

## 4. OPOTŘEBENÍ STROJNÍCH SOUSTAV A VZNIK PORUCH

### Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

<b>Budete umět:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• orientovat se v pojmech souvisejících s poruchami, jejich rozsahem, závažností a vznikem,</li> <li>• popsat vznik a vývoj poruch, určit mezní stavy objektů, klasifikovat poruchy podle způsobu jejich vzniku,</li> <li>• určit a podrobně popsat základní druhy opotřebenění materiálů, nalézt způsoby omezení nebo zabránění opotřebenění.</li> </ul>	Budete umět
--	-------------

Provozem vozidla dochází ke změně jeho vlastností způsobené opotřebením jeho součástí. Snahou konstruktérů i provozovatele vozidla je především opotřebenění zamezit, či jej alespoň snížit, a tak omezit možnost vzniku poruchy. Zejména železniční, ale i silniční vozidla jsou udržována v systému preventivních prohlídek a oprav, cílem údržbového systému je zajistit spolehlivost a bezpečný provoz vozidel. Vzniká tak souvislost mezi procesem opotřebenění a vznikem poruchy na jedné straně, a údržbovým systémem jako prostředkem k předcházení nebo odstraňování poruch na straně druhé.

### 4.1 Základní pojmy



**Čas ke studiu:** 1 hodina



**Cíl** Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- definovat pojmy související s poruchami, jejich vznikem, rozsahem, závažností apod.



**Výklad**

**Porucha** je ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci.

**Náhodná porucha** je taková porucha, kterou nelze předpovědět podle jiných souvislostí. Závislá porucha vzniká následkem jiné poruchy, nezávislá nikoliv.

**Trvalá porucha** je taková porucha, kterou lze odstranit pouze obnovou prvku nebo soustavy. V dalším textu se předpokládají výhradně trvalé poruchy.

**Dočasná porucha** je taková porucha, která může samovolně vymizet, nebo trvá jen po dobu působení vnějšího vlivu.

**Katastrofální porucha** způsobí okamžitou a úplnou ztrátu schopnosti provozu.

**Úplná porucha** je porucha objektu, při níž dochází k úplné neschopnosti objektu plnit všechny požadované funkce.

**Částečná porucha** způsobující neschopnost objektu plnit některé, nikoliv však všechny požadované funkce.

**Kategorizace poruch** je rozdělení poruch z hlediska klasifikace jejich následků.

**Konstrukční porucha** je porucha způsobená nesprávnou konstrukcí, projektem nebo návrhem objektu.

**Výrobní porucha** je porucha, kterou může způsobit neshoda výrobního procesu a návrhu.

**Nezávislá porucha** je porucha objektu, která není přímo ani nepřímo zapříčiněná poruchou jiného objektu.

**Závislá porucha** je porucha objektu, která je přímo nebo nepřímo zapříčiněná poruchou jiného objektu.

**Závada** je zhoršení schopnosti provozu, které ještě nezpůsobí poruchu, se označuje jako chyba, nebo závada.

## 4.2 Vznik a vývoj poruch



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



**Cíl** Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- identifikovat skutečný a jmenovitý mezní stav výrobků, vzniklý důsledkem opotřebení, definovat důsledky opotřebení výrobků,
- klasifikovat druhy poruch podle povahy jejich vzniku, popsat vlastnosti poruch postupných, náhlých a kombinovaných.



## Výklad

Změny vlastností součástí (prvků) vozidla vyvolané opotřebením vedou k dosažení **mezního stavu**. Je nutné upozornit na objektivně existující dva druhy mezních stavů [Stuchlý,1993]:

- **Skutečný mezní stav** je stav konkrétního prvku (nebo prvků), při kterém skutečně vzniká porucha prvku.
- **Jmenovitý mezní stav** je takový stav prvku, při kterém příslušný parametr prvku dosáhne mezní hodnoty stanovené technickými podmínkami (dokumentací).

Snahou konstruktéra i provozovatele vozidla je především opotřebení zabránit, nebo jej omezit. Důsledky opotřebení se mohou projevit ve dvou základních rovinách:

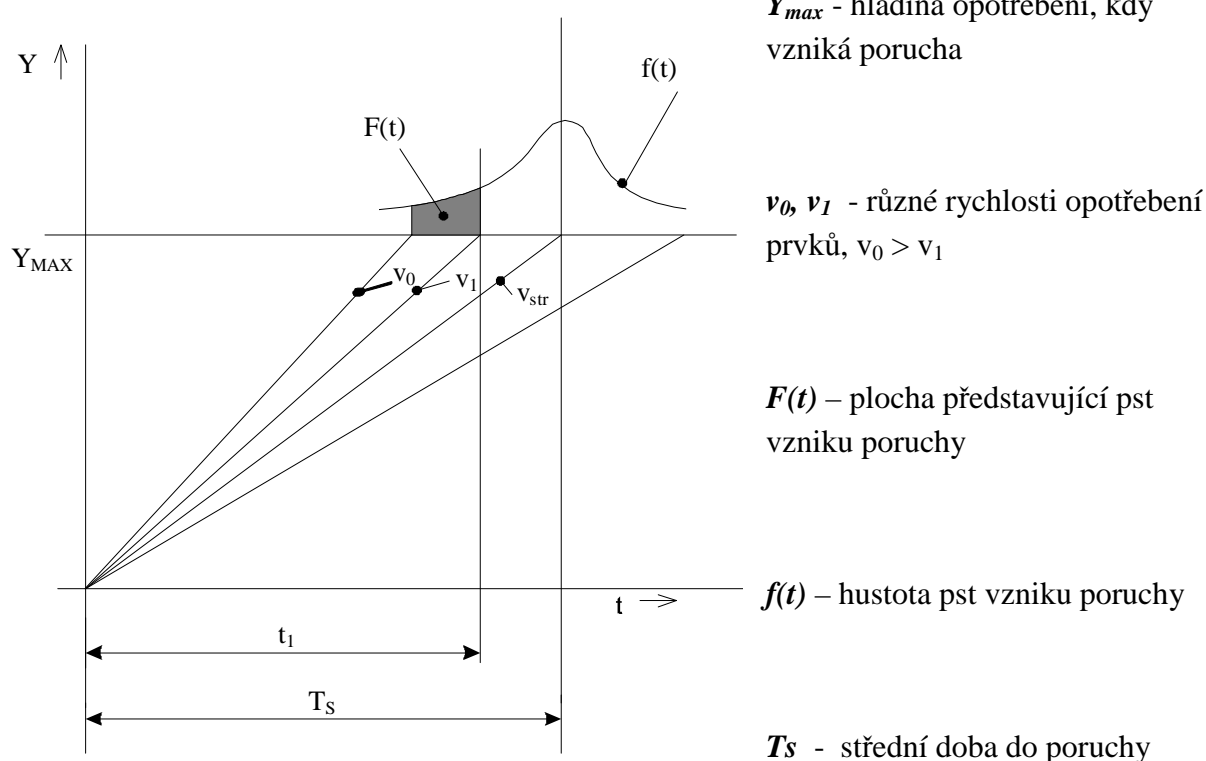
1. Dotyk funkčních ploch, zde můžeme obvykle sledovat poměrně snadno rozměrové a povrchové kvalitativní změny.
2. Změny uvnitř součásti, zde obvykle dochází vlivem zatěžování ke změnám ve struktuře materiálu, v důsledku těchto změn hrozí vznik mikrotrhlin, případně až lomů.

Ke stanovení mezních stavů a výpočty průběhu opotřebení je nutné klasifikovat poruchy podle charakteru jejich vzniku.

### □ Klasifikace poruch podle charakteru jejich vzniku

**Postupné poruchy** vznikají jako důsledek degradačního procesu, dochází tak ke zhoršení počátečních vlastností prvku. Základním rysem tohoto typu poruch je závislost pravděpodobnosti vzniku poruchy na čase, tj. čím déle prvek pracuje, tím se zvyšuje pravděpodobnost poruchy. Některé prvky se opotřebovávají rychleji, jiné pomaleji, a to i tytéž prvky u různých vozidel (např. pneumatiky u dvou vozidel). Rozdělení pravděpodobnosti poruchy je potom závislé na **rozdělení rychlosti opotřebení** (obr. 4.1), a je tak možné sestavit matematický model průběhu opotřebení a vzniku poruchy.

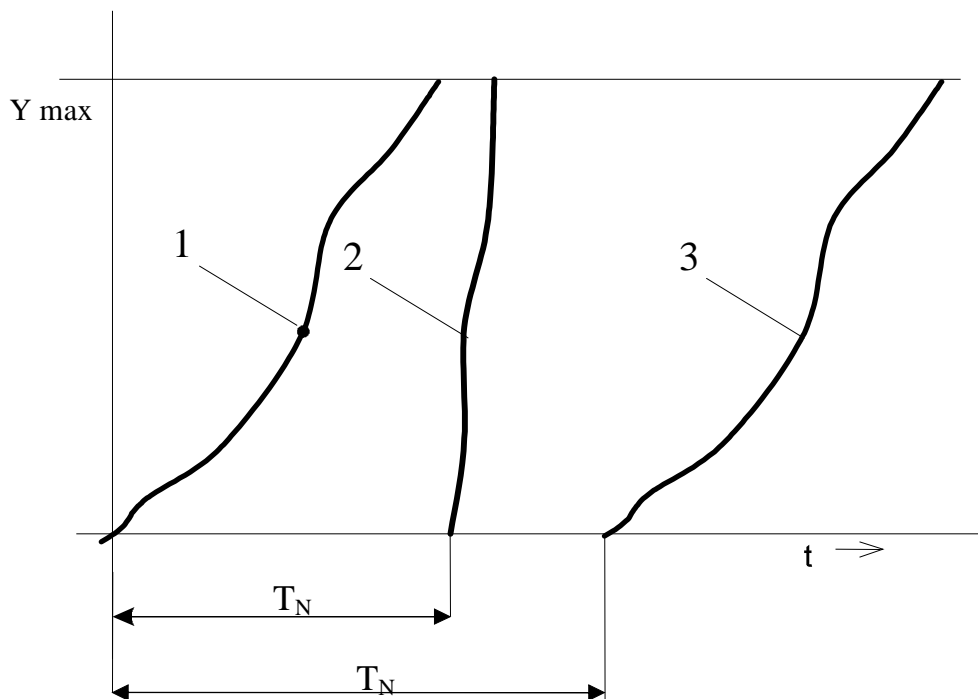
Postupné poruchy se projevují u většiny součástí vozidel, jsou spojené s procesem koroze, křehnutí plastů, únavy materiálu, opotřebení (pneumatiky, brzdového obložení, pístová skupina spalovacího motoru apod.). Zpravidla je možné proces degradace, a tím i nebezpečí vzniku poruchy dobře identifikovat využitím preventivních údržbových systémů a diagnostiky. Degradací procesy jsou relativně pomalé, je dostatek času hrozící poruchu identifikovat a provést vhodné kroky k jejímu zabránění, nebo alespoň k omezení důsledků při vzniku poruchy.



Obr. č. 4.1 Průběh opotřebení a vznik poruchy

**Náhlé poruchy** vznikají v důsledku **vlivu vnějšího působení** (zatížení), které překračuje konstrukční možnosti prvku a nebylo předpokládáno v technických podmínkách. Dochází k němu náhle, bez předchozích příznaků, příkladem je nehoda vozidla. Častou příčinou jsou skryté materiálové či konstrukční závady (což se někdy projeví jako nehoda). Rychlost změny poškození (degradace) prvku je velká, vznikají lomy, plastické deformace jako důsledek přetížení konstrukce. Většina náhlých poruch je dobře identifikovatelná, protože úzce souvisí se svým vznikem – např. nehodou vozidla. Není proto nutné k jejich identifikaci použít preventivní systém údržby, je však vždy nutné provést velmi pečlivou kontrolu vozidla. Ty poruchy, které se nepodaří po nehodě identifikovat, jsou velmi nebezpečné při dalším provozu vozidla.

Základním rysem náhlé poruchy je nezávislost pravděpodobnosti jejího vzniku na předchozí době práce prvku, řídí se **náhodným rozdělením vnějších působení**. Na rozdíl od postupné poruchy je čas začátku vzniku poškození  $T_n$  prvku prakticky totožný s časem vzniku poruchy, což je dáno velkou rychlostí vzniku náhlé poruchy (obr. 4.2). **Kombinované poruchy** zahrnují principy obou předcházejících případů, inicializace vzniku degračního procesu má původ ve vnějším působení a rychlost degradace odpovídá vzniku postupné poruchy.



Obr. č. 4.2: Průběh 1. postupné, 2. náhlé a 3. kombinované poruchy

### 4.3 Druhy opotřebení strojních soustav



**Čas ke studiu:** 3 hodiny



**Cíl** Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- orientovat se v základních druzích opotřebení strojních soustav,
- identifikovat a podrobně popsat jednotlivé druhy opotřebení materiálů (adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové, vibrační), nalézt způsoby omezení nebo zabránění opotřebení.

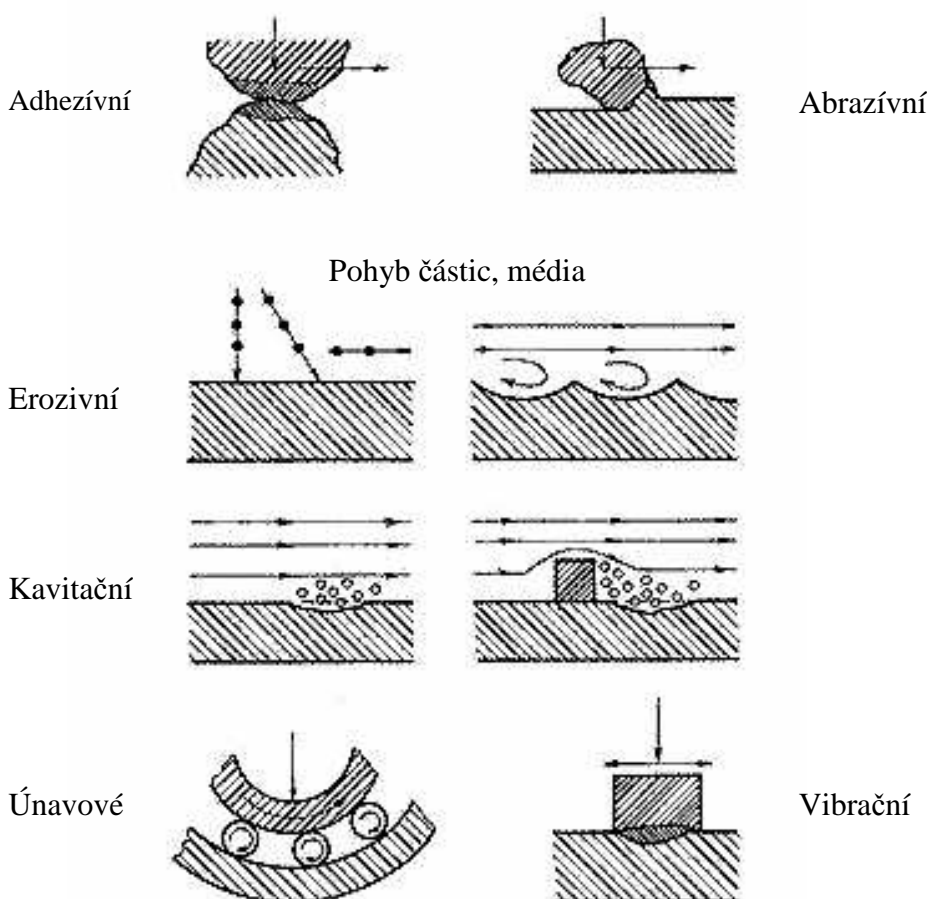


**Výklad**

Opotřebenění je nežádoucí změna povrchu, rozměrů nebo vlastností tuhých těles, způsobená vzájemným působením funkčních povrchů nebo povrchu a média, které opotřebenění vyvolává. V technické praxi dochází velmi často ke kombinaci různých druhů opotřebenění, např. únavové opotřebenění ozubených kol při současném působení abrazivních částic. Dle ČSN 015050 „Opotřebenění materiálu. Názvosloví.“ Rozdělujeme opotřebenění na 6 základních druhů:

- adhezivní,
- abrazivní,
- erozivní,
- kavitační,
- únavové,
- vibrační.

Schématicky jsou druhy opotřebenění znázorněny na obrázku 4.3.



**Obr. č. 4.3: Schématické znázornění druhů opotřebenění**

### □ Adhezivní opotřebenění

Adhezivní opotřebenění 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. Vznik mikrospojů je doprovázen lokálním ohřevem materiálů a vzniká vhodné prostředí pro chemickou reakci kovu s okolním prostředím, která může dále zvýšit rychlost opotřebenění.

V praxi se adhezivní opotřebenění vyskytuje např. při kontaktu kolo – kolejnice, kluzná ložiska, čepy.

Velikost opotřebenění je závislá na zatížení kontaktní dvojice, volbě materiálů kontaktní dvojice, technologii výroby (opracování) funkčních povrchů. Výrazné snížení opotřebenění lze docílit vhodným mazáním funkčních povrchů, protože mazivo odděluje kontaktní povrchy a snižuje lokální napěťové špičky, působí současně jako chemická ochrana povrchů, např. před působením vzdušného kyslíku. Příkladem je mazání okolků hnacích vozidel plastickým mazivem, kdy zavedením této technologie se odstranila nutnost navařovat (renovovat) jízdní plochu dvojkolí.



**Obr. č. 4.4: Adhezivní opotřebenění pístního čepu**

## □ Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení je charakteristické oddělováním částic z funkčního povrchu působením tvrdého a drsného povrchu druhého tělesa – abrazivní částice. Typickým projevem abrazivního opotřebení je vznik rýh na povrchu funkční plochy, případně funkčních ploch, pokud abrazivní částice vnikne mezi dvě pohybuující se tělesa. Počet vzniklých rýh bude nepřímo úměrný velikosti abrazivní částice, šířka rýhy odpovídá přibližně 10 až 20 % průměru částice.

V praxi se abrazivní opotřebení projevuje např. opotřebením zubů lžice rypadel, zmenšením tloušťky stěny potrubí dopravující písek (křemičitý písek je velmi silné abrazivo), vznikem rýh na pístu a pouzdru válce spalovacího motoru apod.

Velikost opotřebení je zjednodušeně řečeno závislá na poměru tvrdosti funkční plochy a abrazivní částice. Obecně platí, že čím tvrdší je abrazivo, tím měkčí musí být povrch funkční plochy a opačně. Proto se např. velmi osvědčilo použití měkčených plastů jako ochranného povlaku potrubí pro dopravu písku. Účinně se lze bránit vzniku abrazivního opotřebení u spalovacích motorů dobrou filtrací nasávaného vzduchu současně s filtrací motorového oleje.

**Poznámka:** Animace laboratorních zkoušek abrazivního opotřebení s využitím brusného plátna, Bondova přístroje, brusné nádoby, zkušebního kanálu a pružného kotouče jsou uvedeny v souboru v příloze.



**Obr. č. 4.5: Abrazivní opotřebení pístu spalovacího motoru**



### □ Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení vzniká dopadem částice obsažené v proudícím médiu na povrch funkční plochy. Pokud má částice dostatečnou energii při dopadu, v závislosti na úhlu dopadu způsobí vytlačení nebo oddělení materiálu z funkční plochy. Částice může být unášena proudem kapaliny (čerpadla, turbíny), nebo proudem plynu (vzduchotechnika, ventilátory). Intenzita opotřebení je závislá na více faktorech, např. rychlost a úhel dopadu částice, chemické složení proudícího média, velikost, tvar a tvrdost částice. Nejvyšší intenzita opotřebení vzniká za situace, kdy moduly pružnosti dopadající částice i funkční plochy jsou velké a vzájemně srovnatelné. Tento jev se využívá při otryskání ocelových konstrukcí kovovými broky, v tomto případě jde tedy o „žádoucí“ druh opotřebení.

Rychlé proudění plynu i rychle proudící kapalina vyvolá dynamické účinky na povrchu funkční plochy a vzniká erozivní opotřebení. Snížit intenzitu opotřebení je možné konstrukčním řešením vedoucím na rovnoměrně rozložené rychlostní pole proudícího média. Ze zkušeností je známo, že kalené – tvrdé povrchy dobře odolávají dopadu částic pod malým úhlem, naopak materiál s relativně měkkým povrchem je odolnější při dopadu částice pod velkým úhlem (kolmo k povrchu).



**Obr. č. 4.6: Erozivní opotřebení koule uzávěru**

### □ Kavitační opořebení

Kavitační opořebení je charakterizováno oddělováním částic kovu z povrchu funkční plochy v místech zániku kavitačních „bublin“, vznikajících v kapalině. 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. Vznikají oblasti (velmi malé), kde tlak kapaliny dosahuje řádu  $10^3$  MPa a teploty v řádu až stovek stupňů. Je zjevné, že současné materiály nedokáží po delší dobu odolávat tomuto typu opořebení a je nutné volit konstrukční postupy zabraňující nebo alespoň omezující možnost vzniku kavitace.

Vhodným řešením omezující kavitační opořebení částí spalovacího motoru (hlavy válců, oběhové čerpadlo, pouzdra válců) je zvýšení tlaku v chladícím okruhu, úprava chladící kapaliny chemickými prostředky. Pokud nejsou naznačené úpravy možné, nezbyvá než zajistit dobrou udržovatelnost a zajištění údržby dotčených součástí.

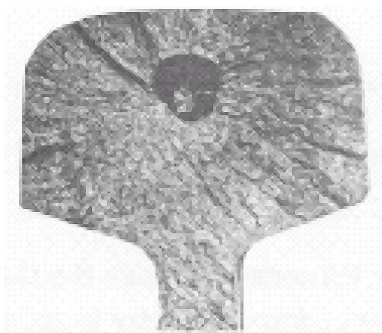


**Obr. č. 4.7: Kavitační opořebení pouzdra válce spalovacího motoru**

## □ Únavové opotřebenění

Únavové opotřebenění vzniká postupnou kumulací poruch v povrchové vrstvě funkčních ploch. Vznikají postupně se rozšiřující oblasti mikrotrhlin, po jistém čase dochází k jejich „spojování“ a postupně vznikají rozsáhlejší oblasti únavového poškození. 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.

Projevy únavového opotřebenění 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. Jiným projevem je vznik spalingu, dochází k odlupování tenké tvrzené povrchové vrstvy materiálu.



**Obr. č. 4.8 : Únavový lom kolejnice**

V železničním provozu je problematika únavového opotřebenění velmi závažný problém např. u dvojkolí a kolejnic. Vznik únavového opotřebenění musí být detekován v počáteční fázi, zanedbání vede k vzniku lomu kolejnice, dřívku nápravy, sesmeknutí obruče apod. Důsledky takových poruch jsou kritické z hlediska zajištění bezpečnosti. K včasné detekci vznikajících trhlin se používají nedestruktivní metody, např. defektoskopie dvojkolí pomocí ultrazvuku.

## □ Vibrační opotřebenění

Vibrační opotřebenění vzniká vzájemnými kmitavými tangenciálními posuny funkčních ploch při spolupůsobení normálového zatížení. Amplitudy kmitavého pohybu mohou být i velmi malé, v řádu 1 až 100  $\mu\text{m}$ . Vibrační opotřebenění je doprovázeno vznikem oxidů železa s typicky hnědočervenou nebo hnědočernou barvou. V praxi vzniká vibrační opotřebenění 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 přepravě lokomotiv na dlouhou vzdálenost došlo k poškození valivých ložisek dvojkolí, způsobené kmity buzené chodem lodního motoru. Tomuto jevu lze zabránit použitím tenkostěnných pouzder, vsunutých do prostoru valivého ložiska s cílem vymezení ložiskové vůle na nulu. Je pochopitelné, že po ukončení přepravy je nutné tyto pouzdra odstranit.



**Obr. č. 4.9: Vibrační opotřebení valivého ložiska**

Uvedený přehled typů opotřebení **není úplný**. Mezi další typy opotřebení patří tečení oceli za tepla – např. u kotlů, nebo tečení oceli za studena. Projevuje se u namáhaných šroubových spojů, ojníc spalovacích motorů postupným zvětšováním délky součástí. Dalším druhem opotřebení je umdlení ocelových pružin, dochází k postupnému zmenšování tuhosti pružiny. Podrobnější informace o mechanismech a průběhu opotřebení včetně rozsáhlé fotodokumentace je uvedeno v [Pošta, 2002]. Obrázky 4.4 až 4.9 jsou převzaty z téhož zdroje.



## Shrnutí kapitoly

**Porucha** je ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci.

**Postupná porucha** vzniká jako důsledek degračního procesu, dochází tak ke zhoršení počátečních vlastností prvku. Pravděpodobnost vzniku tohoto druhu poruchy stoupá s dobou provozu prvku.

**Náhlá porucha** vzniká v důsledku vlivu náhodného vnějšího působení (zatížení), které překračuje konstrukční možnosti prvku. Rychlost šíření poruchy je obrovská.

Základními druhy opotřebenění strojních soustav jsou: **adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační opotřebenění.**



### Kontrolní otázky

- 4.1. Jak jsou definovány základní pojmy – poruchy?
- 4.2. Jak klasifikujeme poruchy podle charakteru jejich vzniku?
- 4.3. Jaké jsou druhy opotřebenění strojních soustav, jaký je mechanismus jejich vzniku?
  - adhezivní
  - abrazivní
  - erozivní
  - kavitační
  - únavové
  - vibrační
- 4.4. Jaké jsou opatření ke snížení nebo odstranění opotřebenění strojních soustav?



### Další zdroje

- [ČSN 015050] ČSN 015050: Opotřebenění materiálu. Názvosloví.
- [Pošta, 2002] Pošta, J. - Veselý, P. - Dvořák, M.: Degradace strojních součástí. Monografie Praha, ČZU, 2002, ISBN 80-213-0967-9
- [Stuchlý, 1993] Stuchlý, V.: Teória údržby, VŠDS Žilina, Žilina 1993, ISBN 80-7100-056-6