числа проходов индентора при максимальной нагрузке 200 мН