

Tribologické vrstvy

Tribologie

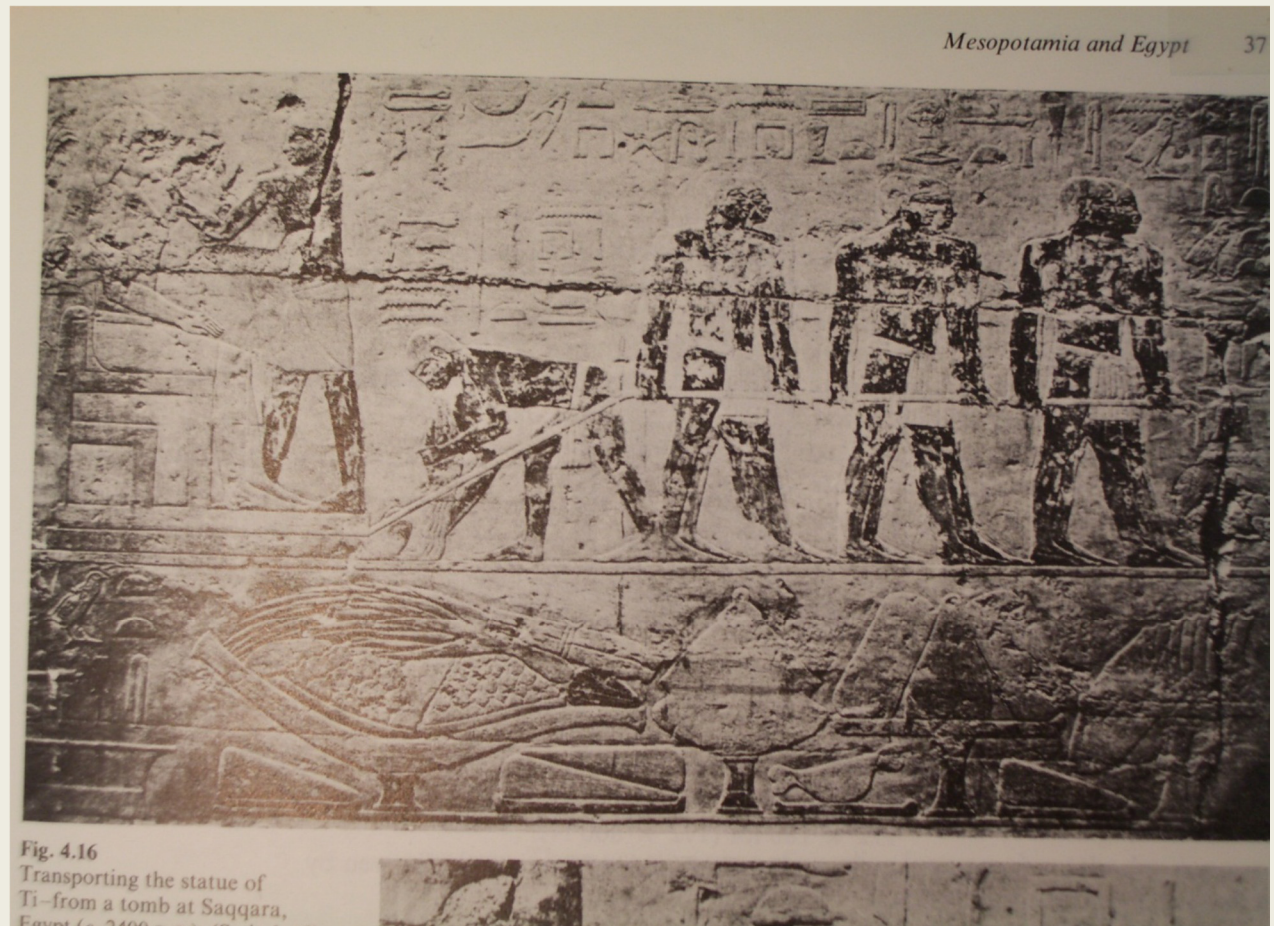
- Vědní obor zabývající se vzájemným kontaktem pohybujících se pevných látek a jak se vzájemně opotřebovávají.
- Z řeckého slova „tribos“ = tření.
- Zastřešuje to pod-disciplíny:
 - Frikce
 - Lubrikace
 - Opotřebení
- Slovo tribologie bylo vymyšleno Dr. H. Peter Jostem v Anglii v roce 1966.

Tribologie

- V jeho zprávě pro parlament napsal „Potential savings of over £515 million per year (\$800 million) for industry by better application of tribological principles and practices.“
- Nicméně z historického pohledu není tribologie zcela nová věda.
- Myšlenkou snižování tření se zabývali lidé už ve starověku.
- Jsou známé případy už ze starého Egypta.

Tribologie

- Transport sochy Ti z hrobky.



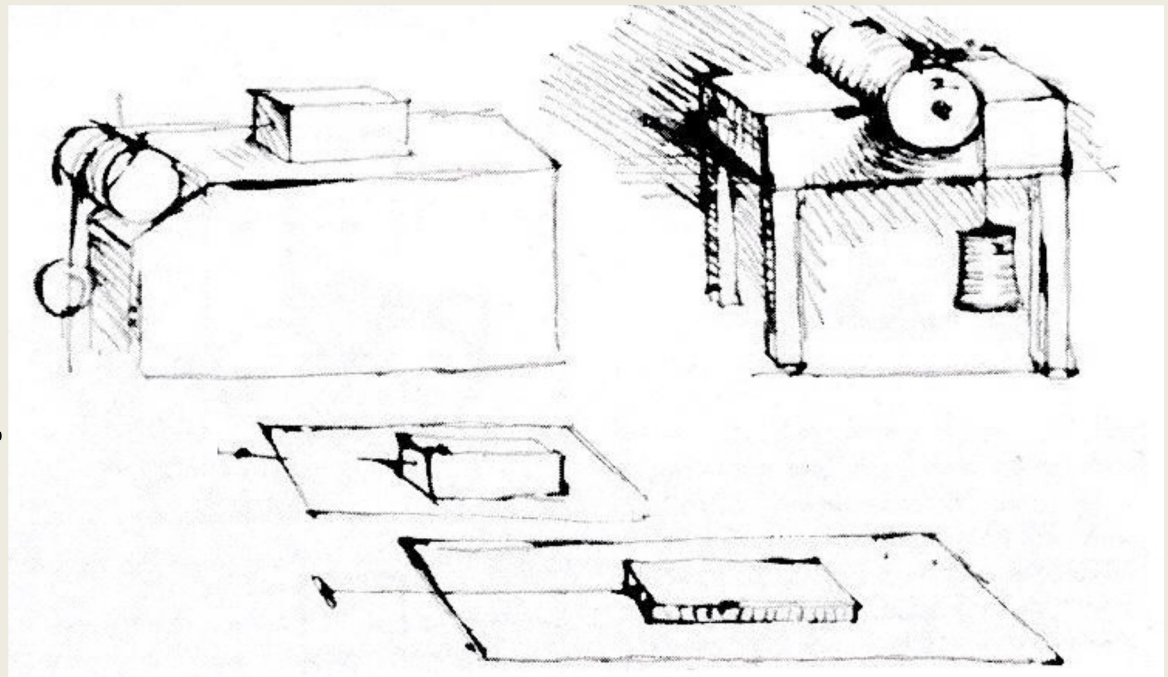
Tribologie

- Na rytině je zobrazen člověk lijící lubrikant pod kamennou desku



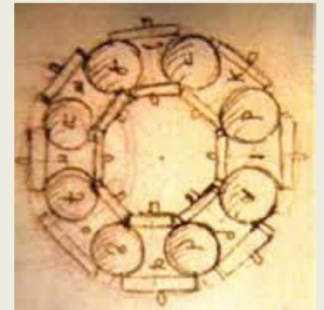
Tribologie

- Principy tribologie se zabýval i Leonardo Da Vinci.
- Od něho pochází návrh sáňkového frikčního testu.



Tribologie

- Zaznamenal dvě důležitá pozorování:
- Velikost plochy kontaktu dvou látek nemá vliv na tření.
- Zdvojnásobením zátěže objektu, který se pohybuje třením způsobí zdvojnásobení samotného tření.
- Tribologie se uplatňuje v mnoha odvětvích lidské činnosti.



Tribologie

- Uplatňuje se při konstrukci jednotlivých komponent.

Převodovka



Brzdové
obložení

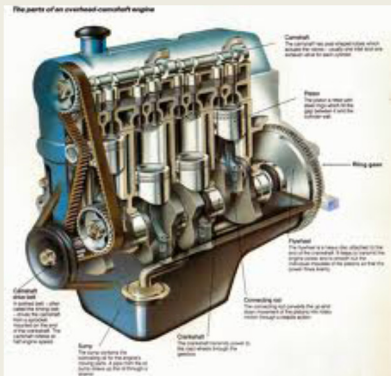


Ložiska

Tribologie

- V konstrukci komplikovaných mechanických zařízení

Motor



Hodinky

Lezecké boty



Curlingový
kámen

Tribologie

- Při různých výrobních procesech.

Broušení



Lisování a
tváření



Válcování



Obrábění



Leštění

Tribologie

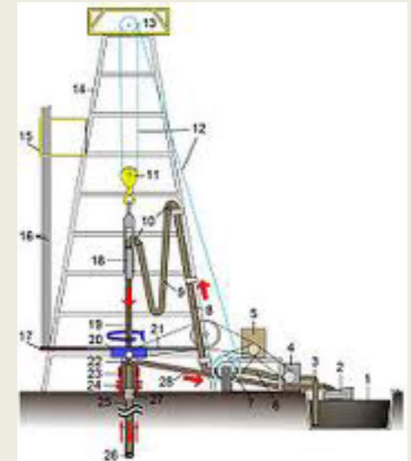
- Při průzkumných a konstrukčních pracích.



Kalové pumpy



Ražba



Vrty



Bagrování

Sestup
raketo
plánu



Tribologie

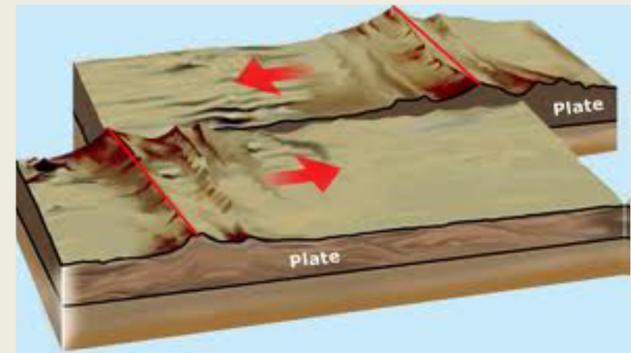
- V přírodě se vyskytují jevy spojené s tribologií.



Větrná
eroze



Tektonika



Vodní
eroze



Tribologie

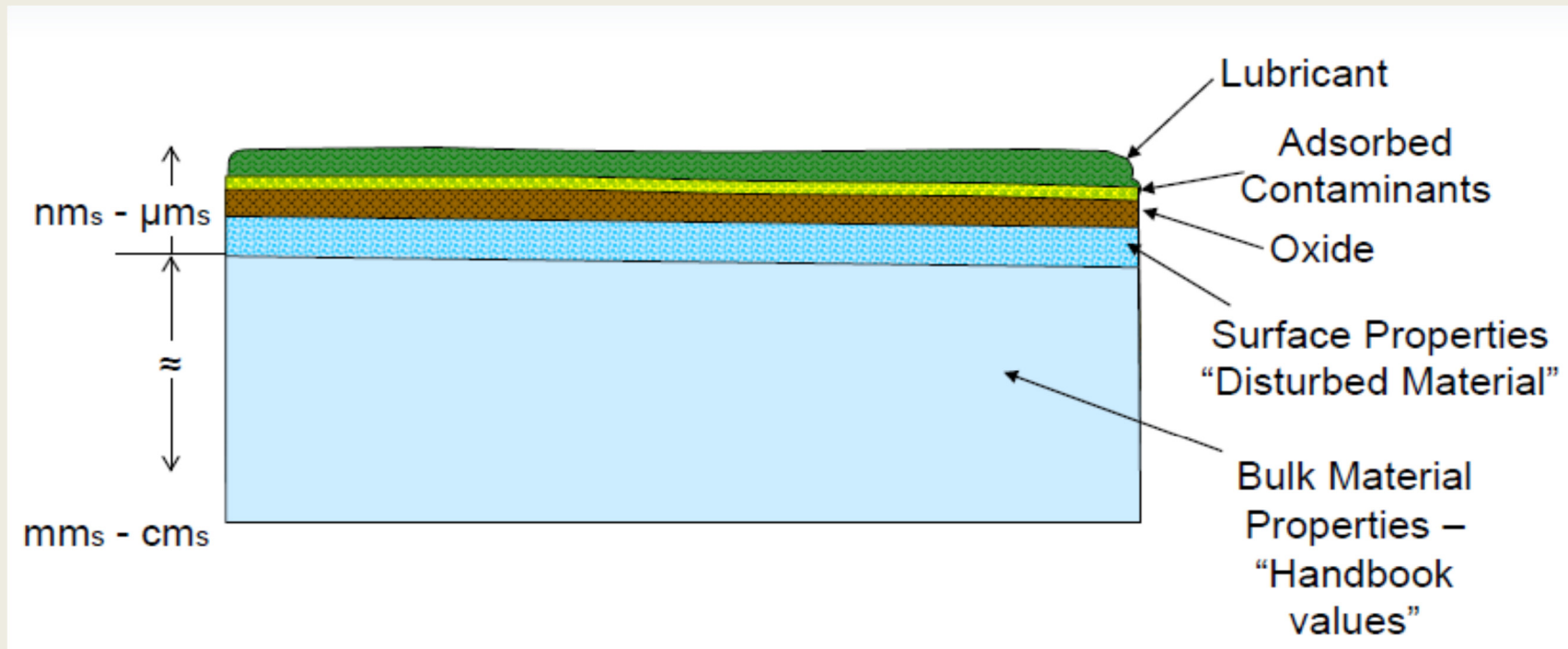
- Aerospace,
- Agriculture,
- Automotive: Engine Piston ring/cylinder, Bearings, valve seats, injectors, Brakes/clutch, Tooling/Machining/Sheet metal forming
- Coatings Providers: Low Friction, Wear Resistant Thin Films
- Cosmetics/Personal Care
- Dental Implants
- Energy: Nuclear, Wind, Fossil, Solar
- Fabric/Clothing
- Flooring
- Food Processing
- Highway/Transportation Depts.
- Lubricant Manufacturers
- Medical Diagnostics
- Medical Implants
- Military
- Pharmaceutical
- Shoe Manufacturers
- Sports Equipment Companies
- Universities/Educators: Mechanical Engineering, Materials Science Eng., Physics, Chemistry

Tribologie

- Mnoho těchto rozdílných odvětví a aplikací má společný jev: tření a opotřebení.
- Jak designovat výrobky a procesy, abychom tření a opotřebení zmenšili?
- Ve většině aplikací máme nějaký povrch v kontaktu s jinou látkou a zároveň dochází pohybu.
- Tedy vlastnosti povrchu jsou velmi důležité z pohledu tribologie.

Tribologie

- Reálný povrch není nikdy dokonale čistý a jednoduchý.



Tribologie

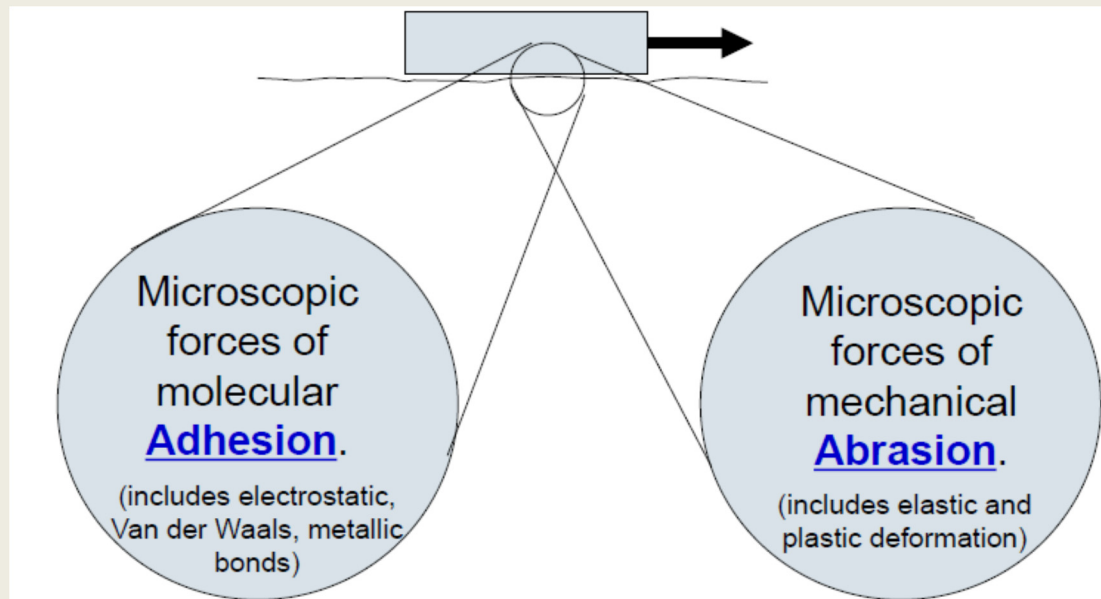
- Reálný povrch také není nikdy dokonale hladký. Hrubost hraje důležitou roli pro tribologii.
- Hrubost povrchu přichází z výroby, úpravy a vlivem povětrnostních jevů.
- Při studiu tribologických vlastností je třeba mít na paměti dva aspekty:
 - Fyzikální
 - Chemický

Tribologie

- Fyzikální vlastnost -> hrubost povrchu
 - Určuje kontaktní plochu povrchů
 - Určuje kontaktní pnutí mezi povrchy
 - Určuje cestičky a rezervoáry pro lubrikanty
- Chemické vlastnosti -> mezilehlé vrstvy mezi povrchy
 - Určuje chemickou kompatibilita
 - Určuje míra smykového tření
 - Určuje vlastnosti lubrikantů (např. viskozita)
- Měření hrubosti:
 - Zvlnění a tvar (makro úroveň)
 - Alpha-step profilometr, optický profilometr, AFM (mikro úroveň)
- Tvrdost měříme pomocí vtisku – indentace nebo vrypem.

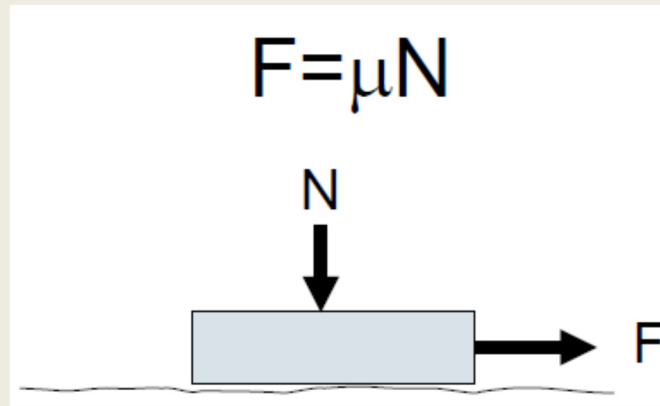
Tření

- Def.: tření je odpor k relativnímu pohybu mezi dvěma tělesy, které jsou v kontaktu.
- Pokud se tělesa dotknou -> existuje mezi nimi síla.



Tření

- Součinitel tření (COF): konstanta úměrnosti mezi silami.



- $\text{COF} = \mu = F/N$
- Určení COF je velmi komplikované. Mnoho okolností ovlivňuje velikost COF.

Tření

- Hrubost povrchů
- Typ lubrikantu
- Chemické procesy na povrchu
- Kontaktní pnutí
- Geometrie kontaktu
- Okolní prostředí
- Teplota těles
- Rychlost vzájemného pohybu těles

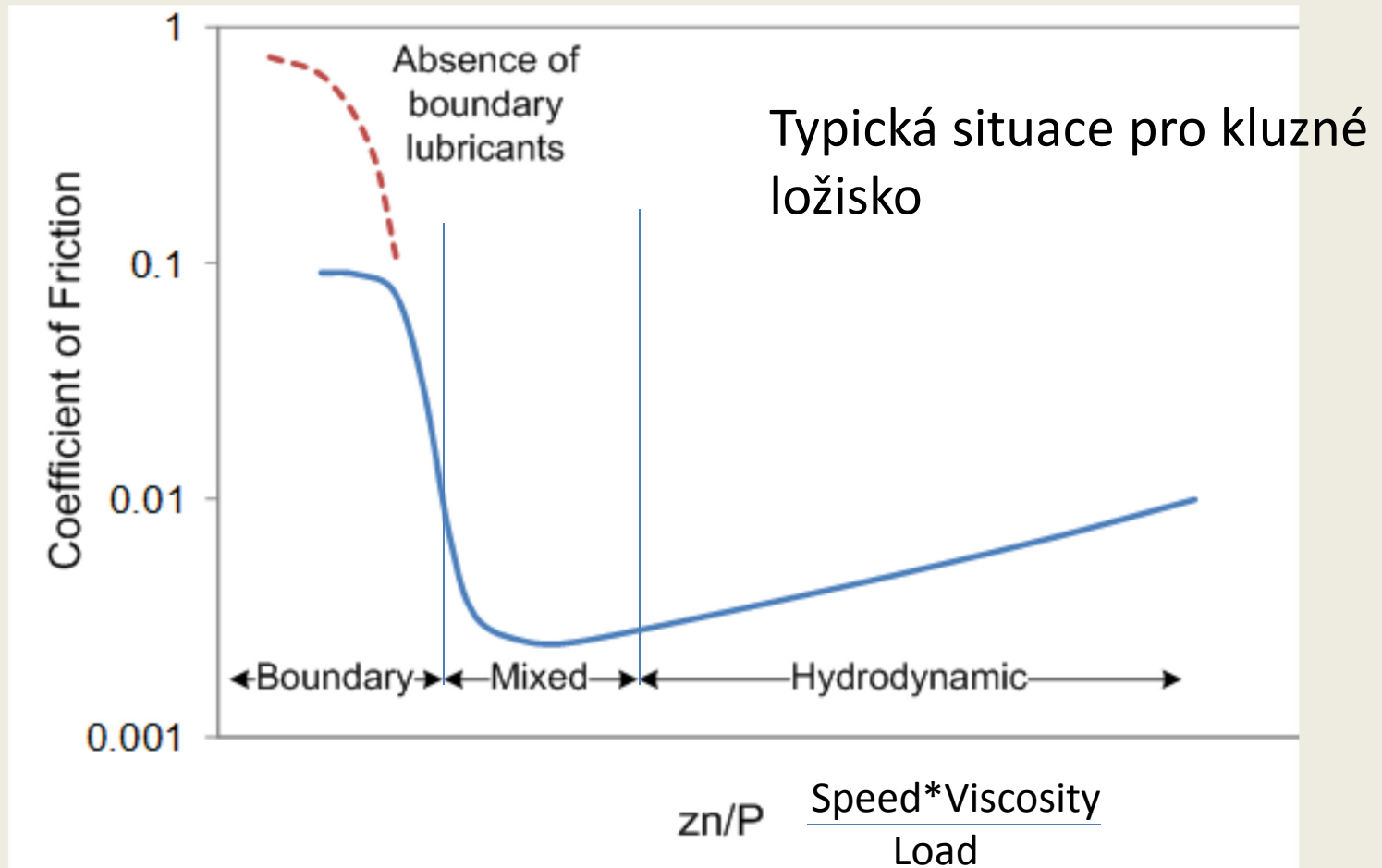
Tření

- Teoreticky stanovit COF je extrémně složité. Nicméně dá se velmi jednoduše měřit -> poměr mezi normálovou silou a třecí silou.
- Při měření musíme správně nastavit všechny okolnosti, ovlivňující COF.
- Je důležité si uvědomit, že COF není vlastností materiálu!!! -> nelze nalézt v tabulkách COF oceli nebo plastu.
- Tření je vždy vlastnost **systemu**.
- Pokud chceme snížit tření, důležitou roli hraje lubrikant.

Mazivo

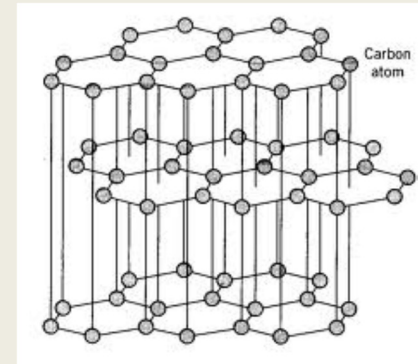
- Lubrikant má důležité vlastnosti:
 - Snižuje tření
 - Minimalizuje nebo předchází opotřebení
 - Odstraňuje zbytky materiálu (piliny) z třecích ploch
 - Poskytuje chlazení třecích ploch
- Rozlišujeme pevné a kapalné lubrikanty.
- Kapalně pracují ve třech režimech podle poměru tloušťky vrstvy lubrikantu a drsnosti povrchu $\rightarrow \lambda$.
- $\lambda > 3$ – hydrodynamika, tlustý lubrikační film.
- $1,2 < \lambda < 3$ – smíšený režim, tenká lubrikační vrstva.
- $\lambda < 1,2$ – hraniční mazání.

Mazivo



Mazivo

- Pevné maziva se používají v hraničním režimu mazání.
- Patří sem sloučeniny s nízkým smykovým pnutím - MoS_2 , grafit, WS_2 , HBN.
- Chovají se jako „balíček karet“.
- Lepené materiály – lepidlem spojené teflony, DLC, impregnované porézní materiály.
- Důležité vlastnosti lubrikantů: Viskozita, reaktivita s povrchem, formování hraniční vrstvy, stabilita pod extrémním tlakem, smyková pevnost pevných lubrikantů.

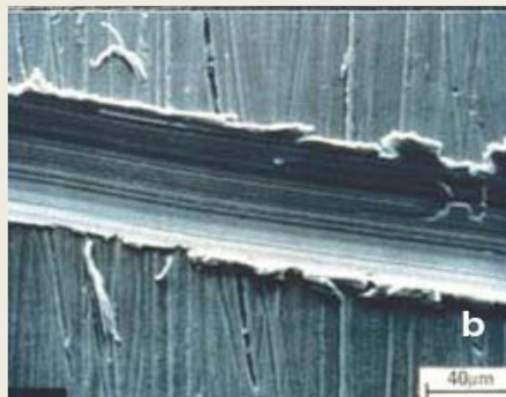


Opotřebení

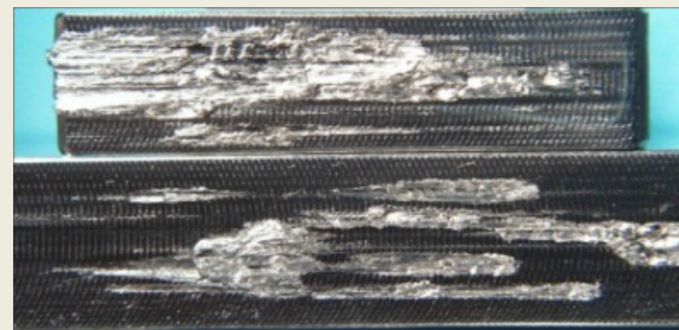
- Def.: odstranění nebo přemístění materiálu z jednoho tělesa (nebo na druhé těleso), když je těleso v kontaktu s jiným tělesem a konají vůči sobě pohyb.
- Známe 6 typů opotřebení:
 1. abrazivní opotřebení (odřetí, oškrábání)
 2. adhezivní opotřebení (zadření, ošoupání)
 3. koroze vyvolaná třením (vyježděné prohlubně)
 4. erozivní opotřebení, kavitace (dutinky), náraz
 5. únava materiálu při válcování, drolení, odprýsknutí, delaminace
 6. tribologická koroze materiálu

Opotřebení

- Ad 1. tvrdší materiál udělá vryp (poškrábe ho) do měkčího materiálu.

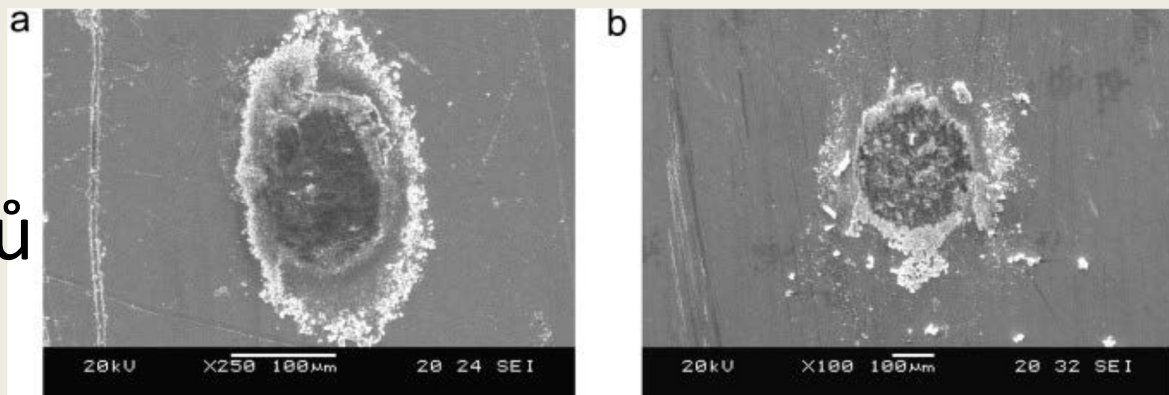


- Ad. 2 dojde k lokálnímu natavení materiálu; může dojít ke „svaření“. Musí se vybrat k sobě vhodné materiály.
Ovlivňuje to krystalová struktura, zoxidování povrchu, atp.



Opotřebení

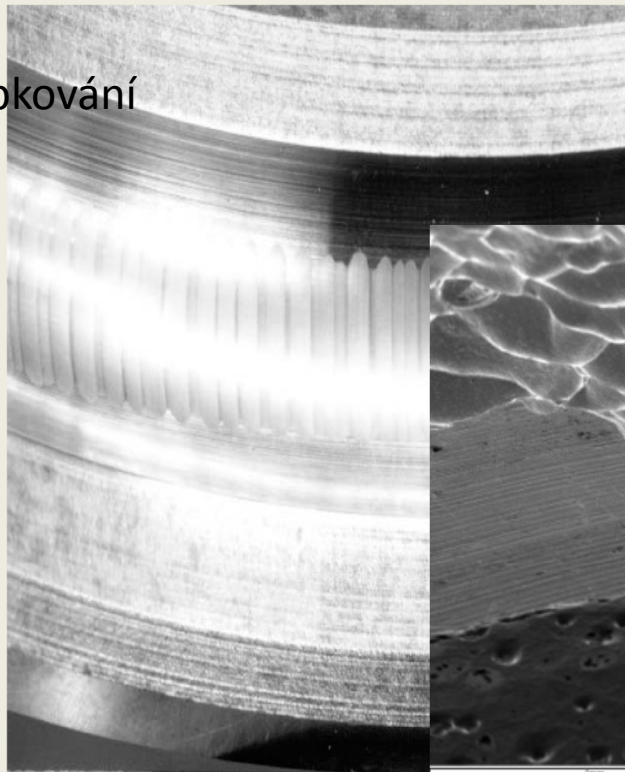
- Ad. 3 dochází ke klouzání povrchů po sobě.



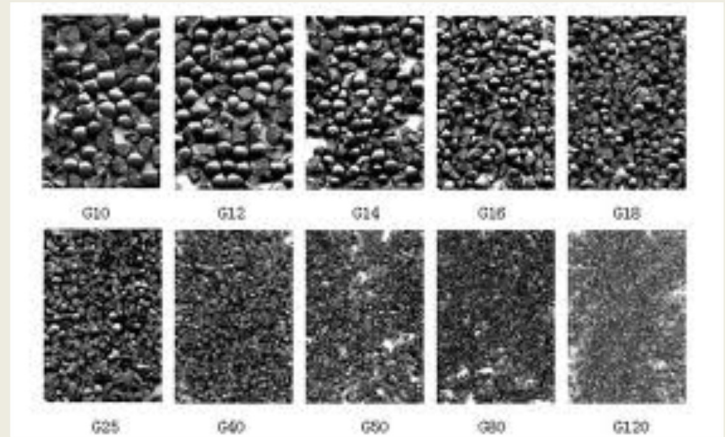
- Okraje kráteru jsou roztřepené, materiál se odděluje od tělesa -> zde dochází ke korozi, silně náchylné na reakci s kyslíkem, sírou, dusíkem atp.

Opotřebení

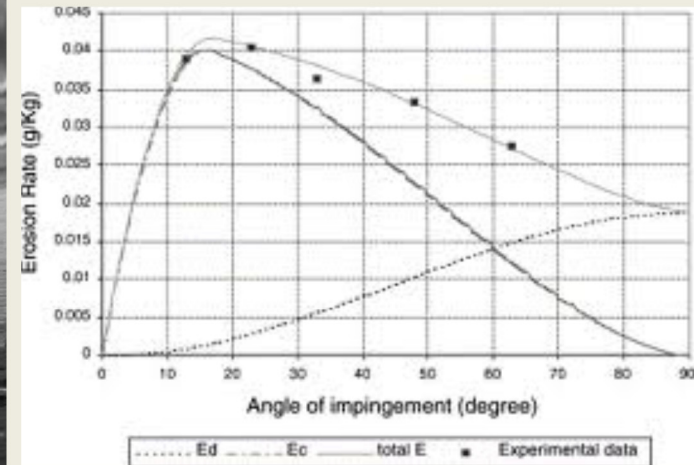
- Ad 4. závisí to na velikosti, tvaru, složení, úhlu dopadu a poddajnosti tělesa.



kavitace

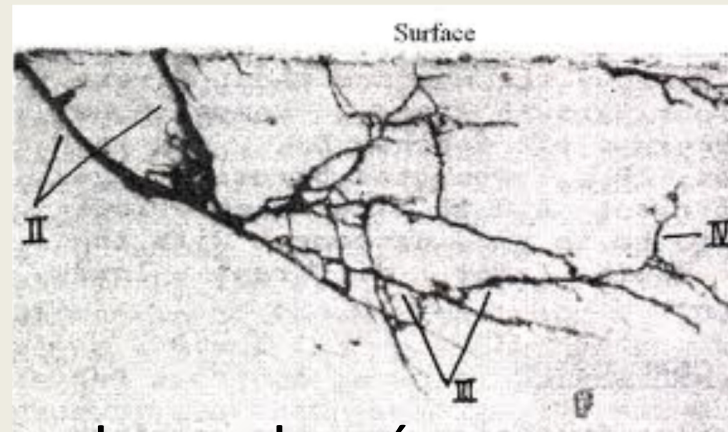


Klasifikace částic



Opotřebení

- Ad 5. vzniká v podpovrchové vrstvě smykové pnutí pokaždé, když válec nebo ložisko přejede po povrchu.
- Toto pnutí se hromadí a vznikají podpovrchové praskliny -> v místech mikrostrukturních defektů.
- Prasklina roste směrem k povrchu -> dojde k odlomení materiálu.
- Vzniklé piliny jsou drceny pod válcem (nebo ložiskem) a roznášeny v ploše doteku a způsobující další praskliny.



Odštěpky ve vodící dráze ložiska

Opotřebení

- Ad 6. dochází k opotřebení, když je přítomna koroze -> jde pak o synergický efekt.
- Nastává typicky při erozi nebo při klouzání po povrchu.
- Typicky se objevuje v bio aplikacích.
- Opotřebení se charakterizuje tzv. **koeficientem opotřebení k** = objemu odděleného materiálu na jednotku zatížení a kluznou vzdálenost.
- Jednotkou je $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.
- Koeficient umožňuje stanovit životnost objektu, pokud se nezměnil typ zkoumaného tribologického systému.
- Opotřebení ovlivňuje také směr třecího pohybu a míra kontinuity pohybu (viz start-stop systém).
- Opotřebení je také systémová vlastnost, ne vlastnost materiálu.
- Jeden typ opotřebení může přejít v jiný (abrazivní -> adhezivní).

Materiály pro tribologii

- Zvýšit tribologické vlastnosti povrchů lze nanesením vhodných tenkých vrstev.
- Ve většině případů materiál tělesa (určeného k nějakému účelu) má nevhodné tribologické vlastnosti.
- Často se používají různé formy nitridů a karbidů různých kovů - Ti, Cr, W, V, Zr, Al.
- Vyznačují se vysokou tvrdostí, dobrou adhezí k podložce, korozní odolností, v mnoho případech mohou mít různou barvu.
- Často se připravují pomocí PVD a CVD technikami.
- CVD – organometalické prekurzory v atmosféře N_2 nebo CH_4 .
- PVD – terče z čistých kovů; reaktivní režim v N_2 nebo C_2H_2 .

Materiály pro tribologii

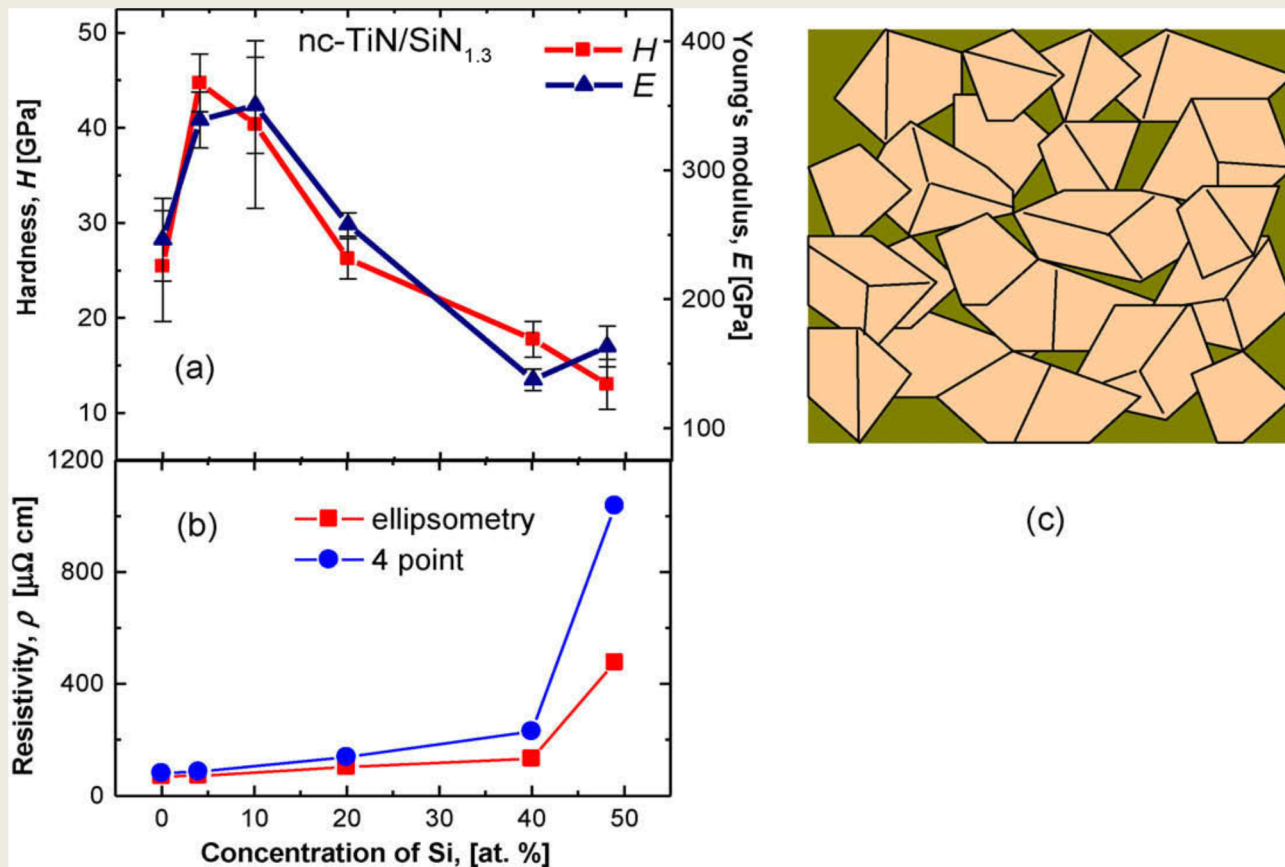
- Materiály pro nízké tření a malé opotřebení – na ložiska, do motorů, lékařské implantáty.
- MoS_2 , WSe_2 , W-C:H, DLC má $\text{COF} < 0,01$.
- PVD metodami je připravováno: TiN, TiC, TiCN, TiYN, TiAlN, CrN, $\text{CrMoC}_x\text{N}_{1-x}$, $\text{Ti}_{1-x}\text{Cr}_x\text{N}$.
- Obráběcí nástroje jsou z ocelí nebo karbidů -> degradace abrazivním opotřebením. Je třeba je pokrýt tvrdou vrstvou s dobrou korozivní odolností a zabránění přehřátí (mikrosvaření).
- TiC, TiN, CrC nebo ZrN zlepši životnost až o 800%.
- Moderní materiály: $(\text{Ti},\text{Al})\text{N}$; $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$; $\text{SiC}/\text{Si}_3\text{N}_4$; Nanolamináty: CrN/W_x ; TiAlN/VN ; $\text{AlN}/\text{Si}_3\text{N}_4$; $\text{NiAlN}/\text{TiBCN}/\text{Ti}$; $\text{C}/\text{Cr}/\text{CrN}$; NbN/CrN ; $\text{nc-TiN}/\text{a-Si}_3\text{N}_4/\text{nc-TiSi}_2$; $\text{nc-TiN}/\text{a-Si}_3\text{N}_4$.

Materiály pro tribologii

- Moderní jsou nanokompozitní super-tvrdé vrstvy.
- Nanočástice MeN nebo MeC (5 – 10 nm) jsou vloženy do matrice amorfního nebo krystalického materiálu (matrice je třeba Si_3N_4).
- Nanokompozity mají nízký Youngův modul pružnosti E , ale vysokou tvrdost H -> vysoká tuhost, elasticita, odolnost prasklinám, otěruvzdornost, teplotní stabilita do 1 100°C.
- Tyto vlastnosti jsou díky nanometrovým krystalitům -> těžko se vytvářejí dislokace mezi velkým množstvím malých krystalitů -> poruchy a poškození mříže mají negativní vliv na tribologické vlastnosti.
- Nejpopulárnější nanokompozit je TiN v Si_3N_4 s $H > 40$ GPa.

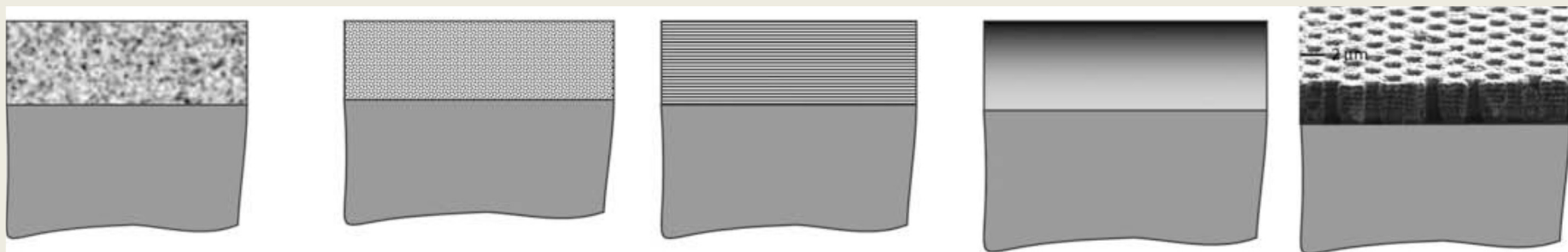
Materiály pro tribologii

- Vliv koncentrace Si v nanokompozitu.



Materiály pro tribologii

- Optimální koncentrace Si odpovídá Si_3N_4 matici plně obklopující 10 nm zrna TiN.
- Nanokompozity mají různou strukturu:



- Vhodným výběrem nanokompozitu: velikost zrna, typ materiálu, orientace krystalitů atp. lze ladit tribologické vlastnosti nanokompozitu

Materiály pro tribologii

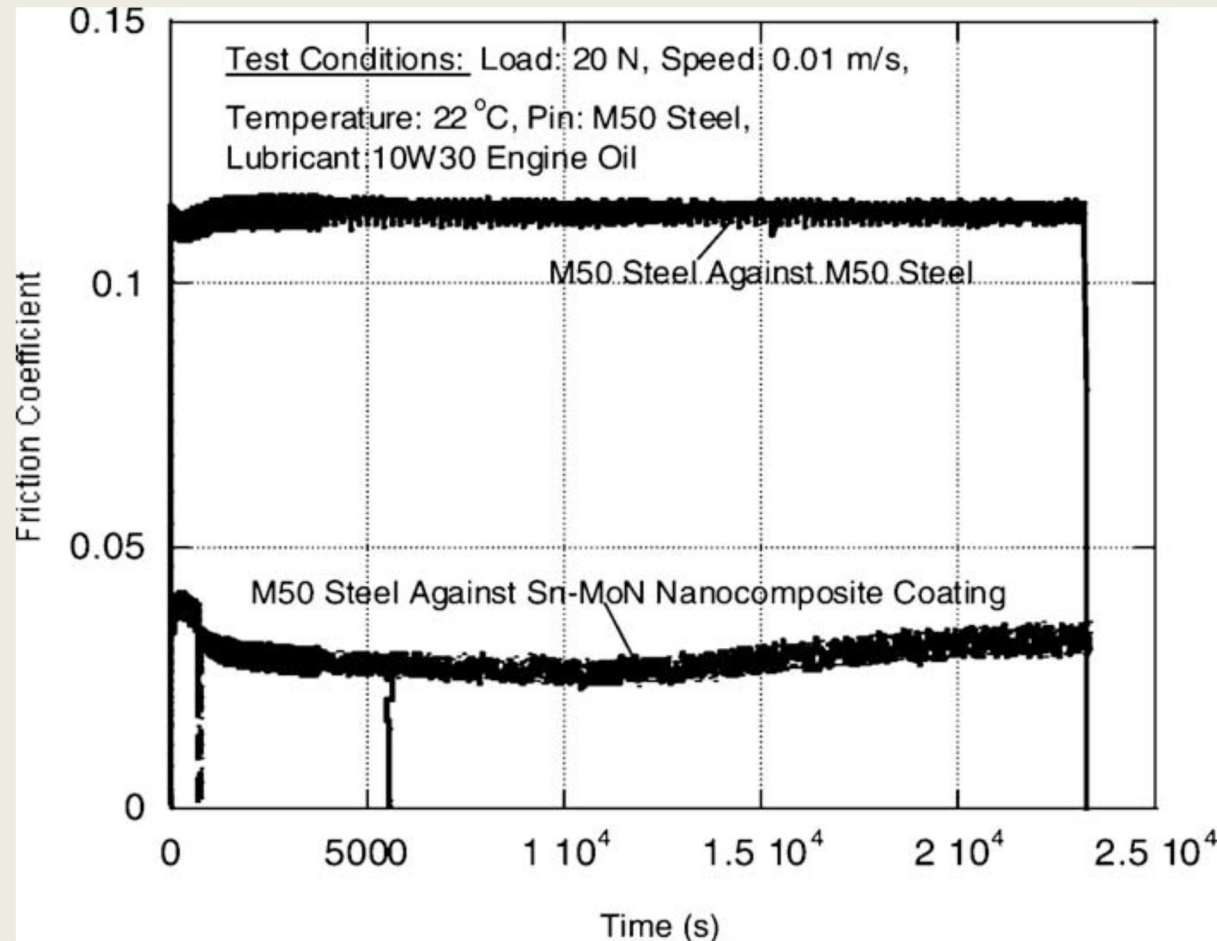
Table 14.1: Examples of superhard coatings and their grain size and mechanical properties

Coating	Average grain size (nm)	% Cu (at.)	Hardness, H (GPa)	E^* ($E/(1 - \nu^2)$) (GPa)	Refs
Zr-Cu-N	38	1-2	55	395	[59-61]
Zr-Ni-N	6	4.1 (Ni)	57	430	[62]
CrCu-N	70-90	1	35		[63]
Al-Cu-N	9, 5	8, 1	47	313	[61]
Zr-Cu-N	10-15	23	23	250	[59-61]
ZrN	-	0	16		[60]
nc-TiN/a-Si ₃ N ₄			40-60	> 500	[6, 64]
nc-TiN/a-Si ₄ N ₄ /a-TiSi ₂			> 80		[30]

Materiály pro tribologii

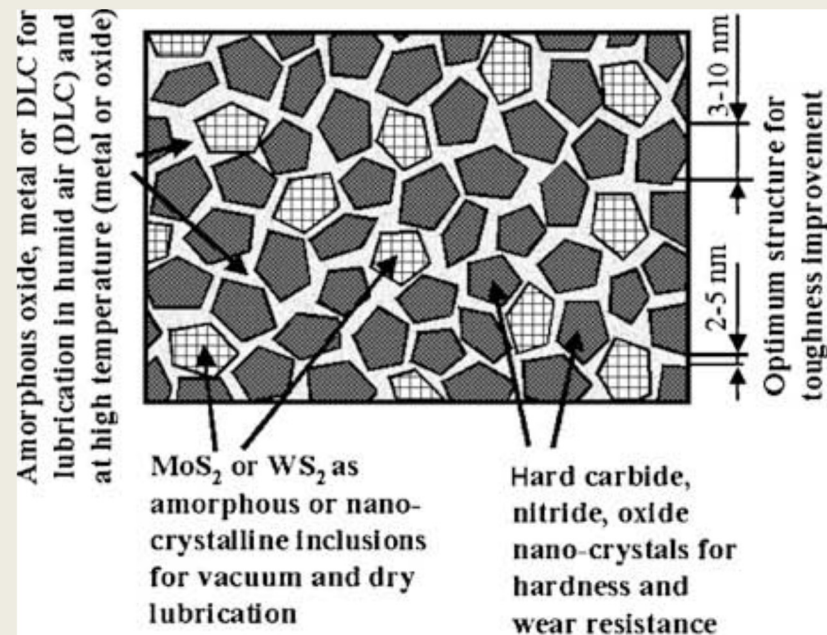
- Mnoho nanokompozitů má vedle vysoké tvrdost, tuhosti a odolnosti proti prasknutí nebo poškrábání také vysoké lubrikační vlastnosti (zvláště ve spojení se speciálními oleji, kdy reagují se speciálními aditivy).
- Typicky nanokompozit se může skládat z tvrdé matrice TiN (nízké opotřebení) v níž je vložen lubrikant MoS_2 (nízké tření).
- Např. nanokompozit Sn-MoN poskytuje excelentní snížení tření -> nízké smykové tření nanočástic Sn nebo reakce nanočástic Sn s aditivy v oleji.

Materiály pro tribologii

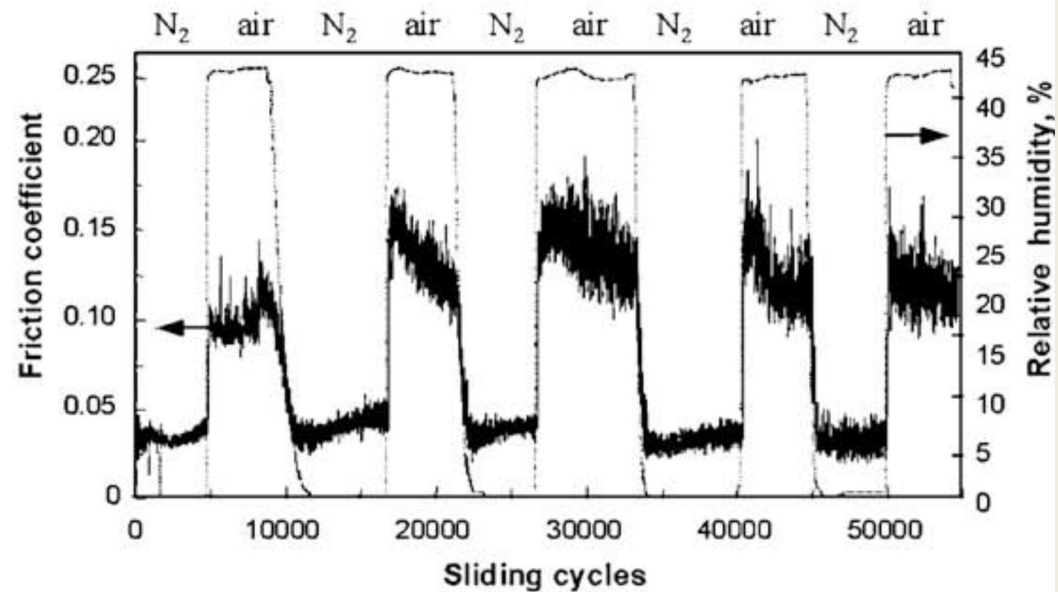


Materiály pro tribologii

- (b) vliv vlhkosti na třecí koeficient nanokompozitu YSZ/Au/MoS₂/DLC.



(a)



(b)

Materiály pro tribologii

- Životnost obráběcího nože z oceli CK45 (S26) pokrytého různými tvrdými vrstvami.
- 826-1 a 826-2 je nanokompozit $(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}/\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$.
- 8026 je vícevrstvý nanokompozit $(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}/\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$.

