

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

POVRCHY A JEJICH ÚPRAVY

- Přednášky: Doc. Ing. Olga Bláhová, Ph.D.
- Skripta: Ing. Václav Kraus, CSc.
- **Obsah předmětu:**
 - Povrch a jeho vlastnosti (struktura povrchu, vlastnosti)
 - Porušování povrchu (koroze, **opotřebení**)
 - Způsoby ochrany výrobků (úprava prostředí, volba materiálu, konstrukční řešení, elektrochemické a dočasné ochrany)
 - Předběžné úpravy povrchu (mechanické, chemické)
 - Organické povlaky (nátěry, plasty, technologie nanášení)
 - Anorganické povlaky (konverzní vrstvy, žárové stříkání, smaltování)
 - Kovové povlaky a vrstvy (žárové, ponorem, postřikem, difúzní, fázovou transformací, chemické a elektrochemické, fyzikální a fyzikálně chemické)
 - **Hodnocení povrchových úprav - cvičení**



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

POUŽITÁ LITERATURA

V. Kraus:

POVRCHY A JEJICH ÚPRAVY [skripta]

ZČU Plzeň 2000

<http://tzs.kmm.zcu.cz/pou.htm>

Brendel, H.:

Tribotechnika. SNTL Praha 1984

Blau, P.J.: ASM Handbook, Volume 18, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM international, 1992

Stachowiak, W., Batchelor, W. Engineering Tribology.

2nd edition. Woburn Butterworth Heinemann, 2001

www.litomysky.cz/mat/rablsr.htm

www.elmed.cz



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tribologie

Tribologie je věda zabývající se **vzájemným působením povrchů** při jejich relativním pohybu a s nimi souvisejícími jevy.

- **Hodnotí:**

- vlastnosti ovlivňující vzájemné působení povrchu, prostředí a tělesa při jejich vzájemném pohybu
- procesy vzájemného působení na rozhraní mezi pevnými, kapalnými a plynnými tělesy

- **Hlavní úkol:**

- zajistit, aby vzájemný pohyb dvou povrchů probíhal s co nejmenší ztrátou energie a materiálu

Tribotechnika

Technické a ekonomické ovládání tření a opotřebení

- vědecky odůvodněná opatření při dimenzování součástí, jejich výrobě, provozu a údržbě

Interdisciplinární obor:

1. **materiálové inženýrství:** materiály pro třecí dvojice, kluzné materiály ...
2. **fyzika a chemie:** přírodovědecké základy pro hodnocení tření a opotřebení, fyzikálně chemické pochody na mezních plochách ...
3. **konstrukční technika:** výpočet, konstrukce a optimalizace třecích dvojic, technologické postupy k zvýšení odolnosti proti opotřebení ..
4. **technika maziv:** vývoj a zkoušení maziv, způsob mazání a mazacích zařízení, organizace techniky mazání v provozu ...
5. **měřicí technika:** měření tření a opotřebení, měřicí a kontrolní metody, technická diagnostika ...
6. **ekonomie:** závislost mezi náklady a spolehlivostí třecích dvojic

Tribologické vlastnosti

- **Koeficient tření (COF)**

Tření:

vnitřní - vzájemný vnitřní pohyb mezi stavebními částmi

- plynu
- kapaliny (viskozita)
- pevné látky (útlum chvění nebo zvuku)

vnější - tření působící na dotykových plochách těles (COF)

- **Koeficient opotřebení**

- závisí
- na typu tření
 - mechanismu opotřebení

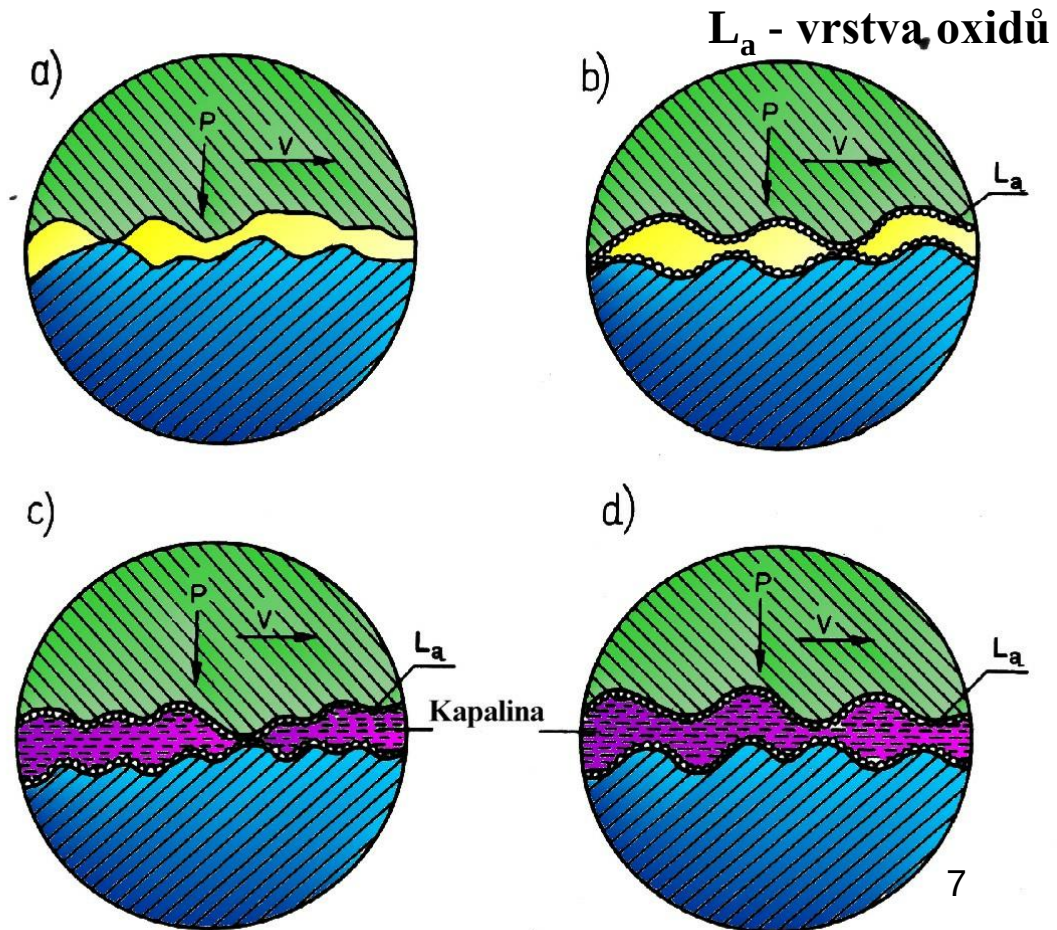


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tribologický systém

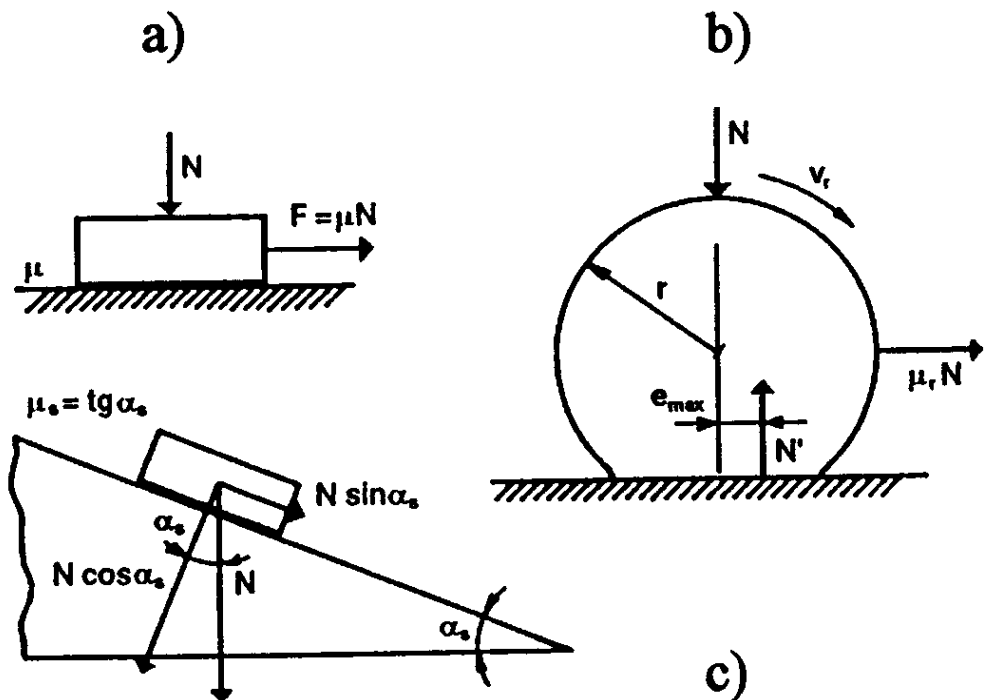
- 2 tělesa
- stykové plochy
- látka mezi stykovými plochami



Tření

- Ztráta mechanické energie při relativním pohybu vzájemně se dotýkajících ploch

- a) Kluzné tření
(smykové, vlečné)
- b) Valivé tření
- c) Kluzné tření
na nakloněné rovině



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Makromodel

Tření: odpor proti vzájemnému pohybu dvou těles
v oblasti jejich styku (ve směru tečném k povrchům)

Kluzné:

Coulombův zákon (1799) - součinitel tření: $\mu = \frac{F}{N}$

N - přítláčná síla

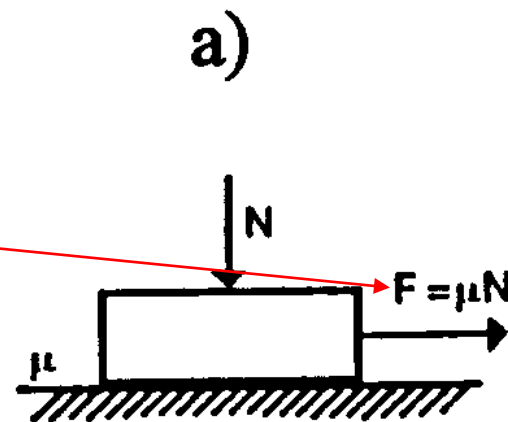
- kolmá k povrchu

F - třecí síla

- působí proti směru pohybu

- závisí: na zátěžné síle N

na koeficientu tření μ

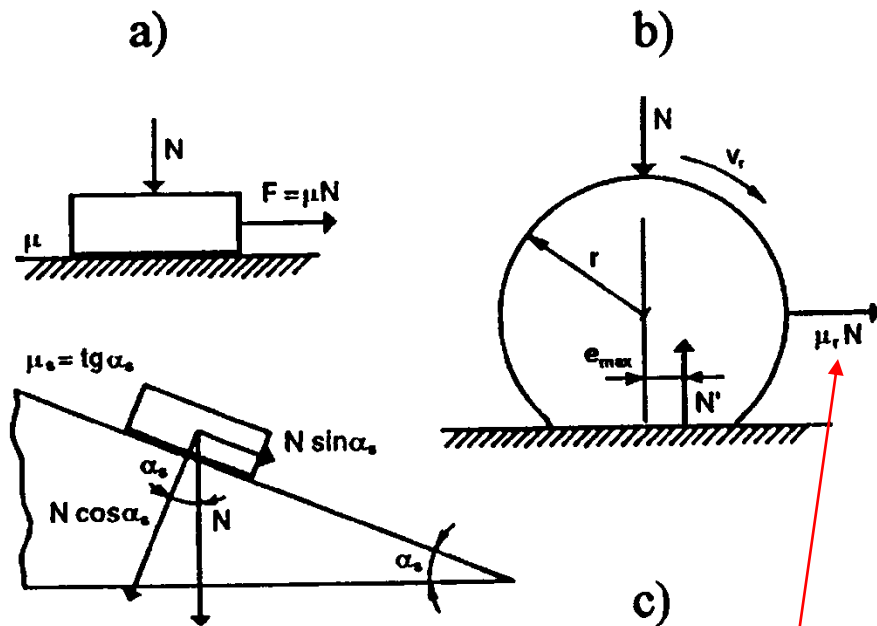


Makromodel

Statický součinitel tření

těleso na nakloněné rovině:

- sklon roviny,
kdy se těleso uvede
samovolně do pohybu



Kinematický součinitel tření

za pohybu

- menší než statický
součinitel tření

$$\mu_R = F_R / N$$

Síla potřebná k valení

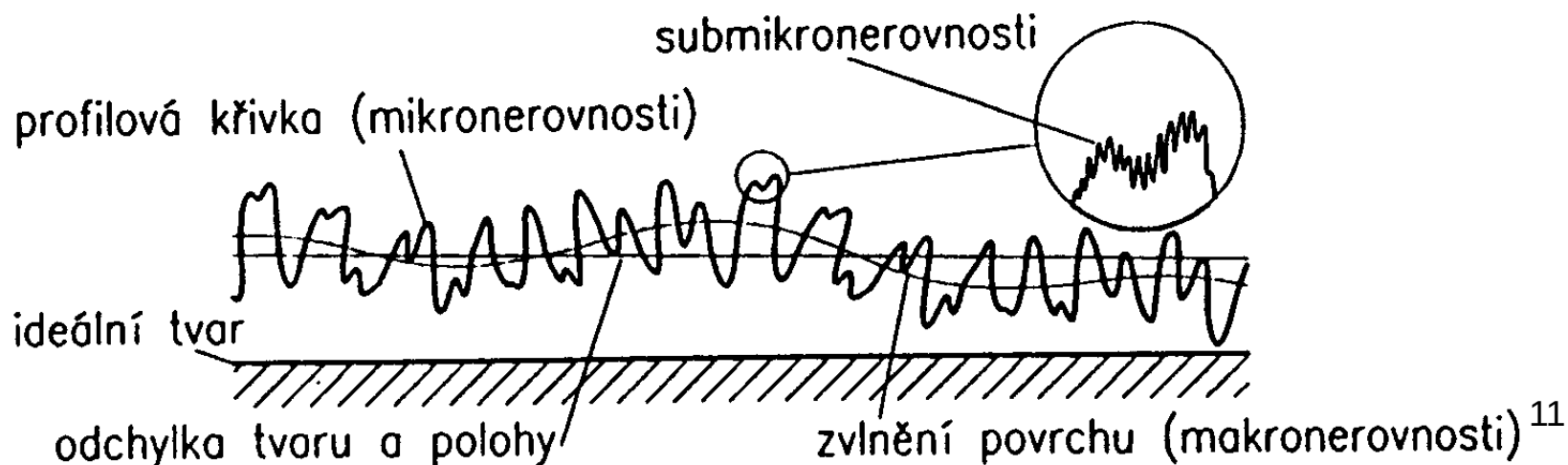
$$F_R = \mu_R \cdot N = \frac{e_{\max}}{r} \cdot N$$

$e_{\max}$ – rameno valivého odporu [m]
10
při jednotkovém poloměru tělesa

Mikromodel

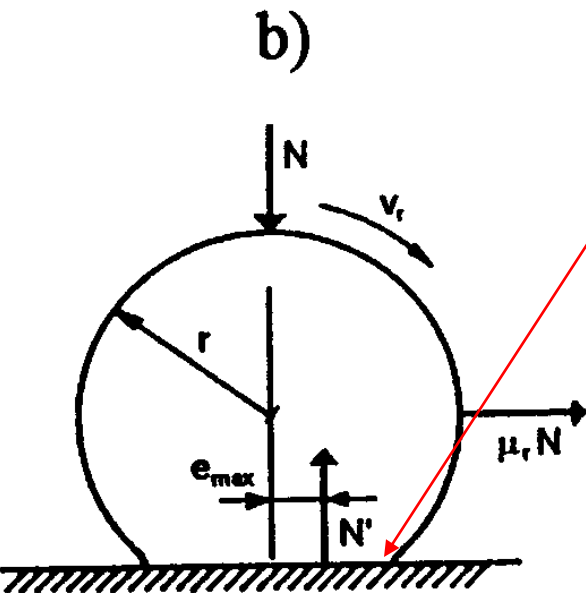
Třecí síla:

- molekulární působení
difúze, adheze → mikrosvary mezi výstupky nerovností
- mechanické působení
mikronerovnosti povrchu, volné částice:
pružné a plastické deformace, abraze...



Valivé tření

- Jedno těleso odvalováno po povrchu druhého
- Ideálně tuhá tělesa: oblast kontaktu: bod
 - pohybuje se po povrchu těles
 - doba kontaktu relativně krátká
- Reálné podmínky: deformace těles v místě kontaktu:



- kombinace odvalování a posuvného pohybu
- Koeficient tření obvykle nižší než při posuvu

Mechanismy tření:

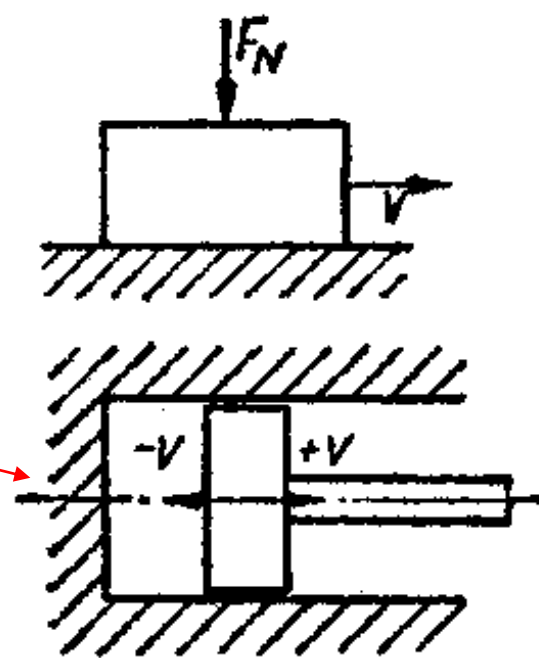
- mikroposuv v oblasti kontaktu těles
- elastická deformace
- plastická deformace
- adheze v kontaktní oblasti

Kluzné tření

Kontakt dvou těles - vzájemný pohyb: tangenciální posunutí makroskopických dotykových ploch
např.: axiální ložiska, kluzná vedení

Skutečný kontakt

- v omezeném počtu malých oblastí (výstupky drsnosti)
- velikost plochy dotyku se zvyšuje se zvyšující se zátěží:
- na vrcholcích může docházet ke vzniku adhezních spoju
- roste odpor vůči vzájemnému pohybu

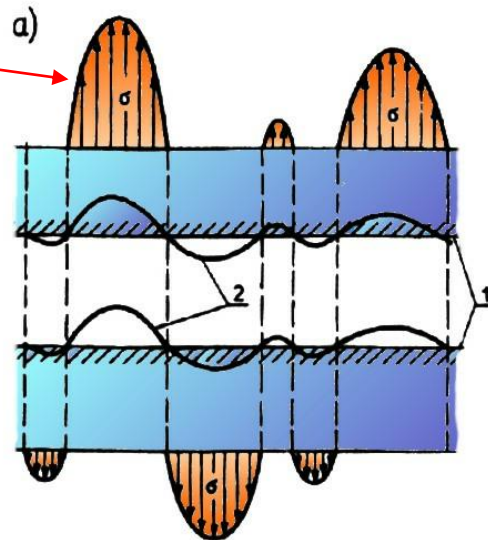


a) *rozložení napětí*

kontakt tělesa

1 - s ideálně rovným povrchem

2 - s reálným povrchem



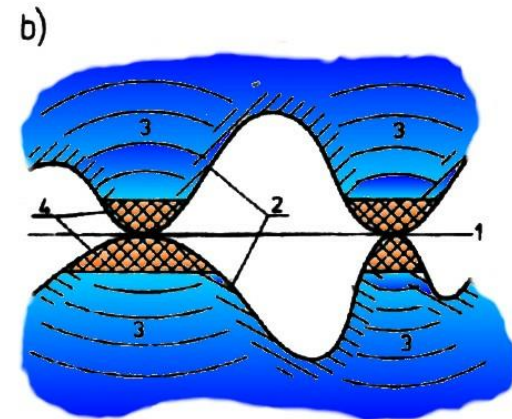
b) *kontakt povrchů*

1 - ideální povrch

2 - reálný povrch

3 - oblast elastické deformace

4 - oblast plastické deformace (může dojít k vytvrzování)



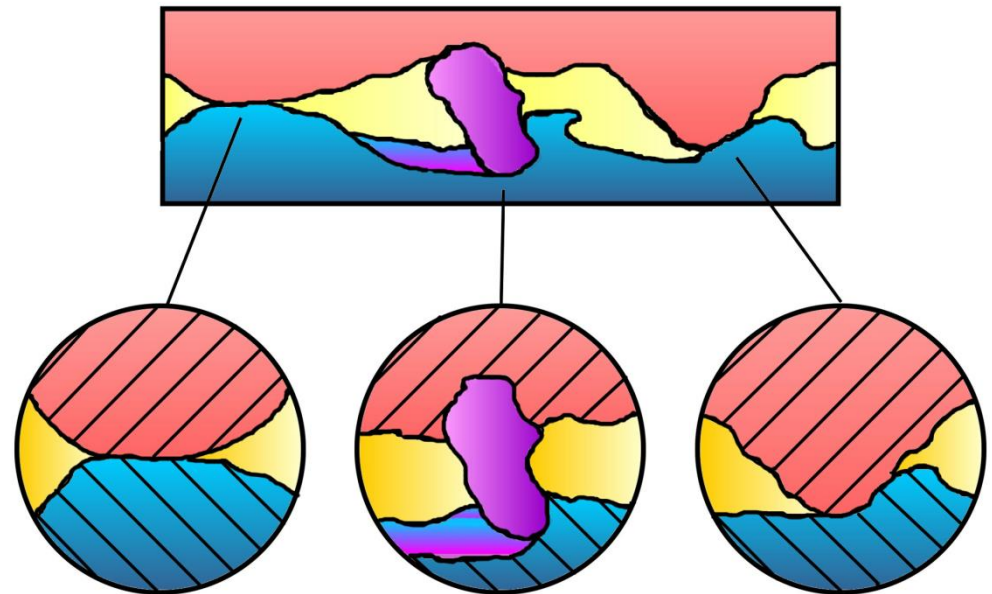
Kluzné tření

Mechanismy tření:

- **adheze** mezi nerovnostmi povrchu
- **rýhování** částicemi - z okolního prostředí
- vzniklými při opotřebování povrchu
- **deformace nerovností** povrchu

Vlivy:

- typ materiálové dvojice
- podmínky tření:
vlastnosti materiálů,
způsob pohybu,
drsnost povrchu,
přítomnost lubrikantu (mazadla)...
- doba vzájemného pohybu



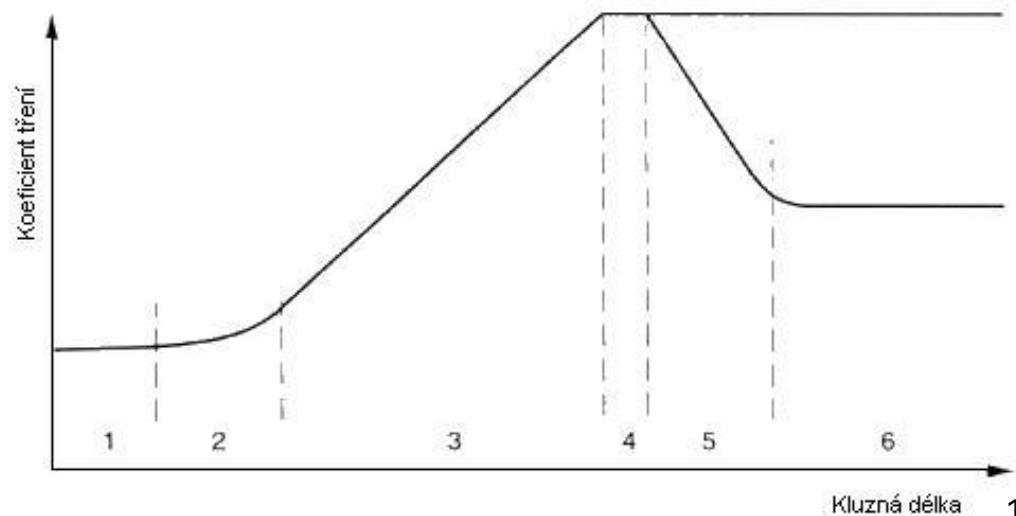
Adheze

Rýhování

Deformace
nerovností

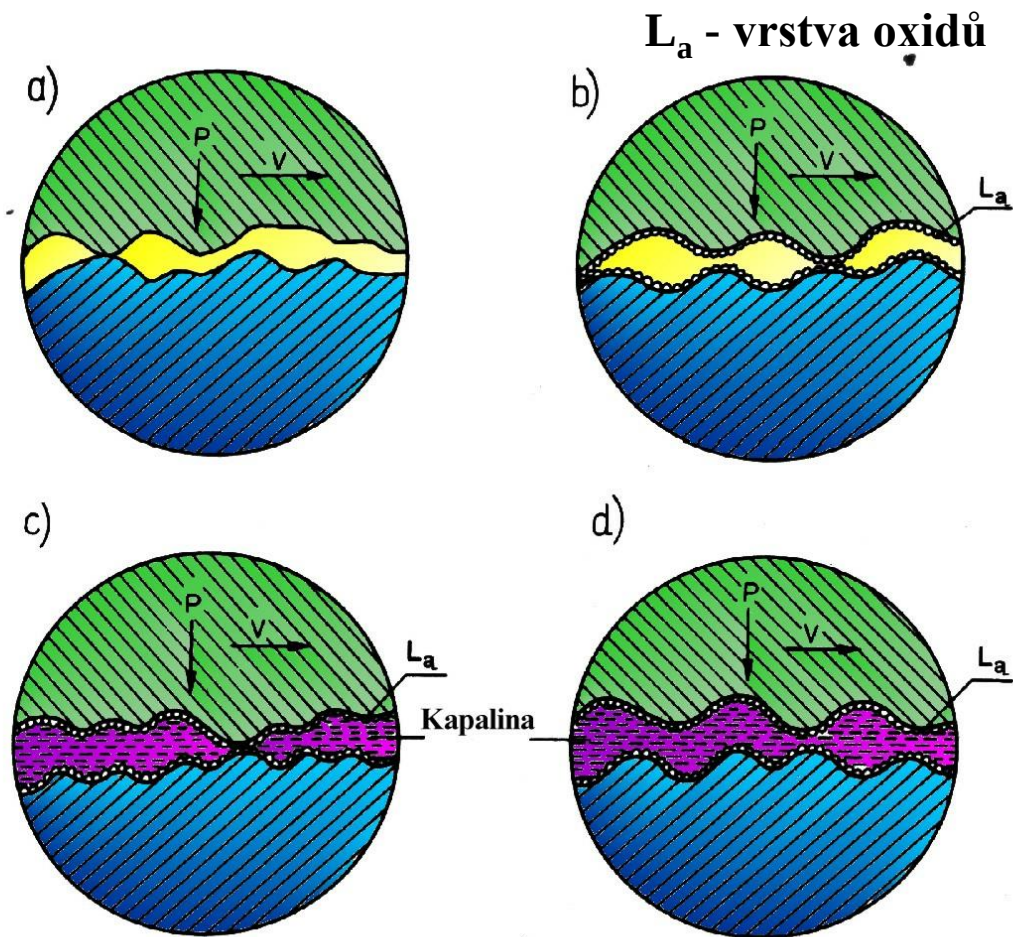
Mechanismy tření

- 1 rýhování povrchu ostrými nerovnostmi
deformace povrchových nerovností
kontaminace povrchu (oxidy...)
 μ (COF) nezávisí na podmínkách tření ani na materiálu kluzné dvojice
- 2 rostoucí adhezní síly $\rightarrow$ mírný nárůst μ , vznik adhezních spojů (mikrosvary)
- 3 přibývání částic uchycených v místě styku $\rightarrow$ nárůst μ , zvětšování aktivované plochy povrchu - adhezní tření
srovnatelná tvrdost obou materiálů: mechanismus rýhování dosahuje maxima
- 4 množství částic, deformace a míra adhezního tření jsou konstantní $\rightarrow \mu = \text{konst.}$
- 5 **kluzné dvojice s velmi měkkým a velmi tvrdým povrchem** $\rightarrow$ zaleštění nerovností měkčího povrchu $\rightarrow$ pokles μ
- 6 zrcadlový lesk
 $\mu = \text{konst.}$



Tření dle přítomnosti maziva

- a) fyzikální suché tření:**
ve vakuu (pouze teoretické)
- b) technické suché tření:**
na povrchu vrstva oxidů, plynů
nebo par
- c) smíšené tření:**
mezi povrchy je mazivo,
občasné dotyky
mikronerovností
- d) kapalinné tření:**
povrchy za pohybu odděleny
souvislou vrstvou maziva nebo
jinou kapalinou



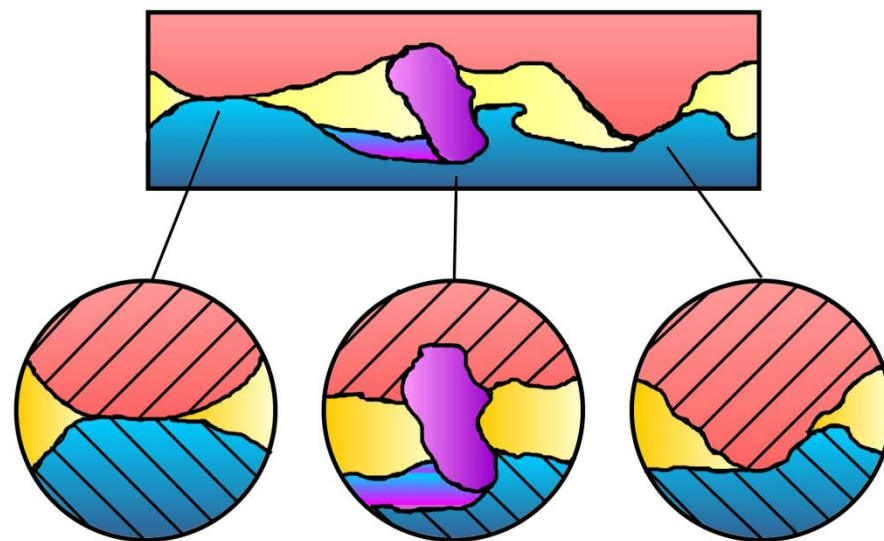
Vlivy na tření:

- oxidové a sulfidové vrstvy: samovolně vzniklé nebo nanesené,
- vlhkost
- adsorbované plyny
- organické kapaliny z řezných olejů a emulzí

Suché tření

$\mu \sim 0,02$ až $0,3$ (až více než 1)

- bez maziva
- dotyk kluzných ploch:
 - přímý kontakt výstupků drsnosti v malých oblastech
- vysoké měrné tlaky



Adheze

Rýhování

Deformace
nerovností

- **adheze**
- **abraze**
- **povrchová únava**

- mikrosvary, zadírání
- rytí výstupky nerovností nebo částicemi
- opakovaná pružná deformace
→ mikrotrhliny



Smíšené tření

- Tření za přítomnosti maziva, dočasné dotyky mikronerovností

Mezní tření

- Tloušťka vrstvy maziva - několik molekulových vrstev
- Oddělení nejvyšších výstupků nerovností mazivem

Kapalinné (plynné) tření

- Povrchy těles zcela odděleny vrstvou maziva
- Nenastává opotřebení těles
- Třecí síla [N]:

$$F_t = S \cdot \tau$$

- tečné napětí, S - plocha povrchu [m^2]

- Tečné napětí v kapalině [N/m^2] :

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx}$$

v - rychlost proudění kapaliny v mazací vrstvě [m/s]

x - souřadnice ve směru kolmém ke směru pohybu [m]

η - dynamická viskozita [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, $\text{Pa}\cdot\text{s}$]

Viskozita - vnitřní tření tekutin

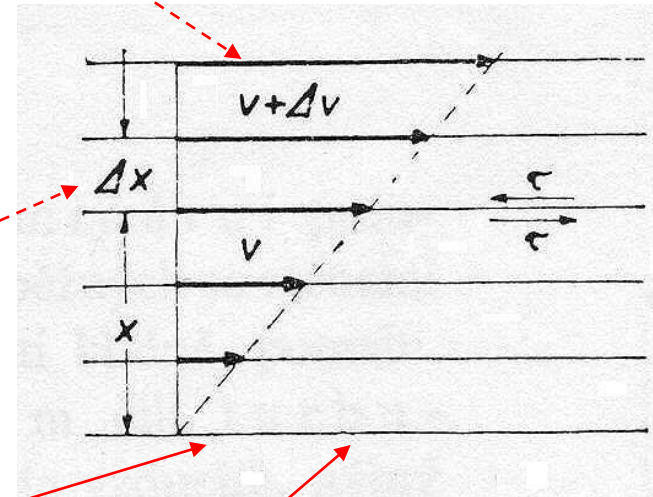
odpor proti posouvání částic kapaliny

při laminárním proudění

částice kapaliny přilehlé ke stěnám se nepohybují

směrem k ose trubice vzrůstá rychlost částic

osa trubky



stěna trubky

Opotřebení

Vzájemné působení funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a okolního prostředí:

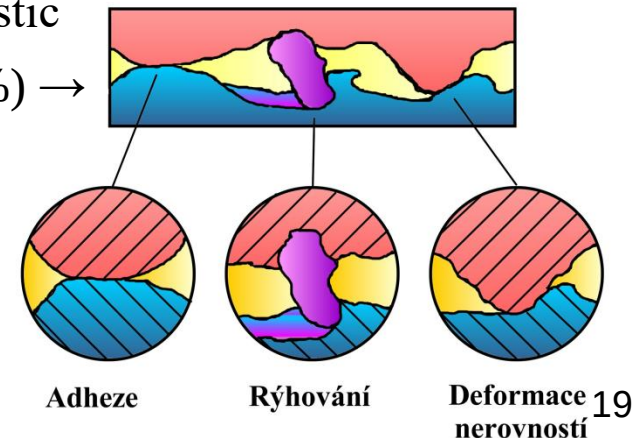
Trvalá změna tvaru nebo **změna materiálu** na povrchu pevných těles vzniklá následkem tření

Mechanismy opotřebení:

- **pružná deformace** výstupků drsnosti povrchu: napětí pod mezí kluzu - vysokocyklová únava
- **mikroplastická deformace** výstupků drsnosti: překročení meze kluzu - nízkocyklová únava
- **zpevnění** výstupků drsnosti povrchu
- **zatlačování** částic jednoho materiálu do druhého
- **aktivace** povrchových vrstev materiálu → vznik oxidů, změna struktury
- **adhezivní spojení** mezi výstupky drsnosti: meziatomové síly - **mikrosvary**:
 - pevnost spoje menší než pevnost základních materiálů → sřížné porušení ve spoji
 - pevnost spoje větší než pevnost základních materiálů → vytržení částice:
intenzivní porušování materiálu a tvorba volných částic
- **abraze**: rýhování a odřezávání částí materiálu (80-90%) → vznik trhlin, nových povrchů → oddělování materiálu

Následky:

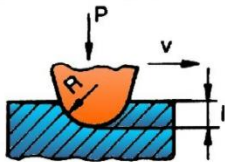
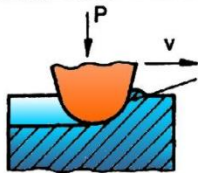
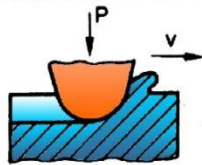
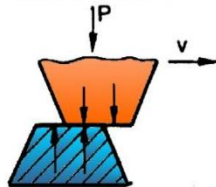
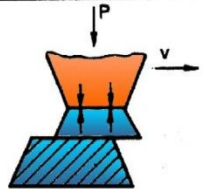
- tření: zadírání
- opotřebení: zmenšení průřezu, rázy, hluk ...



Průběh opotřebení

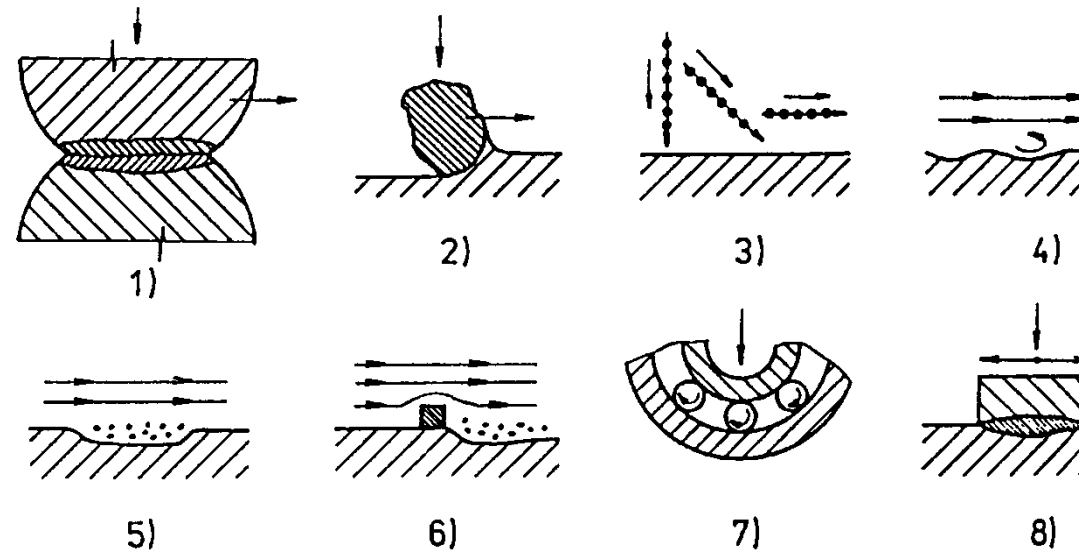
odstraňování nebo
přemísťování částic hmoty
z funkčního povrchu

- mechanické účinky
- jiné vlivy:
chemické
elektrochemické
elektrické

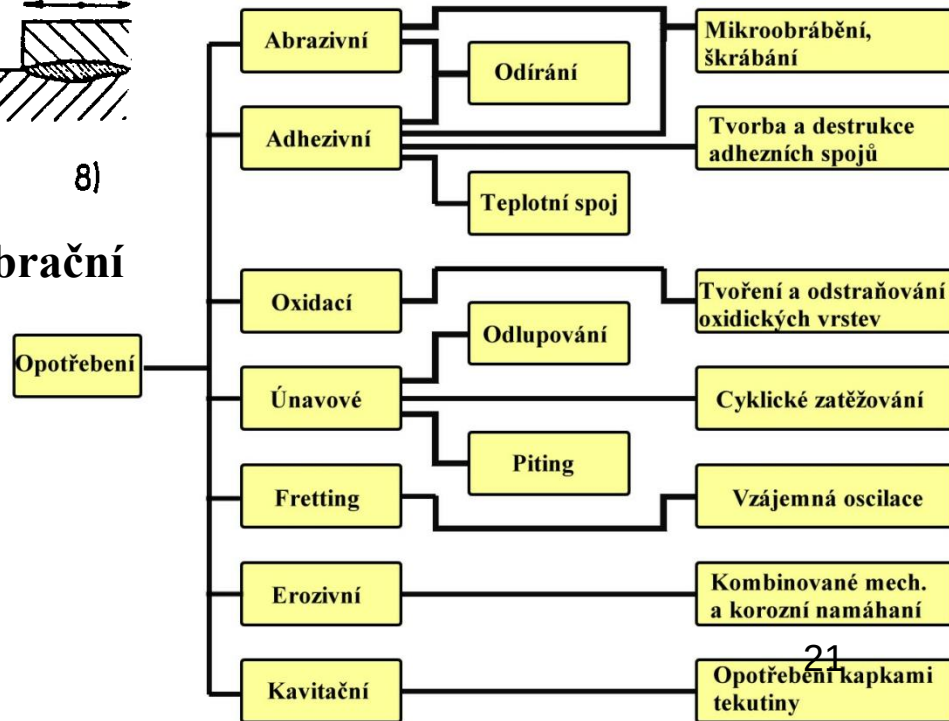
Typy interakcí		Počet cyklů vedoucí k destrukci	Mechanismus porušení
Charakter vzájemného působení	Schéma porušení mikrospoje		
Mechanické		$N \rightarrow \infty$	Elastická deformace
		$1 < N < \infty$	Plastická deformace
		$N \rightarrow 1$	Rýhování
Molekulární		$N \rightarrow \infty$	Adhezní porušení
		$N \rightarrow 1$	Kohezní porušení

Druhy opotřebení

1) Adhezivní 2) Abrazivní 3) a 4) Erozivní

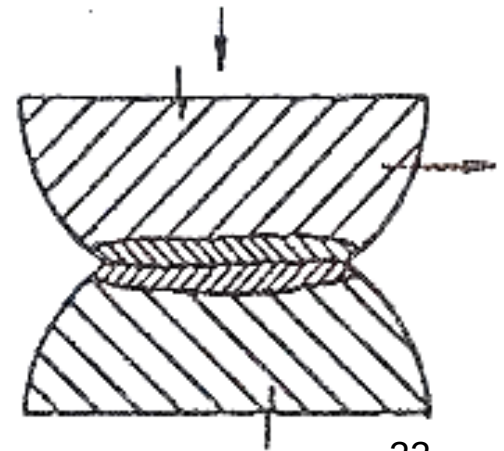


5) a 6) Kavitační 7) Únavové 8) Vibrační



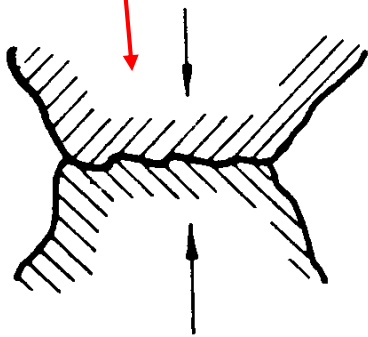
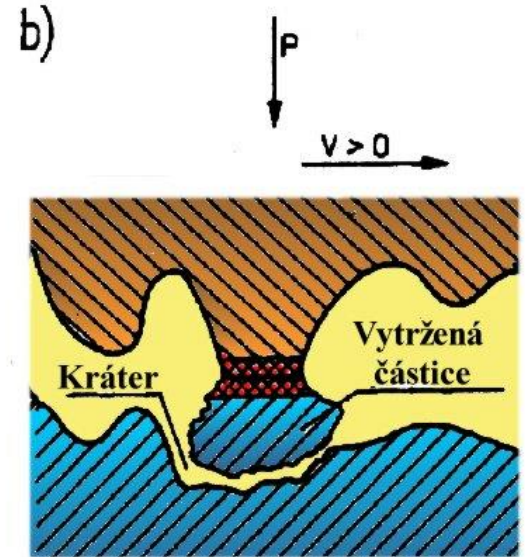
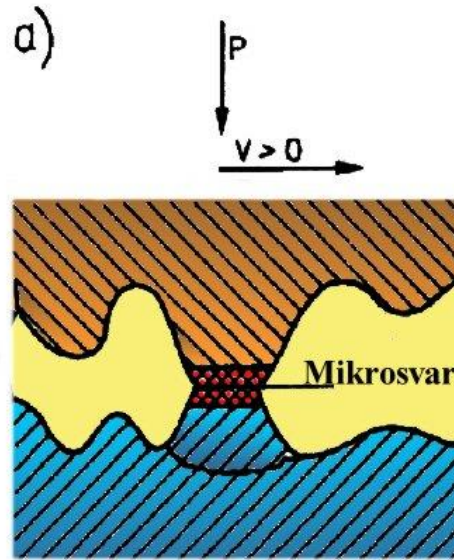
Adhezivní opotřebení

- *Opotřebení pevného tělesa vlivem adheze k jinému tělesu*
- **Vznik:** vysoké kontaktní tlaky, malé rychlosti
- **Výskyt:**
 - převážně na výstupcích drsnosti - **mikrosvary**
- porušení mikrosvarů: na původní ploše spojení nebo vytržení částice
- vliv na adhezivní opotřebení: vzájemná rozpustnost v tuhém stavu:
 - dvojice stejných nebo rozpustných materiálů
 - spoje pevnější než základní materiál → vytržení částice
 - velké adhezivní opotřebení
 - kovy navzájem nerozpustné → malé adhezivní opotřebení
- **Protiopatření**
 - hydrodynamické mazání
 - přidání vysokotlakého aditiva do maziva
 - zmenšení jmenovitého tlaku
 - použití vzájemně nesvařitelných materiálů nebo povlaků

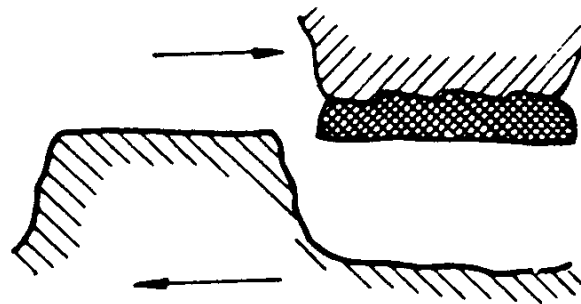


Adhezivní opotřebení

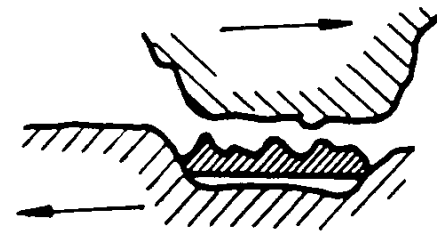
Působení
meziatomových sil:
mikrosvary



a)



b)



c)

a) Styk nerovností

b) Přenos materiálu

c) Tvorba nových částic

Abrazivní opotřebení

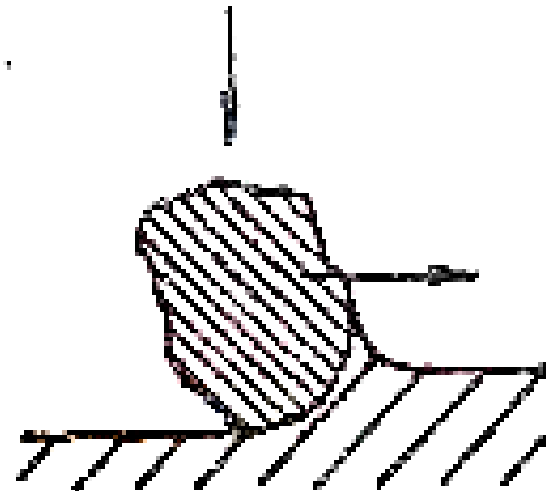
- *Opotřebení výstupky drsnosti tvrdšího tělesa nebo volnými tvrdými částicemi*
- **Vznik:** kontakt dvou povrchů, z nichž jeden je výrazně tvrdší
- Vzájemný pohyb: rýhování nebo odřezávání měkčího povrchu výstupky tvrdšího materiálu nebo tvrdými částicemi mezi povrchy
- Vlivy na rozsah poškození:
 - zatížení, délka kluzné dráhy, tvrdost, drsnost povrchů
 - množství, velikost a tvar částic

Abrazivně - korozní opotřebení:

- Vzájemné mechanického působení a korozního prostředí
- Produkty abrazivně-korozního opotřebení: oxidy s vysokou tvrdostí - výrazný brusný účinek

Protiopatření:

- hydrodynamické mazání
- snížení drsnosti opotřebovávané části
- zvýšení tvrdosti opotřebovávané části
- zmenšení jmenovitého tlaku
- vyloučení volných tvrdých částic



Abrazivní opotřebení

Abrazivní částice:

- volné
- vázané
(výstupky drsnosti)

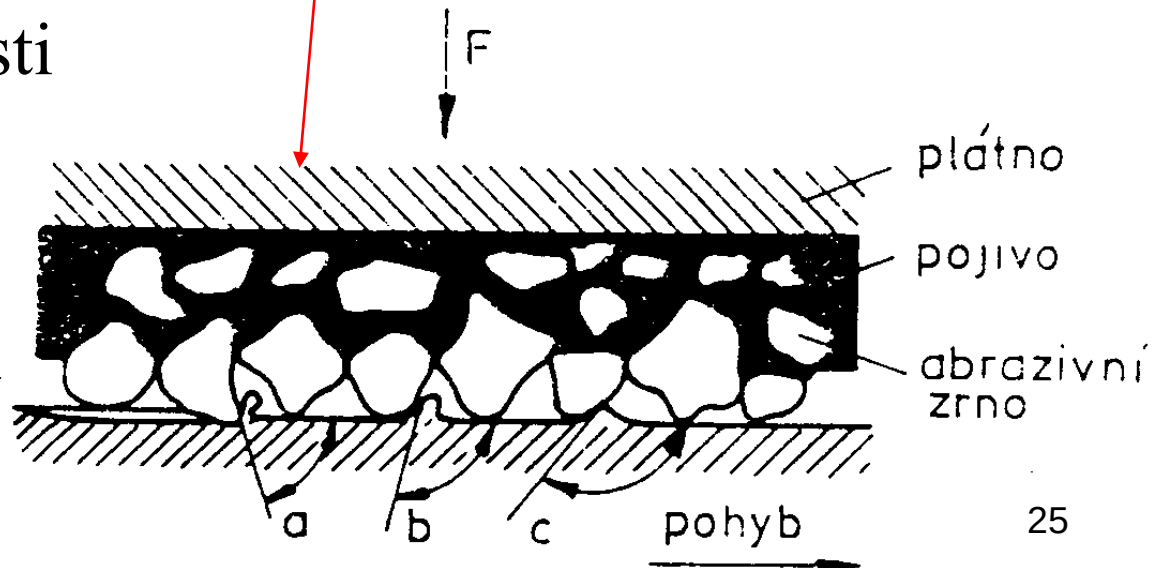
Vlivy:

- mechanické vlastnosti
- velikost zatížení
- tvar částic a úhel
vzhledem k povrchu

Analogie s broušením:

Deformační mechanismy:

- a** tvorba třísky
- b** tvorba nárůstku
- c** tvorba valu



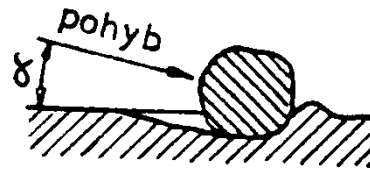
Erozivní opotřebení

Opotřebení vlivem dopadu pevných nebo kapalných částic:

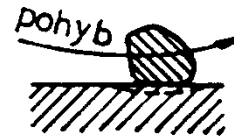
kinetická energie $\rightarrow$ deformační práce

Vlivy:

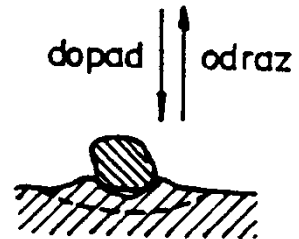
- rychlost částic, úhel nárazu, koncentrace částic ...
- vlastnosti média s částicemi: materiál, tvar, velikost, tvrdost, lámavost, teplota ...
- vlastnosti materiálu: tvrdost, modul pružnosti, zpevňování, mikrostruktura ...
- typy dopadajících částic:
 - pevné částice v plynu
 - pevné částice v kapalině
 - kapalné částice v plynu



a)



b)

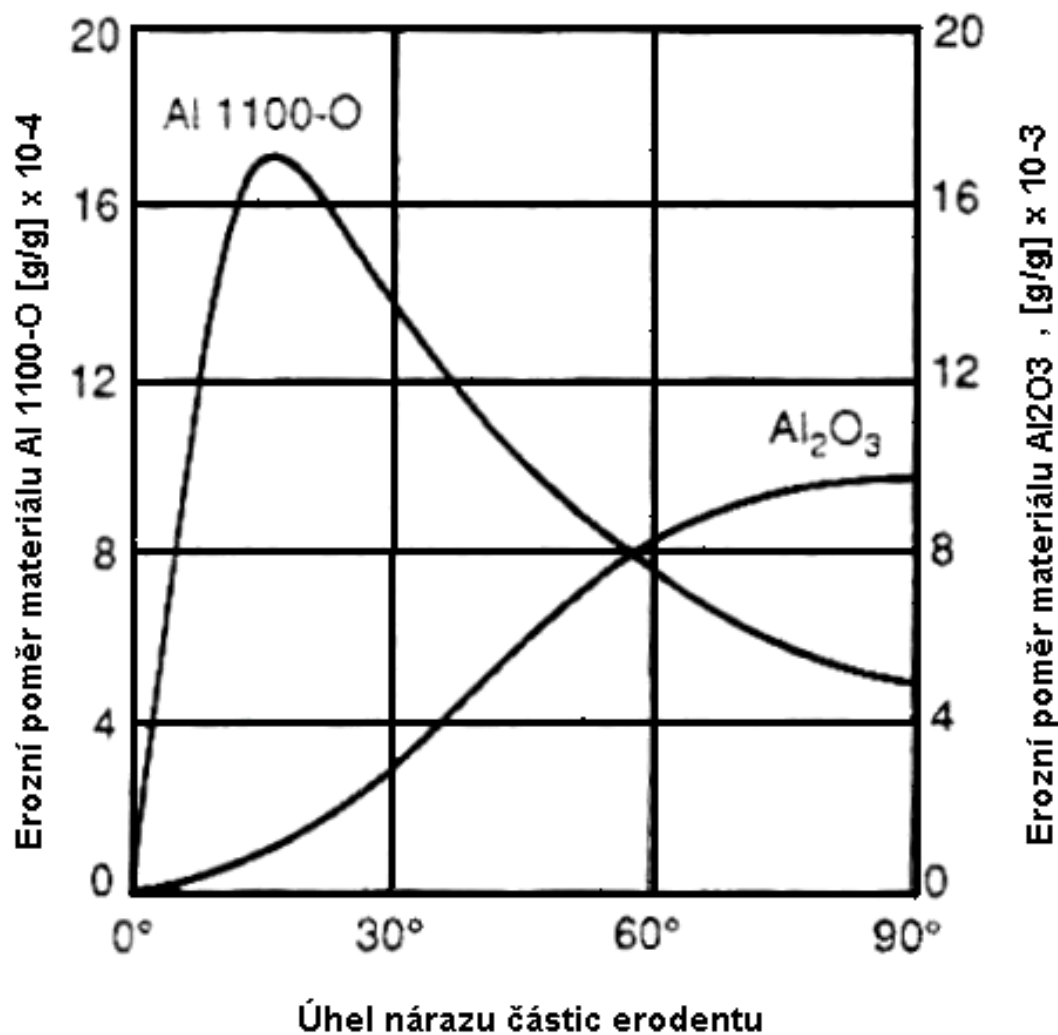


c)

Dopad částic na povrch:

- a) šikmý dopad**
- b) dopad rovnoběžně s povrchem**
- c) dopad kolmo k povrchu**

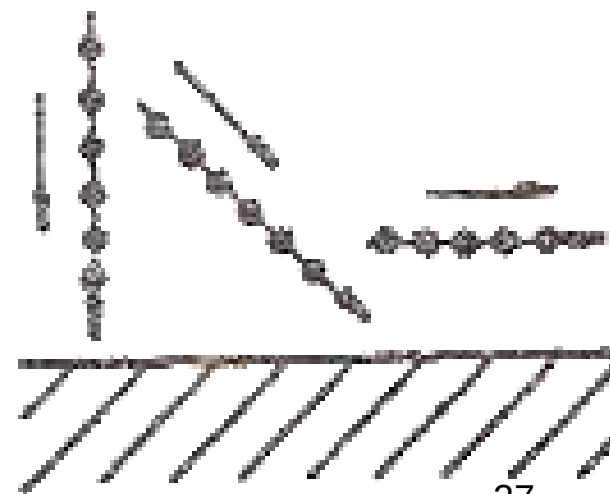
Erozivní opotřebení vliv úhlu dopadu



Erozní poměr R

ztráta hmotnosti nebo
objemu materiálu na jednotku
hmotnosti erodentu:

$$R = \frac{\Delta m(\Delta V)}{m_e}$$



Částice: SiC, velikost 127 μm , rychlost 152 m/s (547 km/s)

Erozivní opotřebení - faktory

Erozní poměr - rychlost opotřebení R :

k - konstanta

n - rychlostní exponent - závisí na materiálu a podmínkách

v - rychlost částic

$$R = kv^n$$

Tvrdost materiálu:

kovy: R je nepřímo závislý na tvrdosti

Lomová houževnatost materiálu:

keramika: výrazná závislost

Tvar částic:

částice kulového tvaru - ustálená eroze vytváří topografii „kopce a údolí“

částice ostrohranné - větší eroze

Velikost částic:

nad $100\ \mu\text{m}$ - změna velikosti nemá na R žádný vliv

pod $100\ \mu\text{m}$ - eroze se snižuje (platí i u abrazivního opotřebení)

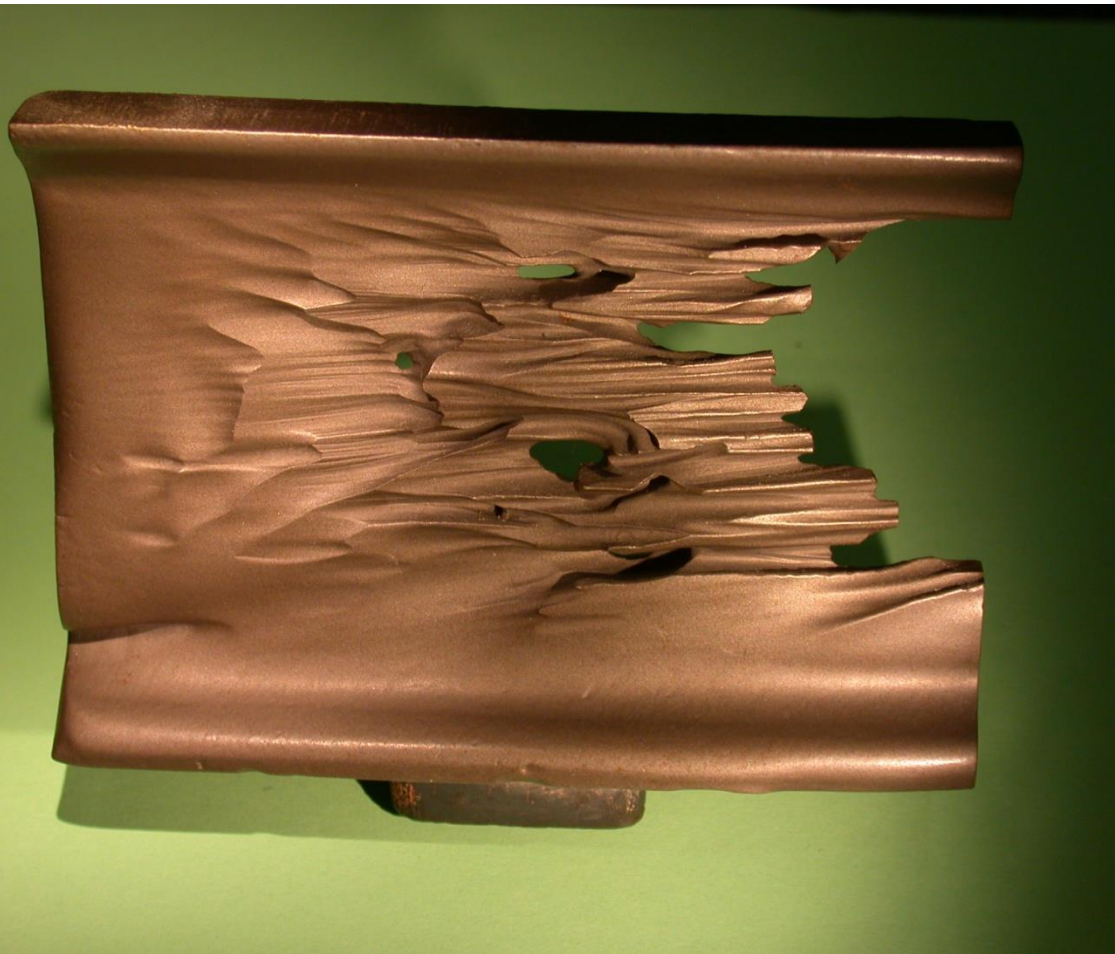
Tvrdost částic:

tvrdost částic erodentu nižší než tvrdost poškozovaného materiálu → eroze klesá

Kalení:

posun vrcholu křivky závislosti R na úhlu nárazu ke křehkému chování (větší úbytky při 90°)

Erozivní opotřebení lopatky tryskacího stroje



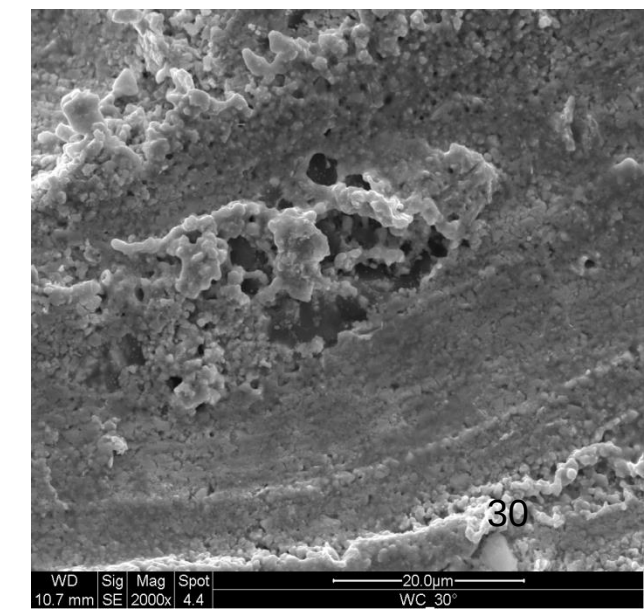
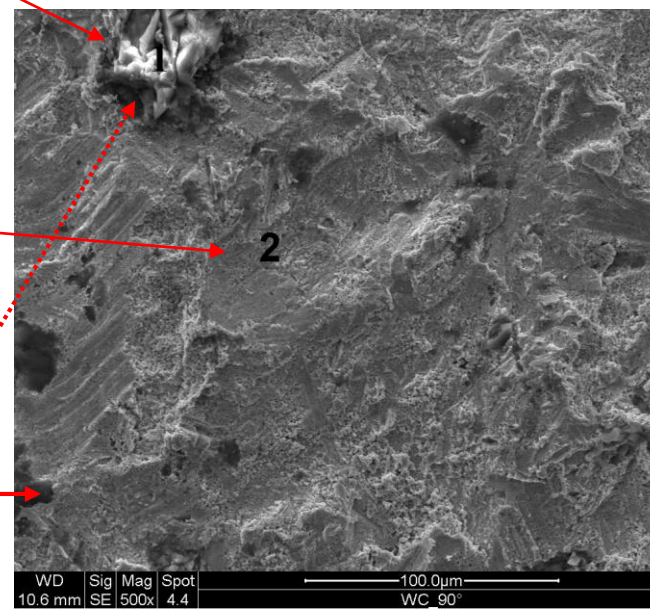
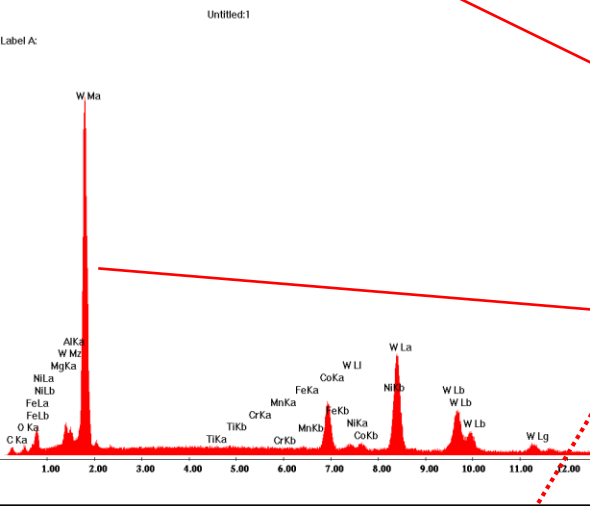
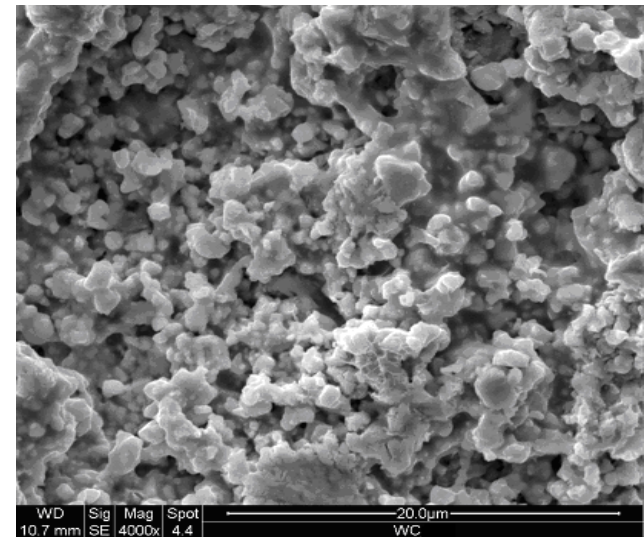
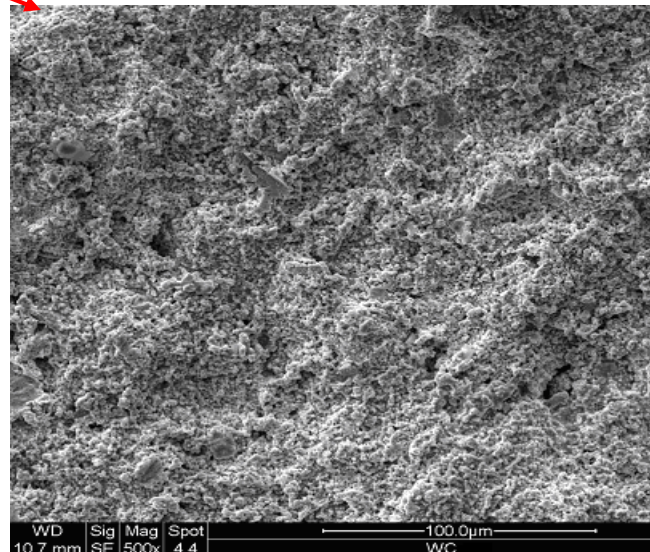
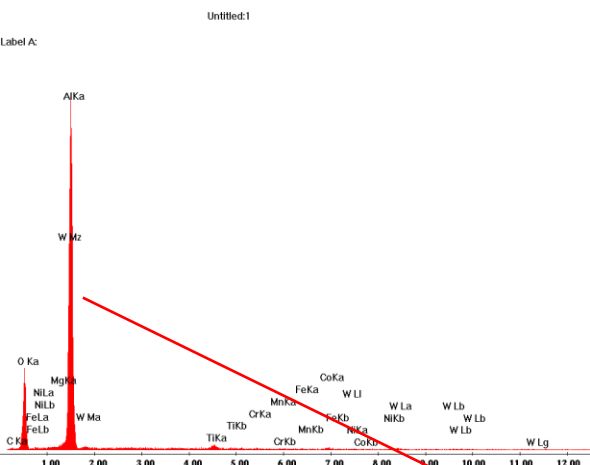
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Erozivní opotřebení žárového nástřiku WC-Co

Původní povrch



Povrch po zkoušce
částice erodentu - korundu

Kavitační opotřebení

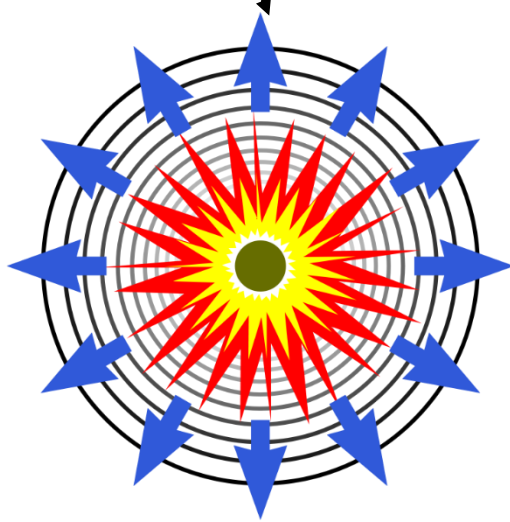
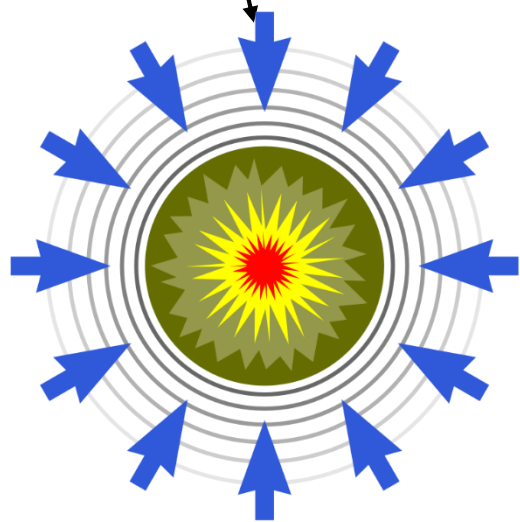
Kavitace: změna tlaku a teploty tekutiny → vznik a zánik bublin: plyny (pára ...)
sytá (nasycená pára) je v rovnováze s kapalinou o stejné teplotě a tlaku

Vznik bubliny: při poklesu tlaku pod tlak syté páry
→ kavitační dutina

Zánik bubliny: opětný nárůst na tlak syté páry
→ imploze (zhroucení: opak exploze)

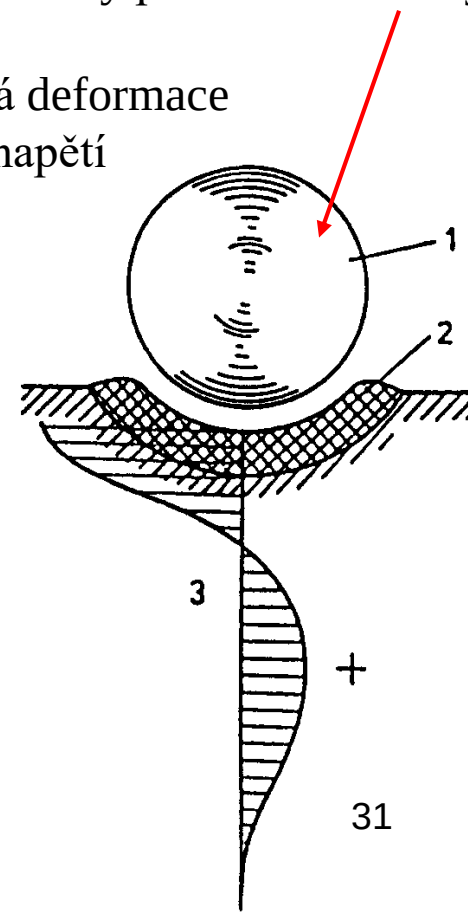
→ tlakové rázy s různou energií →

- **elastická deformace** - vysokocyklová únava
- **plastická deformace** - vznik reliéfu
- **deformační zpevnění** - nízkocyklová únava
- **vylamování** materiálu



Působení rázové vlny při zániku bubliny:

- 1** bublina
- 2** plastická deformace
- 3** průběh napětí



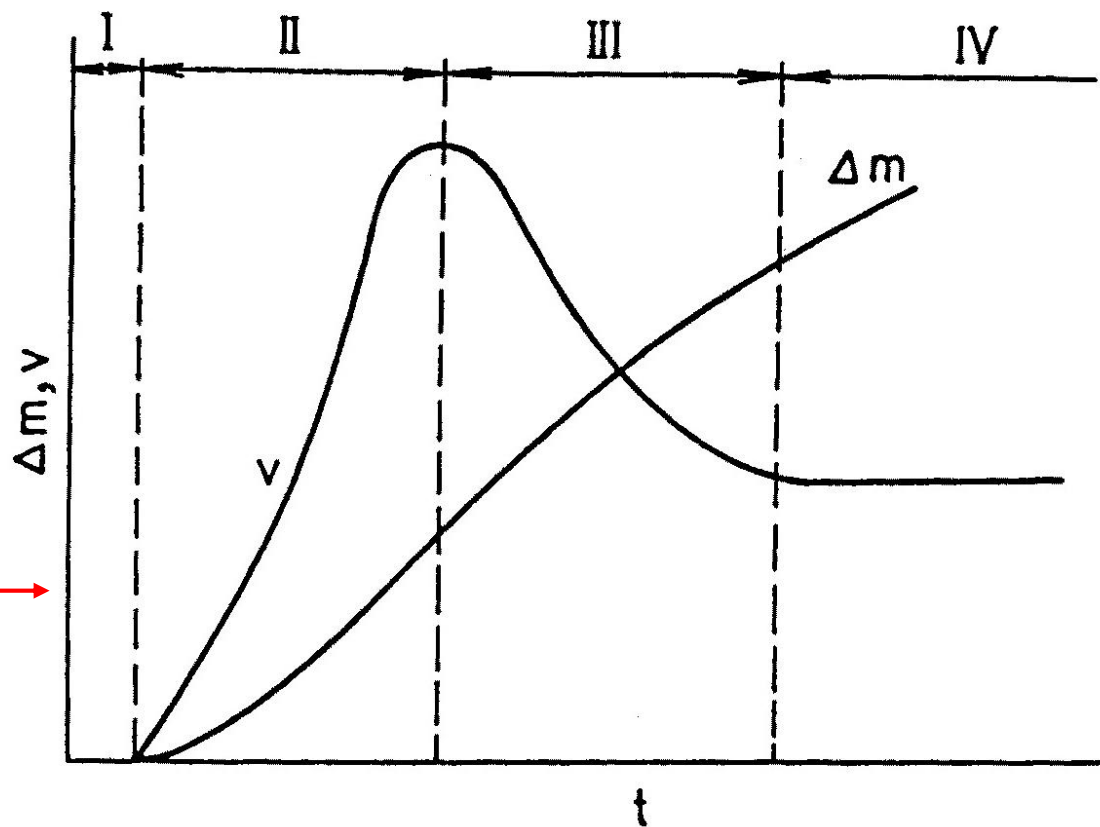
Kavitační opotřebení

Vlivy:

- Teplota a tlak kapaliny
→ velikost a počet trhlin
- voda: max. porušování při 45-50°C
- Obsah plynů v kapalině
- Rychlost proudění
- Struktura materiálu
- Tvrdost materiálu
- Chemická aktivita prostředí
→ koroze

Stádia:

- počáteční (inkubační) -
zpevnění, mikrotrhliny
- vzrůst rychlosti -
oddělování částic
- snížení rychlosti
- ustálený stav - konstantní
rychlost pro dané podmínky



Δm - hmotnostní úbytek
 v - rychlost opotřebení
 t - čas

Kavitační opotřebení

Typy:

- **hydrodynamická kavitace:**
 - obtékání předmětů kapalinou
 - pohybování předmětu v kapalině
- **akustická kavitace:**
 - periodický průchod intenzivními (ultra)zvukovými vlnami

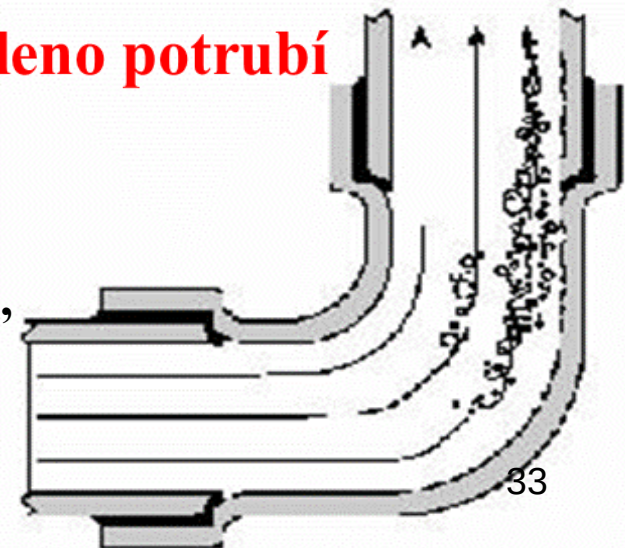


Vodní turbína

Výskyt:

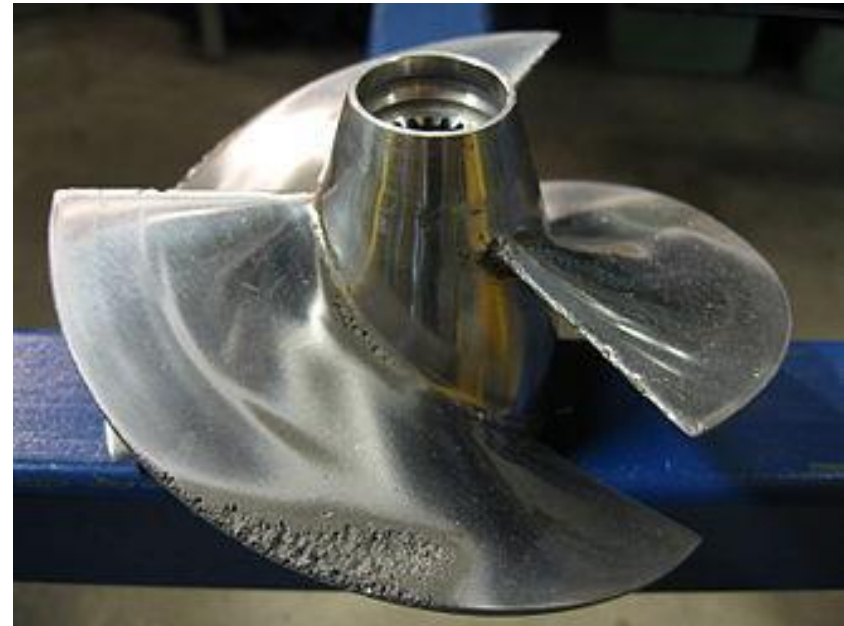
- lodní šrouby, vodní turbíny
- mostní pilíře, armatury
- odstředivá čerpadla, vstřikovací trysky
- míchací zařízení, kluzná ložiska, hydraulické lisy
- automobily: hydrodynamické měniče točivého momentu, vložky vodou chlazených spalovacích motorů...

Koleno potrubí



Odolnost proti kavitačnímu opotřebení

- **Vhodné materiály:**
 - vysoká odolnost proti korozi, tvrdá jemnozrnná homogenní struktura povrchu, vysoká odolnost proti plastické deformaci, tlakové pnutí v povrchové vrstvě
 - hladký povrch
- **Nevhodné materiály:**
 - malá odolnost proti korozi, heterogenní struktura, malá odolnost vůči mechanické deformaci, vnitřní tahové pnutí
 - drsný povrch
- **Příklad:**
Oceli:
 - feritická struktura: nejméně odolná
 - nárůst perlitu: odolnost roste
 - martenzitická struktura: nejvyšší odolnost



Lodní šrouby

Opatření proti kavitačnímu opotřebení

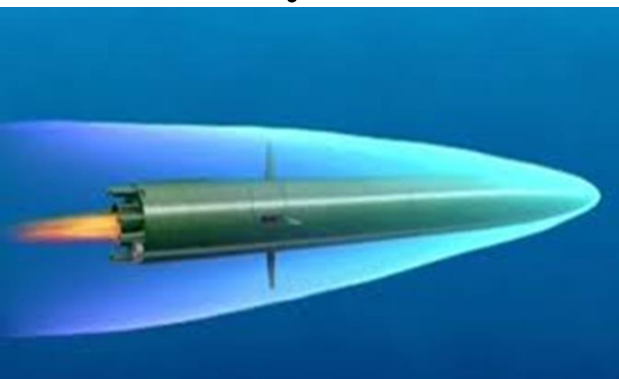
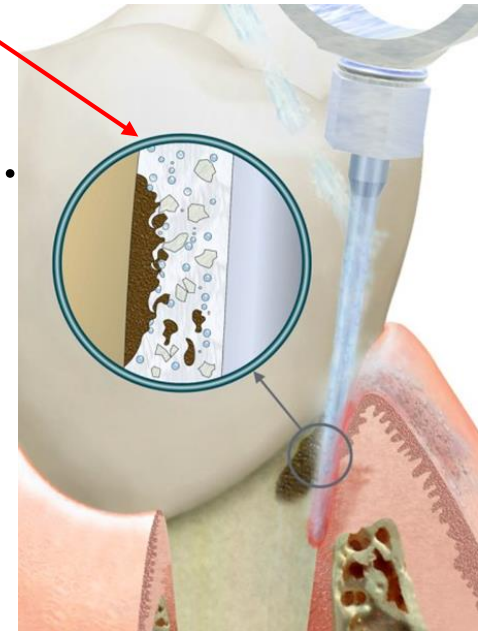
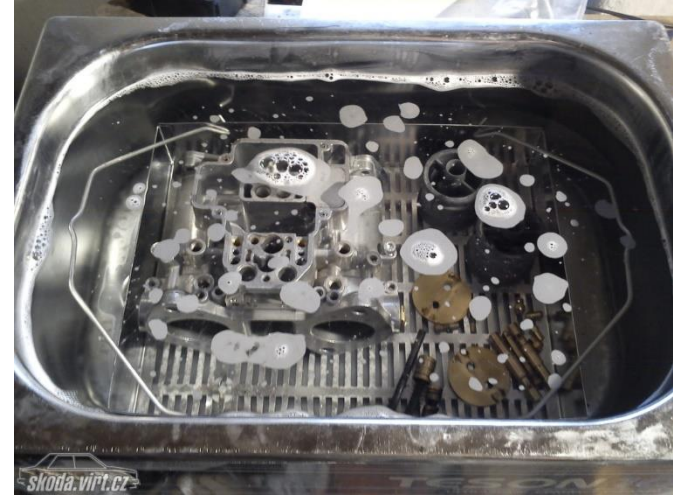
- **Konstrukční opatření:**
 - zamezení kavitace
 - snadná vyměnitelnost poškozených součástí při údržbě
 -
- **Volba materiálů:**
 - vyšší odolnost proti kavitaci
 - vysoká odolnost proti korozi pro agresivnější prostředí
 - korozivzdorné oceli, bronzы, mosazi, plasty, méně odolné materiály s povrchovými úpravami
- **Zavzdušnění:**
 - řízený přívod vzduchu → zvýšení tlaku nad hodnotu nasycených par



**Mosazný lodní šroub s kroucenými listy
vyvinutý pro lodě náchylnější ke vzniku vibrací a kavitace:
ponorky a letadlové lodě**

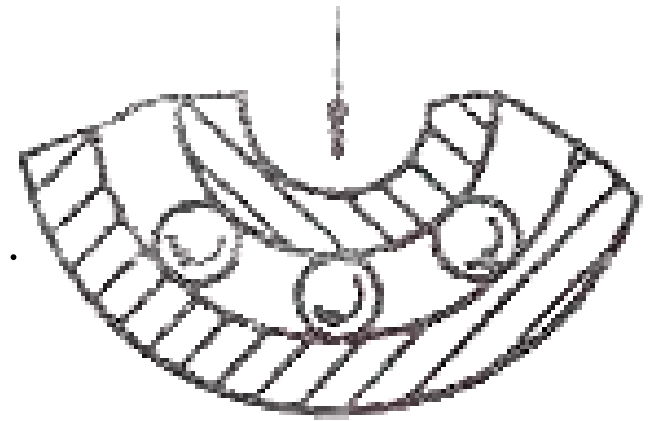
Využití kavitace

- **ultrazvukové čističky** →
 - čištění předmětů: šperky, členité předměty...
 - desinfekce lékařského vybavení:
zničení bakterií bez nutnosti vysoké teploty
- **rozrušování zubního kamene ultrazvukem**
- **rozrušování ledvinových kamenů**
- **rozrušování tukových buněk**
→ redukce hmotnosti
- **potravinářský průmysl:**
 - homogenizace mléka, sterilizace potravin, čištění vody...
- **vojenský průmysl:**
 - vznik vzduchové vrstvy mezi torpédem a vodou
→ rychlost až 360 km/h



Únavové opotřebení = kontaktní únava

- *Opotřebení únavou povrchových vrstev následkem plastických nebo elastických interakcí*
- Vznik: - povrch střídavě zatěžován a odlehčován
 - sečtení zbytkových pnutí a vnějších napětí
 - vznik mikrotrhlin v místech koncentrátorů napětí
 - šíření trhlin
 - uvolnění částic
- **Příklad:** poškození valivých ložisek, ozubených kol...
- Nepříznivý vliv: oxidické vměstky



Protiopatření:

- Užití materiálů a povlaků, které nemají sklon ke zkřehnutí, tvorbě mikrotrhlinek, popř. důlkovitosti (pitting)
- Tlumení vibrací a nárazových normálových namáhání
- Vyloučení složek maziva a ovzduší urychlujících rozšiřování mikrotrhlinek

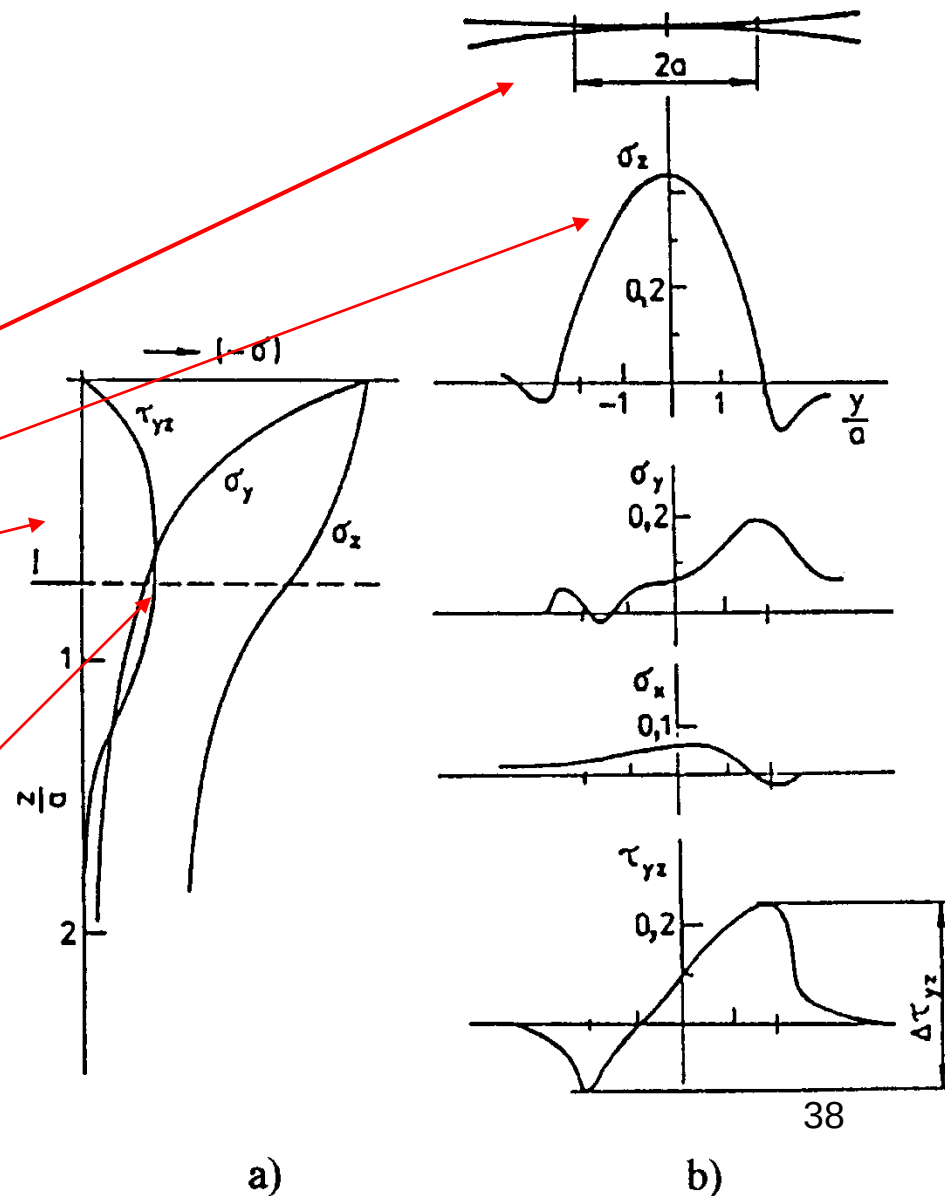
Kontaktní únava

Cyklické namáhání - dotyk
zakřivených povrchů

Příklad: Ozubená kola:

Rozložení napětí

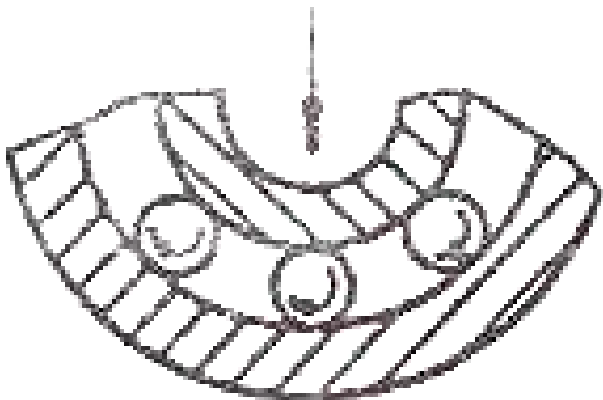
- dotyk ($2a$)
 - eliptické rozložení napětí
 - rozložení napětí pod povrchem
 - normálové složky $\rightarrow$ opakovaná
plastická deformace
 - smykové složky - maximum
pod povrchem
- ($0,7a$: až desetiny mm)
iniciace trhlin $\rightarrow$ pitting



Kontaktní únava

Průběh porušování:

- plastická deformace
- zdrsňování
- trhlinky →
síťoví až 0,35 mm
pod povrchem
- odlupování částic
(pitting)
- únavový charakter



Faktory:

povrchová vrstva:

- tvrdost
- mez kluzu
- drsnost povrchu
- tloušťka
- struktura
- defekty

rozhraní (u povlaků):

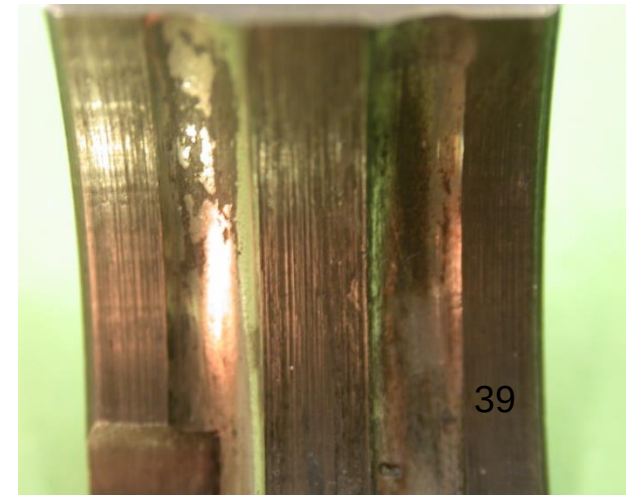
- adheze
- vnitřní pnutí

okolí:

- teplota:
 - okolí
 - lokální
- rychlost
- mazání
- tření - vliv na napětí



Opotřebení valivých ploch ložiska



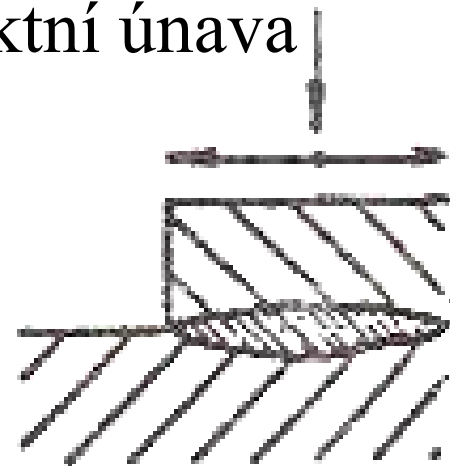
Vibrační opotřebení

Třecí únava = vibrační koroze

- vzájemný kmitavý pohyb + působení zatížení:
 - nízká amplituda
(max. 0,075 mm)
 - vysoká frekvence
- styk těles: bodový, čárový nebo plošný
- vliv prostředí - oxidy

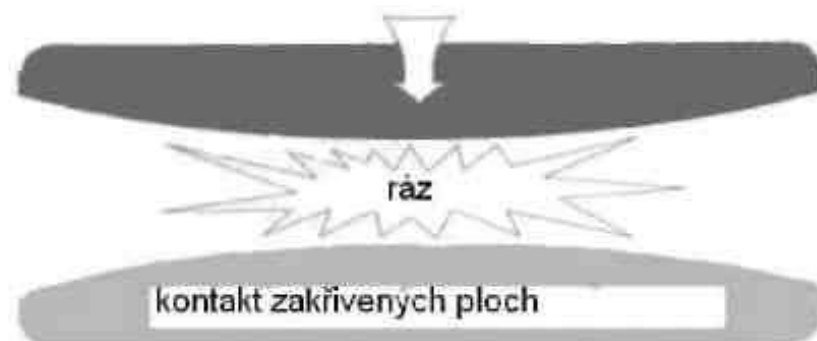
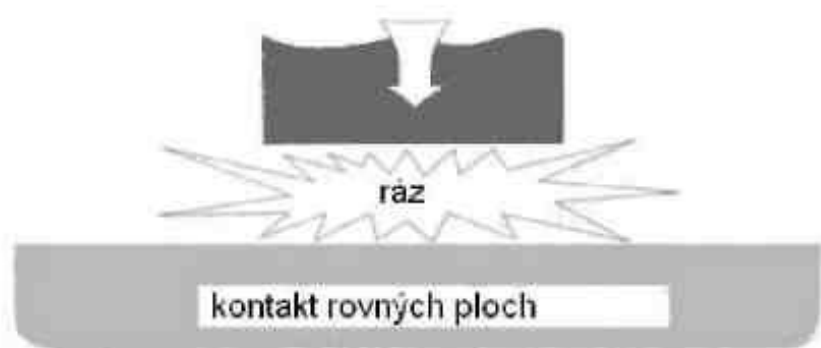
Kombinace:

- adhezivní opotřebení
- abrazivní opotřebení
odstraňování pasivačních vrstev
- oxidace
- kontaktní únava



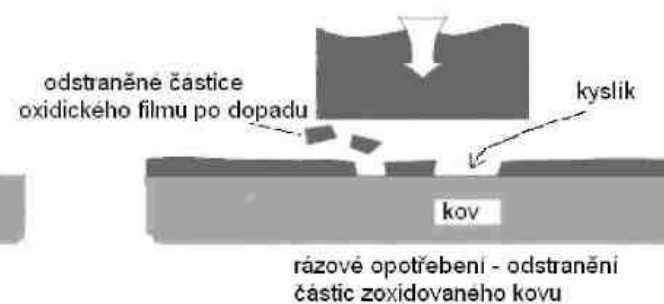
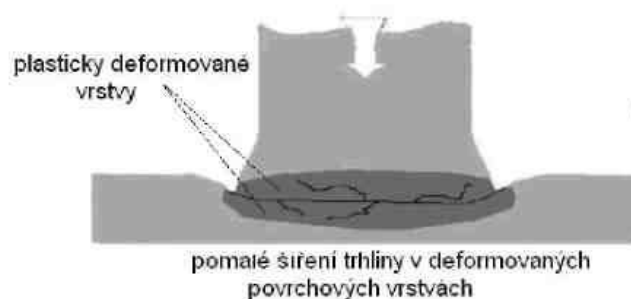
Rázové opotřebení

Opotřebení vlivem opakovaných silových kontaktů mezi dvěma tělesy



Mechanismy porušování:

- elastická a plast. deformace
→ zpevňování
- vyčerpání el.-pl. schopnosti
- uvolnění energie →
vytvoření nového povrchu:
trhlina - iniciátor porušení
- přítomnost kyslíku: oxidace
→ zhoršení el.-pl. vlastností
→ snazší šíření trhliny



Korozivní opotřebení

Opotřebení zmenšením pevnosti povrchových vrstev následkem tribochemických reakcí (třecí oxidace - tribokoroze)

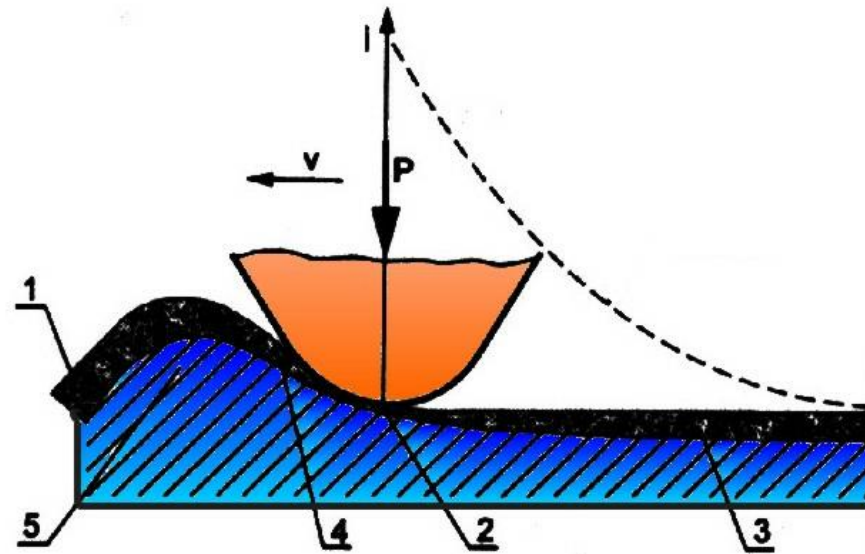
- chemické reakce na povrchu
 - koroze kovového materiálu: vznik oxidační vrstvy
 - pasivační vrstva
 - ochrana před další korozi a adhezivním opotřebením
 - lubrikační vrstva: zpomaluje korozi i opotřebení
 - slabá vrstva - krátká životnost v místě třecího kontaktu
 - vysoká rychlost opotřebení v důsledku destrukce vrstvy
 - urychlení koroze

Protiopatření

- přidání protikorozního aditiva do maziva
- vyloučení reakce složek a nečistot v mazivu a v okolním plynu
- použití základních materiálů nebo povlaků povrchů odolnějších proti korozi
- chlazení → snížení rychlosti chemické reakce

Abrazivně - korozní opotřebení

1. *pasivační vrstva na povrchu*
2. *čerstvě odkrytý povrch*
3. *nově vytvořená pasivní vrstva*
4. *místo destrukce*
5. *deformace materiálu*



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Difúzní opotřebení

Vysoká teplota a vzájemný kontakt:
difúze prvků z jednoho tělesa do druhého

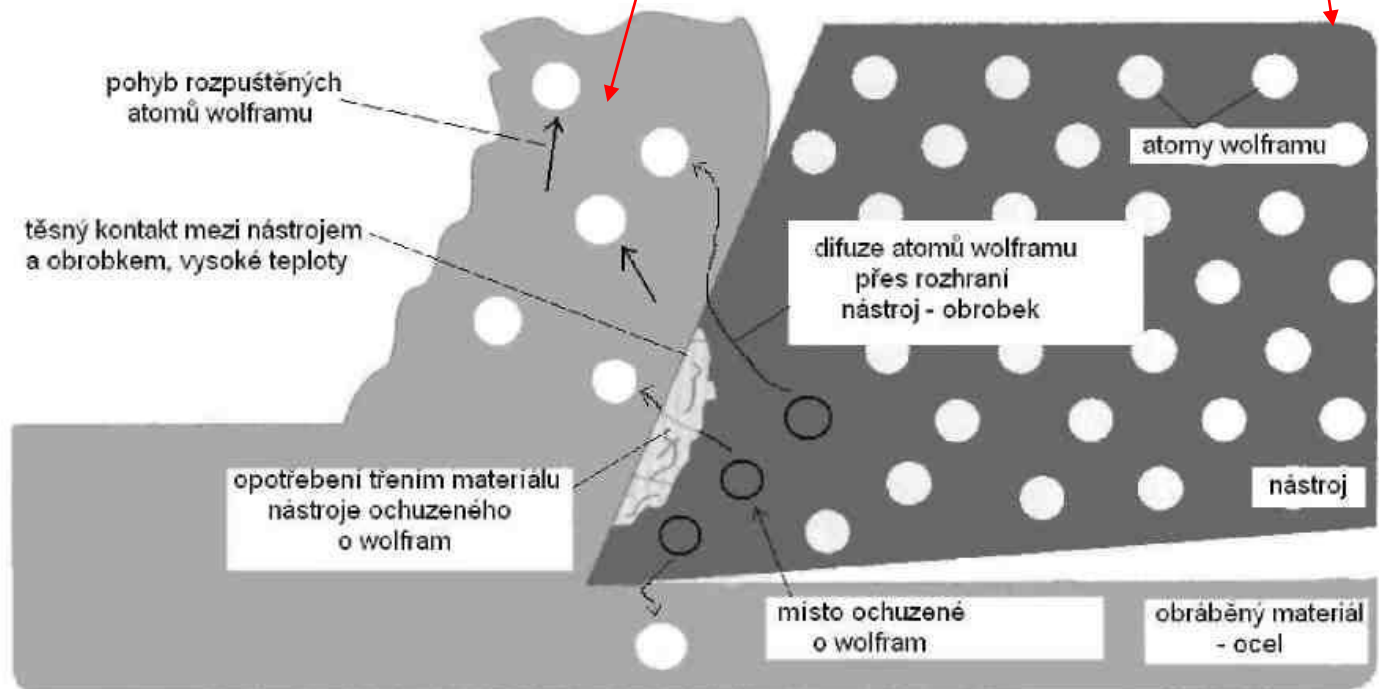
Difúze:

- zmenšení koncentračních rozdílů
- měknutí
- destrukce

Faktory:

- teplota
- rozpustnost materiálů

např.: **obrobek (ocel) - nástroj (WC)**
teploty nad 700°C
extrémní kontaktní tlaky



Difúze

■ 1. Fickův zákon:

$$dm = -D \frac{dc}{dx} A d\tau$$

dm [g] - množství látky přenesené difúzí

D [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] - difúzní koeficient:
množství prvku procházející
jednotkou plochy
za jednotku času při
jednotkovém gradientu

dc/dx [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$] - koncentrační gradient

c [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] - koncentrace

x [m] - vzdálenost

A [m^2] - plocha kolmá na směr difúze

$d\tau$ [s] - čas

$J = dm/Ad\tau$ [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] - difúzní tok

■ Vliv teploty:

Arrheniova rovnice:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{R.T}\right)$$

D_0 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] - difúzní součinitel
nezávislý na teplotě

Q [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$] - aktivační energie difúze:
hodnota kinetické energie
potřebné k difúzi atomu
(nezávisí na T)

R [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$] - plynová konstanta:
8,314 $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

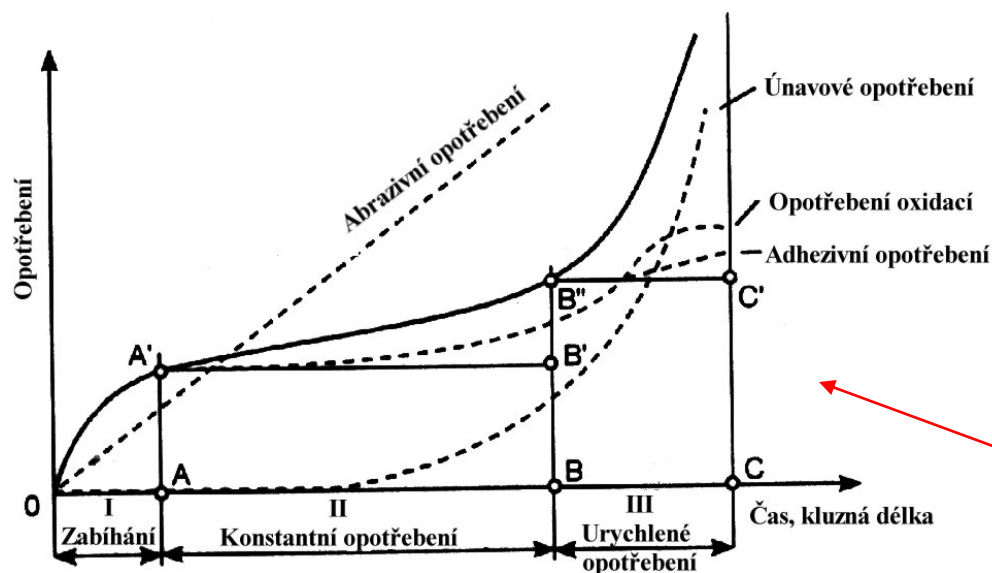
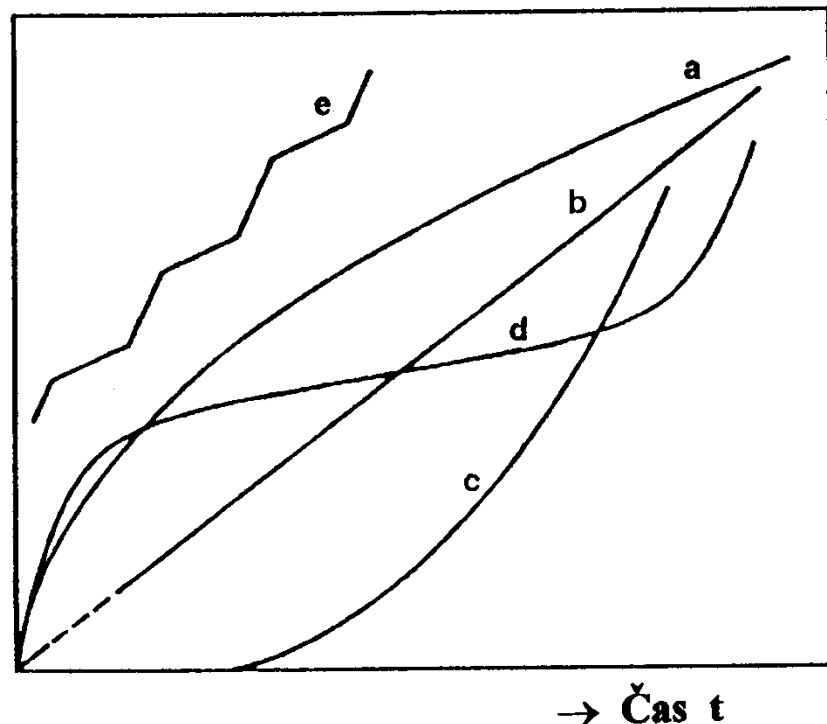
T [K] - absolutní teplota

Hodnocení opotřebení

Otěr (opotřebení):

- objemový: $W [m^3.m^{-1}]$
- lineární: $W_l [\mu m.m^{-1}]$
- hmotnostní: $W_m [g]$
- rychlost otěru: $w = \frac{dW}{dt} [m^2 / s]$

↑ Objemový otěr W

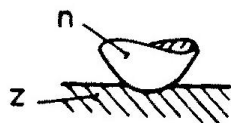


- a) Záběh
- b) Lineární závislost (abraze)
- c) Kavítace, únavové opotřebení
- d) Záběh, ustálené a progresivní op.
- e) Periodické zvyšování intenzity op.

Lorencova křivka

Hodnocení opotřebení

$$\frac{a}{r} \leq \left(c \cdot \frac{R_{kd}}{E} \right)^2$$



a)



b)



c)



d)



e)

a - hloubka vtlačení

mikronerovnosti **n** do tělesa **z**

r - poloměr nerovnosti **n**

c - součinitel zpevnění

R_{kd} - mez kluzu v tlaku materiálu **z**

E - modul pružnosti materiálu **z**

a) **elastická deformace** → vysokocyklová únava

$$a/r = 0,02 - 0,0004$$

b) **plastická deformace** → nízkocyklová únava

$$a/r < 0,1 - 0,2 - \text{suché povrchy}$$

$$a/r < 0,5 - 0,6 - \text{mazané povrchy}$$

c) **rýhování** → odřezávání částic

$$a/r > 0,1 - 0,2 - \text{suché povrchy}$$

$$a/r > 0,5 - 0,6 - \text{mazané povrchy}$$

d) **porušování povrchových vrstev**

chemické reakce →

porušování mikrospojů mezi vrstvami

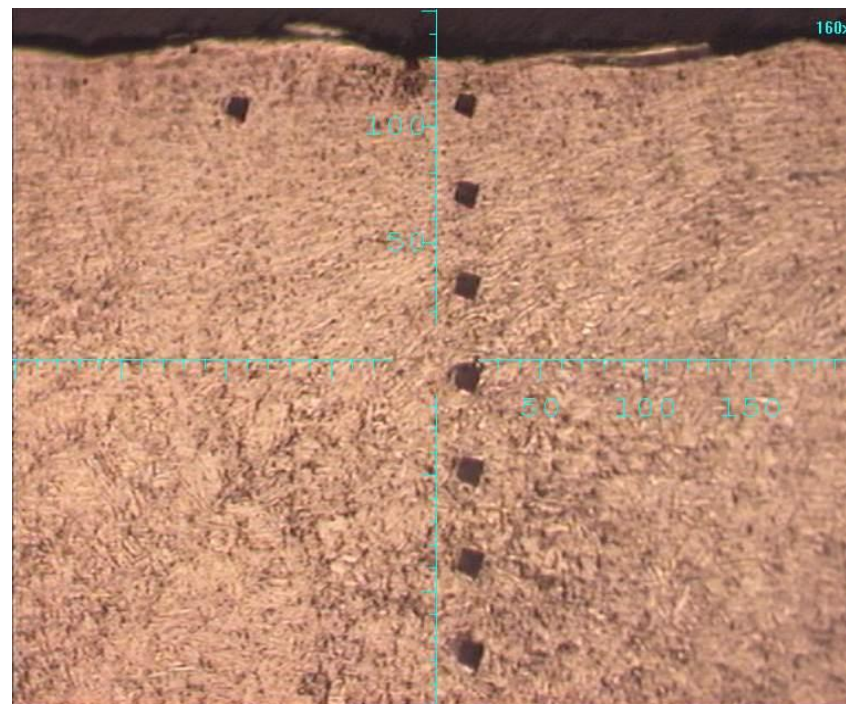
e) **vytrhávání základního materiálu** -

pevnost mikrospoje s povrchovými

vrstvami je větší než pevnost

podpovrchových vrstev

Opotřebení ploch vačky



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Opakovací otázky

- Které prvky jsou elektropozitivní a elektronegovní? Jaké mají vlastnosti?
- Které prvky jsou karbidotvorné?
- Jaké jsou nejčastější typy krystalických mřížek u kovů?
- Jaké jsou základní typy tuhých roztoků?
- Co je to překrystalizace a rekrystalizace?
- Co vyjadřuje 1 promile a 1ppm?
- Jaké jsou interakce plynů s povrchy?
- Co je Beilbyho vrstva? Jak vzniká a jakou má strukturu?
- Co je to alotropie a polymorfie?
- Co je amplituda a frekvence?
- Co je mez únavy, jak jí určujeme?
- Jak se hodnotí drsnost povrchu?



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY