

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA FAKULTA STROJNÍ



VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ

KOROZE A OPOTŘEBENÍ

doc. Ing. Halama Radim, Ph.D.
Ing. František Fojtík, Ph.D.
Ing. Martin Fusek, Ph.D.
Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D.
Dr. Ing. Ludmila Adámková

Ostrava 2013

© doc. Ing. Halama Radim, Ph.D., Ing. František Fojtík, Ph.D., Ing. Martin Fusek, Ph.D., Ing.
Jaroslav Rojíček, Ph.D., Dr. Ing. Ludmila Adámková

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3027-8



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	KOROZE A OPOTŘEBENÍ.....	3
1.1	Koroze	4
1.1.1	Chemická koroze kovů.....	4
1.1.2	Elektrochemická koroze kovů	6
1.1.3	Korozní praskání a korozní únava	8
1.1.4	Omezení působení korozního napadení.....	8
1.2	Opotřebení	8
1.2.1	Adhezivní opotřebení	11
1.2.2	Abrazivní opotřebení.....	12
1.2.3	Erozivní opotřebení.....	12
1.2.4	Kavitační opotřebení.....	13
1.2.5	Vibrační opotřebení.....	13
1.2.6	Kontaktní únava	14
2	POUŽITÁ LITERATURA	17



1 KOROZE A OPOTŘEBENÍ



OBSAH KAPITOLY:

Chemická a elektrochemická koroze

Koroze pod napětím, korozní únava

Ochrana proti korozi

Tření, adhezivní a abrazivní opotřebení

Eroze, kavitace, únavové a vibrační opotřebení



MOTIVACE:

V této kapitole se budeme věnovat dvěma degradačním procesům, které se projevují postupným zeslabováním tloušťky materiálu – korozi a opotřebení. V prvním případě hraje hlavní roli okolní prostředí a strojař musí mít alespoň základní náhled na fyzikální podstatu jednotlivých případů koroze. Orientace v základních typech opotřebení funkčních povrchů součástí je pak pro praxi také velmi důležitá, neboť opotřebení je častou příčinou poruchových prostojů v praxi.



CÍL:

Chemická, elektrochemická koroze, korozní praskání, ochrana proti korozi.

Mechanismy opotřebení funkčních povrchů.



1.1 KOROZE

Části strojů a zařízení jsou v provozu často vystaveny chemickým vlivům okolního plynného nebo kapalného prostředí. Korozi rozumíme postupné chemické nebo fyzikálně-chemické znehodnocování materiálu za působení okolního prostředí. Chemická interakce materiálu a okolního prostředí výrazně znehodnocuje nejen povrch, ale také vnitřní strukturu materiálu (strukturní koroze – mezikrystalová či transkrystalová). Koroze obecně vede ke zhoršení lomových charakteristik, pevnostních a plastických vlastností materiálu.

Dle prostředí dělíme korozi na:

- a) Atmosférickou
- b) Půdní
- c) Korozi v chemických sloučeninách
- d) Korozi v horké páře

Podle procesů pak rozeznáváme:

- 1) *Chemickou korozi* - v el. nevodivých prostředích.
- 2) *Elektrochemickou korozi* - ve vodných roztocích elektrolytů, ve vodách, atmosféře a půdě.
- 3) *Korozní praskání* - důsledek koroze pod napětím (korozní únava – při únavovém namáhání, korozní praskání – při statickém namáhání).



Audio 1.1



Dle vnější formy máme korozi rovnoměrnou (napadení celého povrchu součásti) a nerovnoměrnou (koroze bodová, důlková, nožová, nitková, selektivní,...).

1.1.1 Chemická koroze kovů

- probíhá v elektricky nevodivých prostředích, např. v nevodných kapalinách, suchých plynech (oxidační či redukční chemickou reakcí).

Při působení O₂, CO₂, nebo SO₂ probíhá na povrchu oxidační reakce – povrch se potahuje vrstvou kysličníku. **Oxidační reakce** je podmíněna dostatečným přísunem plynu k povrchu kovu, adsorbci plynu, disociací molekuly plynu za vzniku atomů kyslíku a jeho rozpouštěním v kovu až do nasycení.

Při oxidaci ztrácí kov své valenční elektrony dle rovnice



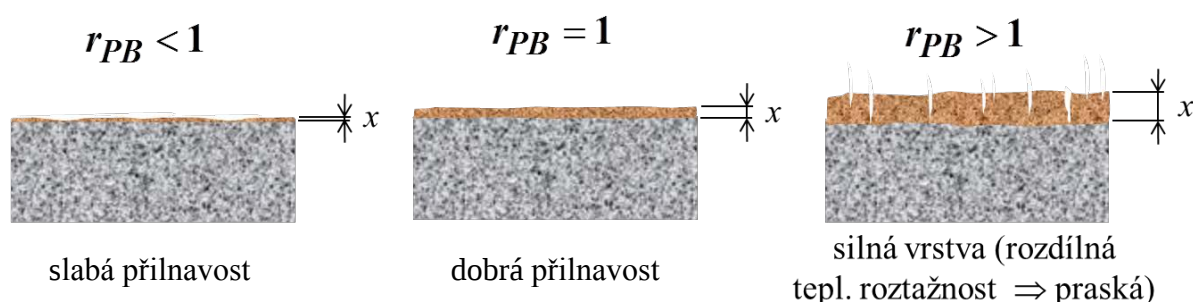
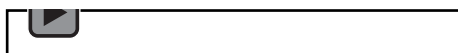
kde Me^{n+} je n -mocný kationt kovu, který se pak slučuje s atomem kyslíku za vzniku oxidu kovu. Náchylnost k oxidaci je dána kompaktností povrchové vrstvy oxidu kovu, která je dána *Pilling – Betworthovým* číslem

$$r_{PB} = \frac{V_0}{V_{Me}} \quad (10.2)$$

kde V_0 je podíl molekulárního objemu oxidu a V_{Me} atomární objem kovu. Jestliže je *Pilling – Betworthovo* přibližně rovno 1 ($r_{PB} = 1$), na povrchu kovu vzniká souvislá ochranná vrstva oxidu kovu, která zamezuje dalšímu průběhu oxidačního děje. Charakter oxidické vrstvy dle velikosti *Pilling – Betworthova* čísla je zřejmý z obr. 1. Hodnoty *Pilling – Betworthova* čísla pro vybrané kovy a vznikající oxidy kovů je uvedeno v tab. 1.



Audio 1.2



Obrázek 1 Vliv Pilling Betworthova čísla na soudržnost oxidické vrstvy

kov	Oxid	V_0/V_{Me}
K	K_2O	0,45
Mg	MgO	0,81
Al	Al_2O_3	1,28
Pb	PbO	1,31
Cu	Cu_2O	1,64
Mo	MoO_3	3,3

Tab. 1 Pilling Betworthovo číslo vybraných kovů

Je-li $r_{PB} \geq 1$, pak tloušťka vrstvy s rostoucím časem vzrůstá. Závislost tloušťky vrstvy x na čase bývá většinou nelineární a lze ji často popsat vztahem

$$x^m = k_p t \quad (10.3)$$

kde k_p je konstanta a m je exponent ($m=1$ až 3).

V redukčních plynech (nejčastěji obsahují volný nebo vázaný vodík, vyvolávají ji např. H_2 , N_2 , CO , NH_3 nebo H_2S) může být důsledkem interakce změna chemického složení materiálu, oduhličením, vodíkové zkřehnutí nebo vznik dutin a vnitřních trhlin, které mohou negativně



ovlivnit únosnost součástí. S vodíkovým zkřehnutím se nejčastěji potýkáme u ocelí, avšak za normální teploty až při vysokých tlacích (nad 200MPa). Vodík se hromadí v trhlinách, pórech, na fázových rozhraních, snižuje povrchovou energii hranic zrn, což vede k výraznému snížení lomové houževnatosti oceli.



Audio 1.3



Koroze v nevodných roztocích (kapalných plynech, bezvodém alkoholu nebo v petroleji) za normálních podmínek často není nebezpečná, podobně jako oxidace či redukce. Např. na ocelových částech se při kontaktu s naftou (chemická reakce se sirnými sloučeninami) vytvoří tenká ochranná vrstva, která výrazně brzdí korozní proces.

1.1.2 Elektrochemická koroze kovů

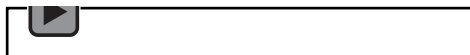
- může nastat při interakci s plynem, v nichž je obsaženo byť jen malé množství vody (nejčastější je u ocelových částí při atmosférické vlhkosti), nebo přímo ve vodných roztocích kyselin, zásad a solí. Mechanismus elektrochemické koroze v sobě zahrnuje dvě reakce. První je oxidace (rozpuštění kovu), např.



druhou je depolarizační katodová reakce, při které dochází k redukci některé oxidační složky roztoku, tj. k vylučování vodíku (koroze s vodíkovou depolarizací) nebo kyslíku (koroze s kyslíkovou depolarizací). Obě reakce se vzájemně podmiňují a musí tedy probíhat současně, pokud kovem neprotéká el. proud. Spojením dvou různě ušlechtilých kovů v korozním prostředí vzniká **korozní makročlánek** (rozpuští se ten méně ušlechtilý – anodová reakce). V materiálovém inženýrství se setkáváme také s pojmem **korozní mikročlánek**, ten ale vzniká nestejnorodostí kovů a slitin v chemickém složení a struktuře.



Audio 1.4



Hmotnost kovu rozpuštěného na jednotkové ploše je dána *Faradayovým zákonem*

$$m = \frac{M_{Me} \cdot i \cdot t}{n \cdot F} \quad (10.5)$$

Kde: M_{Me} je molová hmotnost kovu, n je počet vyměněných elektronů v reakci, $F=9,65 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ je Faradayova konstanta, i je hustota korozního proudu [$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$] a t je čas.



Elektromotorické napětí je dáno *Nerstnovým vztahem*

$$U = E_0^k - E_0^a + \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{C_k^{n_k}}{C_a^{n_a}} \right) \quad (10.6)$$

Kde: E_0^k, E_0^a - standardní elektrochem. potenciál anody a katody

C_k, C_a - koncentrace iontů kovu (kat. a anody) v elektrolytu

n_k, n_a - mocenství kovových iontů

R - univerzální plynová konstanta

T – teplota

Korozní odolnost a elektrochemická ušlechtilost jsou konfrontovány pro jednotlivé kovy v tab. 2.

Tab. 2 Elektrochemická ušlechtilost a korozní odolnost kovů ($T=25^\circ\text{C}$)

Korozní ušlechtilost		Korozní odolnost
E_0 [mV]	kov	Kov
+1,5	Au	Au
+1,2	Pt	Pt
+0,987	Pd	Pd
+0,799	Ag	Zr
+0,337	Cu	Ti
-0,126	Pb	Ag
-0,136	Sn	Mo
-0,20	Mo	Cr
-0,25	Ni	Cu
-0,403	Cd	Ni
-0,440	Fe	Pb
-0,740	Cr	Al
-0,763	Zn	Sn
-1,18	Mn	Fe
-1,53	Zr	Cd
-1,63	Ti	Zn
-1,66	Al	Mg
-2,37	Mg	Mn



1.1.3 Korozní praskání a korozní únava

Koroze pod napětím bývá intenzivnější, šíření trhliny rychlejší a doba do lomu kratší, než kdyby působily oba vlivy na materiál odděleně (důvodem je *opakované* porušování pasivační vrstvy na povrchu lomových ploch v blízkosti kořene trhliny).

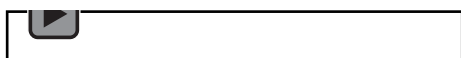
Dle velikosti faktoru intenzity napětí K_I rozeznáváme:

- interkrytalické korozní praskání – pro nízké hodnoty K_I
- transkrytalické šíření trhliny – pro vyšších hodnoty K_I
- tvárné šíření trhliny – pro vysoké hodnoty K_I

Při časově proměnlivém zatěžování mluvíme o korozní únavě. Mechanismus šíření trhliny je stejný jako u korozního praskání.



Audio 1.5



1.1.4 Omezení působení korozního napadení

- Volba vhodného konstrukčního materiálu
- Změna vlastností korozního prostředí (voda PH=0)
- Úprava konstrukce a izolace (podložky)
- Využití způsobu elektrochemické ochrany zařízení a staveb
- Použití ochranného povlaku, nejčastěji:
 - jiným kovem
 - anorganické nátěrové hmoty
 - organické nátěrové hmoty



Audio 1.6



1.2 OPOTŘEBENÍ

Opotřebení chápeme jako nežádoucí změnu povrchu nebo rozměrů způsobenou vzájemnou interakcí funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a média. Odhaduje se, že 50 až 80% poruchových prostojů je zapříčiněno právě opotřebením strojních součástí.

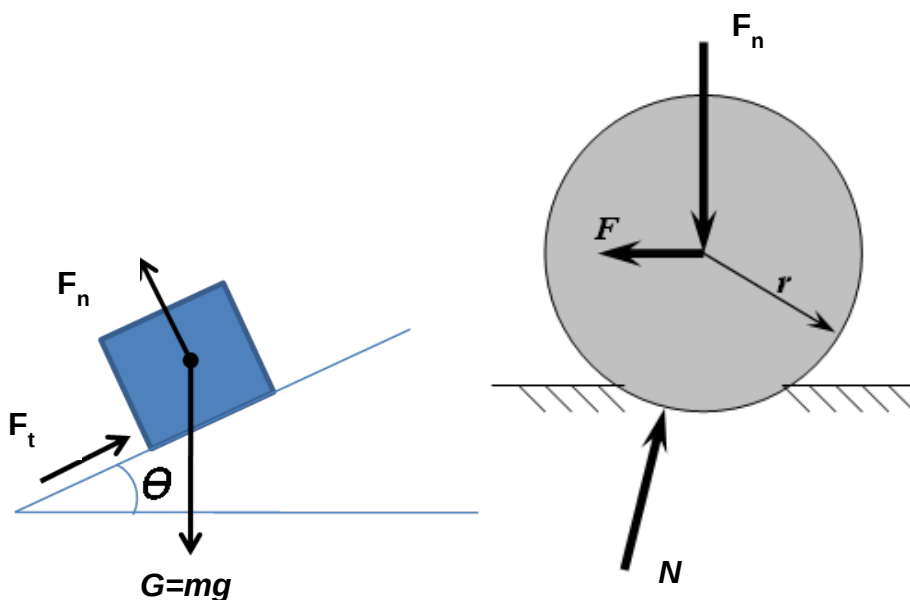
K opotřebení se velmi silně váže pojem tření. Připomeňme tedy alespoň základní pojmy ze statiky tuhých těles. Při relativním pohybu dvou těles vzniká v oblasti styku povrchů silový odpor F_t [N], který se nazývá *třecí silou* nebo také *třením*. Je kolmý na normálovou sílu F_n [N] a vyjadřuje se vztahem



$$F_t = \nu F_n \quad (10.7)$$

kde ν je součinitel tření, který se dle charakteru pohybu nazývá součinitelem

- a) klzného (smykového) tření (obr. 2 vlevo)
- b) valivého tření

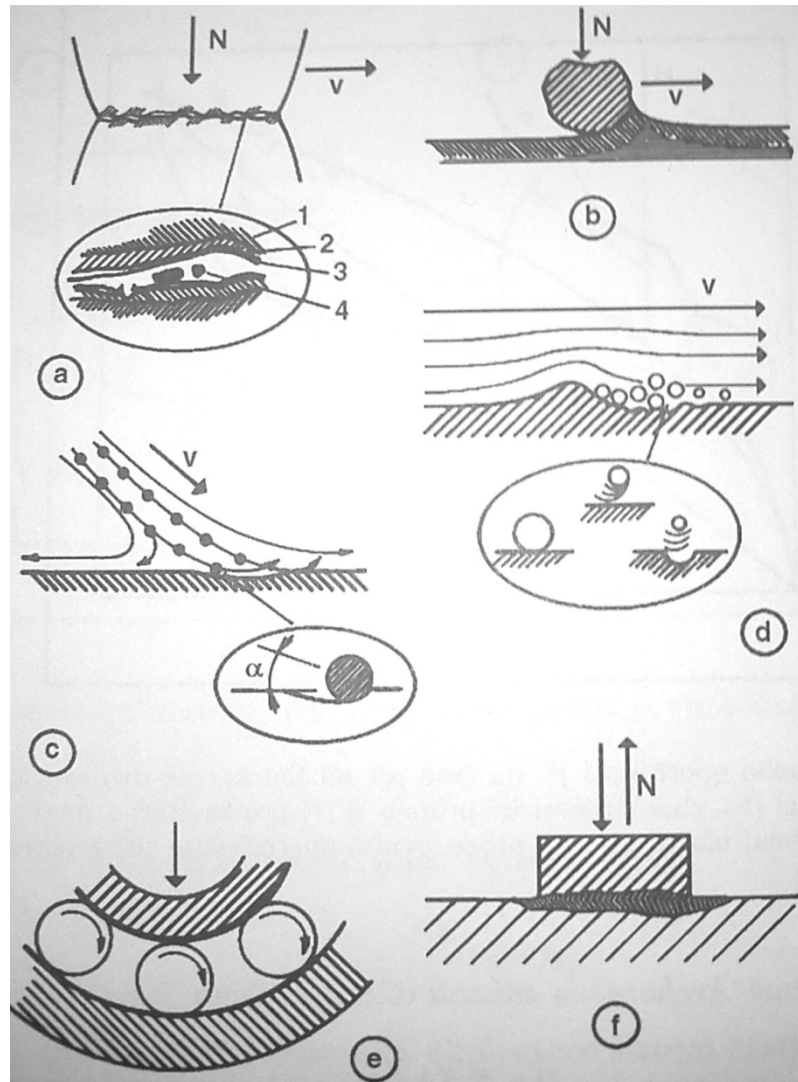


Obrázek 2 Smykové a valivé tření

Dle mechanismu opotřebení rozlišujeme šest základních typů opotřebení (obr. 3):

- a) Adhezivní
- b) Abrazivní
- c) Erozivní
- d) Kavitační
- e) Únavové
- f) Vibrační



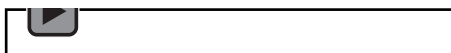


Obrázek 3 Základní typy opotřebení

Opotřebení se hodnotí *délkovým* W_l [μm] *objemovým* W_V [mm^3] či *hmotnostním otěrem* W_h [mg].



Audio 1.7

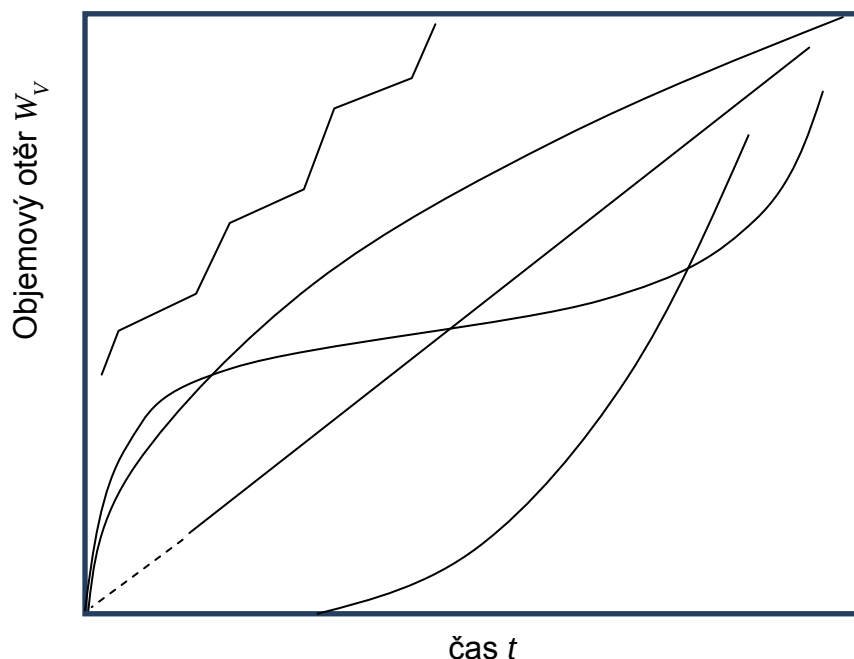


Rychlost otěru je pak definována časovou derivací otěru:

$$w_i = \frac{dW_i}{dt}, \quad i = l, V, h \quad (10.8)$$

Charakter opotřebení je různý. Nejobvyklejší případy jsou uvedeny na obr. 3.





Obrázek 4 Typické průběhy opotřebení funkčního povrchu

1.2.1 Adhezivní opotřebení

Příčinou *adhezivního opotřebení* je nerovnost funkčních povrchů.

Ke styku při normálové síle F_n dochází v menší ploše než je kontaktní plocha A_n , tzv. skutečné ploše

$$A_r = A_n N_n \quad (10.9)$$

kde N_n je normalizovaná tlaková síla definovaná vztahem

$$N_n = \frac{F_n}{A_n H} \quad (10.10)$$

kde H je tvrdost podložky v Pa.

V případě lineárního opotřebení se uplatňuje *Archardův zákon*

$$W_n = \frac{W_v}{A_n} = k_A N_n \quad (10.11)$$

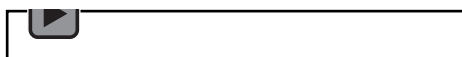
kde k_A je *Archardova konstanta* adhezivního opotřebení, jenž je bezrozměrná. Hodnota Archardovy konstanty závisí na relativní rychlosti funkčních povrchů, ale také na mechanismu adhezivního opotřebení:



1. Při nízkých rychlostech se opotřebení uskutečňuje *plastizací* vrstvy a postupnou *delaminací* (vyčerpání schopnosti plastické deformace).
2. Při vyšších relativních rychlostech povrchů dochází z důvodu zvýšení teploty i k *oxidačním jevům* a rychlost adhezivního opotřebení se zvyšuje.
3. Při vysokých rychlostech a vysokých hodnotách normalizované tlakové síly se opotřebení realizuje *natavením povrchových vrstev* či dokonce *zadřením*, způsobeným vznikem mikrospojů.



Audio 1.8



1.2.2 Abrazivní opotřebení

Při abrazi dochází k oddělování částic z funkčního povrchu účinkem působení tvrdého a drsného povrchu druhého tělesa nebo účinkem tvrdých částic.

Objemový otěr se při abrazi projevuje škrábáním a rýhováním funkčního povrchu.

Archardův zákon (lineární opotřebení)

$$W_n = k_{ab} N_n \quad (10.12)$$

kde k_{ab} je *Archardova konstanta* abrazivního opotřebení.

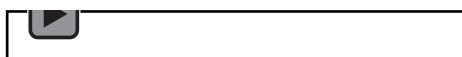
Objemový otěr závisí kromě působící tlakové síly a relativní rychlosti funkčního povrchu a abraziva také na podílu tvrdosti abraziva H_a a tvrdosti materiálu funkční části H_0 , tedy

$$W_v = K \cdot \log \frac{H_a}{H_0} \quad (10.13)$$

kde K je pro neměnné podmínky abrazivního opotřebení konstanta. Odolnost proti abrazi lze zvýšit například legováním nebo tepelným zpracováním. Legování ocelí – Cr, W, V (karbidotvorné prvky – vzniká tvrdý martenzit).



Audio 1.9



1.2.3 Erozivní opotřebení

Eroze vzniká interakcí tuhých částic, unášených kapalným nebo plyným médiem, a funkčního povrchu strojních částí.

Erozivní opotřebení se projevuje často nerovnoměrným vymíláním povrchových vrstev a rýhováním způsobeným turbulencí proudícího média.



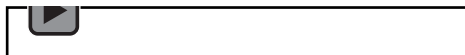
Objemový otěr závisí na úhlu dopadu α na povrch (obr.3c) a kinetické energii částic

$$W_v = \text{konst} \cdot mv^2 \cos^2 \alpha \quad (10.14)$$

kde m je hmotnost dopadající částice.



Audio 1.10



1.2.4 Kavitační opotřebení

Kavitace vzniká z důvodu opakovaného vzniku (imploze) a zanikání bublin v kapalině, která je s funkčním povrchem ve styku, dochází ke vzniku hydrodynamických rázů a k lokalizované plastické deformaci povrchových vrstev, vzniku mikrotrhlin a následnému oddělování materiálu.

K posouzení náchylnosti ke kavitaci se zavádí tzv. *Thomův součinitel*

$$Th = \frac{p - p_p}{0.5 \rho v^2} \quad (10.15)$$

kde p , r , v je tlak, měrná hmotnost, respektive rychlost proudící kapaliny a p_p je tlak nasycených par kapaliny při dané teplotě. ***Čím je Thomův součinitel vyšší, tím menší je pravděpodobnost vzniku kavitace.***

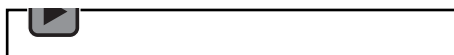
Kavitací bývají postiženy lopatky oběžných kol čerpadel, vodních turbín, konstrukční prvky hydraulických zařízení, míchací prvky, atd.

Kavitaci lze eliminovat:

1. Zlepšením konstrukce.
2. Zajištěním běhu stroje v navrženém režimu.
3. Volbou vhodného materiálu (bronzi, mosazi).



Audio 1.11



1.2.5 Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení neboli fretting vzniká na stykových plochách součástí konajících vzájemný tangenciální kmitavý pohyb při působení normálových sil.



Vyskytuje se u:

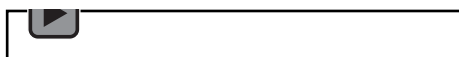
- hybných uložení (valivá ložiska, čepy, hřídele,...)
- zdánlivě nehybných uložení (lisované spoje, šrouby, nýty,...)

U *vibračního opotřebení* se výrazně uplatňuje také *korozní působení* okolního prostředí. U kovů začíná vibrační opotřebení většinou oxidací **adhezí** vzniklých oxidačních částic, které následně působením normálových sil způsobují **abrazi** funkčního povrchu (adheze-oxidace-abraze).

Vznikající *důlky a trhliny* výrazně snižují mez únavy!



Audio 1.12



Minimální amplituda kmitavého pohybu je $\sim 1\text{-}10\mu\text{m}$.

1.2.6 Kontaktní únava

Únavové opotřebení vzniká u funkčního povrchu součástí, z nichž alespoň jedna koná valivý pohyb, a to v důsledku působení normálových a smykových kontaktních sil, někdy se používá pojem *valivá kontaktní únava* (angl. rolling contact fatigue).

Vyskytuje se na jízdní ploše kolejnic či železničních dvojkolí, u valivých ložisek, ozubených kol, apod.

U jednotlivých defektů může být mechanismus kontaktní únavy odlišný (vysokocyklová únava, nízkocyklová únava či cyklické tečení-ratcheting, tepelně indukované trhliny...).

Opotřebení se zkoumá v laboratorních podmínkách na speciálních zkušebních strojích, např. zařízení TUORS na VŠB-TU Ostrava (obr. 5).



Obrázek 5 Zkušební zařízení TUORS pro výzkum kontaktní únavy

Při vyšších trakčních koeficientech f či vyšších zátěžných tlacích může dojít k akumulaci plastických deformací, k tzv. ratchetingu.

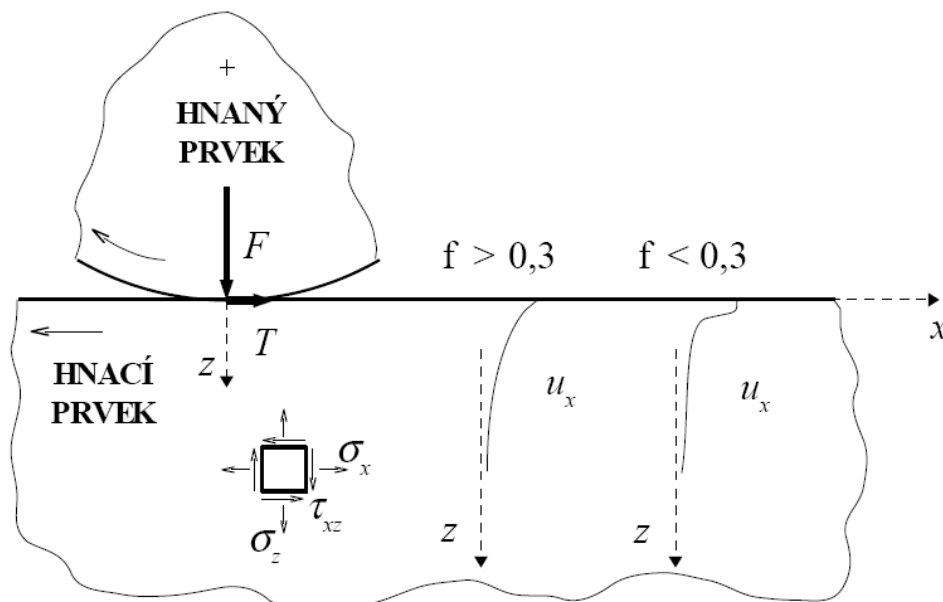
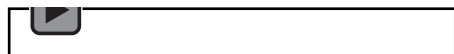
Numericky i experimentálně bylo ověřeno, že při valivém kontaktu s prokluzem s trakčním koeficientem $f > 0.3$ dochází k největší akumulaci deformace (ratchetingu) na povrchu, při



nižších hodnotách je kritické místo pod povrchem, viz profil deformované vrstvy na obr. 6. Podobně je tomu s charakterem vad.

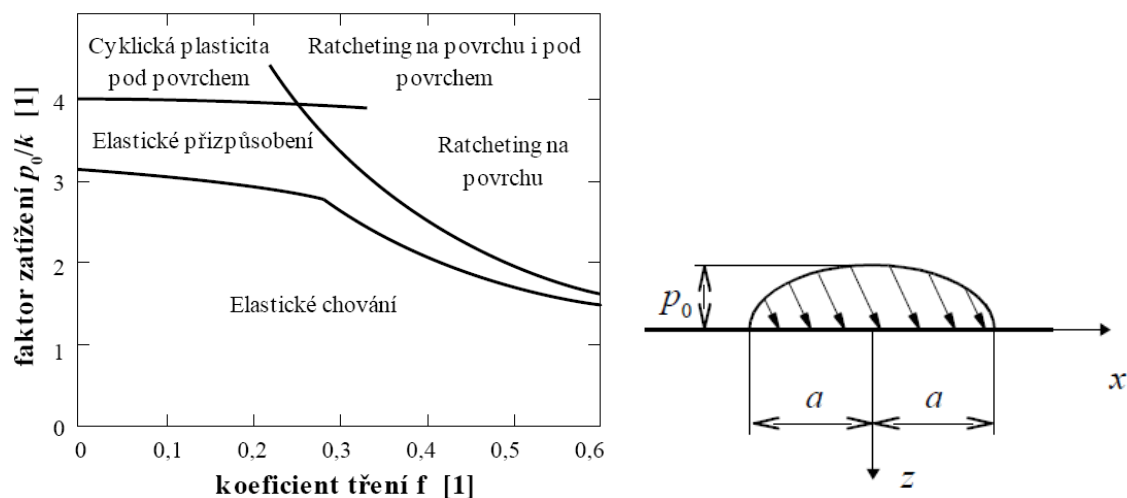


Audio 1.13



Obrázek 6 Souvislost ratchetingu povrchové vrstvy s trakčním koeficientem

K odhadu chování materiálu v povrchové vrstvě těles podrobených valivému kontaktu se používají tzv. mapy přizpůsobení (shakedown maps). K jejich stanovení se využívá většinou Hertzovy teorie kontaktu těles, která pro případ liniového styku (např. dva válce) vede k parabolickému průběhu normálového kontaktního tlaku ve styčné ploše. V mapě přizpůsobení pak vystupuje faktor zatížení jakožto poměr maximální hodnoty kontaktního tlaku p_0 a mezi kluzu ve smyku k , viz obr.7. Za bezpečnou oblast lze považovat oblast elastického chování. Oblast elastického přizpůsobení vede k poškození povrchové vrstvy mechanismem vysokocyklové únavy, zbývající oblasti se pak týkají mechanismu nízkocyklové únavy respektive ratchetingu.



Obrázek 7 Mapa přizpůsobení pro liniový kontakt (vlevo) a uvažovaný průběh kontaktního tlaku dle Hertze

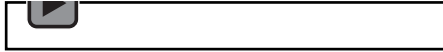


U bodového kontaktu je faktor zatížení navíc funkcí geometrie kontaktních těles, nikoliv jen maximálního fiktivního elastického tlaku p_0 a meze kluzu ve smyku k . Navíc mohou třecí síly působit v příčném i podélném směru (ve směru valení).

V případě, že styčné plochy jsou mazány, může dojít také ke vzniku důlků v kontaktní ploše, tzv. pittingu (ložiska, železniční kola, ozubená kola,...).



Audio 1.14



2 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Strnadel, B.: Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství, VŠB – TU Ostrava, 1998, 334 s.
- [2] Strnadel, B.: Nauka o materiálu, skripta FS VŠB – TU Ostrava, 2004, 187s.
- [3] HALAMA, R. *Řešení elastoplastické napjatosti v bodovém styku dvou zakřivených těles pomocí MKP: doktorská disertace*. Ostrava: VŠB-TU Fakulta strojní, 2005. 130 s., 3 příl.

Internet

- [4] University of Cambridge. *Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS)*. Animace pro podporu výuky Nauky o materiálu (Materials Science), 2010. <http://www.doitpoms.ac.uk/index.html>

