

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**TECHNICKÁ FAKULTA**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**

**Faktory ovlivňující intenzitu opotřebení kovových materiálů**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Autor práce: Martin Bureš

**PRAHA 2011**

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Akademický rok 2009/2010

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Martin Bureš**

obor Silniční a městská automobilová doprava

Vedoucí katedry Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu ČZU v Praze  
čl. 16 určuje tuto bakalářskou práci.

Název práce: **Faktory ovlivňující intenzitu opotřebení  
kovových materiálů.**

### Osnova bakalářské práce:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Druhy opotřebení a jejich charakteristika
4. Přehled faktorů ovlivňujících intenzitu opotřebení
5. Závěr
6. Seznam literatury
7. Přílohy

Rozsah hlavní textové části: 30 - 40 stran

Doporučené zdroje:

- [1] Friction and Wear Testing. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1987. pp. 186.
- [2] IGRAMOV, U. – MACHKAMOV, K. CH.: Berechnung und Bewertung des abrasiven Verschleisses. Berlin, Technik 1987. 132 s.
- [3] RABINOWICZ, E.: Friction and wear of materials. New York, Wiley 1965. 244 s.
- [4] TENENBAUM, M. M.: Iznosostojkost` konstrukcionnych materialov i detalej mašin při obrazivnom iznašivanii. Moskva, Mašinstrojenije 1966. 330 s.
- [5] VOCEL, M. - DUFEK, V. aj.: Tření a opotřebenění strojních součástí. Praha, SNTL 1976. 376 s.
- [6] časopisy: Strojárstvo - Strojřenství, Zváranie - Svařování, MM Průmyslové spektrum, Dělení spojování svařování materiálů, Technik.
- [7] ČSN 01 5050. Opotřebenění materiálu. Názvosloví. 1969.
- [8] ČSN 01 5084. Stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazivnímu opotřebenění na brusném plátně. 1974.
- [9] firemní literatura.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Milan Brožek, CSc.**

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání bakalářské práce: duben 2011



Vedoucí katedry





Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

**Cíl práce:**

- shromáždit literární podklady o jednotlivých faktorech ovlivňujících intenzitu opotřebení kovových materiálů.

**Metodika:**

- současný stav řešeného problému (literární rešerše).
- závěry a přínos práce.

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením a za pomoci vedoucího bakalářské práce prof. Ing. Milana Brožka, CSc. a použil jen pramenů citovaných v příložené bibliografii.

V Praze dne 8.4.2011

Martin Bureš

## **Poděkování**

Děkuji za věcné připomínky a odbornou pomoc, kterou mi při psaní bakalářské práce poskytl prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

**Abstrakt:** Cílem této bakalářské práce bylo shromáždit literární poznatky o jednotlivých faktorech ovlivňujících intenzitu opotřebení kovových materiálů. V první části práce jsou uvedeny jednotlivé druhy opotřebení, a to adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační opotřebení doplněné o jejich charakteristiky. Druhá část práce shrnuje nejdůležitější faktory ovlivňující intenzitu výše uvedených typů opotřebení. V praxi se tyto faktory většinou neprojevují samostatně. Velmi často se vzájemně kombinují. Tato část práce popisuje podstatu těchto faktorů a na základě výsledků některých publikovaných experimentálních zjištění ukazuje, jaké jsou jejich důsledky.

**Klíčová slova:** opotřebení kovů, abraze, adheze, kavitace

### **Factors influence the metallic materials wear rate.**

**Summary:** The aim of this thesis was to collect pieces of knowledge about particular factors which affect intensity of metal material wear. There are mentioned particular kinds of wear, namely adhesive, abrasive, erosive, cavitation, fatigue and vibratory one with their characteristics in the first part of this thesis. The second part of this work completes the most important factors affect of the kinds of wear the above. In practice this factors are not mostly individual. Very often they combine one another. This part of the work describes their principle and on the basis of any published experimental results it exposes effects of wear.

**Key words:** metal wear, adhesive, abrasive, cavitation

# Obsah

1 Úvod .....	1
2 Druhy opotřebení a jejich charakteristika.....	2
2.1 Adhezivní opotřebení .....	3
2.2 Abrazivní opotřebení .....	5
2.3 Erozivní opotřebení .....	7
2.4 Kavitační opotřebení.....	8
2.5 Únavové opotřebení.....	10
2.6 Vibrační opotřebení .....	13
3 Přehled faktorů ovlivňujících intenzitu opotřebení .....	15
3.1 Vliv různých faktorů na adhezivní opotřebení .....	15
3.1.1 Vliv zatížení.....	15
3.1.2 Vliv tepelného režimu .....	16
3.1.3 Vliv mazání .....	16
3.1.4 Vliv použitých materiálů .....	17
3.1.5 Vliv okolního prostředí.....	18
3.2 Vliv různých faktorů na abrazivní opotřebení.....	18
3.2.1 Kritická velikost abrazivních částic.....	18
3.2.2 Tvar abrazivních částic .....	19
3.2.3 Pevnost abrazivních částic.....	20
3.2.4 Vliv kluzné rychlosti na abrazivní opotřebení.....	20
3.2.5 Vliv tvrdosti abraziva na opotřebení .....	21
3.3 Vliv různých faktorů na erozivní opotřebení.....	23
3.3.1 Kritická velikost zrna.....	23
3.3.2 Vliv rychlosti dopadu částic na intenzitu opotřebení .....	23
3.3.3 Vliv chemického působení média.....	24
3.3.4 Závislost na bodu tání materiálu.....	25
3.4 Vliv různých faktorů na kavitační opotřebení .....	25
3.4.1 Vliv obsahu plynů v kapalině .....	25
3.4.2 Vliv teploty a tlaku .....	26
3.4.3 Vliv povrchového napětí a viskozity kapaliny .....	26
3.5 Vliv různých faktorů na únavové opotřebení .....	27
3.5.1 Tvrdost povrchové vrstvy a kontaktní únosnost.....	27



3.5.2 Závislost na drsnosti povrchu .....	28
3.5.3 Vliv vměstků a nečistot .....	28
3.6 Vliv různých faktorů na vibrační opotřebení.....	29
3.6.1 Vliv amplitudy pohybu .....	29
3.6.2 Vliv kmitočtu.....	29
3.6.3 Vliv měrného tlaku .....	29
3.6.4 Vliv času .....	30
3.6.5 Vliv vlastností materiálu.....	30
3.6.6 Vliv prostředí.....	31
4 Závěr.....	32
5 Seznam literatury.....	33

# 1 Úvod

Problém opotřebení materiálů nepochybně provází člověka již od dob, kdy poprvé začal používat nástroje a jednoduché stroje.

Předčasné opotřebení strojů a jejich součástí negativně ovlivňuje jejich funkci a může vést k jejich zbytečnému vyřazení z provozu. Abychom zamezili nebo alespoň snížili opotřebení, musíme se vyvarovat vlivům, které opotřebení způsobují. Proto je nutné co nejvíce poznat podstatu opotřebení a podmínky, za kterých k němu dochází.

## 2 Druhy opotřebení a jejich charakteristika

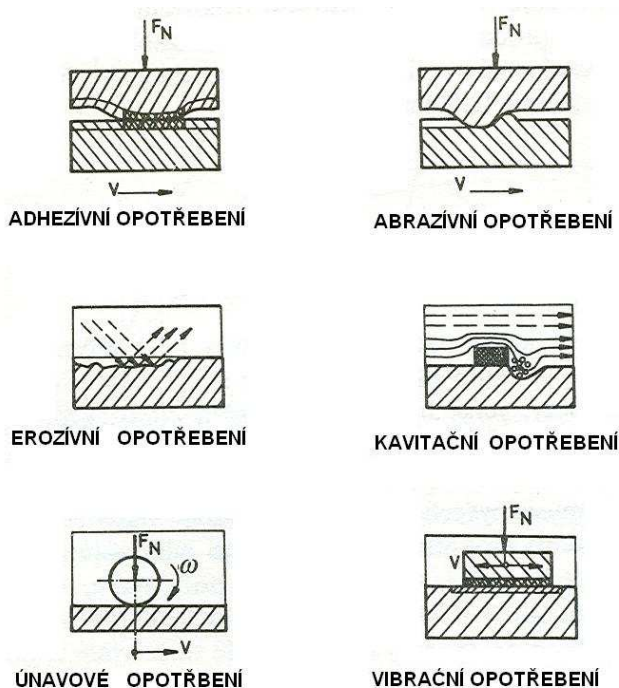
Opotřebení je podle definice nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a media, které opotřebení vyvolává. Projevuje se jako odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z funkčního povrchu mechanickými účinky, případně doprovázenými i jinými vlivy (např. chemickými, elektrochemickými nebo elektrickými) [12].

Opotřebení způsobuje porušení zhotovených počátečních rozměrů výrobků. Technologické jevy porušení materiálu při konečném povrchovém opracování, jako například broušení, leštění, lapování apod., jsou v podstatě shodné s procesy opotřebení, ale liší se tím, že jsou záměrné a žádoucí a jsou výsledkem řízeného procesu [6].

B.I. Kostěckij ve své práci [2] rozděluje 4 druhy opotřebení: oxidační, tepelné, brusné, d'ubkovité.

V současné technické praxi se rozděluje šest základních druhů opotřebení kovových materiálů, jak bylo stanoveno v ČSN 01 5050 [11]: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové, vibrační.

Obr. 1 Symbolické znázornění jednotlivých druhů opotřebení [3]

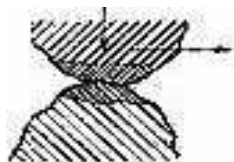


To jsou základní případy opotřebení, které se v technické praxi obvykle kombinují a uplatňují se další vlivy, takže vzniká řada variant [15].

## 2.1 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení je charakteristické oddělováním a přemísťováním částic kovu mezi dvěma stykovými plochami, kdy v důsledku relativního pohybu funkčních povrchů dochází k porušování povrchových vrstev materiálů. Ke styku povrchů dochází prostřednictvím velkého množství kontaktních plošek za spolupůsobení velkých sil, vznikají plastické deformace a vytváří se mikrospoje, které jsou vzápětí rozrušovány. Vznik mikrospojů je doprovázen lokálním ohřevem materiálů a vzniká vhodné prostředí pro chemickou reakci kovu s okolním prostředím, která může dále zvýšit rychlost opotřebení [16].

Obr. 2 Schéma mechanismu adhezivního opotřebení [16]



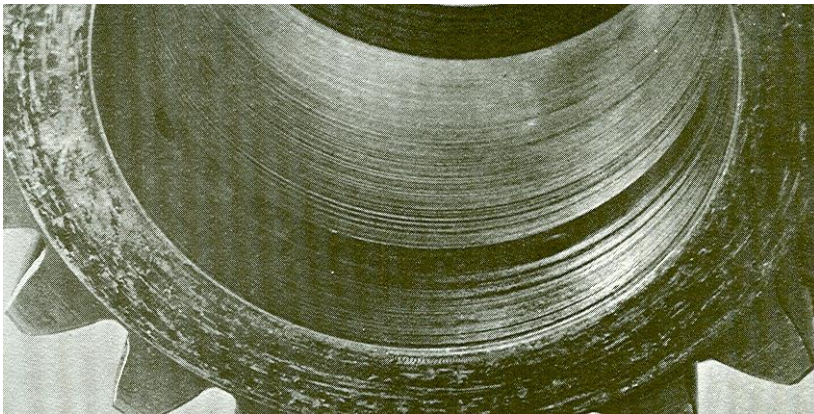
Při adhezivním opotřebení může v praxi dojít až ke dvěma krajním případům, a to od mírného až po intenzivní.

V případě tzv. mírného opotřebení jde o děj, při němž rychlost vzniku oxidických ochranných vrstev na povrchu kovu je větší než rychlost jejich porušování při vzájemném relativním pohybu funkčních povrchů. V takovém případě působí tyto vrstvy jako ochrana povrchů, brání vzniku adhezních spojů, které jsou méně četné a méně dokonalé, takže při jejich následném porušování nedochází k významnějšímu přenosu materiálu mezi povrchy. Takto mírně opotřebovávané povrchy jsou vyhlazené, lesklé, bez rýh a stop po zadírání. Obdobně se na vzhledu adhezivně opotřebovaného povrchu projevuje i přítomnost maziva mezi povrchy, které se třou [1, 3, 15].

V druhém případě jde o výrazné a relativně hluboké rozrušování funkčních povrchů, provázené vznikem četných částic, jejich oddělováním a přenosem mezi funkčními povrchy a velkými změnami funkčních povrchů následkem plastické deformace mikrooblastí a makrooblastí [1].

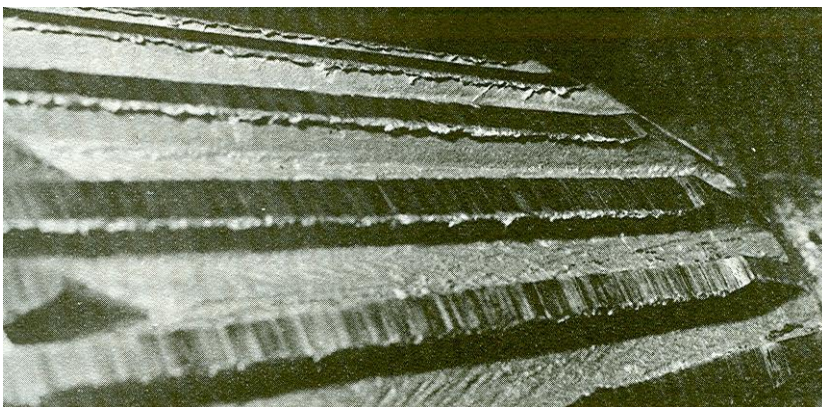
Takto intenzívně opotřebovávané povrchy jsou rýhované, rozbrázděné, v pokročilejším stadiu jsou i pouhým okem viditelné částice materiálu, ulpělé na povrchu jedné nebo obou součástí, které jsou spolu ve styku. Velmi silně vzrůstá odpor proti pohybu a obvykle dojde k úplnému zablokování (zadření). Příčiny tohoto stavu jsou různé, velmi často jde o následek selhání mazání[15].

*Obr. 3 Adhezivní opotřebení funkční plochy ozubeného kola [1]*

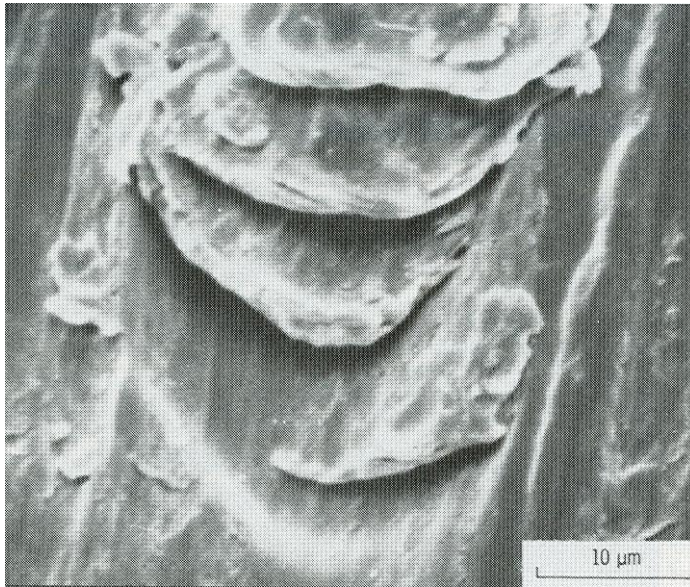


V praxi se adhezivní opotřebení vyskytuje např. při kontaktu kolo kolejového vozidla a kolejnice, dále u kluzných ložisek, čepů, při technologii lisování plechů - tažení [16].

*Obr. 4 Adhezivní opotřebení žeber kuželového rotoru papírenského rafinéru [1]*



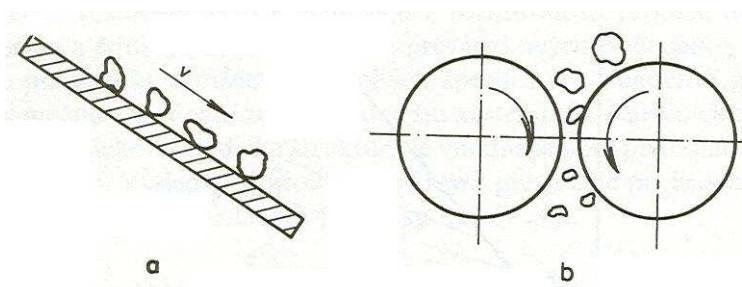
Obr. 5 Mikrosnímek adhezivního opotřebení [8]



## 2.2 Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení je charakteristické oddělováním částic z funkčního povrchu působením tvrdého a drsného povrchu druhého tělesa – abrazivních částic. Typickým projevem abrazivního opotřebení je vznik rýh na povrchu funkční plochy, případně funkčních ploch, pokud abrazivní částice vnikne mezi dvě pohybující se tělesa. Počet vzniklých rýh bude nepřímo úměrný velikosti abrazivní částice [3, 10, 16].

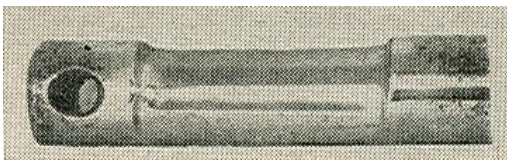
Obr. 6 Schéma mechanismu abrazivního opotřebení [3]



a - interakce dvou těles, b - interakce tří těles

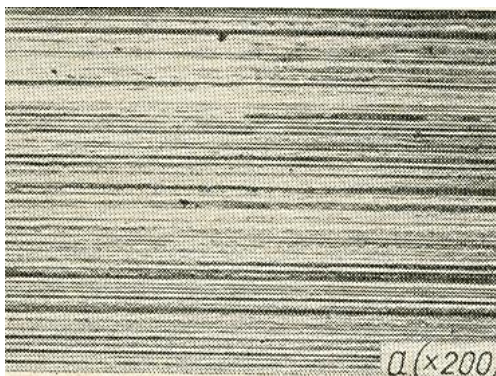
U abrazivního opotřebení rozlišujeme dva případy. První případ abrazivního opotřebení nastává při vzájemném silovém působení tvrdých, obvykle minerálních částic a funkčního povrchu součástí. Přitom dochází k oddělování a přemísťování částíček materiálů. Tvrdé částice mohou být volné nebo určitým způsobem vázané (např. v hornině, na brusném plátně). Druhý případ abrazivního opotřebení je vyvolán přítomností tvrdých částic mezi funkčními povrchy, které jsou v relativním pohybu. Vyskytuje se u kluzných dvojic, kde vnikají tvrdé nečistoty mezi nedostatečně utěsněné funkční povrchy. V procesu adhezivního opotřebení mohou též vznikat tvrdé částice otěru, které působí na jeden nebo oba kluzné povrchy abrazivně [13].

*Obr. 7 Abrazivně opotřebená součást [7]*



Uvádí se, že přes 50 % všech případů opotřebení strojů a strojních zařízení je způsobováno abrazí [10, 13]. Proto je nutné používat u strojů ucpávky, prachovky, zakrývání funkčních částí strojů, aby nevnikal mezi funkční plochy mikroprach.

*Obr. 8 Mikrofotografie Abrazivní opotřebení zvětšená 200x [7]*

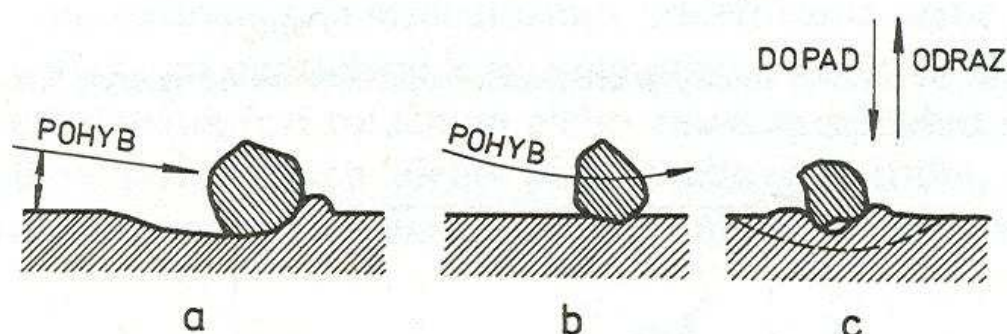


## 2.3 Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním funkčního povrchu, které může být vyvoláno:

- částicemi, nesenými proudem kapaliny (součásti čerpadel, vodních turbín, potrubí, armatur, trysek aj.)
- částicemi, nesenými proudem plynu (součásti ventilátorů, cyklonů, tryskačů, potrubí, armatur, práškovodů)
- proudem kapaliny, páry, kapek nebo plynu (parní armatury, části parních turbín, součásti plynových turbín. aj. ) [3, 4].

Obr. 9 Schéma mechanismu erozivního opotřebení [3]



a - částice nesené proudem plynu, b - částice nesené proudem kapaliny, c - částice nesené proudem kapaliny, kapek, páry anebo plynu

Pro erozivní opotřebení je jedním z typických projevů nerovnoměrné porušení funkčního povrchu a často jeho výrazné zvlnění. Je to způsobeno vlivem turbulence proudícího média, při níž mohou být oddělovány částice materiálu v určitých exponovaných místech i z nejnižších míst povrchu [1].



*Obr. 10 Erozivně opotřebená součást*



*Zdroj: [http://www.kentintrol.com/public/images/products/ss\\_fig11\\_large.jpg](http://www.kentintrol.com/public/images/products/ss_fig11_large.jpg)*

## **2.4 Kavitační opotřebení**

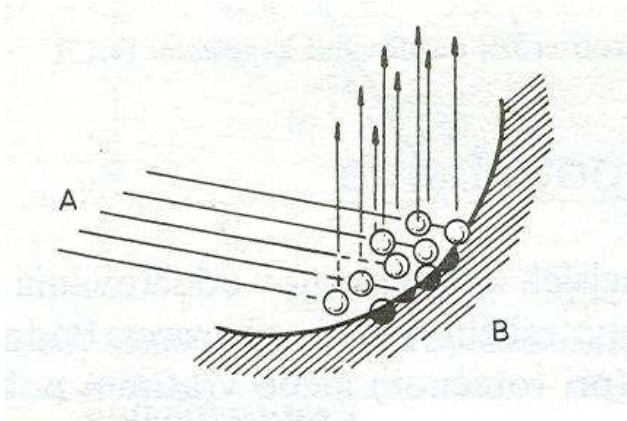
Kavitační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic z povrchu součástí v oblasti zanikání kavitačních dutin v kapalině [5].

Ke kavitaci dochází v proudící kapalině v místech, kde se zvyšuje rychlost proudění a důsledkem je snížení tlaku kapaliny. Objeví se kavitační bubliny vyplněné párou (plynem), které ulpí na povrchu kovu a zaniknou implozí. V okamžiku zániku - implozi kavitační bubliny uvnitř kapaliny vzniká rázová vlna, která působí na povrch kovu naprosto devastujícím účinkem [1, 5, 16].

Mnoho součástí pracuje v různých kapalinách, velmi často ve vodě. Voda je silně agresivní prostředí, které působí provozní potíže a poruchy v důsledku koroze, eroze a

kavitace. Kavitační opotřebení bývá často nesprávně považováno za důsledek koroze. Ke kavitačnímu opotřebení může docházet pouze tam, kde se vyskytuje kavitace, tj. dochází ke vzniku kavitačních dutin, jejichž zánik vyvolává hydrodynamické rázy. Rázy působí na povrch materiálu zcela analogicky jako kontaktní tlaky u opotřebení povrchovou únavou [5, 15].

*Obr. 11 Schéma mechanismu kavitačního opotřebení [3]*



A - proud tekutiny, B - povrch tělesa

S tímto druhem opotřebení se setkáváme např. ve vodních turbínách, čerpadlech, u součástí hydraulických systémů, ve vodovodech, v redukčních ventilech, v chladicích systémech pracujících s kapalinou, v pračkách, v tlakově mazaných ložiskách apod. [5, 15].

*Obr. 12 Kavitačně opotřebená součást*



*Zdroj: <http://getenecon.com/proven-solutions/pitting-corrosion.aspx>*

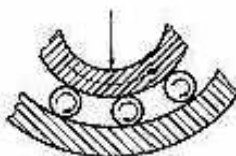
## **2.5 Únavové opotřebení**

Únavové opotřebení vzniká postupnou kumulací poruch v povrchové vrstvě funkčních ploch. Z postupně se rozšiřujících oblastí mikrotrhlin po jistém čase vznikají rozsáhlejší oblasti únavového opotřebení. Únavové poškození vzniká při cyklickém namáhání součástí. Pokud je namáhání pod mezí kluzu materiálu vzniká vysokocyklová únava, při namáhání nad mezí kluzu vzniká nízkocyklová únava [3, 15].

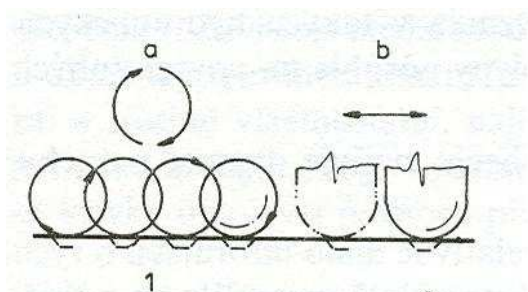
Nejčastější případy únavového opotřebení jsou známy u valivých ložisek, ozubených kol, železničních kol, zdvihátek ventilů i u jiných strojů pracujících s vibracemi nebo se silnými rázy [1].

Projevy únavového opotřebení při kontaktním namáhání součástí se mohou lišit. Často se objevuje poškození tvořením pittingu, vznikají jamky oblého tvaru na povrchu funkční plochy, typicky u ozubených kol. Ovšem u povrchů s vysokou tvrdostí (valivá ložiska nebo cementované součásti) mohou mít důlky i hranatý nebo protáhlý tvar. Na jejich vzniku se význačně podílí mazivo. Účinkem kontaktních tlaků vniká mazivo do povrchových trhlin a v důsledku dalšího pohybu součástí je v nich uzavíráno a jeho tlak se účinkem kontaktního namáhání zvyšuje. To přispívá k dalšímu šíření trhlinek a vede až ke vzniku zmíněných důlků [15].

*Obr. 13a Schéma mechanismu únavového opotřebení [16]*



*Obr. 13b Mechanismus únavového opotřebení [3]*



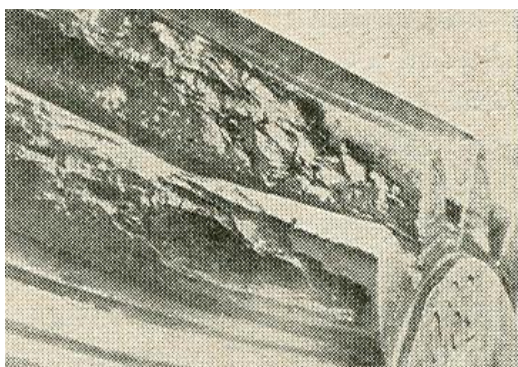
a – cyklický pohyb, b – vratný skluz

1 – zárodek opotřebení z povrchové anebo podpovrchové trhliny

Jiným projevem je vznik spalingu, dochází k odlupování tenké tvrzené povrchové vrstvy materiálu. Dochází k němu zejména u povrchově tvrzených součástí, při malých tloušťkách tvrzené vrstvy. Vysoké, opakující se kontaktní tlaky vyvolávají podpovrchová smyková napětí, která působí vznik podpovrchových trhlin. Později dochází k prolamování povrchové vrstvy a k jejímu odlupování [15, 16].

Únavové opotřebení, jako děj vázaný převážně na povrchové vrstvy materiálu, může iniciovat i únavové lomy, které zasáhnou část nebo celý průřez součásti [3].

Obr. 14 Únavově opotřebená součást [7]

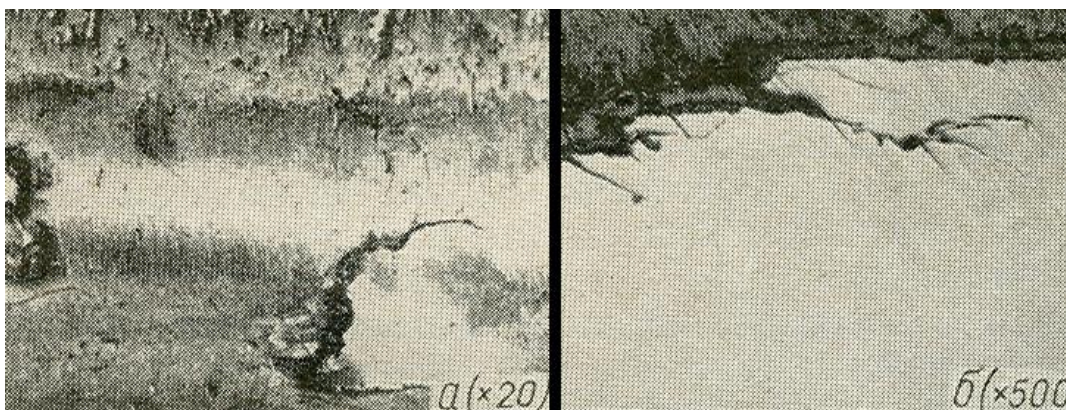


Obr. 15 Kuželík ložiska



Zdroj: <http://degradace.tf.czu.cz>

Obr. 16 Mikrofotografie zvětšení 20x a 500x [7]

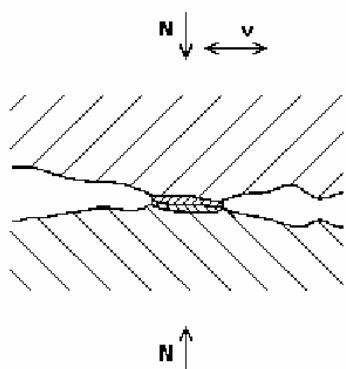


## 2.6 Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic materiálu v místech kmitavých tangenciálních posuvů funkčních ploch při jejich současném zatížení normálními silami [1].

Amplitudy kmitavého pohybu mohou být i velmi malé, v řádu 1 až 100  $\mu\text{m}$ . Vibrační opotřebení je doprovázeno vznikem oxidů železa s typicky hnědočervenou nebo hnědočernou barvou. Vzájemný pohyb součástí má různý původ. Může se jednat o přímočarý vratný pohyb, o pohyb způsobený přenesenými vibracemi nebo o pohyb vzniklý v důsledku pružných deformací v uložení mechanicky namáhaných součástí. V praxi vzniká vibrační opotřebení u valivých ložisek, čepů, nalisovaných spojení náboje kola a hřídele. Budící kmity způsobující vibrace mohou být generovány vlastní prací stroje, taktéž vnějším zdrojem. Jsou známy případy, kdy při lodní přepravě lokomotiv na dlouhou vzdálenost došlo k poškození valivých ložisek dvojkolí, způsobenému kmity buzenými chodem lodního motoru. Typický výskyt tohoto opotřebení je u křížových kloubů a v drážkovém spojení kloubových hřídelů [1, 15, 16].

Obr. 17 Schéma mechanismu vibračního opotřebení [15]



Vibračním opotřebováním se poškozují i velmi tvrdé materiály, bez ohledu na přítomnost maziva. Vibrační opotřebení může iniciovat i únavové lomy [15].

*Obr. 18 Vibračně opotřebené pouzdro ložiska*



Zdroj: <http://degradace.tf.czu.cz>

## 3 Přehled faktorů ovlivňujících intenzitu opotřebení

Faktory ovlivňující intenzitu jednotlivých druhů opotřebení jsou rozvedeny v následující kapitole.

### 3.1 Vliv různých faktorů na adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení je ovlivňováno celou řadou působících faktorů. Mezi nejdůležitější patří zatížení, tepelný režim, mazání, kluzná rychlost, použité materiály třecí dvojice a jejich způsob výroby, jejich doba funkce a velikost stykových povrchů. Níže jsou uvedeny některé zjištěné poznatky o vlivu těchto faktorů, které jsou považovány za nejdůležitější.

#### 3.1.1 Vliv zatížení

Zatížení může působit v jednom směru nebo v různých směrech, může být stálé nebo přerušované. Ovlivňuje podstatně procesy tření a odolnost proti adhezivnímu opotřebení a tím i rychlost opotřebení. Obecně platí, že velikost opotřebení je přímo úměrná působícímu zatížení, pokud se nemění v procesu opotřebení stav stykových povrchů, což souvisí s působícími mechanismy opotřebení. Malá intenzita opotřebení se může o několik řádů skokem zvýšit po překročení určité kritické hodnoty zatížení. Současně vzroste i drsnost stykových ploch a změní se charakter částic otěru. Místo malých převážně oxidických částic se při intenzivním opotřebení tvoří větší nezoxidované částice. Za předpokladu, že se nemění dominantní mechanismus opotřebení, platí mezi velikostí opotřebení  $W$  a zatížením  $F$  vztah

$$W = K \cdot \left(\frac{F}{A}\right)^n ,$$

kde  $K$  je součinitel úměrnosti, který se mění s charakterem procesu opotřebení;  $F$  - zatížení;  $A$  - nominální plocha dotyku;  $n$  – exponent ( $n > 1$ ) [13].



### 3.1.2 Vliv tepelného režimu

Vlivem plastické deformace povrchových vrstev a přeměnou energie při tvorbě mikrospojů se dosahuje v povrchových vrstvách teplot, které se mohou blížit teplotě tavení níže tajícího kovu. Za těchto teplot snadno dochází k vzájemným chemickým reakcím mezi materiálem povrchových vrstev a okolním prostředím. Tyto reakce mohou mít podstatný vliv na proces adhezivního opotřebení. Mohou působit jednak příznivě, např. v oceli působí vzniklý povlak oxidu železitého ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) jako ochranná vrstva a též plní funkci maziva. Produkty chemických reakcí mohou však opotřebení i zvyšovat, jako např. tvrdé oxidy některých kovů, které působí abrazívně, což vede k přechodu adhezivního opotřebení na abrazivní [1].

Vysoké teploty také mění mechanické vlastnosti povrchových vrstev materiálů ve třecí dvojici. Za vysokých teplot může dojít i k rozkladu vrstvy maziva, a tím ke ztrátě jeho mazací schopnosti [3].

Tepelný režim na styku dvou vzájemně se pohybujících povrchů je funkcí řady faktorů. Nejvýznamnější z nich jsou kluzná rychlost, teplota okolního prostředí, součinitel vzájemného překrytí, velikost stykových povrchů a tepelné vodivosti obou materiálů třecí dvojice [1].

### 3.1.3 Vliv mazání

Mazivo odděluje stykové povrchy, odstraňuje místní špičky napětí ve styku mikronerovností a působí jako chemická ochrana (např. před vzdušným kyslíkem) obou povrchů vzájemně se pohybujících těles [1, 3, 8].

Z hlediska opotřebení jsou optimální hydrodynamické nebo hydrostatické mazání, která zaručují oddělení funkčních povrchů dostatečnou vrstvou maziva. Například v případě valivých ložisek se hydrostatické mazání realizuje tlakovým olejem z čerpadla. Typickým příkladem hydrodynamického mazání je ustálený běh kluzných ložisek. Při mezním mazání jsou stykové povrchy odděleny navzájem vrstvou maziva molekulární tloušťky, jehož aktivní složka se fyzikálně nebo chemicky adsorbuje na povrchy. I takto malá vrstva maziva zmenšuje celkovou dotykovou plochu mikronerovností, a proto je celkové množství přeneseného materiálu a otěru menší než při tření za sucha. Není-li

mazání dostatečné, dojde k porušení mezní mazací vrstvy a proces opotřebení je velmi rychlý [1, 6].

Mazací schopnosti daného maziva významně ovlivňuje tepelný režim ve stykové oblasti povrchů. Se zvyšující se teplotou značně klesá viskozita maziva, tím dochází ke zmenšení tloušťky mazací vrstvy, což může způsobit zvýšení počtu dotykových plošek povrchů. Tím bude růst třecí odpor a následně i teplota maziva, až se poruší mazací vrstva a tak dojde k adhezivní poruše povrchu [1, 3].

### 3.1.4 Vliv použitých materiálů

Na proces opotřebení mají nezanedbatelný vliv fyzikální a chemické vlastnosti použitých materiálů.

Jednou z vlastností ovlivňujících odolnost dvojice kovů proti adhezivnímu opotřebení je vzájemná rozpustnost těchto kovů v tuhém stavu. Malého opotřebení třecí dvojice se dosáhne:

- 1) u kovů navzájem nerozpustných (je omezena možnost difuze v místě mikrospoje, která by podstatně ovlivnila jeho pevnostní vlastnosti),
- 2) u dvojice kovů z nichž jeden je ze skupiny B periodické soustavy prvků (krystalové vazby těchto kovů mají některé rysy kovalentních vazeb).

Důležitým materiálovým faktorem je krystalová struktura. U kovů s kubickou plošně centrovanou krystalovou mřížkou je intenzita opotřebení až stokrát vyšší než u kovů s mřížkou hexagonální [1].

Významně se při adhezivním opotřebení uplatňují též fyzikálně mechanické vlastnosti materiálů. Nejdůležitějšími z nich jsou tvrdost  $H$  a mez kluzu v tlaku  $\sigma_{Kd}$ . S rostoucí tvrdostí klesá velikost opotřebení. Vliv samotné tvrdosti je mnohem menší, pokud se současně mění mikrostruktura a chemické složení [1].

Vliv mikrostruktury na opotřebení dosud nebyl dostatečně objasněn. V procesu opotřebení totiž dochází ke strukturálním změnám vyvolaným rychlým ohřevem na vysoké teploty a rychlým ochlazováním. Tak vzniká například u ocelí v povrchových vrstvách

martenzit, který při malých zatíženích snižuje rozsah porušování stykových povrchů. Při velkých zatíženích působí ale nepříznivě [1].

### **3.1.5 Vliv okolního prostředí**

V oblasti styku dvou kovových povrchů se uplatňují jednotlivé povrchové vrstvy. Jsou to: základní materiál, vrstva zpevněná plastickou deformací při obrábění, vrstva oxidů, vrstva produktů chemických reakcí mezi mazivem a oxidy kovů, absorbovaná vrstva polárních molekul maziva a vrstva maziva. Na povrchové vrstvy působí kyslík a vodní páry z okolního prostředí. S růstem jejich obsahu v prostředí přímo úměrně roste i velikost mírného adhezivního opotřebení [1].

K velkému opotřebení může dojít i u mazaných povrchů, protože kyslík reaguje nejen s kovem, ale i s mazivem. Vzniklé oxidy kovů obvykle však působí při opotřebení příznivě. Stejně tak absorbované vrstvy polárních molekul maziva, které tvoří souvislý tenký povlak na povrchu obou kovů. Silně tím brání i tvorbě mikrospojů a mají vysokou ochrannou schopnost při tření kovů v podmínkách mezního mazání [1].

## **3.2 Vliv různých faktorů na abrazivní opotřebení**

Na průběh abrazivního opotřebení působí řada vlivů. Mezi nejvýznamnější patří vlastnosti abrazivních částic: kritická velikost, tvar a jejich pevnost. Dále to jsou například vliv kluzné rychlosti, vliv tvrdosti abraziva, vliv legování a tepelného zpracování na odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Některé zjištěné poznatky o vlivu nejdůležitějších faktorů působících na abrazivní opotřebení jsou uvedeny dále.

### **3.2.1 Kritická velikost abrazivních částic**

Studiem závislosti abrazivního opotřebení různých materiálů na zatížení a průměrné velikosti částic bylo zjištěno, že tato závislost není lineární. Byla stanovena tzv. kritická velikost abrazivního zrna, která způsobuje významnou změnu závislosti opotřebení na průměrné velikosti abrazivních částic. Kritická velikost zrna závisí na zatížení a vlivem zkušebních podmínek (rozměrem vzorku, použitými částicemi, vlastnostmi opotřebovávaného materiálu) se mění v rozmezí 70 až 200  $\mu\text{m}$  [1].

Poznatek o kritické velikosti abrazivních částic je významný pro praxi. Zmenšováním velikosti abrazivních částic pod uvedenou kritickou hodnotu výrazně klesá jejich abrazivní účinek. To může napomoci řešení některých problémů spojených s nežádoucími účinky abrazivních částic, které se dostávají do maziva a mazaných míst strojů a zařízení [1].

### 3.2.2 Tvar abrazivních částic

Abrazivní účinky částic jsou z velké části ovlivněny jejich tvarem, který lze popsat:

- množstvím hran či výstupků (makrogeometrie),
- hladkostí povrchu hran či výstupků (mikrogeometrie),
- poloměrem výstupků.

Na vliv uvedených faktorů se názory různí. Je to dáno obtížným měřením a hodnocením tvaru částic, dále mnohotvárností jejich vlastností i chemického složení [1, 4].

Makrogeometrie abrazivního zrna může být například posuzována podle tzv. součinitele hranatosti. Je to poměr povrchu skutečného zrna k povrchu koule o stejném objemu. Tím je dáno, že měrný povrch částice bude tím větší, čím více se bude její tvar odchylovat od ideálního kulového tvaru. V praxi se měření součinitele hranatosti zrn využívá nejčastěji k určení vlastností slévárenských písků používaných pro formování odlitků [1, 4].

Pokud jde o mikrogeometrii částic, bylo zjištěno, že hrany a výstupky částic nejsou geometricky přesnými řezy krystalografických rovin. Prakticky vždy to jsou zaoblené tvary. Toto bylo dokázáno výsledky proměření karborundových a korundových částic. Detailní proměření mikrogeometrie zrna může mít význam při studiu vlastního mechanismu opotřebení. Umožňuje totiž poměrně přesně charakterizovat tvar částic a případně i jejich změny v průběhu abrazivního opotřebení. Jde však o měření pracné a náročné, pro praktické účely se proto spíše nevyužívá [1, 6].

### 3.2.3 Pevnost abrazivních částic

Průběh a intenzitu opotřebení významně ovlivňuje pevnost abrazivních částic. Při vzájemném pohybu částic a funkčního povrchu součásti dochází k porušování materiálu a zároveň k otupování či vylamování výstupků a hran abrazivních zrn. Výsledky zkoušek bylo prokázáno, že při malém silovém působení se příliš nemění průměrná velikost zrn, mění se však jejich mikrogeometrie. Byl sledován pokles abrazivního účinku křemenných částic o průměru 1 až 2 mm v brusné nádobě, kde byly za rotace po různou dobu exponovány vždy 4 válcové vzorky o  $\varnothing$  10 mm z oceli 12 050 o tvrdosti 200 až 210 HV. Sítovým rozbořem částic bylo následně zjištěno, že průměrná velikost abrazivních zrn se změnila max. o 10 %, zatímco jejich účinek se snížil až na 40 % původní hodnoty [1].

Při větším silovém působení během interakce abraziva s funkčním povrchem dochází k většímu porušování zrn, zejména k jejich fragmentaci a tak se do určité míry kompenzuje větší otupování výstupků a hran. Tím lze zřejmě vysvětlit, že při větším silovém působení se pokles abrazivity částic výrazně neliší od poklesu abrazivního účinku při malém silovém působení. Dále bylo zjištěno, že křemenné částice mají mnohem větší pevnost při prostém zatížení v tlaku než při současném smyku [1].

Prověřováním pevnosti abrazivních částic z korundu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a karbidu křemíku (SiC) bylo při tzv. dynamické zkoušce pevnosti, tj. volným pádem na válec rotující obvodovou rychlostí  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , zjištěno, že k větší fragmentaci dochází u korundu. Karbid křemíku se jeví v těchto podmínkách jako odolnější [1].

### 3.2.4 Vliv kluzné rychlosti na abrazivní opotřebení

Praxe prokázala v řadě případů, že vliv relativní kluzné rychlosti částic po funkčním povrchu je málo významný. Například při dopravě a zpracování nerostných surovin, zemin, uhlí či jiných abrazivních látek se používají relativně malé kluzné rychlosti, většinou od  $0,5$  do  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Podobně při těžbě surovin pracují lopatková, korečková i kolesová rýpadla při rychlostech  $2$  až  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [1, 6].

U malých částic opotřebení stoupá s rychlostí. U větších částic je růst opotřebení s rychlostí zanedbatelný [1].

Při větších kluzných rychlostech vlastnosti povrchové vrstvy materiálu budou ovlivněny zejména změnou teploty vlivem tření. Při tření dvou kovových povrchů bez

mazání může růst jejich povrchová teplota až k bodu tavení. Toho se prakticky využívá při svařování kovů třením za rotace. Naproti tomu vznikají potíže např. při broušení kovů brusnými kotouči při větších rychlostech bez účinného chlazení. Pro snížení abrazivního opotřebení při velkých kluzných rychlostech je třeba zaměřit se na použití ocelí s velkou odolností proti popouštěcím teplotám, příp. jiných materiálů s vysokou tvrdostí i při vyšších teplotách [1, 6].

### 3.2.5 Vliv tvrdosti abraziva na opotřebení

Vzájemné porovnávání účinků nejrůznějších abrazivních částic, s nimiž se můžeme setkat v průmyslu i v přírodě, se jeví jako velmi složité [1].

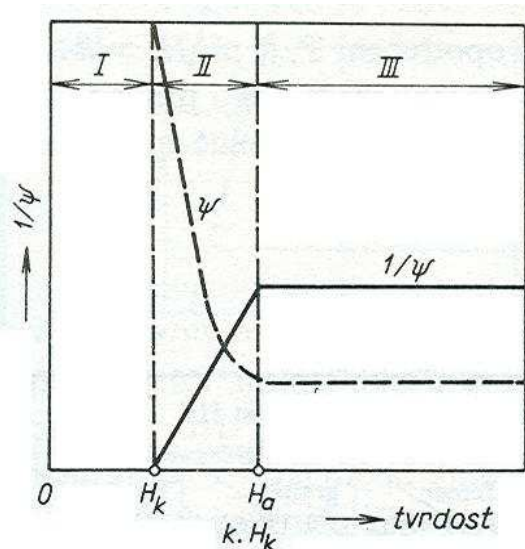
Aby se usnadnilo vzájemné porovnávání různých materiálů, byl zaveden pojem tzv. poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi$ , který je definován výrazem

$$\psi = \frac{W_l \text{etalonu}}{W_l \text{vzorku}} = \frac{W_h \text{et.}}{W_h \text{vz.}} \cdot \frac{\rho \text{vz.}}{\rho \text{et.}} = \frac{W_o \text{et.}}{W_o \text{vz.}}$$

Je to tedy poměr délkového otěru  $W_l$  zkoušeného etalonu a vzorku, resp. poměr objemového otěru  $W_o$  zkoušeného etalonu a vzorku, nejčastěji určovaného nepřímo z hmotnostního otěru  $W_h$  při známé hustotě  $\rho$ . Při srovnávání se používají obvykle kovové etalony tvářené nebo lité, příp. se používají i etalonová abraziva, aby se zmenšil vliv náhodných faktorů na výsledky zkoušek [1].

Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení závisí na poměru tvrdosti abrazivních částic a tvrdosti opotřebovaného materiálu, při dodržení podmínky, že porovnáváme mikrotvrdost obou materiálů stejnou metodou [1].

Dále bylo hodnotou  $\frac{1}{\psi}$  definováno tzv. poměrné opotřebení vzorku vzhledem k etalonu. Závislost poměrného opotřebení  $\frac{1}{\psi}$  a poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi$  zkoušeného kovu o tvrdosti  $H_k$  na tvrdosti abraziva  $H_a$  znázorňuje obr.19.



Obr. 19 Závislost poměrného opotřebení  $\frac{1}{\psi}$  a poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi$  zkoušeného kovu o tvrdosti  $H_k$  na tvrdosti abraziva  $H_a$  [1].

Z tohoto obrázku je patrné, že pokud abrazivum má menší tvrdost než kov (oblast I), k opotřebení ve větší míře nedochází. V oblasti III, kde tvrdost abraziva je značně větší než tvrdost kovu, je opotřebení víceméně konstantní a nezávisí na poměru tvrdostí  $\frac{H_a}{H_k}$ .

V přechodové oblasti II opotřebení vzrůstá od minimální hodnoty při  $H_a = H_k$  k hodnotě maximální při  $H_a = k \cdot H_k$ , přičemž hodnoty součinitele  $k$  pro různé kovy a různá abraziva kolísají v rozmezí 1,3 až 2,0 [1, 3].

Pro čisté kovy a žíhané oceli platí:  $\psi = b \cdot H$ , kde  $H$  je tvrdost,  $b$  - součinitel.

V souřadnicích  $\psi, H$  jde o přímkovou závislost [3].

Pro konstrukční oceli, některé nástrojové a slitinové oceli, zkoušené ve stavu tepelně zpracovaném platí:  $\psi = \psi_o + b'(H - H_o)$ , kde  $\psi_o$  je poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení v žíhaném stavu,  $H_o$  - tvrdost v žíhaném stavu,  $b'$  - součinitel závislý na druhu oceli (chemickém složení) [3].

V souřadnicích  $\psi, H$  představuje tento vztah soustavu přímek s počátkem na přímce  $\psi = b \cdot H$  [3].

Pro mechanicky zpevněné kovy a oceli, u nichž při zpevnění nedochází ke strukturálním změnám, platí  $\psi = konst$ . Je to výsledek experimentálního zjištění, že zvýšení

tvrdosti povrchové vrstvy se prakticky neprojeví zvýšením odolnosti proti abrazivnímu opotřebení [1, 3].

### 3.3 Vliv různých faktorů na erozivní opotřebení

Na procesu erozivního opotřebení se nejvíce uplatňují faktory jako kritická velikost zrna, rychlost a úhel dopadu částic, pružnost povrchu a chemické působení média. Dále jsou uvedeny některé zjištěné poznatky o nejdůležitějších vlivech na erozivní opotřebení.

#### 3.3.1 Kritická velikost zrna

Obdobně jako u abraze bylo zjištěno, že i v případě eroze opotřebení vzrůstá s rostoucí velikostí částic, a to až do jejich velikosti řádově 0,1 mm. Při vyšších velikostech částic je pak závislost opotřebení na velikosti částic malá [1].

#### 3.3.2 Vliv rychlosti dopadu částic na intenzitu opotřebení

Průběh erozivního opotřebení materiálu výrazně ovlivňují vlastnosti materiálu, provozní nebo zkušební podmínky a dopadová rychlost částic [1].

Částice které jsou unášeny kolmo nebo šikmo k povrchu narážejí na povrch a odražejí se. V závislosti na podmínkách dopadu a odrazu dochází k interakcím mezi částicemi. Také úhly dopadu částic se v celém průřezu proudu média mohou navzájem lišit. Proto s rostoucím počtem částic nemusí lineárně vzrůstat i velikost opotřebení [1, 3].

Částice nesené proudem se při přiblížení k povrchu vzorku brzdí účinkem média, které se vytlačuje z oblasti místa dotyku. Byla odvozena závislost okamžité rychlosti při dopadu  $v$  na počáteční rychlosti  $v_0$  pro částice o různé hmotnosti a pro různou viskozitu  $\eta$  nosné kapaliny ve tvaru

$$v^2 = v_0^2 + \left( \frac{g \cdot \eta \cdot R^4}{2d^3 \rho h^2} \right)^2 - \frac{g v_0 \eta R^4}{d^3 \rho h^2}, \quad \text{kde } R \text{ je poloměr vtisku částice, } h \text{ - vzdálenost částice}$$

od povrchu,  $\rho$  - měrná hmotnost částice.

Při proudění nosného média nejsou v celém jeho průřezu stejné rychlosti. Na to má vliv jednak tření média o stěny ohraničující proud, jednak hydrodynamické nebo



aerodynamické podmínky vlastního proudění. V proudu média tak vzniká rychlostní pole, které může mít různý tvar. Například u parních kotlů se proto používají tzv. usměrňovací pásy, které do určité míry mění směr proudění spalin. Odstraněním rychlostních polí v průřezu proudu se dosáhne i rovnoměrného účinku částic a odstraní se místa s velkou intenzitou opotřebení [1].

### 3.3.3 Vliv chemického působení média

Dalším faktorem ovlivňujícím erozi materiálu je spolupůsobení koroze a i toto je problémem velmi složitým. Korozní děje mohou probíhat ve vlastní povrchové vrstvě, ale podle chemického složení média i erozí napadeného materiálu může jít o působení do větší hloubky (např. bodová koroze). Zplodiny koroze se mohou snadno oddělovat z povrchu materiálu a účinek částic proudících v médiu urychluje korozní složku průběhu opotřebení [1, 6].

Mohou však také vznikat korozní produkty, které pevně lpí na povrchu materiálu a tím erozivní účinek částic snižují [1].

Bylo například sledováno chování vybraných materiálů v korozním médiu za účinku tvrdých částic při normálních a vysokých teplotách. Pohybující se vzorky byly exponovány volně padajícími částicemi při relativní rychlosti dopadu do  $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a teplotách do  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ . Jako interní atmosféra byl zvolen argon, dále se použil  $\text{CO}_2$ , vzduch a směs vzduchu s 5 %  $\text{SO}_2$ . Zvolené podmínky do určité míry modelovaly erozivní opotřebení materiálu při provozu plynových turbín. Zkouškami byla potvrzena platnost vztahu  $W_h = b \cdot v^m$ , kde  $W_h$  je hmotnostní otěr,  $v$  - relativní rychlost částic,  $m$  - exponent,  $b$  - součinitel pro daný materiál [1].

U nelegované oceli 11 600 byla hodnota  $m = 2,44$ . U legovaných houževnatých materiálů byla hodnota  $m$  nižší, např. u oceli 17 341  $m = 1,51$ . Ze zkoušek vyplynulo, že erozivní opotřebení konstrukčních ocelí a slitin v nekorozním médiu není závislé na teplotě. Intenzita eroze v korozním médiu závisí na intenzitě korozních dějů, které probíhají na exponovaném povrchu [1].

Snížení eroze v korozních podmínkách je tedy možné při použití materiálů odolných proti korozi, které mají současně dostatečnou odolnost proti účinku tvrdých částic, v závislosti na jejich rychlosti a úhlu dopadu [1].

### 3.3.4 Závislost na bodu tání materiálu

Příručka Handbook of Tribology [4] v článku 2.3.4 uvádí: „Nejzajímavější tvrzení podal Hutchings (1979), který ukázal, že erozivní opotřebení nepřímo závisí na výsledku  $\rho C_p \Delta T$ , kde  $\rho$  je hustota kovu,  $C_p$  je specifické teplo a  $\Delta T$  je rozdíl mezi teplotou kovu a jeho bodem tání. Hutchingsův vzorec ukazuje, že odolnost vůči erozivnímu opotřebení bude vyšší pro materiály mající vysoký bod tání (tj. vysokou hodnotu  $\Delta T$ )“.

## 3.4 Vliv různých faktorů na kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení je nejvíce ovlivňováno teplotou, tlakem a obsahem plynu v kapalině, povrchovým napětím, viskozitou kapaliny, odolností materiálu a časovým průběhem opotřebení. Dále jsou uvedeny některé poznatky zjištěné o faktorech považovaných za nejdůležitější z hlediska vlivu na kavitační opotřebení.

### 3.4.1 Vliv obsahu plynů v kapalině

Vznik kavitace je podmíněn množstvím a stavem vzduchu nebo plynu obsaženého v kapalině. V kapalinách, které obsahují při normálním tlaku viditelné bubliny vzduchu, se při snížení tlaku vytvářejí kavitační dutiny expanzí těchto bublin, vylučováním vzduchu z kapaliny nebo spojováním menších bublin. Pokud nejsou při normálním tlaku bubliny v kapalinách viditelné, vznikají dutiny až při tlaku přibližně rovném tlaku syté páry při odpovídající teplotě a tyto dutiny vyplňuje převážně sytá pára kapaliny. U kapaliny zbavené pohlcených plynů a nečistot se dutiny vytváří až při značném tahovém namáhání a jsou vyplněny jen parou kapaliny [1, 5].

V praxi nastává nejčastěji kavitace u kapalin, které neobsahují za normálního tlaku viditelné bubliny vzduchu. Toto se vysvětluje přítomností malých nepatrných bublinek vzduchu a také nečistot, které spolupůsobí jako „vypařovací jádra“. Obsah pohlceného vzduchu klesá s teplotou. Vypařovací jádro v podobě bublinek vzduchu lze odstranit při vysokém tlaku rozpuštěním vzduchu. Při zániku kavitačních dutin však může vzduch ve vodě působit i příznivě, protože tlumí ráz kapaliny [1].

### 3.4.2 Vliv teploty a tlaku

Experimentální výsledky ukazují, že při vyšší teplotě kapaliny se zlepšují antikavitační vlastnosti zařízení. Tento jev se vysvětluje termodynamickým účinkem kapaliny na kavitaci. Velikost kavitační dutiny je tím větší, čím menší je tlak nasycených par  $p_p$ , který se snižuje s poklesem teploty okolí. Kavitační opotřebení závisí též na počtu bublin rostoucím s teplotou, neboť kapalina se odpařuje při nižším tlaku. Důležitým faktorem při kavitačním opotřebení je také vztah mezi vnějším tlakem a tlakem nasycených par. Je-li rozdíl tlaků v kapalině  $p_o - p_p = 0$ , k opotřebení materiálu vlivem kavitace nedochází. Je to dáno tím, že při  $p_o = p_p$  není kapalina podrobována tahu, takže neexistují podmínky pro vznik kavitace [1, 5].

### 3.4.3 Vliv povrchového napětí a viskozity kapaliny

Experimentálně bylo zjištěno, že se zvětšováním povrchového napětí  $\sigma$  vzroste poloměr bubliny, a tak zvětšení povrchového napětí vede ke zvýšení intenzity kavitačního opotřebení, pokud uvažujeme konstantní tlakové poměry [1].

Dále bylo prokázáno, že se zvyšováním povrchového napětí  $\sigma$  se snižuje kavitační tlak. Se vzrůstem  $\sigma$  se zpomaluje růst kavitační bubliny, ale urychluje její zánik. Povrchové napětí je zřejmě hlavním vlivem při počátku a zániku kavitační bubliny [5].

Vliv viskozity kapaliny na kavitační opotřebení není dosud dostatečně jasný. Teoreticky je ve viskózní kapalině růst bubliny pomalejší než v kapalině ideální. Antikavitační vlastnosti kapaliny by se tedy měly zlepšovat s její vyšší viskozitou. Experimentální výsledky toto však vždy nepotvrzují. Pokusy provedenými v tzv. Venturiho dýze se ukázalo, že kavitační parametr pro počátek kavitace vzrůstá s Reynoldsovým číslem. Tato závislost platí od hodnoty  $Re > 1,5 \cdot 10^5$  až do  $Re = 6 \cdot 10^5$ . Naproti tomu bylo též zjištěno, že od hodnoty  $Re = 1,5 \cdot 10^5$  kavitační parametr u vody vzrůstá s klesajícím  $Re$  [1].

Výsledky pokusů také prokázaly závislost zvětšení kavitačního parametru na velikosti průměru obtékaného tělesa [5].

### 3.5 Vliv různých faktorů na únavové opotřebení

Proces únavového opotřebení nejvíce ovlivňují materiálové faktory jako tvrdost povrchové vrstvy, drsnost povrchu, vměstky a nečistoty a dále kontaktní únosnost, mazivo a vliv prostředí. V následujících podkapitolách jsou shrnuty některé zjištěné poznatky o nejdůležitějších z výše uvedených faktorů.

#### 3.5.1 Tvrdost povrchové vrstvy a kontaktní únosnost

Experimentálně bylo prokázáno, že odolnost proti poškození únavovým opotřebením se zvyšuje s tvrdostí povrchu. Tato závislost je lineární a projevuje se i v oblasti vysokých tvrdostí (55 až 68 HRC). Například pro středně a vysoce legované oceli a oceli pro valivá ložiska v leteckém průmyslu byl při zvyšování tvrdosti v uvedeném rozmezí vzrůst životnosti více než desetinásobný [1, 15].

Z hlediska přípustného kontaktního namáhání i odolnosti proti kontaktnímu opotřebením u ozubených kol je nejlepší používat kola s povrchově tvrzenými zuby. U valivých ložisek a jiných případů valivých uložení jsou nároky na kontaktní únosnost (kontaktní únavovou pevnost  $p_H$ ) ještě vyšší. Zde se aplikace povrchově tvrzených částic nepokládá za zvláště výhodnou a příliš se nepoužívá. U valivého uložení může na povrchově tvrzených drahách při nedostatečné tloušťce vrstvy dojít k jejímu prolomení. Nebezpečná jsou zejména vysoká smyková napětí způsobená kontaktními tlaky v povrchové vrstvě, která mohou vést ke vzniku plastických deformací pod vrstvou. Z těchto podmínek namáhání vyplynuly požadavky na tloušťku tvrzených vrstev [1].

S ohledem na kontaktní namáhání pro ozubená kola byl stanoven požadavek, aby tloušťka tvrzené vrstvy byla větší než hloubka maxima smykových napětí:  $t_E = 2Z\tau_{max}$ ,

kde  $Z\tau_{max} = 0,786.a$  je hloubka maxima smykových napětí pod povrchem,  $a$  – poloviční šířka dotykové plošky,  $t_E$  = efektivní tloušťka vrstvy ( odpovídá poklesu tvrdosti ve vrstvě nad 50 HRC) [1].

V současné době se tloušťka vrstvy zjišťuje moderními metodami založenými na použití kontaktních laserových mikroskopů.

Pro požadavky na tvrdost platí obecná závislost; čím jsou povrchově tvrzené vrstvy tvrdší, tím je vyšší kontaktní únosnost. To znamená, že materiál snese vyšší tlakové

namáhání. Toto však neplatí obecně existují i některé anomálie. Například u ocelí typu 14220, 16420 aj. bylo prokázáno, že vysoký obsah zbytkového austenitu v cementační vrstvě, který snižuje tvrdost ve vrstvě až k hodnotě kolem 600 HV, při kontaktním namáhání s malým podílem skluzu má v porovnání s čistě martenzitickou strukturou výrazně vyšší kontaktní únosnost. Je to tím, že při kontaktním namáhání dochází v cementační vrstvě následkem plastických deformací k přeměně zbytkového austenitu na velice jemný martenzit o vysoké tvrdosti a pevnosti [1, 2].

### **3.5.2 Závislost na drsnosti povrchu**

Drsnost povrchu rovněž výrazně ovlivňuje odolnost proti únavovému opotřebení. Lze to vysvětlit vrubovými účinky drsnějších povrchů. Na vrcholcích zdrsňeného povrchu vznikají vysoké lokální tlaky, které způsobují plastickou deformaci a následné poškozování materiálu. V místech, kde se soustřeďuje napětí a plastické deformace, má tedy stav povrchu styčných ploch významný vliv na únavové vlastnosti. Zvláště u povrchově tvrzených materiálů je vliv drsnosti povrchu na jejich odolnost výrazný. To znamená, že čím má povrchová vrstva větší tvrdost, tím musí mít jemnější povrch. Jinak dochází vlivem plastické deformace k porušování soudržnosti povrchové vrstvy [1, 6, 15].

### **3.5.3 Vliv vměstků a nečistot**

Snaha dosáhnout co nejvyšší životnosti u ložiskových ocelí a u ozubených kol s nejvyššími nároky na únosnost vedla ke sledování vlivu rozložení a velikosti vměstků a ke sledování obsahu znečišťujících prvků při kontaktním namáhání. Tak byl na vměstcích v povrchu a v mikrooblasti při povrchu prokázán počátek vzniku kontaktních únavových mikrotrhlin. Především velikost vměstku působí nepříznivě na životnost materiálu zvýšeným vrubovým účinkem. Záleží těž na typu vměstku. Zvláště nepříznivý je vliv oxidů, což současně dokazuje škodlivý vliv obsahu kyslíku v oceli [1, 2].

Změnil se také názor na vliv obsahu síry a siřníkových vměstků. Oproti starším představám se prokázal příznivý vliv zvýšeného obsahu síry (do 0,1 %) v ložiskových ocelích. Vysvětluje se to vznikem sulfidických obálek kolem ostrohranných oxidů, čímž se zmírňuje jejich vrubový účinek a to snižuje kontaktní únavové namáhání [1].

## **3.6 Vliv různých faktorů na vibrační opotřebení**

Vibrační opotřebení je velmi výrazně ovlivňováno velikostí amplitudy pohybu, kmitočtem, měrným tlakem, dobou působení kmitavého pohybu, prostředím a vlastnostmi materiálu. Některé zjištěné poznatky o vlivu nejdůležitějších faktorů na vibrační opotřebení jsou uvedeny dále.

### **3.6.1 Vliv amplitudy pohybu**

Vibrační opotřebení nastává hlavně v případech, kdy je vibrační pohyb větší, než jaký může absorbovat pružnost funkčních povrchů, a kdy dochází k jejich vzájemnému skluzu [1].

Zkouškami bylo prokázáno, že vibrační opotřebení se zvětšuje s růstem velikosti amplitudy pohybu a tato závislost je přímková [1].

V praxi se ukazuje, že skutečná amplituda vzájemného pohybu stýkajících se povrchů je zmenšena o amplitudu absorbovanou vlivem jejich pružnosti. To značně závisí na měrném tlaku. Avšak i při úplném utlumení pohybu může dojít k vibračnímu opotřebení, může totiž nastat únavové porušení povrchu vlivem střídavého namáhání [1].

### **3.6.2 Vliv kmitočtu**

Původně se předpokládalo, že změna kmitočtu nemá zjevný účinek na intenzitu vibračního opotřebení. Pozdější práce však ukázali, že jde o jeden z nejdůležitějších faktorů majících vliv na vibrační opotřebení za přístupu vzduchu. Kmitočet pohybu má opačný vliv než jeho amplituda [1].

Větší opotřebení při nižších kmitočtech bývá označováno jako frekvenční efekt a vysvětluje se vyšší účastí chemické (korozní) složky děje [1, 3].

### **3.6.3 Vliv měrného tlaku**

Zkoušení vlivu měrného tlaku na intenzitu vibračního opotřebení neposkytuje zcela jednoznačné výsledky. Zvětšováním měrného tlaku se totiž zmenšuje amplituda kmitu. Poškození materiálu se nejprve zvětšuje s růstem měrného tlaku. Při jeho dalším zvětšování se v závislosti na zmenšování amplitudy zmenšuje i vibrační opotřebení. Pokud vysoký měrný tlak zcela eliminuje relativní pohyb, nedochází již k vibračnímu opotřebení.

Je-li amplituda kmitů udržována i při stoupajícím měrném tlaku konstantní, dosáhne se prakticky přímkové závislosti vibračního opotřebení na měrném tlaku [1, 6].

### **3.6.4 Vliv času**

Vibrační opotřebení se s dobou působení kmitavého pohybu (tj. s počtem kmitů) zvětšuje. Výsledky sledování závislosti vibračního opotřebení na počtu kmitů se mohou lišit vlivem zvolené zkušební metodiky a nestejným způsobem vyhodnocování.

Počet kmitů při zkoušce se v závislosti na ostatních podmínkách zkoušky projevuje zvětšováním plochy a hloubky poškozené oblasti [1].

### **3.6.5 Vliv vlastností materiálu**

Vliv fyzikálně chemických vlastností kovových materiálů na jejich odolnost proti vibračnímu opotřebení značně omezuje např. to, že mezi styčnými plochami velmi rychle vzniká vrstva oxidů, porušujících kovový styk povrchů. Odolnost kovů pak určují abrazivní vlastnosti jejich oxidů, které mívají větší tvrdost než příslušný kov [1].

Bylo prokázáno, že se stoupající tvrdostí materiálu klesá jeho citlivost k vibračnímu opotřebení. Přesto se doporučuje aby jeden materiál z dvojice byl měkčí. Malé vibrační opotřebení měkkých kovů (cín, hliník) se vysvětluje zatlačením jejich tvrdých oxidů do povrchu, ale i vytvořením měkké vrstvy oxidu, jako např. u mědi [1].

Na vliv drsnosti povrchu na vibrační opotřebení převažuje názor, že změny původního povrchu, zvláště při větších tlacích, probíhají tak rychle a jsou tak velké, že drsnost vlivem kvality předchozího obrobení se na intenzitě vibračního opotřebení příliš neprojeví [1].

Také měření součinitele tření dokazují rychlé zvětšení drsnosti původního povrchu. Například počáteční součinitel tření ocelových povrchů se během několika kmitů zvětšil o 300 až 310 %, dále pak mírně klesal ale ještě při  $10^6$  kmitech byl větší o 180 až 240 % než při prvním kmitu [1].

Vibrační opotřebení se projevuje prakticky u všech materiálů a jejich odolnost nelze hodnotit samostatně. V praxi má proto význam pouze porovnání dvojic materiálů z hlediska jejich odolnosti proti vibračnímu opotřebení. Některé z těchto dvojic zahrnuje následující tabulka.

Tab. 1 [1]

Odolnost různých dvojic materiálů proti vibračnímu opotřebení při tření bez maziva

dobrá	střední	nizká
zlato – ocel	zinek – ocel	ocel – ocel
stříbro – ocel	měď – ocel	nikl – ocel
nástrojová ocel – nástrojová ocel	zinek – hliník	hliník – ocel
polytetrafluóretylén – ocel	stříbro – hliník	hliník – hliník
	bronz – ocel	Al-Si – ocel
	litina – litina	cín – ocel
	zinek – litina	hliník – litina
	stříbro – litina	hliník – korozivzdorná ocel
	měď – litina	ocel
	zirkonium – zirkonium	chróm – litina
		hořčík – litina
		nástrojová ocel – korozivzdorná ocel
		cín – litina

### 3.6.6 Vliv prostředí

Skutečnost, že vzájemným mechanickým působením dvou stýkajících se povrchů v prostředí normální vzdušné atmosféry a za normální teploty nevzniká jen kovový otěr, ale převážně oxidy kovu, dokládá složitost procesu [1, 3].

Bylo zjištěno, že produkty vibračního opotřebení uhlíkové oceli obsahují asi 95%  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a 5 % čistého železa. V závislosti na vlhkosti vzduchu, měrném tlaku a kmitočtu mohou ještě vznikat  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a hydroxidy. Na vznik určitého oxidu lze usuzovat i podle jeho barvy.  $\text{FeO}$  a  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  jsou černé, zatímco  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  mají barvu červenou [1, 3].

Probíhá-li vibrační opotřebení za normálního přístupu vzduchu, uplatňují se ze složek atmosféry nejvíce kyslík a vodní pára. Při zkouškách v dusíku bylo vibrační opotřebení asi o 80% menší než za přístupu vzduchu. Dále bylo zjištěno, že se zvyšováním relativní vlhkosti se vibrační opotřebení zmenšuje. Ovlivňuje to mj. absorbovaný film vody, který pomáhá odstraňovat oxidy ze styčných ploch a tím zmenšovat jejich abrazivní účinek [1].



## 4 Závěr

Předložená bakalářská práce ve své první části definuje opotřebení a jsou zde uvedeny jeho jednotlivé druhy doplněné o jejich bližší charakteristiku. Druhá část práce se zaměřuje na jednotlivé faktory ovlivňující opotřebení kovových materiálů.

Závěrem lze konstatovat, že faktorů majících vliv na opotřebení kovových materiálů je velmi mnoho. Často dochází k tomu, že se tyto vlivy vzájemně prolínají a kombinují. Jde o problematiku tak širokou, že shromáždění údajů o všech těchto faktorech by vysoce přesahovalo stanovený rámec této práce.

Současná rozvinutá průmyslová výroba klade vysoké nároky na moderní technologie, kvalitu, jakost a takové vlastnosti materiálů, aby co nejvíce vyhovovaly technickým požadavkům na moderní nástroje, stroje a zařízení. Stále více roste požadavek na efektivní využívání materiálů a na zmírňování dopadů průmyslové výroby na životní prostředí. Proto bude i do budoucna třeba se problematice opotřebení kovových materiálů intenzívně věnovat.

## 5 Seznam literatury

- [1] VOCEL, M. – DUFEK, V. a kol. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha, STNL 1976. 376 s.
- [2] KOSTĚCKIJ, B.I. *Odolnost strojních součástí proti opotřebení*. Praha, Průmyslové vydavatelství 1952. 184 s.
- [3] BLAŠKOVIČ, P.- BALLA, J. – DZIMKO, M. *Tribológia*. Bratislava, ALFA 1990. 360 s.
- [4] BHARAT, B. – GUPTA B.K. *Handbook of Tribology*. New York, McGraw-Hill, Inc. 1991. 1171 s.
- [5] NOSKIEVIČ, J. a kol. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. Praha, STNL 1990. 336 s.
- [6] SAVIN, N.V. *Opotřebení kovů*. Praha, Česká grafická unie 1940. 17 s.
- [7] KOSTĚCKIJ, B.I. – NOSOVSKIJ, I.G. *Iznosostojkost' i antifrikčnost' detalej mašin*. Kiev, Těchnika 1965. 204 s.
- [8] CZICHOS, H. *Tribology*. Amsterdam, Elsevier 1978. 400 s.
- [9] LAZARENKO, B.I. – PREJC, G.A. *Iznosostojkost' metallov*. Moskva, Mašriz 1960. 220 s.
- [10] TENENBAUM, M.M. *Iznosostojkost' konstrukcionnych materialov i detalej mašin pri abrazivnom iznašivanii*. Moskva, Mašinostrojenije 1966. 330 s.
- [11] ČSN 01 5050. *Opotřebení materiálu. Názvosloví*. 1969
- [12] SUCHÁNEK, J. Opotřebení materiálů. *Tribotechnika* [online].2009, [cit.2011-02-16]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42009/opotrebeni-materialu.html>
- [13] SUCHÁNEK, J. Abrazivní opotřebení kovových materiálů. *Tribotechnika* [online]. 2010, [cit.2011-02-20]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html>

- [14] SUCHÁNEK, J. Adhezivní opotřebení. *Tribotechnika* [online]. 2010, [cit.2010-02-20]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22010/adhezivni-opotrebeni.html>
- [15] POŠTA, J. *Degradace strojních součástí*. [online]. 2003, [cit.2011-02-19]. Dostupné z: [http://degradace.tf.czu.cz/Mngr\\_ram.html](http://degradace.tf.czu.cz/Mngr_ram.html)
- [16] *Teorie Údržby*. [online]. 2007, [cit.2011-02-22]. Dostupné z: [home1.vsb.cz/~krz011/4kapitola.pdf](http://home1.vsb.cz/~krz011/4kapitola.pdf)
- [17] *Kentintrol*. [online]. 2011, [cit.2011-03-2]. Dostupné z: [http://www.kentintrol.com/public/images/products/ss\\_fig11\\_large.jpg](http://www.kentintrol.com/public/images/products/ss_fig11_large.jpg)
- [18] *Enecon*. [online]. 2009, [cit.2011-03-2]. Dostupné z: <http://getenecon.com/proven-solutions/pitting-corrosion.aspx>