

Synergické aspekty mezních stavů strojních součástí

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Michal Černý, CSc.

Vypracoval:

Milan Prášek

N

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci: **Synergické aspekty mezních stavů strojních součástí** vypracoval/a samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom/a, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne 18. 5. 2017

Poděkování:

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Michalu Černému, CSc. za cenné rady a připomínky při vedení práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na synergické aspekty mezních stavů strojních součástí.

Práce má za cíl seznámit se základními principy vzniku vad a následného porušování v materiálu. Dále popsat činnost soudního znalce a právních předpisů s touto činností spojených.

V části doporučení pro praxi má práce snahu o přiblížení postupu investigace škodné události a důležitost zaměření na detailní objasnění příčiny selhání strojní součásti a následného zničení stroje.

Klíčová slova

Degradace, opotřebení materiálu, únava materiálu, křehký lom, technické znalectví, soudní znalectví.

Abstract

This bachelor thesis is focused on synergic aspects of limit states of machine parts.

The aim of the work is to introduce the basic principles of defects and subsequent violations of the material. Further describes the work of the forensic expert and the legal regulations related to this activity.

Practical recommendations are trying to get closer to investigating the malicious event and the importance of focusing on the detailed explanation of the cause of the machine component failure and the subsequent destruction of the machine.

Keywords

Degradation, material wear, material fatigue, brittle fracture, technical connoisseurs, forensic experts

Obsah

1	Úvod	8
2	Cíle bakalářské práce	9
3	DEGRADACE OCELOVÝCH KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ	10
3.1	Vliv škodlivých prvků na vlastnosti materiálu	10
3.2	Vliv výrobních postupů při výrobě polotovarů	10
3.3	Vliv výrobních technologií.....	11
3.4	Vliv provozní.....	11
3.4.1	Vliv deformace a rychlosti zatěžování	11
3.4.2	Vliv provozní teploty.....	12
4	OPOTŘEBENÍ MATERIÁLU	13
4.1	Hlavními činiteli v opotřebení jsou:	13
4.2	ČSN 01 50 50 dělí opotřebení na šest základních druhů:.....	14
4.2.1	Adhezivní opotřebení.....	14
4.2.2	Abrazivní opotřebení.....	15
4.2.3	Erozivní opotřebení	16
4.2.4	Kavitační opotřebení	18
4.2.5	Vibrační opotřebení.....	19
4.2.6	Únavové opotřebení	21
5	ÚNAVA MATERIÁLU A ÚNAVOVÉ POŠKOZENÍ	25
5.1	Proces únavy.....	25
5.1.1	První stádium změny mechanických vlastností.....	26
5.1.2	Druhé stádium.....	28
5.1.3	Třetí stádium.....	30

6	LOM MATERIÁLU	33
6.1	Křehký lom	33
6.2	Houževnatý lom.....	36
7	DOPORUČENÍ PRO TECHNICKOU PRAXI	37
7.1	Doporučení pro praxi v oblasti hodnocení degradace materiálu	37
7.2	Doporučení pro praxi v oblasti technického zručnosti	41
8	Závěr	43
	Literatura	44
	Seznam obrázků	46

1 Úvod

Se vznikem první průmyslové revoluce v 18. – 19. století, byla činnost vykonávaná lidmi a zvířaty, postupně nahrazována stroji. Za symbol průmyslové revoluce je považován parní stroj. S příchodem strojů se začíná rozvíjet nový obor strojírenství. Na kvalitu strojů byl kladen čím dál vyšší důraz, bylo zapotřebí nejen kvalitnějších materiálů ale i jeho správná výroba. Díky větší poptávce po železné rudě se začíná strojů využívat pro těžbu a vznikají těžební věže. První studie zabývající se vlivem cyklického zatěžování na řetězy těžebních věží popsal W.A.J. Albert v roce 1828. Označení únav použil poprvé ve své práci Francouz J.V. Poncelet 1839 v knize o mechanice. Na přepravu velkého množství materiálu vyprodukovaného stroji, vznikají první železnice a parní lokomotivy, kde se na nápravách projevuje vliv cyklického namáhání. Na tuto skutečnost poukazuje významný železniční inženýr Augustian Wöhler, který začal v 50 - tých letech minulého století zkoumat poruchy způsobené tímto namáháním. Wöhler položil základy, které pomáhají odstranit závady způsobené únavou. Navrhl zkoušky litiny, ocelí a delších kovů na ohybové, torzní a osově namáhání. Pod vedením Českého profesora F. Píška vzniká v 50 - tých letech tohoto století v Brně Ústav fyzikální metalurgie.

V dnešní době jsou na zkoumání materiálu a poruch využívány nejmodernější technologie. Pro pochopení dějů probíhajících v materiálu při lomu materiálu nám nejvíce dopomáhají elektronové mikroskopy. Díky tomuto můžeme vidět přesný průběh lomu až na samotné atomové mřížce.

2 Cíle bakalářské práce

Cílem této práce je vysvětlit problematiku porušování strojních součástí. Základní seznámení s procesem výroby materiálu a při tomto vznikající vady. Dále chce autor objasnit procesy poškozování součástí při jejich používání, vznik lomu materiálu a následky které z tohoto vyplývají.

Seznámit čtenáře s praxí technického znalce, zákonné podmínky pro vznik soudního znalce. Problematiku při vyhodnocování porušených strojních součástí.

3 DEGRADACE OCELOVÝCH KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ

Vlastnosti ocelového materiálu se dají ovlivnit použitými výrobními technologiemi. V porovnání ideálního stavu se skutečným, můžeme zjistit, že při výrobě dochází ke značnému ovlivnění vlastností materiálu. Pokud dojde ke zhoršení vlastností, používáme označení výrobní degradace (Ptáček L. Et al.; 1999).

„Degradací materiálů se tedy rozumí procesy většinou postupného, trvalého a nevratného zhoršování vlastností materiálů součástí, které mohou ohrozit bezpečnost a spolehlivost součástí i celého zařízení a v krajním případě mohou vést až k úplnému selhání jejich funkce (k meznímu stavu)“. (Ptáček L. et al.; 1999)

3.1 Vliv škodlivých prvků na vlastnosti materiálu

Čistota materiálu je tedy dána následujícími škodlivými prvky:

Síra – dostává se do oceli z rud a paliv. Síra má za následek křehkost oceli při tváření za tepla, zhoršuje houževnatost a tvárnost oceli při 20 °C, svařitelnost.

Kyslík – dostává se do oceli při zkujňování. Kyslík zhoršuje zejména vrubovou houževnatost.

Fosfor – zhoršuje svařitelnost, vrubovou houževnatost a zvyšuje lámavost za studena

Dusík – vylučuje se na hranici zrn, to zapříčiňuje nižší vrubovou houževnatost a tvárnost za studena. Tento jev se označuje jako stárnutí oceli.

Vodík – uvnitř materiálu vyvolává vznik trhlinek (Horáček J; 2000).

3.2 Vliv výrobních postupů při výrobě polotovarů

Výrobní degradace se objevuje jak v době přípravy materiálu, tak i v průběhu jeho zpracování. Jako významní činitelé například při odlévání nebo svařování působí dendritická segregace a mikrosegregace.

- Dendritická segregace

Je nerovnoměrné rozdělení leguru a doprovodných prvků, což je důsledek nerovnovážného tuhnutí. Segregace vede k poklesu tvárnosti a vrubové houževnatosti oceli. Následkem toho dochází k lomům ve vycezeninách a mezidendritickým lomům (Ptáček L et al.; 1999).

- Mikrosegregace

V materiálu jsou přítomny poruchy krystalové struktury, které jsou potenciálními místy pro segregaci. Doprovodné prvky jsou vázány v tzv. vměstky. Jedná se o relativně malý obsah, který segreguje a může významně přispět k degradaci materiálu (Ptáček L et al.; 1999).

3.3 Vliv výrobních technologií

Výrobní technologie zásadně ovlivňují materiál vzhledem k jeho budoucímu uplatnění např.: ocel je vyráběna oxidačními pochody, a proto v závěru tavby zůstává množství rozpuštěného kyslíku v kovové lázni. Deoxidací je možné snížit obsah kyslíku ve výsledném produktu a tím zlepšit jeho vlastnosti.

3.4 Vliv provozní

Dlouhodobým účinkem vysoké teploty, mechanického namáhání a agresivního prostředí dochází k degradaci materiálu, snížení životnosti a bezpečnosti. (creep, koroze, pokles meze kluzu, snížení koeficientu bezpečnosti, apod.)

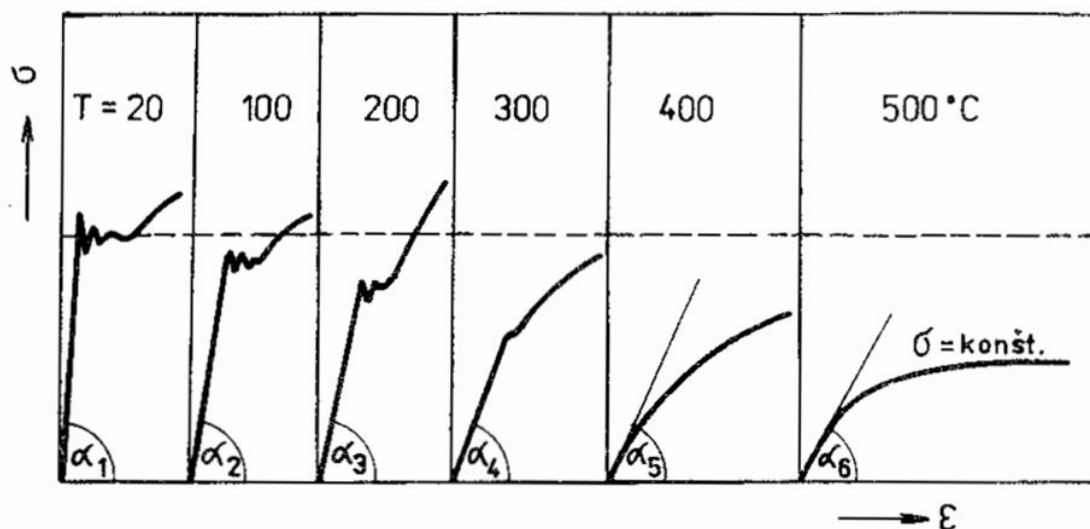
3.4.1 Vliv deformace a rychlosti zatěžování

Rychlost zatěžování negativně ovlivňuje vlastnosti materiálu. S rostoucí rychlostí zatěžování, můžeme očekávat zkřehnutí materiálu, pak tedy platí:

rychlost zatěžování posouvá tranzitní teplotu křehkosti směrem k vyšším teplotám (www.ipm.cz)

3.4.2 Vliv provozní teploty

Teplota ovlivňuje vlastnosti materiálu. Při návrhu konstrukčního řešení je proto nutné započítat vliv teploty na konstrukci. U oceli do 350°C postupně mizí výrazná mez kluzu, nad 350°C zaniká výrazná mez kluzu, dochází k jevu označenému jako tečení – creep. Naopak při nízkých teplotách klesá houževnatost a snižuje se pevnost a hrozí křehký lom, mluvíme o tranzitním lomovém chování. Odolnost proti nízkým teplotám lze dosáhnout snížením obsahu uhlíku maximálně 0,15% a zvýšením obsahu manganu až na obsah 1,6% (www.opi.zcu.cz.).



Obr. 1 Vliv teploty na tahový diagram oceli
Zdroj: <http://slideplayer.cz>

4 OPOTŘEBENÍ MATERIÁLU

Opotřebení se definuje jako trvalá nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, vyvolaná vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolá. Opotřebení je jeden z nejrozšířenějších způsobů poškození materiálu (Strnadel B.; 1993).

4.1 Hlavními činiteli v opotřebení jsou:

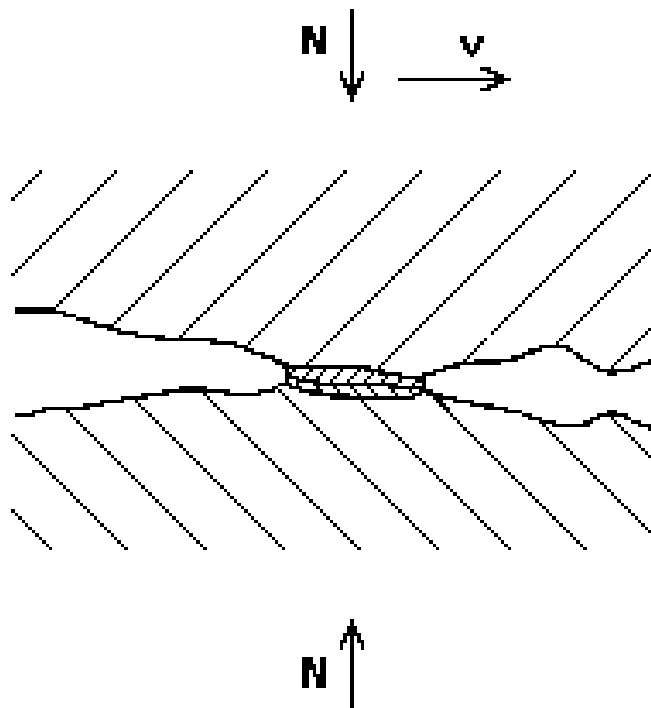
1. Mikroplastická deformace - vrstvy materiálu přicházejí do přímého kontaktu. To má za následek tvorbu mikrospojů. Při jejichž následném rozrušování dochází k oddělení kovových částic a k přemístění materiálu povrchů. Intenzita tohoto procesu závisí na řadě činitelů:
 - Vlastnosti vzájemně působících povrchů
 - Vlastnosti média mezi povrchy
 - Charakteristiky pohybu povrchů (směr, rychlost)
 - Zatížení (Janovec J. et al.; 2004)
2. Koroze kovu - převážně vzniká chemickou nebo elektrochemickou reakcí, při které dochází k rozrušování materiálu působením okolního prostředí. Při korozi dochází ke znehodnocení povrchové vrstvy a vnitřní struktury materiálu. Poškození korozí má vliv na zhoršení povrchových, pevnostních a plastických vlastností, lomových charakteristik, může vést až k úplné ztrátě funkčnosti součástí. (Janovec J. et al.; 2004).

4.2 ČSN 01 50 50 dělí opotřebení na šest základních druhů:

- Adhezivní
- Abrazivní
- Erozivní
- Kavitační
- Únavové
- Vibrační (ČSN 10 50 50)

4.2.1 Adhezivní opotřebení

Je typické v případech, kdy dochází ke smýkání dvou těles, přitlačovaných k sobě normálovou silou jak je patrné z obrázku (Obr. 2). Následkem jejich dotyku, dochází k porušení povrchových absorpčních a oxidových vrstev a ke vzniku adhezivních mikrospojů, které jsou následně rozrušovány. Bowden – Taborova teorie smykového tření: Třecí síla je rovna síle nutné k porušení adhezivních spojů (mikrosvarů).



Obr. 2 Adhezivní opotřebení

Zdroj: <http://www.gsxr.wz.cz>

Faktory, které mají největší vliv na vznik adhezivního opotřebení:

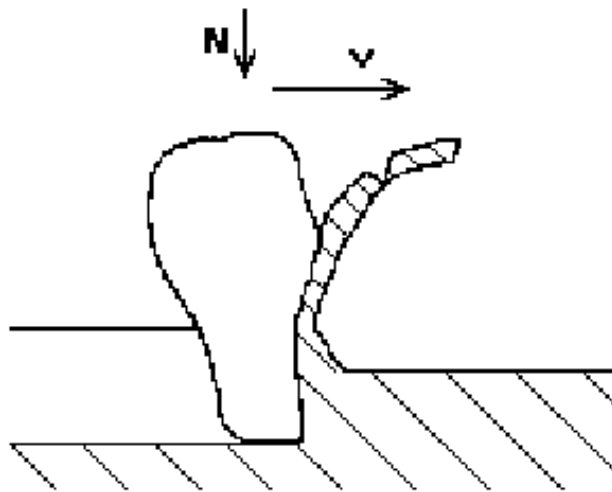
- hloubka vnikání a poloměr zakřivení povrchových mikronerovností
- velikost zatížení a rychlost relativního pohybu
- schopnost materiálu vytvářet adhezivní spoje (Janovec J. et al.; 2004, www.fsiforum.cz).

Velikost adhezivního opotřebení je závislé na volbě materiálu a je přímo úměrné zatížení N a velikosti posunu V a nepřímo úměrné tvrdosti materiálu. Použitím různých materiálů, zvýšením tvrdosti povrchu a dostatečného množství kvalitního maziva je možné opotřebení minimalizovat (Moravčík R. et al.; 2009).

Pro vyhodnocení odolnosti dvou materiálů proti adhezivnímu opotřebení lze použít vztahu, podle kterého lze snížit opotřebení použitím dvou tvrdých materiálů, nebo volbou třecí dvojice s velmi malou hodnotou součinitele adhezivního opotřebení (Janovec J. et al.; 2004).

4.2.2 Abrazivní opotřebení

Je vzájemné působení funkčních povrchů a abrazivního média (Obr. 3). Pozorovatelné je na rýhování a odřezávání částic na exponovaném tělese. Příkladem mohou být zuby bagrovacích lžic a mlecí části mlýnů tvrdých surovin (kamen, uhlí). Porušování povrchu se děje mikrořezáním, rýhováním a podpovrchovými trhlinkami. Při procesu mikrořezání odebírají částice z povrchu drobné třísky. Čím větší bude tvrdost částic, tím více se bude uplatňovat proces mikrořezání, přičemž se tohoto procesu účastní pouze 10% z celkového počtu částic. Zbylé částice 90 % vytváří na povrchu rýhy, na jejichž okraji se vytváří val, který po překročení plastické deformace vede ke vzniku mikrotrhlin (Ptáček L. Et al.; 1999).



Obr. 3 Abrazivní opotřebení

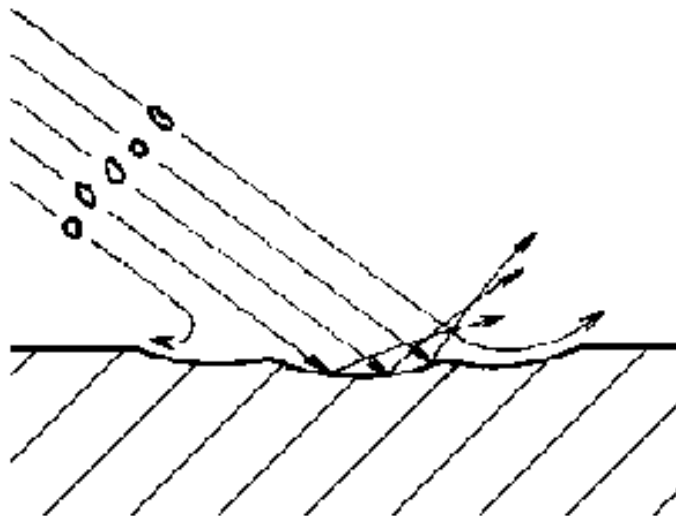
Zdroj: <http://www.gsxr.wz.cz>

4.2.3 Erozivní opotřebení

Pro erozivní opotřebení je charakteristické oddělování materiálu účinkem:

- částic nesených proudem kapaliny nebo plynu (vyskytuje se u cyklonů, tryskačů)
- samotnou kapalinou, párou nebo plynem (vyskytuje se u náběžných hran křídel a ostatních ploch letadla, koncových stupňů parních turbín).

Způsob porušení materiálu je podobný jako u abrazivního opotřebení, dochází k rýhování a seřezávání materiálu. Typické pro erozivní opotřebení je zvlněný povrch a zvrásnění i v prohlubeninách (Obr. 4).



Obr. 4 Erozivní opotřebení

Zdroj: <http://www.gsxr.wz.cz>

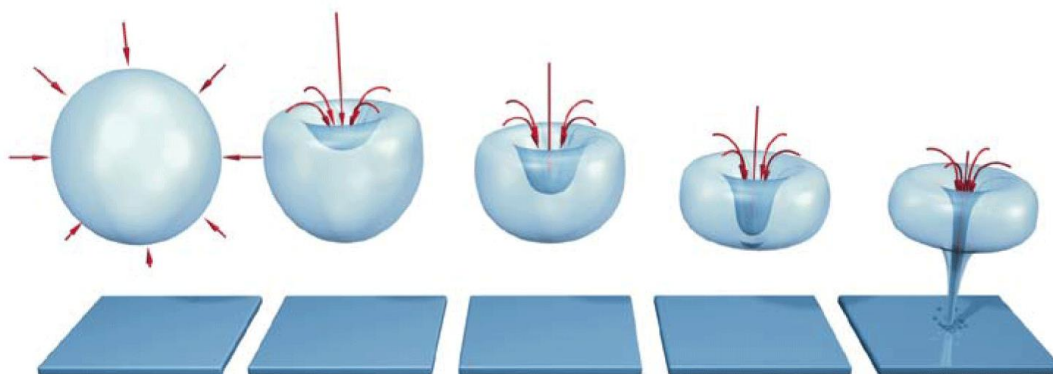
Intenzita opotřebení je ovlivněna řadou faktorů:

- rychlostí opotřebovovacích částí
- teplotou a vlastnostmi nosného média
- velikostí a tvarem částic
- úhlem dopadu a energií dopadajících částic
- vlastnostmi opotřebovávaného materiálu.

Všechny výše uvedené vlivy působí současně jen v rozdílných měrách. Rozsah v jakém budou částice působit na opotřebovávaný povrch, ovlivňuje více faktorů. Lehké částice se nemusí vůbec dostat do kontaktu s povrchem. Proto jsou zavedeny pojmy kritická velikost a kritická rychlost. Pokud dopadne částice na povrch s velkou hodnotou modulu pružnosti, pak vznikající síly jsou značné a dochází k velkému opotřebení tohoto materiálu. Obráceně tomu bude při dopadu částic na povrch s malým modulem pružnosti, pak vznikající síly při značných deformacích jsou malé např. u pryže a dochází k velice nepatrnému opotřebení (Janovec J. et al.; 2004).

4.2.4 Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení se děje při zanikání plynných bublin v kapalině a dochází při něm k vytrhávání částic z povrchu materiálu. Při zániku kavitační dutiny je vyvolán hydrodynamický ráz (Obr. 5), vzniká mikroproud kapaliny o vysoké rychlosti (nad 300 m/s). Tímto dojde k vyvolání tlakové vlny a rázy, dosahující hodnoty 100 MPa i vyšších.



Obr. 5 Kavitační opotřebení

Zdroj: <http://eswt.net>

Kavitační poškození se vyskytuje v čerpadlech, v turbínách, ve vodovodech, v tlakově mazaných ložiscích, pračkách, lopatkách lodních šroubů (Obr. 6) apod.

Hlavní faktory ovlivňující velikost kavitačního opotřebení jsou:

- Obsah plynů v kapalině (Obr. 6)
- Teplota a tlakové poměry
- Povrchové napětí a viskozita kapaliny



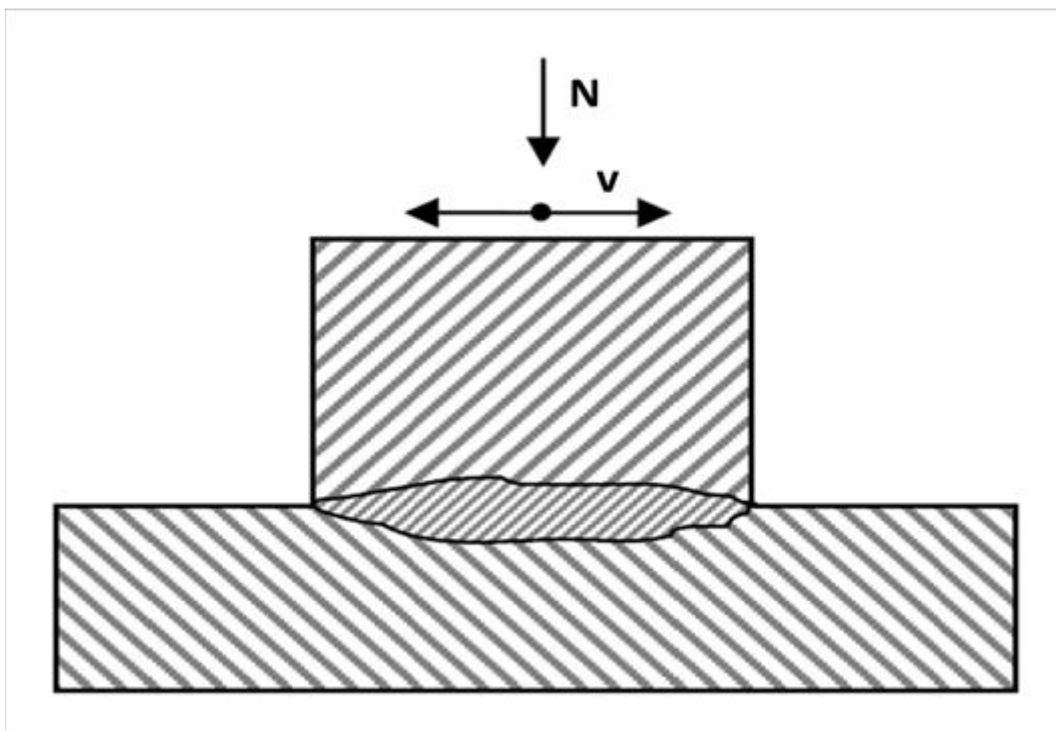
Obr. 6 Lodní šroub a proud plynu
Zdroj: <http://watercraftjournal.com>

Povrchové napětí kapaliny má výrazný vliv na velikost kavitační dutiny. Při vyšším povrchovém napětí vznikají větší dutiny za jinak stejných podmínek, to znamená větší intenzitu kavitačního opotřebení. Naopak vliv viskozity je pozorovatelný těsně před zánikem kavitační dutiny a to tak, že snižuje rychlost, s jakou kapalina vniká do dutin (Janovec J. et al.; 2004).

4.2.5 Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení vzniká na stykových plochách konajících vzájemný kmitavý pohyb o malých amplitudách výchylky při působení normálových sil (obr. 7). S vibračním opotřebením se můžeme setkat nejen u součástí s hybným uložením valivá ložiska, čepy, hřídele, ale také u spojů na první pohled nehybných lisované spoje, nýty,

šrouby, je li při provozním namáhání překročena mez pružnosti jednoho z materiálů. U vibračního opotřebení se však mimo mechanické složky významně podílí i koroze materiálu.



Obr. 7 Vibrační opotřebení

Zdroj: Obrázek autora

Velikost vibračního opotřebení ovlivňuje amplituda, frekvence, měrný tlak ale také volba dvojice materiálu (obr. 8).

Odolnost materiálu proti vibračnímu opotřebení se posuzuje jak z hlediska odolnosti proti abrazi, tak i z hlediska odolnosti proti oxidaci. Jako nejvhodnější se jeví materiál s vysokou odolností proti abrazi a jen velmi málo oxidující. Oxidující oddělené částice nemohou materiál odolný abrazi porušit.



Obr. 8 Vibrační opotřebení ložiska

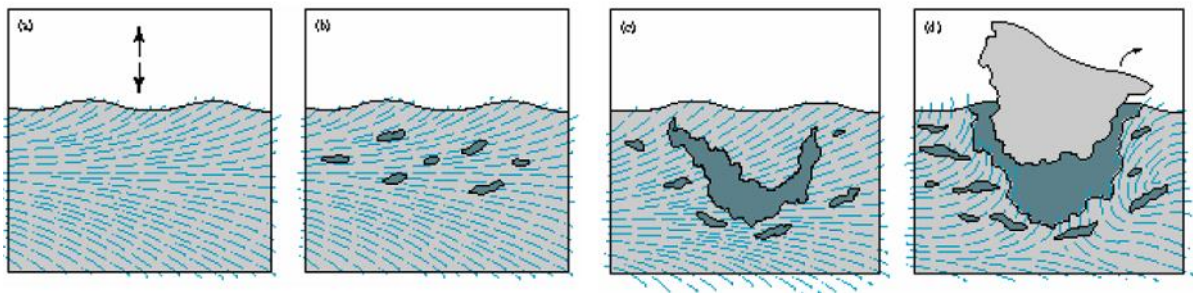
Zdroj: <http://www.technicka-diagnostika.cz>

Odolnost proti vibračnímu opotřebení mají dvojice rozdílných ocelí nebo PTFE a nástrojová ocel.

Negativní účinky vibračního opotřebení lze snížit povrchovým zpevněním, deformací za studena, povlakováním nebo volbou vhodného maziva (Strnadel B.; 1993).

4.2.6 Únavové opotřebení

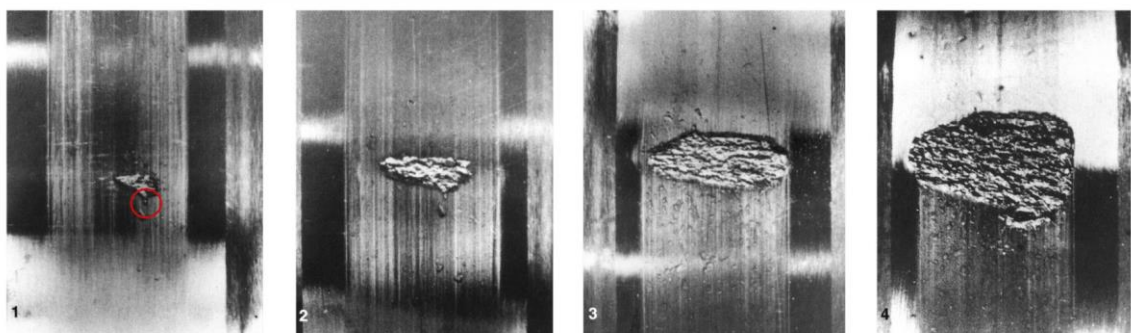
Únavové opotřebení neboli kontaktní únava se vyskytuje všude tam, kde dochází ke styku funkčních povrchů vystavených opakovanému valivému pohybu jiného strojního dílu (Obr. 9). Tímto namáháním dochází v povrchové vrstvě k proměnným elastickým nebo elasticko-plastickým deformacím. Tyto deformace mohou vést podle hodnoty působícího smykového napětí v povrchové vrstvě k lokální vysokocyklové nebo nízkocyklové únavě.



Obr. 9 Únavové opotřebení

Zdroj: <http://docplayer.cz>

Projevem únavového opotřebení je tvorba pitingu (povrchových důlků). Piting je důsledkem vyčerpání plastické deformace materiálu v povrchové vrstvě, vznik podpovrchových mikrotrhlin a vytrhávání kusů materiálu (Obr. 10).



Obr. 10 Vznik únavového opotřebení

Zdroj: <http://evolution.skf.com>

Nejčastěji je možno toto porušení pozorovat na bocích zubů ozubených kol (Obr. 11), valivé dráhy a valivé členy ložisek.



Obr. 11 Pitting na zubech ozubeného kola

Zdroj: <http://forums.pelicanparts.com>

Méně častým případem kontaktního porušování, ke kterému dochází u povrchově tvrzených součástí s malou tloušťkou vrstvy, je odlupování povrchové vrstvy (spalling).

Vysoká opakovaná smyková napětí vyvolaná kontaktním tlakem vedou ke vzniku plastické deformace a únavových mikrotrhlin pod vrstvou, vrstva se pomalu následně prolamuje a odlupuje (Obr. 12).

Vyšší životnost součástí namáhaných kontaktní únavou lze získat zpevněním povrchové vrstvy cementováním, povrchovým kalením nebo nitridováním. Nepříznivý vliv na vlastnosti materiálu má přítomnost vměstků a nečistot ve struktuře. Díky opakovanému namáhání se pak tyto stávají koncentrátory napětí a způsobují dřívější iniciaci mikrotrhlin (Strnadel B.; 1993).



Obr. 12 Spalling

Zdroj: <http://steelselector.sij.si>

5 ÚNAVA MATERIÁLU A ÚNAVOVÉ POŠKOZENÍ

„ Prohlubováním teoretických poznatků a získáváním nových praktických zkušeností vede k postupnému zpřesňování modelových představ, s cílem zvýšit únavovou životnost, zvýšit bezpečnost konstrukcí při úspoře materiálů i v případě zvýšení provozních zatížení. “ (Janovec J. et al.; 2004)

Převážná většina konstrukcí a strojních součástí není namáhána pouze staticky, ale proměnným, kmitovým napětím, které může být pravidelné nebo nepravidelné. Pravidelné můžeme dále rozdělit na střídavé a míjivé. U střídavého se nám pravidelně mění tlakové a tahové napětí. Působící cyklické napětí vyvolá v materiálu deformaci, která se v průběhu zatížení periodicky mění. Existují dva způsoby cyklického namáhání měkký cyklus, tvrdý cyklus.

Měkký cyklus – zatěžování s řízenou amplitudou napětí

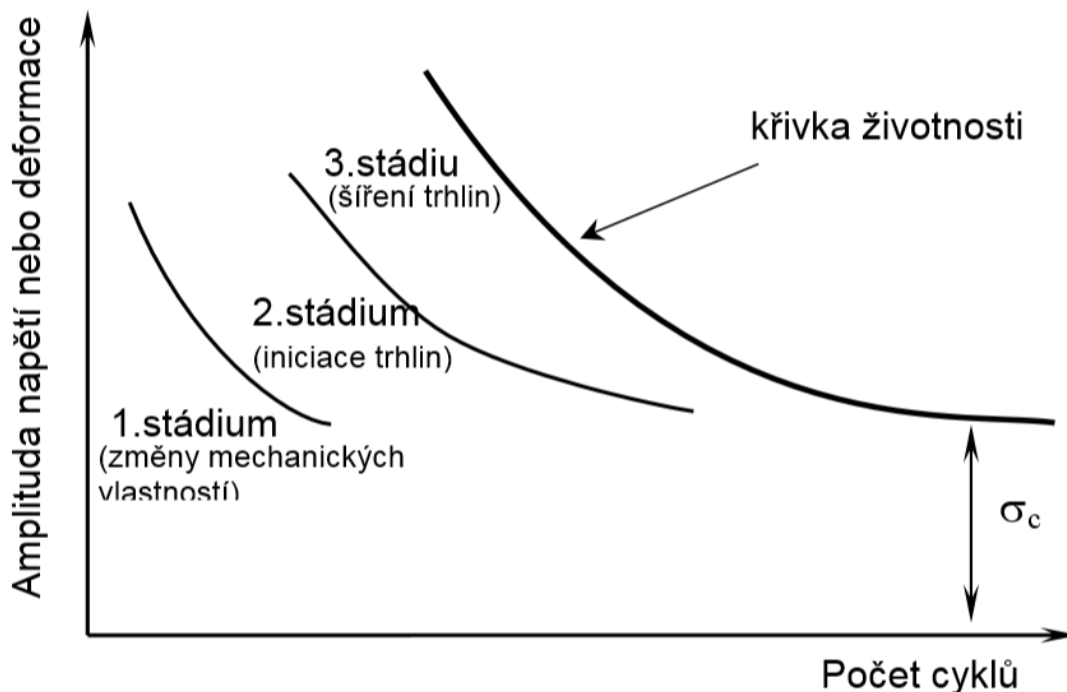
Tvrdý cyklus – zatěžování s řízenou amplitudou poměrné deformace (Strnadel B.; 1993)

5.1 Proces únavy

Odolnost materiálů proti opakovanému namáhacímu cyklu je ovlivněna mnoha různými faktory. Přičemž proces únavy má několik stádií (obr. 13). V jednotlivých stádiích únavového poškození vždy dominuje jeden určitý mechanismus, řídící se více či méně známými a ověřenými zákonitostmi (Janovec J. et al.; 2004).

1. Stádium jsou změny mechanických vlastností. Dochází ke změnám v celém objemu materiálu, a to ke zpevnění nebo změkčení.
2. Stádium vzniku (iniciace) trhlin. Ke změnám dochází pouze v malém objemu vzorku u povrchové vrstvy, kde dochází k plastické deformaci a vzniku mikrotrhlin.

3. Stádium šíření trhlin v kolmém směru k normálovému maximálnímu napětí. Při propojení dostatečného množství mikrotrhlin dochází k únavovému lomu.



Obr. 13 Stádia změn mechanických vlastností

Zdroj: <http://www.vutbr.cz>

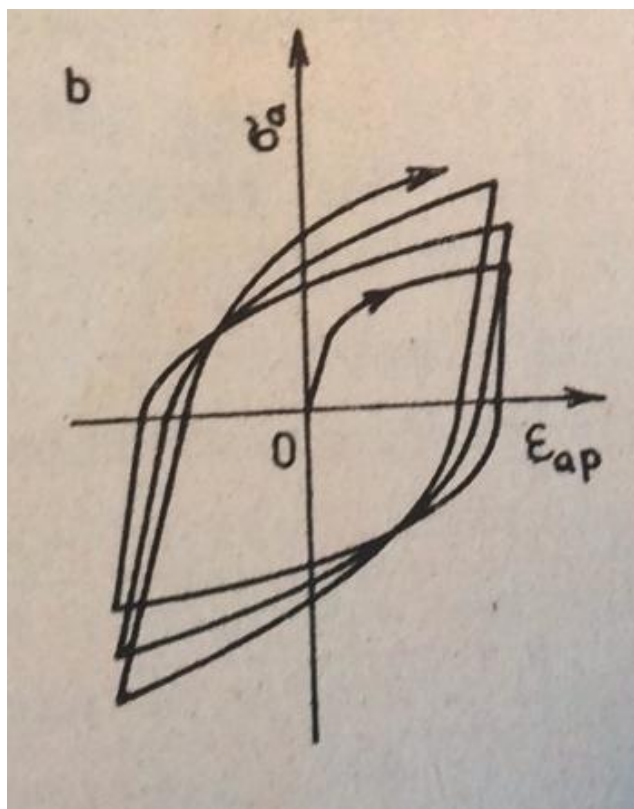
5.1.1 První stádium změny mechanických vlastností

V prvním stádiu dochází v kovových materiálech ke změnám ve fyzikálních, elektrických, magnetických, chemických a mechanických vlastnostech. Experimenty bylo prokázáno, že tyto změny jsou výrazné pouze na začátku zatěžování a s růstem počtů cyklů jejich intenzita klesá, až zcela vymizí (Klesinl M. et al.; 1975).

Během cyklického opakování se vlastnosti materiálu a tím i tvar hysterezní smyčky mění. Nejčastěji můžeme pozorovat následující časové změny:

Zpevnění materiálu

Při měkkém cyklu v průběhu stabilizace hysterese smyčky, s rostoucím počtem opakování amplituda plastické deformace klesá, popřípadě při tvrdém cyklu roste, mluvíme o cyklickém zpevnění materiálu (obr. 14) (Strnadel B.; 1993).

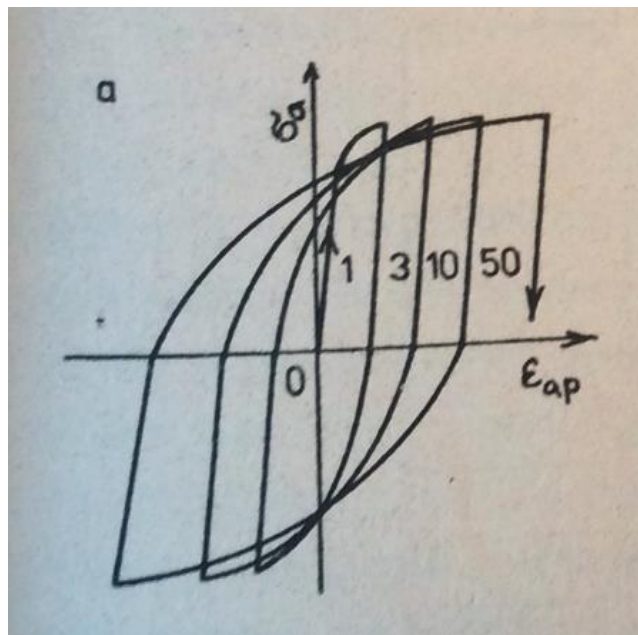


Obr. 14 Cyklická křivka zpevnění

Zdroj: Strnadel B.; 1993

Změkčení materiálu

Pokud při měkkém cyklu s počtem opakování amplituda plastické deformace roste, popřípadě při tvrdém cyklu amplituda plastické deformace klesá, hovoříme o cyklickém změkčení materiálu (obr. 15) (Strnadel B.; 1993).



Obr. 15 Cyklická křivka změkčení

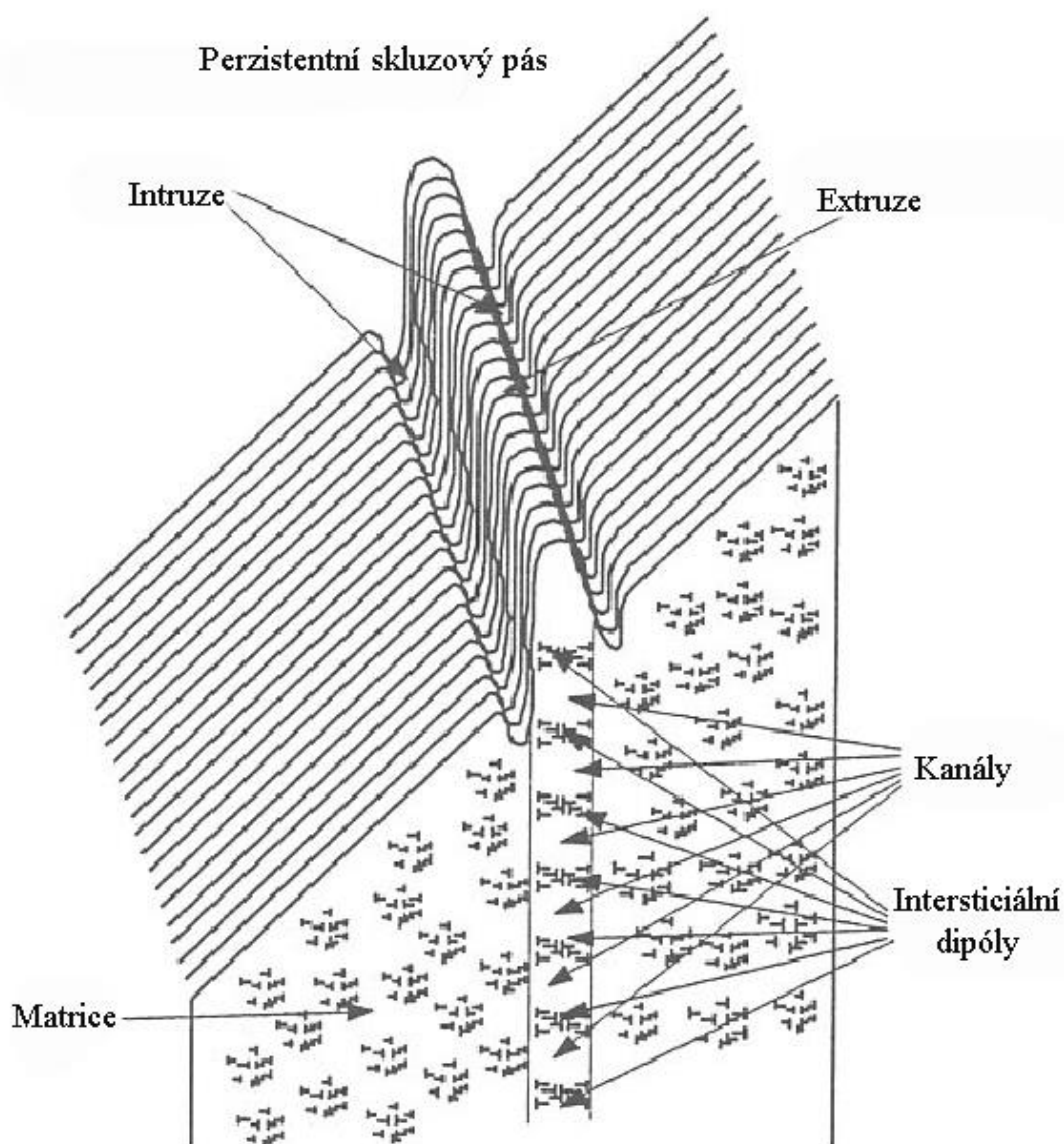
Zdroj: Strnadel B.; 1993

5.1.2 Druhé stádium

Experimenty bylo dokázáno, že počátek trhliny vzniká na volném povrchu součásti, a to v místě, kde se nachází koncentrace cyklické plastické deformace. Stav povrchu součásti tedy rozhoduje o únavové pevnosti. Každé obrábění zanechává na povrchu nerovnosti, lze tedy říci, že žádný povrch není dokonale rovný (Klesnil M. et. Al.; 1975).

Nejčastěji vzniká trhlina v perzistentním skluzovém pásu. S vyšším opakováním cyklů perzistentní skluzový pás roste a začíná docházet k vystupování materiálu nad původní povrch (exturze) a vtlačování materiálu pod původní povrch (inturze). Následkem vyšší amplitudy plastické deformace dochází ke vzniku vysoké koncentrace bodových poruch (vakancí). Tyto poruchy se šíří z perzistentního skluzového pásu dále do okolního materiálu. Proti vakancím se pohybují atomy do okolní matrice, kde dochází k jejich nahromadění a díky tomuto se na rozmezí mezi perzistentním skluzovým pásem a okolí matrice vytváří dislokace, které mají charakter intersticiálních

dipólů. Působením napětí vyjdou dipóly na povrch a vytvoří exturzi (obr. 16). V těchto místech dochází k iniciaci únavové trhliny, která může vzniknout na rozhraní cizí fáze a matrice, přechodem trhliny z prasklé inkluze nebo na skluzových pásech vycházejících z inkluze (Polák J.; 1991).



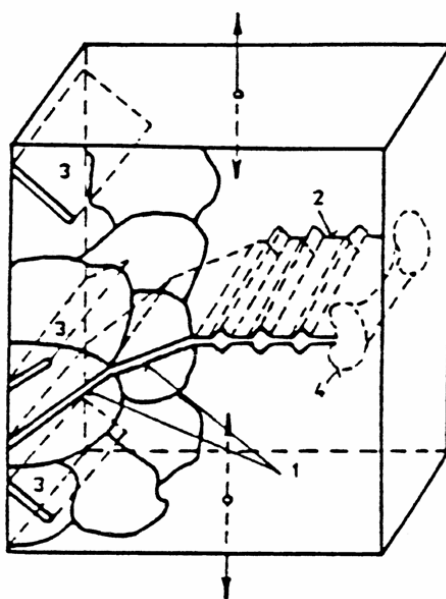
Obr. 16 Vznik perzistentního skluzového pásu a iniciace trhlin

Zdroj: Polák J.; 1991

5.1.3 Třetí stádium

Je šíření trhlin vzniklých v druhém stádiu, kdy za pokračujícího cyklického namáhání dochází k propojování mikrotrhlin a pronikání do hloubky materiálu (obr. 17). První etapou šíření trhliny nazýváme krystalografický růst, protože rostou v krystalografických rovinách. Šíření trhlin v této rovině je pomalé oproti druhé etapě. V první etapě většina trhlin brzy zanikne a nedostane se do větší hloubky než několik mikronů. (Klesnil M. et. al.; 1975)

Únavová trhlina se z počátku šíří ve stejném směru, v jakém proběhla iniciace trhliny. S narůstající délkou se trhlina stáčí do kolmého směru k působícímu napětí. Délka trhliny a přechod do druhého stádia závisí na velkém množství faktorů například: druh materiálu, amplitudě napětí, rychlosti šíření (Polák J. et. al.; 1991)

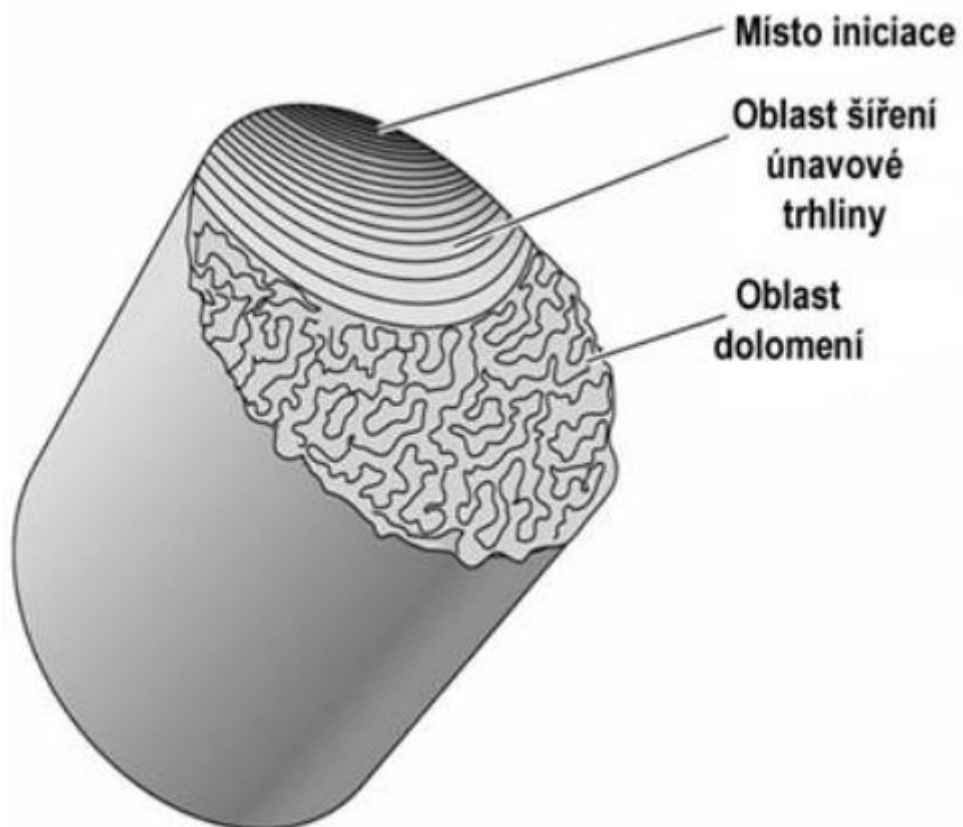


Obr. 17 Schéma šíření trhliny

Zdroj: Pluhař J.; 1987

- 1 – první etapa krystalografické šíření trhliny
- 2 – druhá etapa nekrystalografické šíření trhliny
- 3 – neefektivní trhlina
- 4 – plastická zóna na čele trhliny

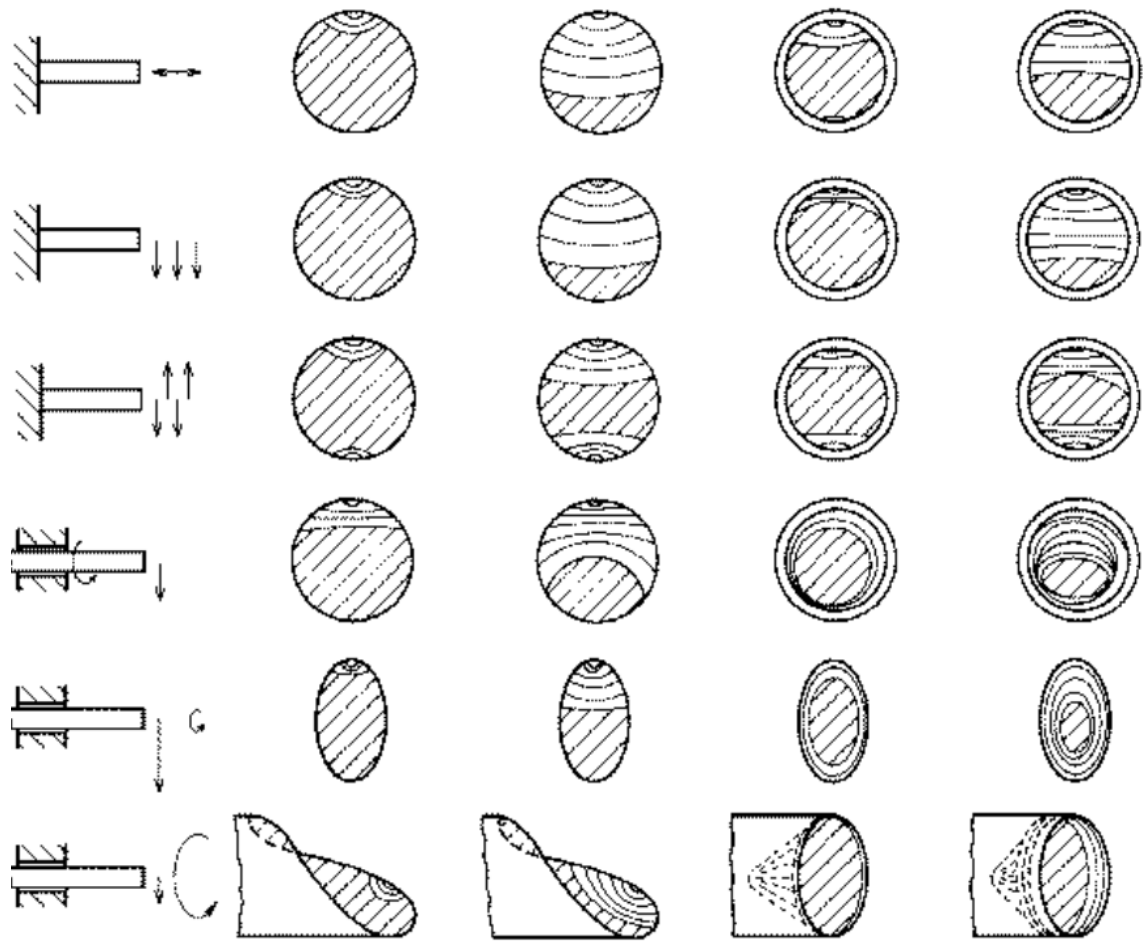
Šíření trhliny končí ve chvíli, kdy se nosný průřez zmenší natolik, že dojde k lomu součásti v místě trhliny vlivem snížení nosného průřezu. Na takovémto lomu pozorujeme z počátku lasturovitý povrch (obr.18), kde procházela trhlina a zdrsňený povrch, kde došlo ke zmenšení průřezu pod únosnou mez a dolomení (Pluhař J.; et al.; 1987)



Obr. 18 Únavový lom

Zdroj: <http://slideplayer.cz>

Dle způsobu namáhání (například: převažujícím tahem nebo ohybem, krutem nebo krutem s ohybem, čistým střídavým nebo míjivým krutem, krutem stálého směru, kombinované namáhání krutem a ohybem) může být struktura lomu (obr. 19):



Obr. 19 Typické případy únavových lomů

Zdroj: <http://www.gsxr.wz.cz>

6 LOM MATERIÁLU

Dle energetické náročnosti můžeme rozdělit na:

1. Křehký lom – nízké spotřeba energie na vznik lomové plochy (obr. 20)
2. Houževnatý lom – vysoká spotřeba energie na vznik lomové plochy

Rozdělení dle tvaru lomové plochy a to na:

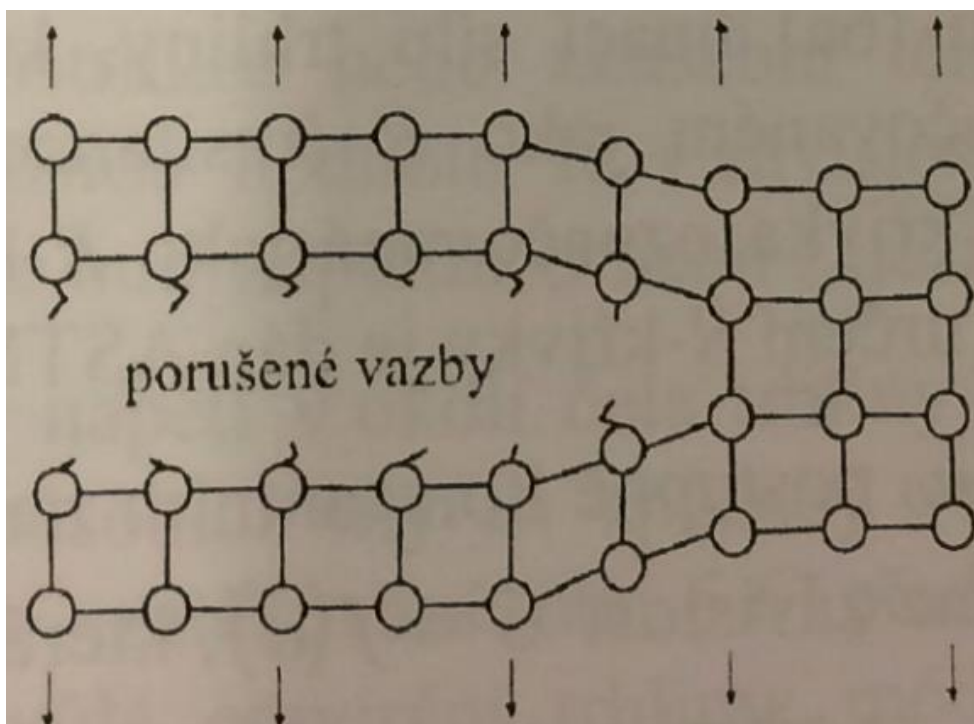
1. Tvárný lom – Předchází-li lomu plastická deformace nebo přetvoření
2. Křehký lom – Nepředchází-li lomu výrazná makroskopická deformace, potom se lom šíří po hranicích zrn nebo v krystalografických rovinách

Rozdělení podle vzniku lomové plochy a jejího přechodu vzhledem k hranicím zrn.

1. Transkrystalický štěpný lom (obr. 22)
2. Transkrystalický tvárný lom
3. Interkrystalický štěpný lom (obr. 21)
4. Interkrystalický tvárný lom (web2.mendelu.cz)

6.1 Křehký lom

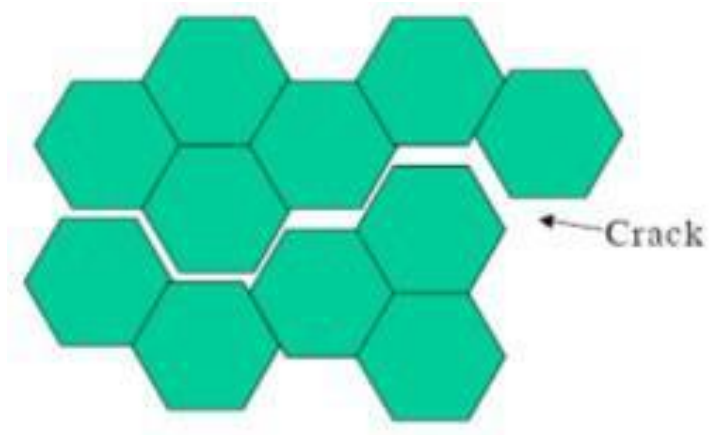
Probíhá při napětí, které je blízké mezi pružnosti, bez zřetelné plastické deformace. Reprezentuje ho rozvoj rychlých trhlin. Tímto je křehký lom velice nebezpečný. Při křehkém lomu dochází k oddělování atomárních rovin (obr. 20). Fraktografický snímek plochy křehkého lomu (obr. 23).



Obr. 20 Schéma vzniku křehkého lomu

Zdroj: Kopec B.; et al.; 2008

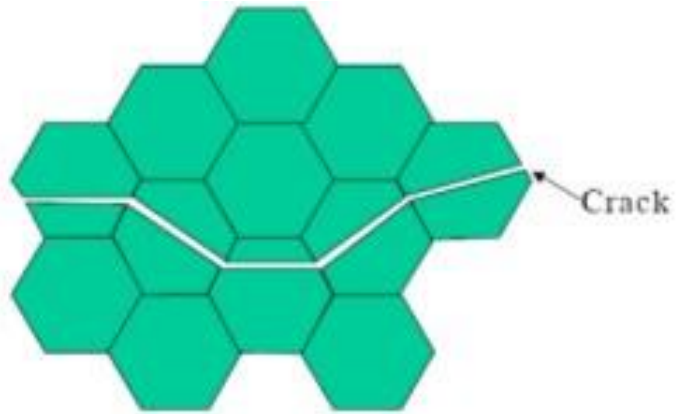
Interkrystalicky – šíří se podél hranic zrn nebo mezi zrn (obr. 21).



Obr. 21 Šíření po hranici zrn

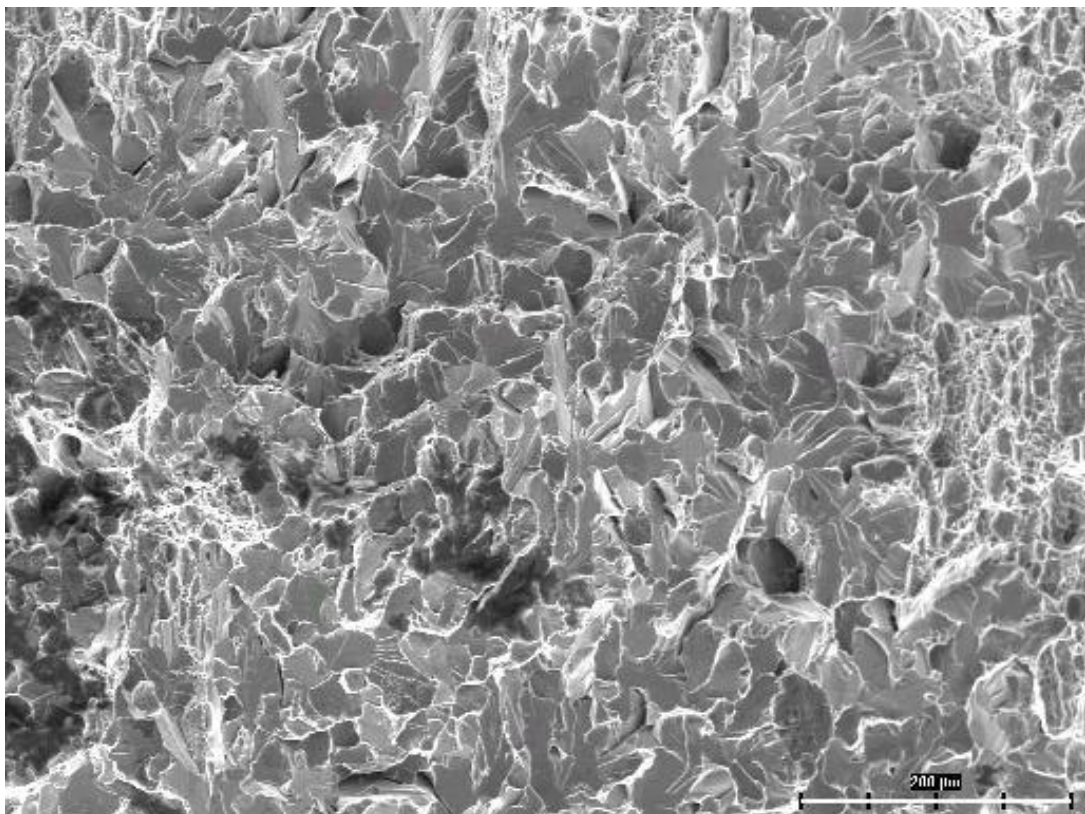
Zdroj: <http://slideplayer.cz>

Transkrystalicky – se šíří lom přes zrna materiálu (obr. 22).



Obr. 22 Šíření přes zrna

Zdroj: <http://slideplayer.cz>

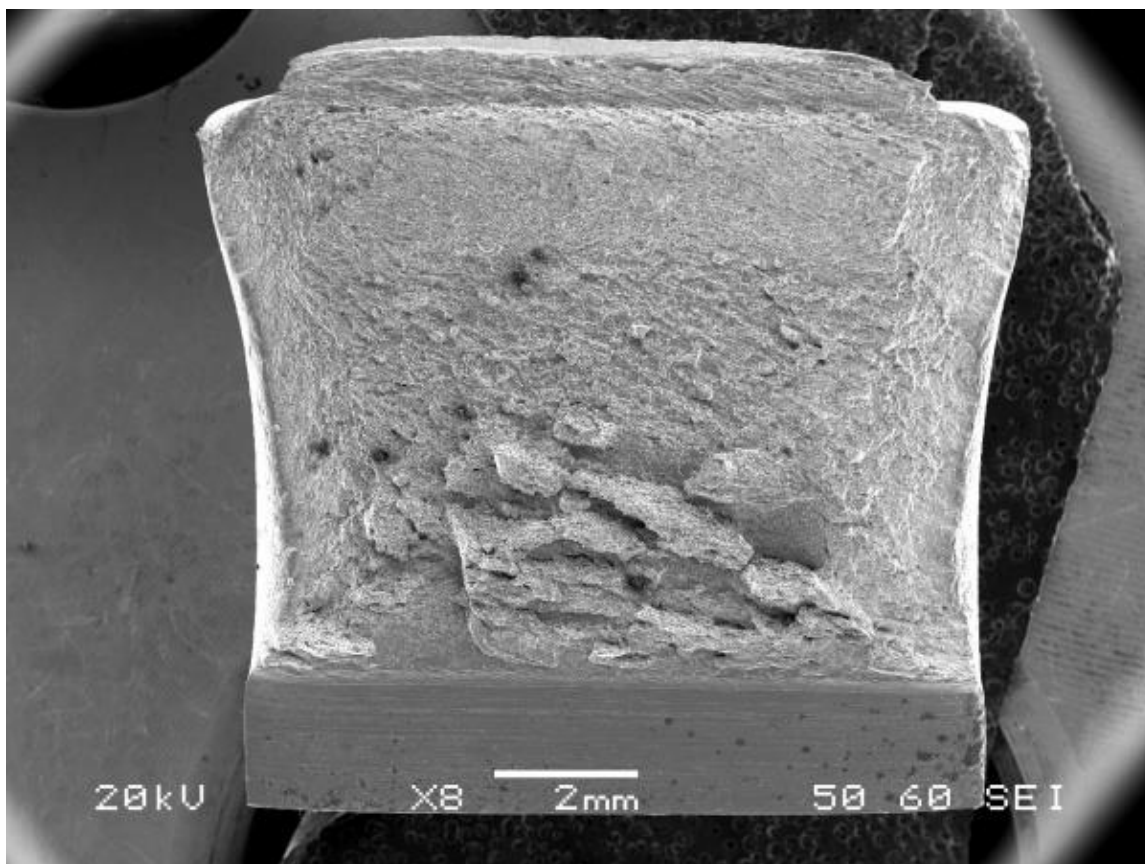


Obr. 23 Fraktografický snímek smíšeného lomu

Zdroj: <http://www.cws-anb.cz>

6.2 Houževnatý lom

Nastává po předchozí plastické deformaci. Bývá doprovázen vznikem lokálního zúžení materiálu (kontrakce v přímém směru obr. 24). Lom je iniciován ve střední části zúžené plochy. V určité vzdálenosti od povrchu se charakter lomu mění, lom probíhá dále ve směru největší smykové složky napětí, přibližně pod úhlem 45° k ose a má charakter smykového lomu.



Obr. 24 Vzhled houževnatého lomu

Zdroj: <http://www.tlakinfo.cz>

7 DOPORUČENÍ PRO TECHNICKOU PRAXI

7.1 Doporučení pro praxi v oblasti hodnocení degradace materiálu

V dnešní době rostou požadavky na spolehlivost strojů a určují hlavní hledisko pro volbu materiálu, způsobu výroby a provoz těchto výrobků. Abychom dosáhly těchto požadavků je potřeba přehodnotit kritéria hodnocení procesů poškozování těles a respektování složitých zákonů kumulace poškození. Každý stroj a konstrukce má omezenou životnost a musíme ji nejen správně určit, ale také hlavně včas rozpoznat.

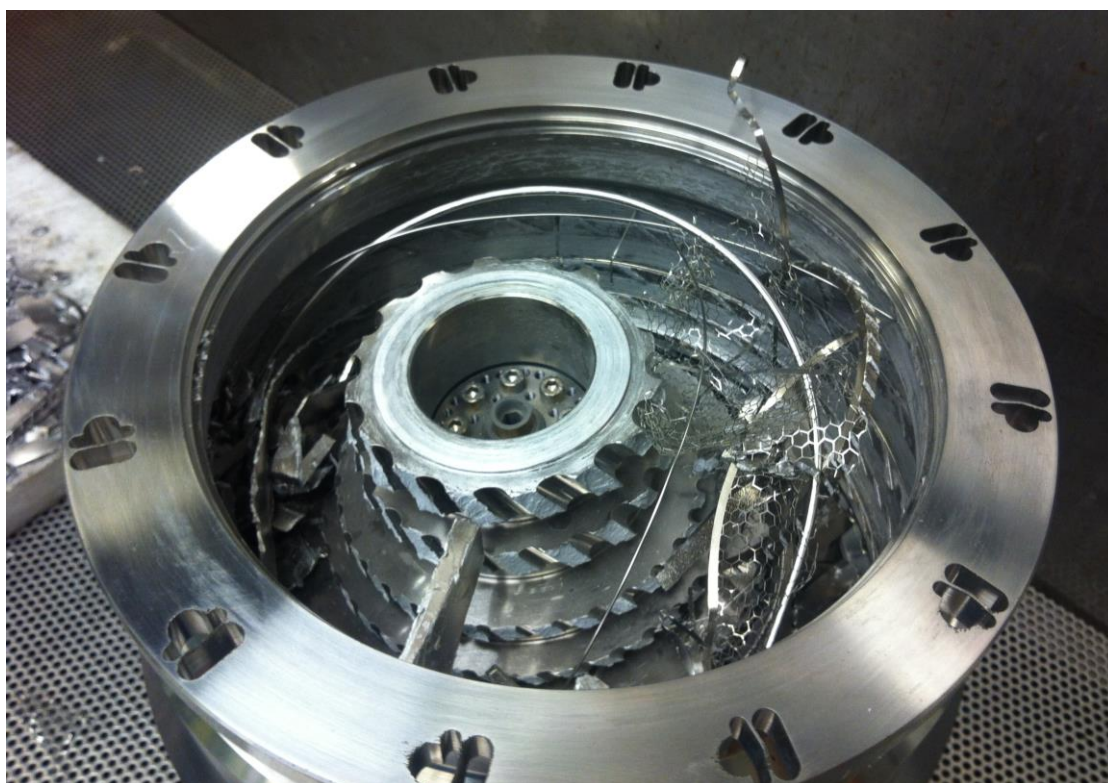
Klasické představy mezních stavu nemohly odpovědět na řadu otázek. Opomíjely to, že porucha má svou dlouhou historii jak z hlediska časového, tak z hlediska prostorového vývoje. Pro volbu materiálu byly rozhodující průměrné mechanické vlastnosti materiálu v průřezu. Uvažovalo se jen průměrné nominální napětí. Při zkouškách, které se staly mírou hodnocení materiálu pro jeho volu a výpočet, se určovala mez kluzu a mez pevnosti. Tyče, které měly defekty, se vylučovaly jako nereprezentativní. Následoval se pouze růst malých trhlin a jejich vývoj do lomu. Ani při hodnocení materiálu na únavu podle klasických názorů nemělo význam studovat jednotlivé fáze rozvoje poruchy, nýbrž se uvažovala mez únavy, která zaručovala neomezenou životnost (Skálová J.; et al 2003).

Soudní znalec v dnešní době musí postupovat při řešení zadání dle nejmodernějších postupů. Pro znaleckou činnost v oboru degradace materiálu je tedy důležité prohlubování znalostí a uplatňování všech moderních systémů, které mohou objasnit pravou příčinu selhání součástí.

Při vyhodnocení selhání součástí se musí nahlížet na problém v širším měřítku historie součástí. Důležitá není jen samotná porušená součást, ale způsob jejího využití, zda nedošlo k její špatné aplikaci a tím k překročení meze, zjištění zda celý stroj byl

využíván dle pokynů výrobce, kontrola dodržování předepsaných servisních intervalů, záznamy o údržbě apod.

Příklad zjištění příčiny selhání turbo molekulární vývěvy. Parametry vývěvy lopatkový rotor (45 000 otáček za minutu) s vloženými statory. Váha rotoru 18 kg s výchytkou při maximálních otáčkách v ose X a Y 5 μ m. Při prvním pohledu se předpokládá vniknutí cizího tělesa, vada na rotoru pravděpodobné utržení lopatky a tím způsobená destrukce celé vývěvy (obr 25).



Obr. 25 Destrukce vývěvy

Zdroj: fotka autora

Pro ucelený názor na způsobenou příčinu je důležité zaznamenat během šetření selhání každý krok a nevynechat sebemenší i na první pohled nedůležitý detail. V takovéto fázi by bylo zcela neprofesionální rozhodnout o příčině. Následným rozebíráním vývěvy se ukázalo, že lomy na všech lopatkách nesou známky štěpného porušení a nebyl pozorován žádný únavový lom (obr. 26, 27).



Obr. 26 Štěpný lom lopatek

Zdroj: fotka autora



Obr. 27 Štěpný lom lopatek

Zdroj: fotka autora

Po inspekci lomů na listech rotoru je zřejmé, že nedošlo k selhání materiálu rotoru, ale jiné části, která způsobila zničení vývěvy. Za destrukci celé vývěvy mohlo posunutí statorových plechů, které se během čerpání posunuly oproti původní pozici a došlo k jejich překrytí. Toto nahromadění materiálu v jednom místě způsobilo přídření a postupné fatální selhání (obr 28).



Obr. 28 příčina selhání vývěvy – statorové plechy

Zdroj: fotka autora

Oproti původnímu předpokladu nedošlo k selhání materiálu, ale chybě při montáži vývěvy, kdy nebyly dle předepsaných pokynů dodrženy postupy a nedošlo k uchycení statorů proti posunu.

7.2 Doporučení pro praxi v oblasti technického znalectví

Znalecká praxe se nutně neobejde bez znalosti zákonů, které tuto činnost doprovází. Soudní inženýrství definuje Jiří Smrček.

„Soudní inženýrství je nová technická disciplína, zabývající se zkoumáním příčin, průběhu a důsledků negativních technických jevů všech oborů. Jejím významným použitím v rámci hledání materiální pravdy je objasňování těchto jevů pro účely řízení před státními orgány zejména v řízení trestním a občanskoprávním, příp. i pro potřeby správních orgánů a organizací“. (BRADÁČ A. et al.; 1997)

Důležité je odlišit kvalifikaci znalce od kvalifikace experta. Výsledkem práce experta jsou především určeny k subjektům, kterým je posuzovaná problematika blízká lidem, kteří se pohybují v daném oboru a oborech příbuzných k dané problematice. Způsob práce experta může být vedena jeho úvahou, podklady pro práci si může opatřovat takovým způsobem, který uzná za vhodný a je důležitý pro jeho subjektivní výsledky.

Znalecký posudek znalce má za úkol problematiku daného oboru převést do srozumitelné formy, která je pochopitelná pro všechny orgány činné v daném řízení, ale i pro subjekty jejichž se výsledek řízení týká. Posudek se musí řídit zásadami procesního řízení (např. trestné řízení, občanské soudní řízení). (Bradáč A. et al.; 1997)

Znaleckou činnost upravuje:

- zákon č. 36/1967 Sb., o znalcích a tlumočnících
- vyhláška Ministerstva spravedlnosti č. 37/1967 k provádění zákona č. 36/1967 ve znění pozdějších novel a předpisů

„Znaleckou a tlumočnickou činnost mohou vykonávat pouze znalci a tlumočníci zapsaní do seznamu znalců a tlumočnicků; znaleckou činnost vykonávají také ústavy“.
(§ 2 odst. 1 zákona č. 36/1967)

Jmenování znalců provádí ministr spravedlnosti nebo z jeho pověření předseda místně příslušného krajského soudu dle místa bydliště znalce. „*Znalce (tlumočníky) jmenuje pro jednotlivé obory (jazyky) ministr spravedlnosti nebo předseda krajského soudu v rozsahu, v němž je ministrem spravedlnosti k tomu pověřen*“.
(§ 3 odst. 1 zákona č. 36/1967)

Pro jmenování znalcem stanoví zákon čtyři podmínky:

- 1) **české státní občanství** (v odůvodněných případech může tuto podmínku ministr spravedlnosti prominout)
- 2) **potřebné znalosti a zkušenosti** v oboru, pro který uchazeč jmenování žádá; přednost má uchazeč, který absolvoval speciální výuku pro znaleckou činnost, pokud je v daném oboru taková výuka zřízena,
- 3) **osobní vlastnosti**, které mají předpoklad pro řádný výkon znalecké činnosti,
- 4) **souhlas uchazeče** se svým jmenováním. (Bradáč A. et al.; 1997)

Znaleckou činnost mohou vykonávat pouze znalci a znalecké ústavy zapsané do seznamu znalců. V některých případech může podat znalecký posudek i osoba nezapsaná v seznamu znalců. Ustanovení tohoto znalce je možné pouze pro státní orgán (tedy nikoliv pro organizace nebo občana). Státní orgán si musí ověřit, že ustanovená osoba znalce má pro podání posudku odborné předpoklady. Takového znalce nazýváme znalec „ad hoc“. Takto ustanovený znalec musí se svým ustanovením souhlasit a složit slib u toho orgánu, který jej ustanovil. (Bradáč A. et al.; 2010)

O odvolání znalce rozhoduje ten, kdo jej za znalce jmenoval. Znalec přestává být znalcem v okamžiku doručení rozhodnutí o jeho odvolání z funkce. Odvolaný znalec rozpracované posudky již nedokončí, musí vrátit jejich spisy, uzavřít deník a společně se znaleckou pečeti ho vrátit krajskému soudu či Ministerstvu spravedlnosti. Jmenování nebo odvolání znalců není soudním ani správním řízením, jde o jednostranný akt, proti kterému není žádný opravný prostředek. (Bradáč A. et al.; 1997)

8 Závěr

Předkládaná bakalářská práce s názvem synergické aspekty mezních stavů strojních součástí je základním přehledem o historii poškozování ocelových konstrukčních materiálů. Kompilační práce, která vychází z řešitelných prací předních odborníků v oblasti degradace materiálu je v závěru doplněna doporučeními, které vyplynuly ze získaných poznatků.

Hlavní část práce je zaměřena na degradaci přímým opotřebením, únavou, křehkým porušením a plastickým lomem a je základním vstupním řešením do jednotlivých částí porušení součástí. Orientace odborného znalce v uvedených degradačních oblastech je při hodnocení příčin vzniku posuzované události naprosto nezbytná. Bez základní orientace v procesech poškození nelze vyslovit hodnotící hypotézu.

Důkazem předchozího tvrzení je uvedena kapitola sedm, v které autor čerpá z poznatků degradačních procesů při řešení vlastní problematiky fragmentace vysokoobrátkové molekulární vývěvy. Při neznalosti základů materiálového poškození by snadno mohlo dojít k milnému závěru že fragmentaci způsobilo vniknutí cizího tělesa respektive materiálová vada. Kognitivita procesu i základní znalosti z probíhající degradace materiálu spolu s fraktografií vedly k závěru, že poškození nastalo vlivem konstrukční chyby a následného vysokorychlostního porušení rotoru.

Získané poznatky a jejich aplikace v kapitole sedm jednoznačně dokazují význam potřebných znalostí pro oblast hodnocení nejen v technické praxi ale i v technickém znalectví.

Literatura

BRADÁČ, Albert. *Soudní inženýrství*. Brno: CERM, 1997. ISBN 80-7204-057-x.

BRADÁČ, Albert, Miroslav KLEDUS a Pavel KREJČÍŘ. *Soudní znaleství*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-7204-704-8.

HORÁČEK, Jaroslav. *Nauka o materiálu*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2000. ISBN 80-213-0397-2.

JANOVEC, Jiří, Petr ZUNA a Karel MACEK. *Fyzikální metalurgie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02935-2.

KLESNIL M., LUKÁŠ P.; *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*; 1. vyd.; Praha: Academia 1975; 224 str.

PLUHAŘ J. a kol.: *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*; SNTL Praha / ALFA Bratislava, 1987; 420 str.; ISBN 04-411-87

POLÁK, J. *Cyclic plasticity and low cycle fatigue life of metals*. 2. vydání. Praha: Academia, 1991. ISBN 80-200-0008-9.

PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, c1999. ISBN 80-7204-130-4.

SKÁLOVÁ, Jana, Vladislav MOTYČKA a Jaroslav KOUTSKÝ. *Nauka o materiálech*. 3. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7043-244-6.

STRNADEL, Bohumír. *Nauka o materiálu: konstrukční materiály a jejich degradační procesy*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1993. ISBN 80-7078-207-2.

Internetové zdroje

MENDELOVA UNIVERZITA: *Údržba a opravy stájové techniky. Fraktografie - nauka o lomech* [online]. 2017 [cit. 2017-05-16].

Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3605&typ=html

OPI.ZCU: *Oceli do nízkých a kriogenních teplot* [online]. 2015 [cit. 2017-05-22].

Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/nizke_teploty.pdf

UFM: *Houževnatost materiálu* [online]. 2008 [cit. 2017-05-22].

Dostupné z: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0ahUKEwjSsOyLkoPUAhWBOywkHfMoAWYQFgg8MAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.ipm.cz%2Fgroup%2Ffracture%2Fvyuka%2Fdoc%2FP06.ppt&usg=AFQjCNFuSYqD2do_UBciEP5Mr4q-Dz6WZg

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *FSIforum.cz: Konstruování strojů* [online]. 2015 [cit. 2017-05-21].

Dostupné z: http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databazepredmetu/5KS/_prednasky / prednaska4.pdf

Seznam zákonů a norem

ČSN 01 5050

zákon č. 36/1967 Sb., o znalcích a tlumočnících

Seznam obrázků

Obr. 1 Vliv teploty na tahový diagram oceli

<http://slideplayer.cz/slide/1914536/>

Obr. 2 Adhezivní opotřebení

<http://www.gsxr.wz.cz/opotreb.htm>

Obr. 3 Abrazivní opotřebení

<http://www.gsxr.wz.cz/opotreb.htm>

Obr. 4 Erozivní opotřebení

<http://www.gsxr.wz.cz/opotreb.htm>

Obr. 5 Kavitační opotřebení

<http://eswt.net/wp-content/uploads/2011/10/cavitation.gif>

Obr. 6 Lodní šroub

<http://watercraftjournal.com/everything-need-know-cavitation/>

Obr. 7 Vibrační opotřebení

<http://www.gsxr.wz.cz/opotreb.htm>

Obr. 8 Vibrační opotřebení ložiska

<http://www.technicka-diagnostika.cz/diagnostika-vibraci.html>

Obr. 9 Únavové opotřebení

<http://docplayer.cz/12668862-Fakulta-strojního-inženýrství-vut-v-brně-ústav-konstruování-konstruování-stroje-strojní-součásti-přednáška-8.html>

Obr. 10 Vznik únavového opotřebení 1

<http://evolution.skf.com/cs/vyvoj-unavoveho-poskozeni-povrchu-lozisek-v-miste-valiveho-styku/>

Obr. 11 Pitting na zubech ozubeného kola

<http://forums.pelicanparts.com/911-engine-rebuilding-forum/211792-intermediate-shaft-gear-pitting.html>

Obr. 12 Spalling

<http://steelselector.sij.si/help/testing/visual.html>

Obr. 13 Stádia změn mechanických vlastností

http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6329

Obr. 14 Cyklická křivka zpevnění

<http://slideplayer.cz/slide/2340915/>

Obr. 15 Cyklická křivka změkčení

<http://slideplayer.cz/slide/2340915/>

Obr. 16 Vznik prezistentního skluzového pásu a iniciace trhlin

POLÁK, Jaroslav. *Cyclic deformation, crack initiation, and low-cycle fatigue.*

Obr. 17 Schéma šíření trhliny

Pluhař Jaroslav Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu

Obr. 18 Únavový lom

<http://slideplayer.cz/slide/2789444/>

Obr. 19 Typické případy únavových lomů

<http://www.gsxr.wz.cz/opotreb.htm>

Obr. 20 Schéma vzniku křehkého lomu

http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/files/95/10984.jpg

Obr. 21 Šíření po hranici zrn

<http://slideplayer.cz/slide/2789444/>

Obr. 22 Šíření přes zrna

<http://slideplayer.cz/slide/2789444/>

Obr. 23 Fraktografický snímek křehkého lomu

<http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=250>

Obr. 24 Tvar houževnatého lomu

<http://www.tlakinfo.cz/t.py/rss/img/t.py?t=2&i=1016&z=2>

Obr. 25 Destrukce vývěvy

fotka autora

Obr. 26 Štěpný lom lopatek

fotka autora

Obr. 27 Štěpný lom lopatek

fotka autora

Obr. 28 příčina selhání vývěvy - statorové plechy

fotka autora