Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta

Analýza opotřebení strojních součástí

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.
Vypracoval: Michal Mojžíš

PRAHA 2018

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Michal Mojžíš

Inženýrství údržby

Název práce

Analýza opotřebení strojních součástí

Název anglicky

Analysis of wear of machine parts

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o problematice opotřebení strojních součástí a jejich následné renovaci.

Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky bakalář stanoví přínos práce.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

opotřebení, povrchové úpravy, renovace, volba materiálu, životnost

---

Doporučené zdroje informací

BASU, B., KALIN, M.: Tribology of ceramics and composites: a materials science perspective. Hoboken: Wiley, 2011, 522.

DAVIES, G.: Materials for automobile bodies. Oxford: Butterworth – Heinemann, 2003. 277.

MESSLER, R. W.: Joining of materials and structures from pragmatic process to enabling technology. Burlington: Elsevier, 2004.

SUCHÁNEK, J.: Erozivní opotřebení materiálů. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2014, 293.

SUCHÁNEK, J., KUKLÍK, V., ZDRAVECKÁ, E.: Abrazivní opotřebení materiálů. Praha, 2007, 162.

Vědecká literatura: Research in Agricultural Engineering, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing Technology, Surface and Coating Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Strojírenská technologie, International Journal of Fatigue, Journal of materials processing technology, Polymer Degradation and Stability, Manufacturing technology, Wear.

Vědecká literatura zabývající se problematikou opotřebení a renovace strojních součástí.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 7. 1. 2016

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 20. 1. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 23. 02. 2018

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Analýza opotřebení strojních součástí" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne _____

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval prof. Ing. Miroslavu Müllerovi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce.

Analýza opotřebení strojních součástí

Abstrakt

Tato práce popisuje základní druhy degradace strojních součástí a způsoby jejich renovace. První část práce přináší souhrnný přehled degradačních mechanizmů, se zaměřením zejména na opotřebení součástí. Uvádí charakteristické příklady pro jednotlivé druhy opotřebení, přináší návrhy na jejich předcházení a uvádí několik konkrétních případů, které jsou doplněny o jejich podrobnější rozbor a fotodokumentaci. Dále poskytuje obecný úvod do problematiky a potvrzuje význam zkoumání mechanizmů opotřebení pro návrh a provoz zařízení.

Klíčová slova: opotřebení, povrchové úpravy, renovace, volba materiálu, životnost

Analysis of wear of machine parts

Abstract

This thesis describes basic types of degradation of machine parts and ways of their renovation. The first part of the work brings a comprehensive overview of degradation mechanisms, focusing mainly on wear of parts. This thesis presents characteristic examples for individual types of wear, brings proposals for their prevention and presents several concrete cases, which are complemented by their more detailed analysis and photographic documentation. It also provides a general introduction to the issue and confirms the importance of examining causes and consequences of wear of parts in designing and operating process.

Keywords: wear of parts, surface treatment, renovation, choice of material, lifetime

Obsah

1 Úvod 9
2 Cíl práce a metodika 11
3 Přehled řešené problematiky 12
3.1 Degradace strojních součástí 12
3.1.1 Opotřebení 12
3.1.1.1 Adhezivní opotřebení 13
3.1.1.2 Vibrační opotřebení 15
3.1.1.3 Abrazivní opotřebení 17
3.1.1.4 Erozivní opotřebení 20
3.1.1.5 Únavové opotřebení 21
3.1.1.6 Kavitační opotřebení 23
3.1.2 Deformace 25
3.1.3 Otlačení 26
3.1.4 Trhliny a lomy 26
3.1.4.1 Lomy statické 27
3.1.4.2 Lomy únavové 27
3.1.5 Koroze 28
3.1.5.1 Koroze dle mechanizmu korozních procesů 28
3.1.5.2 Koroze dle druhu korozního prostředí 29
3.1.5.3 Koroze dle druhu korozního napadení 29
3.1.6 Ostatní poškození 30
3.2 Renovace strojních součástí 30
3.2.1 Renovace součástí na opravné rozměry 31
3.2.2 Renovace součástí na původní rozměry 31
3.2.2.1 Navařování a svařování 32
3.2.2.3 Galvanizace 33
3.2.2.4 Renovace pomocí lepidel a tmelů 33
3.2.2.5 Renovace nanášením plastů 34
3.2.2.6 Renovace nanášením kompozitů 35
4 Praktická část práce 36
4.1 Řetězové kolo sekundárního převodu motocyklu 36
4.2 Čep pásového vozidla 37
4.3 Průchodka zdvihátka ventilu 37
5 Diskuze nad problematikou 40
6 Závěr 40
7 Seznam použité literatury 42
8 Seznam obrázků 44

1 Úvod

Všechny strojní součásti během své existence prochází několika základními etapami, kterými jsou zejména:

- Návrh konstrukce výrobku a technologie výroby
- Výroba
- Montáž
- Provozní užití
- Vyřazení součásti a její likvidace

U každé součásti se vlastnosti, které získala při výrobě, mění souběžně s jejím užíváním a součást přestává správně plnit svou funkci. Na životnost součásti má největší vliv její správné navržení, způsob užívání a pravidelná údržba. V důsledku stále rostoucích požadavků na výrobce vyrábět stále dokonalejší, ale zároveň levnější výrobky, je nutné již při návrhu stroje nebo jeho součásti počítat s opotřebením, spojeným s prostředím, kde bude výrobek pracovat, a s funkcí, kterou bude vykonávat. Velký důraz by měl být kladen na bezporuchový provoz v době technického života výrobku, snahu o prodlužování této doby, ale zároveň i na ekonomický faktor výroby. V posledních letech se stále aktuálnějším problémem stává ekologie výroby, se kterou souvisí i doba životnosti součásti. Nekvalitně zpracovaný výrobek s krátkou dobou trvanlivosti se spíše promění v odpad než výrobek o vysoké jakosti, jehož výrobní cena nemusí být o mnoho vyšší, přičemž náklady na jeho provoz a údržbu bývají zpravidla nižší. Stejně tak se ušetří energie, spotřebovaná při výrobě. Například vhodnou volbou materiálu použitého během výroby či pravidelnou údržbou stroje během provozu lze zajistit několikanásobně vyšší životnost výrobku bez většího ekonomického dopadu.

Za správně navržené zařízení je možné označit stroj, který se po celou dobu své životnosti opotřebovává ve všech uzlech rovnoměrně, to znamená, že po skončení svého technického života se žádná jeho součást nejeví bez opotřebení, tedy není naddimenzovaná a zároveň nebylo nutné v době provozu stroje žádnou součást opravovat nebo vyměňovat.

Z těchto důvodů je nezbytné se stále seznamovat s nejnovějšími objevy vědy a výzkumu v oblasti materiálu a technologií, snažit se tyto znalosti prohlubovat a samozřejmě je při konstrukci aplikovat. Pro konstruktéra tak vzniká nelehký úkol v nalezení co nejlepšího řešení z hlediska kvalitativního, ekonomického a ekologického.

2 Cíl práce a metodika

Cílem práce je shromáždit a analyzovat formou literární rešerše aktuální poznatky o problematice opotřebení strojních součástí a jejich následné renovaci, posoudit několik konkrétních případů opotřebených součástí, určit příčiny jejich opotřebení, navrhnout opatření k jeho zamezení a vyvodit obecné závěry z hlediska konstrukčního návrhu. U všech těchto případů je známá historie použití, projevy a důsledky poruchy a následné řešení. Podklady byly získány vlastní praxí.

3 Přehled řešené problematiky

Následující část práce je věnována rozlišení jednotlivých druhů degradace materiálů a strojních součástí, zejména opotřebení, a metodám jejich následné renovace. Rovněž také uvádí způsoby zvyšování spolehlivosti strojů a zařízení, eliminací vzniku poruch z důvodu nadměrného opotřebení. V kapitole jsou zařazeny některé konkrétní případy.

3.1 Degradace strojních součástí

Pod pojmem degradace rozumíme změny vlastností materiálu během jeho používání, díky nimž se tento materiál postupně stává pro danou aplikaci nevyhovujícím. Pokud k degradaci materiálu dochází díky chemickým reakcím se složkami prostředí, pak hovoříme o korozi. Znalost degradačních mechanismů je důležitá, neboť umožní v řadě případů předcházet velkým škodám, které jsou s poškozením materiálů spojeny[1].
Degradační procesy lze rozdělit na:

- opotřebení
- deformace
- otlačení
- trhliny a lomy
- koroze
- ostatní poškození

3.1.1 Opotřebení

Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu, zhoršení jeho kvality a funkčnosti, nežádoucí změna tvaru a rozměrů tuhých těles, zhoršení jejich mechanických, chemických, protikorozních a elektrických vlastností, způsobená vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a abrazivního média, které opotřebení způsobuje a jejich vzájemnou kombinací[2].

Projevem opotřebení je přemisťování nebo odstraňování částic materiálu z funkčního povrchu součásti zejména mechanickými účinky, které někdy doprovází chemické, elektrické nebo elektrochemické vlivy[3].

Rozeznáváme šest základních druhů opotřebení, uspořádaných do dvojic podle mechanizmu působení[3]:

- Adhezivní opotřebení
- Vibrační opotřebení

- Abrazivní opotřebení
- Erozivní opotřebení

- Únavové opotřebení
- Kavitační opotřebení

V praxi se většinou uvedené druhy opotřebení vzájemně kombinují a přidávají se i další vlivy, jako jsou koroze, trhliny na součásti a její deformace. Velice často na sebe jednotlivé druhy opotřebení vzájemně navazují, například při poškozování součásti abrazivním opotřebení vznikají nežádoucí vůle, které vedou ke vzniku rázů a následné deformaci či lomu součásti.

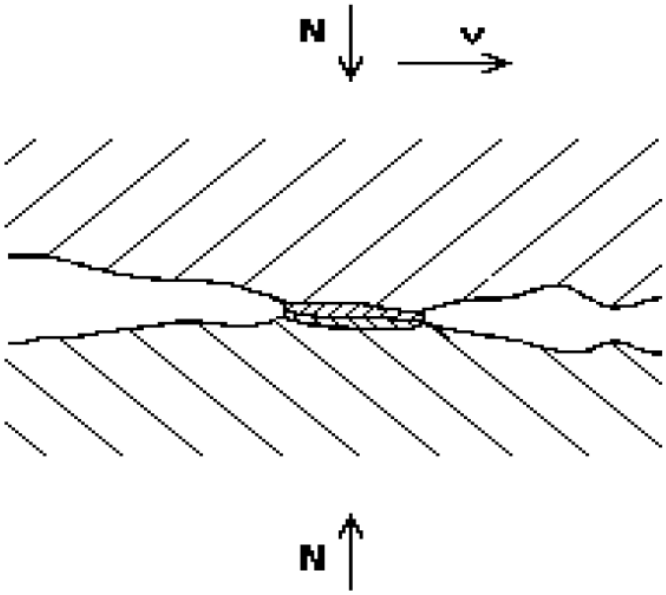
3.1.1.1 Adhezivní opotřebení

K adhezivnímu opotřebení dochází v situacích, kdy dochází ke smyku dvou tuhých těles, vzájemně k sobě přitlačovaných normálovou silou. (Obr.1) V místě dotyku vznikají značné meziatomové síly a dochází k vytrhávání a přenášení částic materiálu. Důsledkem je narušování povrchů v místě dotyku, způsobené vznikem a následným porušením adhezivních mikrospojů, které vznikají v důsledku odstranění oxidových a adsorpčních vrstev na povrchu materiálu. Adhezivní opotřebení může nabývat různé intenzity, v závislosti na mnoha faktorech, jimiž jsou:

- schopnost materiálu vytvářet adhezní spoje
- rychlost relativního pohybu a velikost normálové síly
- hloubka vniku a poloměr zakřivení povrchových nerovností
- látka, nacházející se mezi funkčními povrchy

Jeden mezní stav nastává, když se oxidové a adsorpční vrstvy povrchu obnovují rychleji než rozrušují. Tím brání vzniku mikrosvárů, které jsou tak méně odolné a vznikají v menší míře, nedochází tedy k přenosu většího množství materiálu[4]. Projevem tohoto typu adhezivního opotřebení jsou lesklé a hladké povrchy bez zjevných stop po zadírání.

V druhém případě vznikají velmi odolné a početné spoje, jejichž porušením se materiál odděluje od povrchu a vznikají tak volné otěrové částice, které pomáhají zvyšování intenzity opotřebení. To obvykle vede až k úplnému znehodnocení povrchů a jejich zadření. Na takto opotřebených površích jsou patrné rýhy a ulpělé částice materiálu.



Obr. 1 Mechanizmus adhezivního opotřebení [2]

Prevencí proti vzniku adhezivního opotřebení je především správné dimenzování styčného spojení - tedy nepřekračování dovoleného styčného tlaku, dále zajištění dostatečného mazání místa styku a odvodu tepla, a v neposlední řadě správná volba materiálů. K opotřebení dochází méně, pokud se po sobě třou dva tvrdé materiály. Vhodné je i použití jednoho měkkého a jednoho tvrdého materiálu, je však nutné počítat s deformacemi měkčího materiálu a zajistit správné mazání styčných ploch.

3.1.1.2 Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním povrchu vzájemnými oscilujícími tangenciálními posuny určitých oblastí stykových povrchů při působení normálního zatížení[3]. Mechanizmus tohoto opotřebení je na obrázku 2.

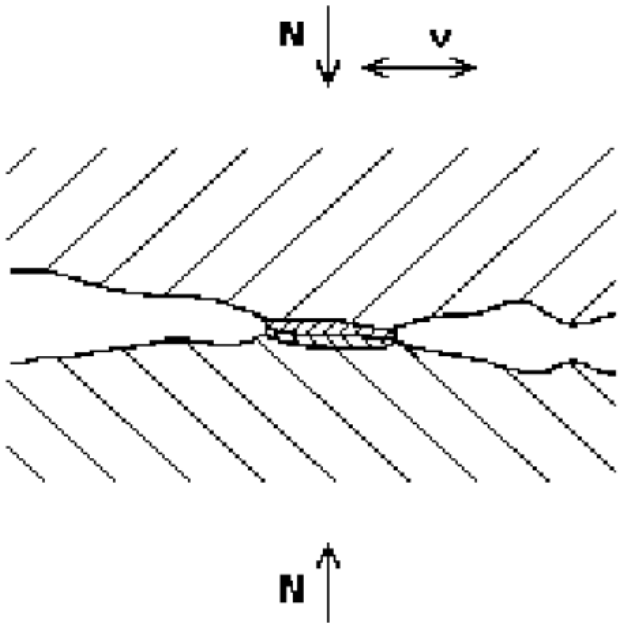
K vibračnímu poškození dochází v uloženích, na které působí vlastní nebo cizí kmity o velmi malé amplitudě a vysoké frekvenci. Tím dochází k oddělování částic z povrchu materiálu za působení normálního zatížení, stejně jako je tomu u adhezivního opotřebení. Vzhledem k nízké amplitudě pohybů nedochází k odstraňování otěrových částic z místa styku a tyto následně u železných materiálů oxidují do typického hnědočerveného zbarvení a abrazivně působí na oba povrchy, protože kovy mají obvykle nižší tvrdost než jejich oxidy. Tento jev se někdy nazývá „krvácení materiálu“ a dochází k němu pouze, když není místo vzniku chráněno před přístupem atmosférického kyslíku vrstvou maziva[5]. U slitin hliníku vznikají černé otěrové částice.

Nejdůležitější faktory, ovlivňující intenzitu vibračního opotřebení jsou:

- frekvence vibračního pohybu
- amplituda vibračního pohybu
- počet cyklů
- měrný tlak
- pracovní prostředí
- vlastnosti opotřebovávaného materiálu

Vibračnímu opotřebení se nechá předejít konstrukčními úpravami, které zabraňují relativnímu pohybu součástí, například použití valivých uložení namísto kluzných, uložením do pružných prvků a s tím spojené zvýšení amplitudy relativního pohybu, dále je vhodné omezovat provozní vibrace strojů jejich správným vyvážením nebo užitím tlumičů. Na odolnost soustavy proti vibračnímu poškození může mít vliv i úprava styčných ploch, jako je nitridace, cementování a povrchové kalení. Vyšší tvrdost povrchu obvykle znamená vyšší odolnost proti vibračnímu opotřebení. Odolnost se může zvyšovat i

elektrochemickým povlakováním materiály odolnými proti oxidaci (stříbro, zlato – užití především v elektrotechnice), u slitin hliníku anodizací (eloxováním). Pro vibračně namáhané součásti jsou spíše než tekutá maziva vhodná maziva tuhá nebo plastická, která dokážou vytvořit na povrchu souvislou vrstvu a zabránit tak styku součástí[6].



Obr. 2 Mechanizmus vibračního poškození

Vibrační opotřebení je typické pro stroje, které konají přímočarý vratný pohyb (vibrační pěchy, vibrační desky,…), dále pro případy, kdy vibrace vznikají pružností součástí(nýtované konstrukce, lisované spoje, apod.). Velmi běžné je vibrační poškození křížových kloubů kardanové hřídele. (Obr. 3)

Obr. 3 Vibrační poškození křížového kloub

3.1.1.3 Abrazivní opotřebení

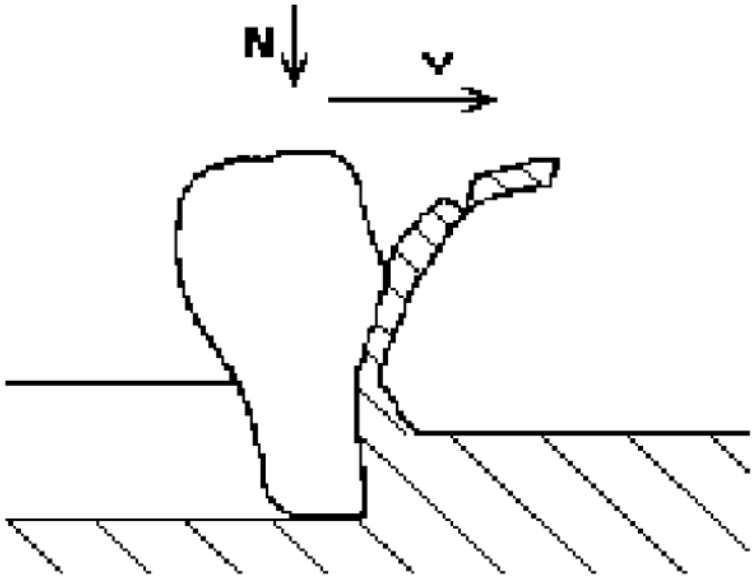
Při abrazivním opotřebení dochází k intenzivnímu oddělování částic materiálu z jeho povrchu vnikáním cizího předmětu, kterým může být druhé funkční těleso nebo volné abrazivní částice[3]. Typickým projevem je vznik viditelných rýh na funkčních plochách, při mírnějším průběhu opotřebení se povrch jeví jako vyleštěný a rýhy jsou vidět pouze při jejich zvětšení. Mechanizmus abrazivního opotřebení je znázorněn na obrázku 4. Rozeznáváme dvě základní kategorie abrazivního opotřebení:

- abrazivní opotřebení s interakcí dvou těles
- abrazivní opotřebení s interakcí tří těles

V prvním případě způsobuje opotřebení jeden materiál pronikající do druhého, na intenzitu opotřebení má vliv především drsnost povrchů a správná volba materiálu. Čím menší má povrch drsnost, tím méně dochází k abrazi v důsledku zarývání výstupků povrchu nebo k jejich odlamování a tvorbě abrazivních částic. Obecně se nedoporučuje volit materiály o podobné tvrdosti. Ve druhém případě způsobují poškození volné abrazivní částice mezi dvěma povrchy, intenzita opotřebení závisí na množství, velikosti a tvaru částic, jejich materiálu a velikostí normálové síly na ně působící[7]. S větším množstvím částic narůstá možnost jejich vrstvení nebo shlukování a tím ke zvýšení opotřebení i při malých rozměrech částic. Velikost abrazivních částic velmi významně určuje míru opotřebení, zvláště při interakci tří těles, kde abrazivo vyplňuje funkční mezeru mezi povrchy. Fatální stav nastává v případě větší velikosti částice než samotné spáry, kdy ani přítomnost souvislé vrstvy maziva mezi funkčními povrchy nedokáže zabránit vzniku abraze. Výzkum také ukázal, že s rostoucí velikostí brusiva se jeho abrazivní schopnost zvyšuje na určitou "kritickou" hranici, kde se abrazivní účinek částic již podstatně nemění. Kritická velikost částic závisí na vlastnostech použitého materiálu, vlastnostech abraziva, tvaru částic a velikosti normálové síly v uzlu[1].

Z hlediska tvaru částic jsou z hlediska abrazivního opotřebení příznivější zaoblené částice než částice ostrohranné. Částice s nízkou pevností se snáze drtí, což má za následek snížení opotřebení vlivem jejich menší velikosti , zároveň však vznikají na lomu nové neotupené hrany, které intenzitu abraze zvyšují. Objektivně srovnávat tvary

abrazivních částic je velmi komplikované, ale byly popsány různé metody měření, například parametr SPQ, který uvažuje při měření pouze hrany přesahující kružnici tvořenou průměrnou velikostí abrazivní částice[8].

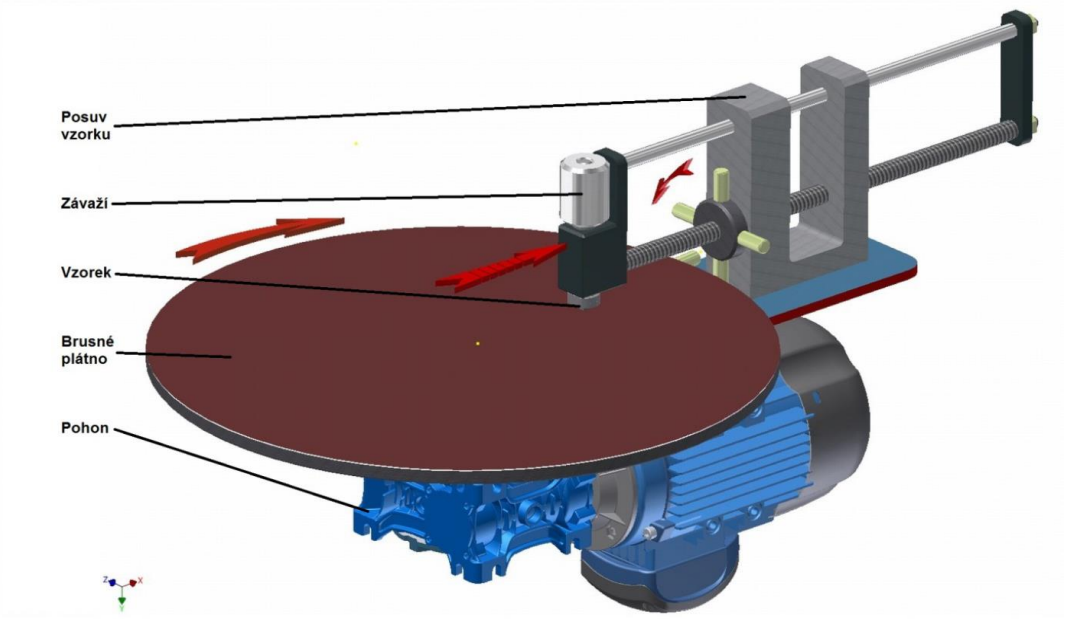


Obr. 4 Mechanizmus abrazivního opotřebení [2]

Odolnost materiálu vůči abrazivnímu opotřebení závisí zejména na jeho tvrdosti. Čím je tvrdost povrchu vyšší, tím do něj částice hůře pronikají. Z tohoto důvodu vzniká snaha volit u součástí, kde lze očekávat vznik abrazivního opotřebení, materiál s co nejtvrdším povrchem, jako jsou kalené uhlíkové a legované oceli, které se ovšem svou tvrdosti nedokážou vyrovnat stále více využívaným keramickým materiálům a jejich kompozitům, jako jsou oxidy kovů, karbidy, nitridy a boridy[9]. Například rychlořezná ocel 19 810 dle ČSN dosahuje maximální tvrdosti cca. 850-900 HV[10], naproti tomu karbid křemíku (SiC) může mít tvrdost až 2800 HV[11].

Jedna z používaných metod testování odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení je normalizovaná zkouška dle ČSN 01 5084.(Obr.5) Zkušební vzorek o půdorysném rozměru 10 x 10 mm je přitlačován na rotující brusné plátno průměru 480 mm silou 32 N na dráze 50 m. Pro zkoušku je používáno brusné plátno s umělým korundem o zrnitosti 120. Konstrukce přístroje zajišťuje, že každých 50 m dráhy je broušeno na nové ploše plátna. Po použití celé plochy plátna je plátno vyměněno za nové.

Následně se měří hmotnostní úbytky a jsou porovnány s etalonem. Jako etalon zkoušky opotřebení na brusném plátně je používán vzorek z oceli 12 014.20. [12]



Obr. 5 Zkouška opotřebení na brusném plátně [13]

Abrazivnímu opotřebení podléhá v technické praxi velké množství součástí a zařízení, typickým příkladem opotřebení s interakcí dvou těles mohou být části strojů pro zpracování půdy a hornin, jako jsou ostří pluhů, nože kultivátorů, lžíce rypadel atd. Případ interakce tří těles je typický například pro spalovací motory, kdy se drobné částice z oleje dostávají mezi stěnu válce a pístní kroužky, nebo mezi pouzdro a dřík ventilu a působí opotřebení. Velmi časté je abrazivní opotřebení kol a řetězů nekrytých řetězových převodů(Obr.6), jak bude dále popsáno v kapitole 4.

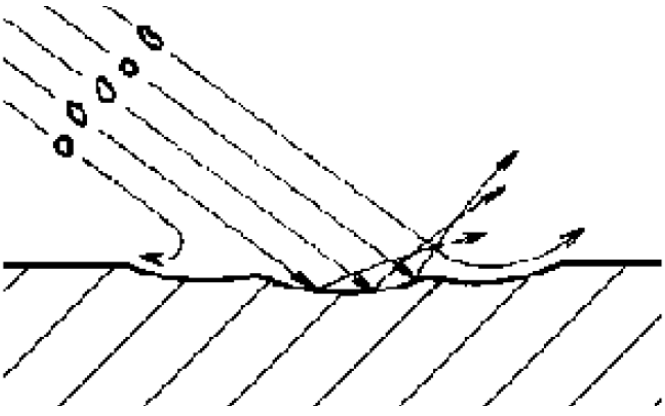
Obr. 6 Abrazivní opotřebení řetězového kola

3.1.1.4 Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení je velmi komplikovaným jevem, při kterém dochází k charakteristickému oddělování materiálu vlivem částic, unášených kapalným nebo plynným médiem nebo dopadem částic kapaliny nebo plynu nebo jejich kombinací. (Obr.7) Dochází k podobným důsledkům jako u opotřebení abrazivního, tedy k viditelnému rýhování nebo odřezávání materiálu[2]. Erozivně opotřebený povrch je typicky nerovnoměrně zvlněný či zvrásněný. Intenzitu erozivního opotřebení ovlivňuje zejména:

- kinetická energií částic
- velikost a tvar částic
- teplota a chemické vlastnosti nosného média
- relativní rychlost pohybu částic a úhel jejich dopadu
- vlastnosti opotřebovávaného materiálu

Uvedené faktory působí současně, každý však v jiné míře. Relativní rychlost a hmotnost částic určují kinetickou energii, která se při dopadu částice mění na deformační práci, to znamená, že s rostoucí rychlostí a hmotností roste i míra opotřebení součásti [14]. K opotřebení dochází i v případě, že jsou unášené částice měkčí než daný materiál. Tvrdé materiály prokazují vyšší odolnost vůči částicím dopadajícím pod malým úhlem, měkké materiály naopak lépe odolávají částicím s kolmějším úhlem dopadu. Materiály s nižší hodnotou modulu pružnosti obecně odolávají erozivnímu opotřebení lépe, protože dopadající částice se díky pružné deformaci zpomaluje na delší dráze a vzniklé síly jsou menší.



Obr. 7 Mechanizmus erozivního opotřebení[2]

Erozivnímu opotřebení lze předcházet vhodnou volbou použitého materiálu, ale zejména takovým konstrukčním řešením, aby v kapalině nedocházelo k turbulentnímu proudění, při kterém intenzita opotřebení značně stoupá. Ke škodlivé erozi dochází u řady zařízení a jejich součástí, které přicházejí do styku s proudící kapalinou nebo plynem, jako jsou například: potrubní linky, kulové ventily(Obr.8), odstředivá čerpadla, ventilátory, tryskové motory, atd. Zároveň se však tohoto jevu z výhodou využívá při otryskávání součástí, kdy je stlačeným vzduchem unášen proud částic křemenného písku, ocelových broků nebo skleněných kuliček v případě tryskání balotinou za účelem vytvoření dekorativních povrchů.

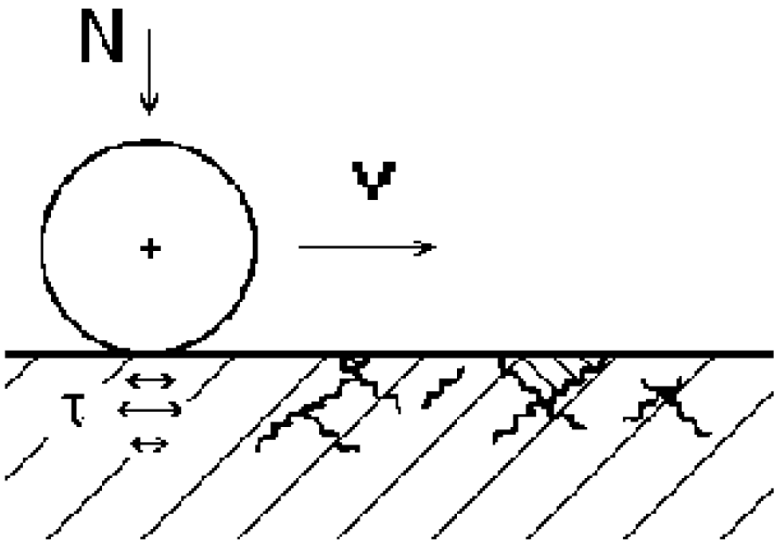
Obr.8 Erozivní opotřebení kulového ventilu [15]

3.1.1.5 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení je charakterizováno oddělováním částic a vznikem poruch v podpovrchové nebo povrchové vrstvě v důsledku opakovaného stykového napětí určité velikosti mezi určitými oblastmi stykových povrchů. (Obr. 8) Tyto poruchy způsobí během dalšího procesu opotřebení oddělení částic od základního materiálu. Únavové opotřebení

se může projevovat i jako poškození povrchové vrstvy křehkým lomem, zejména u materiálů s nízkou schopností plastické deformace[3]. Průběh a intenzita opotřebení závisí na provozních podmínkách, zpravidla vzniká při cyklicky opakovaném styku dvou těles za přítomnosti vysokých lokálních tlaků. Na jeho vznik dále působí skluz a vzájemné tření součástí, které přispívají k narušení povrchu vlivem vzniku tahového a smykového napětí.

Únavový proces probíhá v několika stádiích: na počátku se mění mechanické vlastnosti materiálu, následuje vznik únavové trhliny, která vzniká zpravidla na povrchu materiálu. Únavová trhlina se postupně šíří (tento proces může trvat i řadu let) až do chvíle, kdy dojde k úplnému zlomení součásti. Na odolnost proti únavovému opotřebení má výrazný vliv kvalita povrchu materiálu. Pokud chceme zvýšit únavovou životnost, je třeba maximálně omezit přítomnost míst na povrchu, kde by mohla vzniknout únavová trhlina. Takovými místy mohou být: závity, vruby, drážky, vměstky, nedokonalé sváry atd. Zvýšení meze únavy lze dosáhnout vnášením tlakového pnutí do povrchové vrstvy, což je možné realizovat například povrchovým kalením nebo tvářením za studena. Dalším faktorem, výrazně ovlivňujícím odolnost materiálu, je jeho drsnost, zejména u povrchově kalených součástí[1].



Obr. 9 Mechanizmus únavového poškození [2]

Jedním z typů únavového opotřebení je pitting (Obr.9) neboli vznik důlků v povrchu materiálu. Na vzniku pittingu se značnou měrou podílí přítomnost maziva, které vniká do trhlin na povrchu materiálu, dalším pohybem součástí v něm narůstá tlak a trhliny se dále šíří. K tomuto jevu dochází především při odvalování dvou těles, charakteristicky u ozubených kol na bocích zubu[16].

Zvláštním typem opotřebení únavou je spalling neboli odlupování povrchové vrstvy materiálu. Vyskytuje se především u povrchově kalených součástí s malou tloušťkou prokalené vrstvy nebo v Beilbyho vrstvě. Cyklicky působící kontaktní tlaky dávají vzniknout podpovrchovým smykovým napětím, což má za následek zrod podpovrchových trhlin. V pozdějším stádiu se povrchová vrstva prolamuje a odlupuje[17].

Obr. 10 Pitting boků zubů kuželového kola

3.1.1.6 Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním opotřebovávaného povrchu v oblasti zanikání kavitačních dutin. (Obr.10) Kromě mechanického působení se při kavitaci uplatňují i elektrochemické, chemické, tepelné a

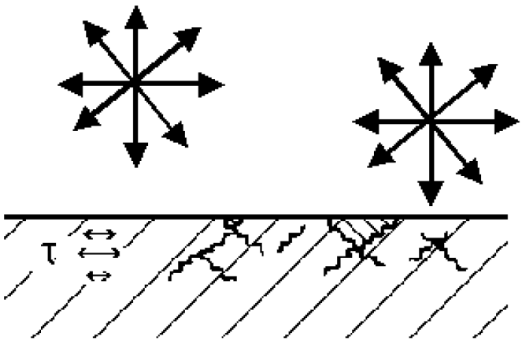
termoelektrické jevy. Vznik kavitace (varu za studena) a kavitačních dutin je podmíněn místním snížením tlaku, v důsledku zvýšení rychlosti proudění, natolik, že při dané teplotě dosáhne kapalina bodu varu. V kapalině vznikají malé dutiny(kaverny) vyplněné parou. Při jejich zániku dochází k implozi, která způsobuje hydrodynamické rázy, narušující povrch materiálu[3]. Kavitací poškozený povrch je hrubý, s místy působícími vytrhaným dojmem. Na vznik a intenzitu kavitace působí především:

- viskozita a povrchové napětí kapaliny
- teplota a tlak kapaliny
- obsah plynů rozpuštěných v kapalině
- rychlost proudění kapaliny

Pokud kapalina při normálním tlaku neobsahuje viditelné plynové bubliny, vznikají kavitační dutiny až přibližně při poklesu tlaku na hodnotu tlaku syté páry při dané teplotě. V případě, že v kapalině jsou patrné bublinky, se kavitační dutiny tvoří za snížení tlaku vylučováním plynu z kapaliny, slučováním těchto bublin nebo jejich expanzí. S rostoucí teplotou se objevuje více kavitačních dutin, ale současně se snižuje jejich objem, z důvodu zvyšování tlaku nasycených par. Tyto dva jevy působí protichůdně, z tohoto důvodu dosahuje kavitace maximální intenzity při určité teplotě. Pro vodu se tato teplota pohybuje mezi 45 – 50 °C [18]. Velikost vzniklých kavitačních dutin roste s povrchovým napětím kapaliny, viskozita kapaliny ovlivňuje rychlost s jakou dutiny vznikají a zanikají. Kavitace může nabývat různých stupňů intenzity působení:

- Vlivem kavitace nedochází k poškození materiálu samého, pouze je narušována mezní vrstva kapaliny a může docházet k poškození materiálu korozí. V tomto případě se jedná pouze o mírné působení
- Při slabém působení narušuje kavitace nedostatečně přilnuté vrstvy na povrchu materiálu, jako jsou korozní produkty, nátěry a oxidační vrstvy.
- V případě, kdy kavitací vyvolané rázy jsou menší než mez kluzu materiálu, hovoříme o středně silném působení. K poškození povrchu dochází vlivem vysokocyklové únavy materiálu

- Pokud je vznikající napětí vyšší než je mez kluzu materiálu, jedná se o silné působení, kdy dochází k deformaci povrchových vrstev, jejich zpevnění a následnému únavovému poškození nízkocyklovou únavou
- V posledním případě je napětí vyvolané rázy větší než mez pevnosti daného materiálu a dochází k poškození lomem v závislosti na materiálu[2].



Obr. 11 Mechanizmus kavitačního poškození [2]

S poškozením kavitací se lze setkat zejména u lopatek turbín, oběžných kol čerpadel, lodních šroubů, redukčních ventilů a obecně u součástí hydrodynamických systémů. Prevencí proti kavitačnímu opotřebení je zejména zajištění takové konstrukce systému, u kterých je vznik kavitace co nejvíce omezen. Pokud nelze zabránit vzniku kavitace, volí se zejména materiály, které dobře odolávají korozi, nebo se součásti potahují například keramickými nebo polymerovými povlaky[19].

3.1.2 Deformace

Deformace je trvalá nežádoucí změna geometrického tvaru součásti, bez změny jejího objemu. Při malých zatíženích dochází k elastické deformaci materiálu, při větších se materiál deformuje plasticky. O deformaci z hlediska degradace součásti se jedná pouze ve druhém případě. Zdeformovaná součást zpravidla již nedokáže plnit svou funkci, z toho důvodu by součásti měly být konstruovány tak, aby při provozním zatížení nedocházelo k překročení meze kluzu daného materiálu[1]. U křehkých materiálu se s deformací setkáváme zřídka, spíše u nich dochází k lomu součásti po překročení meze pevnosti. Deformační napětí může být vyvoláno vnějšími nebo vnitřními silami. Vnitřní síly mohou vznikat z důvodu zbytkových napětí, vzniklých při výrobě (např.: tváření za studena), nebo mohou být způsobena

působením vnějších, například tepelných vlivů. Mezi vnější faktory způsobující deformaci patří síly obvykle vyvolané torzními nebo ohybovými momenty[20].

Deformace se často projevuje jako následek předchozího opotřebení součásti, při kterém dochází ke vzniku a vůlí a s nimi souvisejících rázů, které vedou až k deformaci součásti. (Obr. 11) Vyvarovat se deformaci součásti tedy lze nejen konstrukčním řešením, které zabraňuje překročení meze kluzu, ale i předcházením vzniku ostatních druhů opotřebení.

Obr. 12 Deformace čepu z pásového vozidla v důsledku vzniku opotřebení

3.1.3 Otlačení

Otlačení je trvalá nežádoucí změna povrchu materiálu způsobená vnějšími silami. K otlačení dochází, pokud kontaktní tlak překračuje mez kluzu materiálu povrchové vrstvy. Za samostatné poškození součásti lze považovat otlačení, ke kterému dochází v oblasti makroskopických rozměrů. K mikroskopickému otlačování povrchu dochází za všech podmínek a nemusí být škodlivé.

Při otlačení nedochází k odebírání materiálu, pouze se přemísťuje a vytváří valy okolo místa působení tlaku[7]. Otlačení se nechá považovat za místní povrchový projev deformace, často bývá příčinou lomu součásti, nebo její následné deformace. (Obr. 11)

3.1.4 Trhliny a lomy

Trhlina se projevuje jako porušení homogenity materiálu v části jeho průřezu, lom je porušení homogenity v celém průřezu. (Obr. 12) Trhliny a lomy vznikají stejně jako deformace působením vnitřních a vnějších napětí, které překročí mez pevnosti nebo mez únavy materiálu. Ke vzniku trhlin dochází zejména u svařenců, odlitků a tepelně zpracovávaných součástí. Trhliny snižují pevnost součásti a vedou ke vzniku únavových a

statických lomů[2]. Podle způsobu namáhání můžeme rozdělit lomy na lomy statické a lomy únavové.

Obr. 13 Detail trhliny klínové řemenice

3.1.4.1 Lomy statické

Statický lom vzniká v případě překročení meze pevnosti materiálu v některém jeho průřezu. U tvrdých materiálů dochází ke vzniku křehkého lomu, energie spotřebovaná na vznik lomu je nižší než u lomu houževnatého. Houževnatý lom obvykle provází zúžení průřezu v místě lomu. Statický lom je obvykle vyvolán ohybovým namáháním, následně vzniklá plocha lomu je rovinná a kolmá na směr napětí, v závislosti na struktuře materiálu jemně nebo hrubě zrnitá. V případě lomu způsobeného namáháním v krutu je vzniklá plocha typicky jehlicovitě roztříštěná u křehkých materiálu a šroubovitá u houževnatých materiálů. V případě lomu v důsledku kombinovaného namáhaní má plocha složitější tvar, blížící se charakteristickému tvaru lomové plochy převládajícího napětí[21].

3.1.4.2 Lomy únavové

Únavový lom vzniká, pokud je překročena mez únavy materiálu při proměnlivém namáhání. Na povrchu materiálu vzniká po určitém počtu cyklů trhlina v místě koncentrace napětí. Ta se vlivem pokračujícího proměnlivého zatížení dále šíří do hloubky materiálu. Tímto se povrchy vyhladí až vyleští, dostávají typický lasturovitě vyhlazený vzhled. Postupně se průřez součásti zmenší natolik, že součást se ve zbývajícím průřezu zlomí statickým

lomem. Příklad únavového lomu lze vidět na obrázku č. 13. Na lomové ploše únavového lomu jsou tedy patrné dvě oblasti s odlišným vzhledem:

- únavová, s lasturovitě vyhlazeným vzhledem
- statická, s typickým zrnitým, drsným povrchem křehkého lomu

Obr.14 Únavový lom hřídele elektromotoru

3.1.5 Koroze

Koroze je trvalá nežádoucí změna povrchu materiálu, způsobená chemickými a elektrochemickými vlivy okolního prostředí a může vést až k úplnému znehodnocení součásti. (Obr. 14) Korozi podléhají téměř všechny anorganické i organické materiály. Druhy koroze dělíme podle následujících kritérií:

3.1.5.1 Koroze dle mechanizmus korozních procesů

- chemická koroze
- elektrochemická koroze

Chemická koroze je mnohem méně běžná, probíhá v elektricky nevodivém prostředí, kde dochází pouze k chemickým reakcím mezi korozním prostředím a materiálem. Naproti tomu u elektrochemické koroze dochází ve vodivém prostředí ke vzniku galvanických článků a průchodu elektrického proudu. Vždy se sestává z anodové a katodové reakce, kdy na anodě probíhá oxidace kovu a na katodě dochází k redukci oxidační složky elektrolytu.

3.1.5.2 Koroze dle druhu korozního prostředí

- atmosférická koroze
- půdní koroze
- koroze v kapalinách
- koroze v plynech

Z uvedených druhů je nejčastější atmosférická koroze, jejíž intenzita závisí především na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu a na obsahu agresivních plynných a tuhých nečistot. Půdní koroze probíhá ve složitém chemickém prostředí, protože půda obsahuje mnoho agresivních látek tuhých, kapalných i plynných. Nejtypičtějším případem koroze v kapalinách je vodní koroze, jejíž rychlost ovlivňuje zejména množství kyslíku ve vodě a obsah minerálních solí a jejich iontů.

3.1.5.3 Koroze dle druhu korozního napadení

Podle druhu korozního napadení rozeznáváme mnoho druhů koroze, jako například korozi bodovou, důlkovou, štěrbinovou, mezikrystalickou, galvanickou a selektivní[22].

Způsobů ochrany proti korozi existuje nepřeberné množství, např.: volba materiálu z vyšší korozní odolností, úprava konstrukčního řešení, aby nedocházelo ke styku s korozním prostředím, úprava okolního prostředí, anodická a katodická ochrana nebo vytváření chemicky odolných povlaků na materiálu (eloxování, nátěry, maziva, polymery, galvanizace, atd.).

Obr. 15 Korozí znehodnocená součást

3.1.6 Ostatní poškození

Mimo výše uvedených nejčastěji se vyskytujících druhů poškození může docházet i k jiným mechanizmům poškození. Patří mezi ně například tečení neboli creep, ke kterému dochází při vystavení materiálu mechanickému napětí v elastické oblasti za zvýšených teplot. Jedná se tedy o kombinaci teplotního namáhání, které vede k trvalé deformaci součásti.

Dalším příkladem může být stárnutí materiálu, které vyvolávají změny teploty, metalurgické pochody uvnitř materiálu, chemické reakce s okolním prostředím a zejména u polymerních materiálů vystavení ultrafialovému záření. U stárnoucího materiálu dochází ke zhoršení mechanických vlastností i ke změnám tvaru. Stárnutí materiálu probíhá bez ohledu na používání součásti.

Mezi ostatní poškozená se řadí i poškození, při kterém se mechanizmus poškození v čase mění, jde o kombinaci některých z výše uvedených druhů poškození. V takovém případě bývá problém určit prvotní příčinu vzniku poškození.

3.2 Renovace strojních součástí

Pod pojmem renovace rozumíme ve strojírenské praxi opravu strojní součásti, tedy obnovení jejího geometrických rozměrů a funkčních schopností. Kvalita renovované součásti odpovídá kvalitě nové součásti. Ve zvláštních případech renovace, kdy hovoříme o modernizaci či zpevňování součásti, je jakost modernizované součásti ještě vyšší než u nových součástí. Obnovení provozuschopnosti součásti může probíhat jak s procesem jejího používání, tak i mimo tento proces. K prvnímu případu ovšem dochází pouze výjimečně[21]. Ve druhém případě znamená renovace součásti její vyřazení z pracovního procesu a jeho přerušení. Podle druhu poškození součásti a jeho následku rozeznáváme následující druhy renovace[23]:

- renovace rozměrů součástí
- renovace fyzikálně-mechanických vlastností
- renovace struktury materiálu součásti
- renovace geometrického tvaru součástí
- renovace vlastností povrchů

- renovace pevnosti součástí
- renovace tuhosti součástí
- renovace těsnosti součástí

Ve většině případů dochází k odstranění několika následků poškození, renovace má tedy komplexní charakter. Renovace součástí umožňuje ušetřit jak náklady na opravu, tak spotřebovaný materiál. Způsobů renovace existuje celá řada, mimo jiné i proto, že se při ní užívají technologické postupy a zároveň vznikají postupy přímo pro potřeby renovace[24]. Způsoby renovace můžeme dále rozdělit do dvou kategorií, podle rozměrů renovované součásti takto:

- renovace součástí opracováním na opravné rozměry
- renovace opotřebených součástí na původní rozměry

3.2.1 Renovace součástí na opravné rozměry

Princip této renovace spočívá v obnovení geometrického tvaru, drsnosti povrchu a dalších vlastností poškozených funkčních ploch za cenu změny původního rozměru na tzv. rozměr opravný. Z tohoto důvodu je nutné upravit pro tento rozměr i ostatní součásti jejich výměnou nebo jinou úpravou která umožní jejich přizpůsobení nového rozměru. V tomto případě se vždy na opravný rozměr opravuje součást výrobně nejsložitější, případně nejdražší a ostatní méně složité součásti se jí přizpůsobují. Příkladem může být přebrušování klikových hřídelů a následná výměna kluzných ložisek za nová.

Výhodou tohoto způsobu je jednodušší postup ve srovnání s výrobou zcela nové součásti, naproti tomu nevýhoda spočívá v narušování zaměnitelnosti součástí a následných komplikacích při opravách[24].

3.2.2 Renovace součástí na původní rozměry

V této skupině se vyskytuje velké množství postupů, které disponují jednou společnou vlastností – na opotřebené funkční plochy se přidává nový materiál, za pomoci kterého je možné obnovit původní rozměry součásti[24].

3.2.2.1 Navařování a svařování

Jedná se o velice rozšířený způsob obnovy funkčních povrchů, který spočívá v navaření nové vrstvy materiálu a jeho následném obrobení. Nejčastěji se ho užívá v případě renovace ocelových součástí, lze ho ovšem využít i pro opravy litiny, barevných kovů a některých plastů. Kvalitu návaru ovlivňuje mnoho faktorů, jako jsou vlastnosti původního a přídavného materiálu a způsob svařování. Při sváření dochází k teplotnímu ovlivnění materiálu, může tak docházet ke vzniku vnitřního pnutí a následnému poškození součásti. Tomu lze předcházet řízením rychlosti ochlazování nebo vyžíháním[25].

Mezi metody navařování patří: ruční navařování elektrickým obloukem nebo kyslíkoacetylenovým plamenem, strojní navařování pod tavidlem, vibrační navařování, odporové navařování, plazmové navařování, navařování s použitím magnetického pole, navařování laserem, navařování třením a mnoho dalších

3.2.2.2 Stříkání kovů

Všechny metody nástřiku kovů zahrnují projekci malých roztavených nebo rozpuštěných částic kovu na připravený povrch, na který přiléhají a vytvářejí kontinuální povlak. Pro vytvoření roztavených částic je nutný zdroj tepla a rozprašovací zařízení. Po kontaktu s povrchem se částice ochladí a mechanicky spojí s povrchem. První metodou je plynové stříkání kovu, při kterém je přídavný drát taven a unášen plamenem hořáku. Druhý způsob je využití elektrického oblouku k roztavení kovu a unášení částic za pomoci stlačeného inertního plynu. Další možností je tepelných a dynamických vlastností plazmového paprsku, do kterého se přídavný materiál přivádí v práškové formě. Tímto způsobem lze kromě kovů nanášet i keramické materiály[26]. Posledním způsobem je detonační nástřik práškového materiálu urychleného výbuchem plynů v detonační komoře stříkacího zařízení. Takto vzniklá vrstva je díky vysokým teplotám při aplikaci velmi odolná[24].

3.2.2.3 Galvanizace

Galvanické pokovování se uplatňuje nejen při renovaci součástí, ale také při vylepšování vlastností funkčních nebo při vytváření dekorativních povrchů a jako ochrana proti korozi. Jedná se o proces, při kterém ionty kovu v elektrolytu vlivem působení stejnosměrného proudu vytvářejí na jedné elektrodě kovový povlak. Z hlediska renovace součásti lze galvanizace užít jen tam, kde je vyžadována tloušťka přidané vrstvy řádově v setinách až desetinách milimetru.

Nejčastěji používaným kovem pro galvanizování je chrom, který se pro svou vysokou tvrdost, otěruvzdornost a odolnost vůči korozi používá při tzv. tvrdém neboli funkčním chromování. Funkčního chromování se využívá jak pro renovaci opotřebených součástí, tak pro zlepšení vlastností nově vyráběných součástí, jako jsou například součásti hydraulické válce a rozvaděče. Použití chromu s sebou nese i několik nevýhod jako nemožnost použití při teplotách nad cca 300 °C a špatná schopnost přilnutí na legované ocele. Při dekorativním chromování se i proto ocel nejprve potahuje mědí, následně niklem a až poté chromem.

3.2.2.4 Renovace pomocí lepidel a tmelů

Výhoda těchto způsobů renovace spočívá především v jednoduchosti opravy a nenáročnosti na vybavení. Nevýhodou je nízká odolnost lepeného spoje proti odlupování a větší nároky na přípravu lepených povrchů. Rozdíl mezi lepidly a tmely spočívá především ve větším rozsahu použití u tmelů a možnosti aplikování silnější vrstvy. Tmely se třídí podle použití na: lepivé, vyrovnávací, spárovací, upevňovací, izolační, antikorozní a teplosměnné [24].

Dnes je ve strojírenství hromadně rozšířeno používání silikonových těsnících tmelů, jejichž použití na mnoha místech vytlačuje použití tradičních druhů těsnění. Výhody těchto tmelů jsou především v jednoduchosti použití, cenové dostupnosti a dlouhotrvající pružnosti. Jejich hlavní nehodou je nutnost jejich odstraňování a opětovného nanášení při každé demontáži.

Jednosložkové upevňovací tmely, které vytvrzují v přítomnosti kovu přinášejí značné výhody při opravách starých i montážích nových strojů. Používají se především pro zajištění

správné polohy součástí. Typický příklad opravy je vlepení nového ložiska do uložení, ve kterém se předchozí ložisko vlivem zadření protočilo a vytvořilo tak zvětšenou vůli v uložení. Tmel v takovém případě odstraňuje vůli mezi součástmi, adhezivně je spojuje a brání kapilárnímu vniku vlhkosti. Při montážích se používají zejména na závity šroubů, aby nedocházelo během provozu k jejich povolování.

Do této kategorie lze rovněž zařadit tzv. plastické (tekuté) kovy. Jedná se o kompozitní materiály na bázi dvousložkové epoxidové pryskyřice obsahující jako plnivo kovové, případně keramické částice. Mezi jejich výhody patří snadná aplikace, vysoká přilnavost, krátká doba vytvrzování, stejná možnost opracování jako u kovů, dobrá chemická a mechanická odolnost. Nejvýraznější nevýhodou je nemožnost použití za vyšších teplot, většinou maximálně do 150 – 200 °C.

3.2.2.5 Renovace nanášením plastů

Tento způsob renovace součástí se velmi rozšířil s vývojem nových materiálů, které přinášejí mnoho způsobů využití ve strojírenství. Plasty se využívají především pro vytvoření nového funkčního povrchu, jehož třecí a odolnostní vlastnosti mohou být lepší než u původní součásti. Vlastnosti plastů mohou být dále ovlivňovány přidáváním různých příměsí při jejich výrobě.

Mezi výhody použití plastů patří především: jejich houževnatost, odolnost proti opotřebení, dobré kluzné vlastnosti, chemická stálost, schopnost tlumit rázy, odolnost proti korozi, jednoduché a spolehlivé nanášení vrstev. Naproti tomu nevýhodami jsou: nízká teplotní odolnost, zejména u polyamidů nasákavost a následná změna rozměrů[23].

Samotný způsob nanášení vrstvy plastu spočívá v napékání jeho práškové formy na součást předehřátou nad hodnotu teploty tavení daného plastu. Následně se součást ponechá po určitou dobu v prostředí se zvýšenou humiditou, aby případně přijala potřebné množství vzdušné vlhkosti a tím se objemově stabilizovala. Následné opracování se provádí zejména třískovým obráběním.[27]

3.2.2.6 Renovace pomocí kompozitů

Kompozity jsou vícesložkové materiály, které v sobě spájí vlastnosti všech svých složek. Použití konstrukčních kompozitů je dnes velmi běžné ve všech průmyslových oblastech. Jedná se o velice rozmanitou skupina materiálů na bázi kovů, polymerních i přírodních materiálů a keramiky. Kompozitní materiál se skládá z matrice (báze), která zajišťuje jednolitost materiálu, spojení se základním materiálem a přenos a rozložení vnějšího zatížení. Druhou složkou je plnidlo, které má určitou vlastnost výhodnou pro konkrétní druh užití, ale nedokáže ve své základní podobě sloužit danému účelu, protože to neumožňují jeho jiné vlastnosti[24]. Kompozity můžeme rozdělit takto:

Podle užitého materiálu matrice:

- kovové kompozity
- polymerové kompozity
- keramické kompozity

Podle tvaru částic plnidla:

- vláknové kompozity
- částicové kompozity
- vrstevnaté kompozity

Tvorba kompozitních povlaků na povrchu součásti se podle použité formy kompozitu dělí do tří skupin[24]:

- Tvorba z pevné fáze
- Tvorba z kapalné fáze
- Tvorba vylučováním a jiným způsobem

Do první skupiny patří práškové kompozitní materiály, které jsou velmi častou formou používanou při renovaci součástí a nanášejí se napékáním. Dalším způsobem nanášení je navařování kompozitů ve formě elektrod nebo drátů. Navařování probíhá obdobně jako u kovových materiálů[28]. Z kapalné fáze se vrstva tvoří rovněž navařováním, dále pak litím nebo sycením základní matrice tekutým kompozitem. Do poslední skupiny patří elektrolytické nebo chemické vylučování vrstvy na povrchu materiálu, stříkání a napařování kompozitů.

4 Praktická část práce

V této kapitole jsou podrobněji analyzovány konkrétní případy opotřebení a koroze. Jsou zde posouzeny hlavní příčiny jejich vzniku a předneseny návrhy na jejich zmírnění. U těchto situací nejsou zmapovány všechny aspekty vzniku a průběhu degradace, důraz je kladen na jejich evidentní příčiny.

4.1 Řetězové kolo sekundárního převodu motocyklu

Tato součást je zobrazena na obrázku č. 6 v kapitole 3.1.1.3. Se snímku je patrné značné opotřebení boků a čel zubů řetězového kola. Porucha se projevovala trhavým chodem řetězového převodu a přeskakováním řetězu, spojených s výrazně zvýšenou hlučností převodu. Tato situace nastala relativně krátkou dobu po montáži nového řetězového kola.

Prvotní příčinou bylo opotřebení celého řetězového převodu abrazivními částicemi, které ve formě prachu a jiných nečistot ulpívají na styčných plochách soustavy vlivem přítomnosti maziva. Při následné neodborné opravě však bylo vyměněno pouze primární kolo převodu a zbytek soustavy zůstal ponechán. Rychlé opotřebení bylo způsobeno nestejnou roztečí čepů článků řetězu a nového kola. Tím došlo k nadměrnému silovému namáhání, které vedlo nejprve k intenzivnímu abrazivnímu opotřebení a následně k deformaci zubů důsledkem jejich zeslabení a poruše převodu.

Z výše uvedeného je patrné, že při daném konstrukčním řešení nelze zcela eliminovat vznik abrazivního opotřebení, ale lze snížit jeho dopady pravidelnou údržbou, to znamená čištěním sestavy a používáním vhodných maziv. Dále pak při zjištění nadnormativního opotřebení některé ze součástí vyměnit všechny související celky.

Z konstrukčního pohledu lze předcházet vzniku abrazivního opotřebení řetězových převodů zamezením přístupu abrazivních částic ke strojnímu celku. Dříve se tohoto dosahovalo používáním celokrytovaných soustav, toto řešení se však pro daný účel ukázalo jako méně vhodné, zejména z důvodu absence možnosti vizuální kontroly. V současné době se dobrých výsledků dosahuje použitím tzv. těsněných řetězů, u kterých je mazivo uzavřeno mezi čepem a pouzdrem řetězu za pomoci pryžových či silikonových kroužků.

4.2 Čep pásového vozidla

Jedná se o díl vyobrazený na obrázku č. 11 v kapitole 3.1.2. U čepu došlo k postupnému otlačení a deformaci, vlivem jeho abrazivního opotřebení, které mělo za následek vytvoření nadměrných vůlí a jím způsobený vznik rázů. Tyto měly za následek „překování“ součásti do zobrazeného tvaru. Tento problém vedl k nadměrnému zatěžování ostatních částí soustavy, zejména pak hnacího kola.

K zmírnění primárního opotřebení brusným materiálem, kterým je v tomto případě zemina a její minerální složky, lze přispět pravidelným čištěním pásů např. tlakovou vodou. Konstrukční řešení se jako v předchozím případě nabízí v utěsnění čepů před vnikem okolních nečistot.

4.3 Průchodka zdvihátka ventilu

Tento díl se nachází na obrázku č. 14 v rámci kapitoly 3.1.5, jedná se o ocelovou bezešvou trubku, zalisovanou ve společné hlavě válců traktoru. Vnější plášť je obtékán chladící kapalinou, vnitřním profilem prochází zdvihátko ventilu a odtéká jím olej, přiváděný k rozvodovému mechanizmu. Porucha se projevila intenzivním průnikem chladící kapaliny do motorového oleje.

Koroze vznikla ze strany chladící vody z několika příčin:

- stářím uvedeného dílu
- dlouhodobým používáním nevhodné chladící kapaliny(studniční vody)
- častým vypouštěním a napouštěním systému

Hlavní důvodem perforace trubky korozí je doba provozu stroje (cca 60 let), jedná se tedy o závadu očekávatelnou. Během celé doby provozu stroje nebyla vždy používána vhodná chladící kapalina (demineralizovaná voda) a zároveň docházelo k vyprázdnění systému během zimního období a tím byla iniciována koroze za přístupu vzdušného kyslíku.

Životnost dílu by se jistě prodloužila důsledným používáním neutrálního chladiva s možností celoročního užití. Konstrukčním vylepšením by bylo využití materiálů s vyšší odolností proti korozi.

4.4 Nástroje

Opotřebení nepodléhají pouze strojní součásti, ale i veškeré nástroje. U mnohých nástrojů lze obnovovat jejich funkčnost, např. broušením, přičemž užitná hodnota nástroje zůstává zachována, ale mění se jeho rozměry. Příklad je uveden na obrázku č. 16, kde jsou porovnány dvě původně identické čepele stejně starých nožů, kde jeden byl hojně užíván a ostřen, zatímco druhý byl používán jen zřídka. Poškození druhého nože je způsobeno především vzdušnou korozí.

Obr. 16 Porovnání čepelí dvou stejných nožů

U nástrojů je třeba dbát na správnou volbu materiálu, vzhledem k účelu jejich užití. Špatná volba materiálu nebo jeho chybné tepelné zpracování má za následek rychlé opotřebení a následné znehodnocení. Toto bývá často spojeno i se zvýšeným rizikem úrazu při práci s tímto nástrojem. Charakteristickou ukázku špatné volby materiálu můžeme pozorovat na obrázku č. 17. Jedná se o dvě podobné osmikilové palice, užívané hlavně pro zatloukání ocelových klínů při štípání dřeva. Nepoškozená palice slouží již několik desetiletí bez zjevných změn tvaru. Naproti tomu u druhé palice došlo k poškození napěchováním materiálu již po několika hodinách práce. Nástroj se tímto stává nebezpečným, protože hrozí pořezáním o ostré části okraje a zároveň jejich vymrštění do okolí. Pro další bezpečné užívání bude třeba zdeformované okraje zbrousit. Lepším řešením by bylo překování nástroje za tepla, což se vzhledem ke kvalitě výrobku a časové a finanční náročnosti tohoto postupu nevyplatí.

Je zřejmé, že pro výrobu nástroje byl pro výše uvedený účel (zarážení ocelových klínů), použit nevhodný materiál, patrně nízkouhlíková ocel bez možnosti tepelné úpravy. Palice vyrobená z tohoto materiálu by našla užití v méně náročných případech jako například při tvorbě dřevěných konstrukcí.

Obr. 17 Napěchování ocelové palice

5 Diskuze nad problematikou

Posuzovaná oblast je velice rozsáhlá a dotýká se všech oborů lidské činnosti. Z literatury a několika uvedených případů je zřejmé, že na mechanizmus degradace má vždy vliv více faktorů. Dochází k jejich vzájemné kombinaci, což ve většině případů znamená urychlení ztráty funkčnosti nástroje, stroje nebo zařízení. Míru opotřebení nelze nikdy přesně stanovit předem, lze pouze vycházet ze zkušenosti s obdobnými situacemi, známými z praxe. Určité přiblížení je možné získat předběžnými laboratorními zkouškami, které simulují budoucí namáhání. Zkoušky v laboratorních podmínkách jsou často úzce spojeny s konkrétní problematikou z výroby, například při zkoumání odolnosti břitu obráběcích nástrojů s cílem nalézt optimální kombinaci geometrie nástroje a jeho materiálu. V současné době se cílí zejména na výzkum titanhliníkových povlaků pro karbidové břity nástrojů. Takto upravený břit umožňuje obrábění i kalených ocelových součástí[29].

Hojně diskutovanou problematiku jsou i cesty ke snižování opotřebení cestou vývoje nových maziv pro pohybující se součásti. Nejčastěji se o tomto diskutuje v souvislosti s automobilovým průmyslem, ať jde již o mazání převodových mechanizmů nebo spalovacích motorů. Výrobci maziv přichází stále s novými typy maziv, kde z komerčních důvodů v některých případech i zveličují jejich pozitivní účinky, mezi které může patřit tvrzení, že při použití daného typu aditiva v motorovém oleji dosáhneme výrazného snížení opotřebení vnitřních částí motoru. Skutečné výsledky podporující nebo vyvracející tato tvrzení lze získat pouze laboratorními pokusy ve specializovaných zkušebnách. Jedním z možných přístupů je rozebrání jednotlivých uzlů vozidla a porovnávání stupně opotřebení dílů při použití rozdílných maziv. Častou metodikou bývá přesné vážení dílů před a po uplynutí stanovené délky zkušebního provozu.

Výše uvedených příkladů studia opotřebení je možné uvést celou řadu. Při návrhu nových konstrukcí je nutné brát v potaz praktické zkušenosti a eventuální výsledky laboratorních testů, pouze tak lze zajistit vysokou spolehlivost zařízení.

6 Závěr

Opotřebení je hojně se vyskytující příčinou degradace strojních součástí, snižující spolehlivost a zkracující životnost zařízení. Degradace součástí nepříznivě ovlivňuje kvalitu výroby, zvyšuje výrobní náklady a v konečném důsledku má negativní dopad i na životní prostředí. Proto je důležité zaměřovat se na předcházení vzniku opotřebení jak při konstruování a vývoji, tak i při samotném provozu a údržbě stroje. Kvalitativní vlastnosti strojů a zařízení z hlediska funkčního, ekonomického i ekologického ovlivňuje mnoho faktorů, mezi něž patří například: Použité konstrukční řešení, technologie výroby součástí, správná volba materiálů, pravidelná údržba a včasné odhalení poruch.

V první části práce se nachází literární přehled řešené problematiky, ve kterém jsou uvedeny jednotlivé druhy degradace strojních součástí, se zaměřením zejména na opotřebení. V práci se nachází také několik vlastních praktických příkladů opotřebených součástí a nástrojů, které jsou podrobněji okomentovány a doloženy fotodokumentací. Tyto případy mají za názorně úkol doplnit popsanou problematiku.

K degradacím strojních součástí dochází i v případech, kdy je na jejich prevenci kladen velký důraz, a proto práce předkládá i poznatky z oboru renovace strojních součástí. Renovace je běžnou součástí strojírenské praxe a přináší ekonomicky i ekologicky přívětivou, v některých konkrétních případech i jedinou schůdnou možnost znovuzprovoznění stroje nebo zařízení. V posledních letech zaznamenaly velký nárůst způsoby renovace, využívající moderní technologie a polymerní a kompozitní materiály, které svými vlastnostmi dokážou překonat materiály konvenčně používané. Oblast výzkumu technologií a materiálů se neustále rozvíjí, je proto nutné se neustále v tomto oboru vzdělávat a snažit se o objevení nových poznatků s ním souvisejících.

7 Seznam použité literatury

[1] KRATOCHVÍL B., ŠVORČÍK V., Vojtěch D. *Úvod do studia materiálů*. 2005. ISBN 80-7080-568-4.

[2] POŠTA, J. *Degradace strojních součástí*. 2002. ISBN 8021309679.

[3] ČSN-01-5050. *Opotřebení materiálu - názvosloví*. 1968.

[4] KATO, Koji a Koshi ADACHI. Wear Mechanisms. *Modern Tribology Handbook*. 2001, 28 p.

[5] SUCHÁNEK J. *Vibrační opotřebení* [online]. [vid. 2018-02-25]. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22011/vibracni-opotrebeni-.html

[6] GEBRESILASSIE, Asmamaw. Design and analysis of Composite Drive Shaft for Rear-Wheel Drive Engine. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2012, **3**(5), 3–6.

[7] POŠTA, J. *Opotřebení strojních soustav a vznik poruch*. nedatováno.

[8] SUCHÁNEK J., KUKLÍK V., Zdravecká E. *Abrazivní opotřebení materiálu*. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03659-4.

[9] BASU, B a M KALIN. *Tribology of Ceramics and Composites: A Materials Science Perspective* [online]. 2011. ISBN 9781118021668. Dostupné z: doi:10.1002/9781118021668

[10] ČSN-41-9810. *Ocel 19810 rychlořezná*. 1967.

[11] The status of silicon carbide and related materials. *III-Vs Review* [online]. 1996, **9**(1), 58–62 [vid. 2018-03-24]. ISSN 0961-1290. Dostupné z: doi:10.1016/S0961-1290(96)80174-8

[12] ČSN-01-5084. *Stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazivnímu opotřebení na brusném plátně*. 1974.

[13] LIŠKA, J a J FILÍPEK. 3D Modely laboratorních zkoušek opotřebení. 2012.

[14] BLAŠKOVIČ, P, J BALLA a M DZIMKO. *Tribológia*. 1990. ISBN 8005006330.

[15] MATOUŠEK, R. *Poškození strojních součástí* [online]. 2016. Dostupné z: http://docplayer.cz/10992387

[16] HWANG, Seok-Chul, Jin-Hwan LEE, Dong-Hyung LEE, Seung-Ho HAN a Kwon-Hee LEE. Contact stress analysis for a pair of mating gears. *Mathematical and Computer Modelling* [online]. 2013, **57**(1–2), 40–49 [vid. 2018-03-24]. ISSN 0895-7177. Dostupné z: doi:10.1016/J.MCM.2011.06.055

[17] BERGMANN, E., J. VOGEL a L. SIMMEN. Failure mode analysis of coated tools. *Thin Solid Films* [online]. 1987, **153**(1–3), 219–231 [vid. 2018-03-24]. ISSN 0040-6090. Dostupné z: doi:10.1016/0040-6090(87)90184-2

[18] *Kavitační opotřebení* [online]. 2018. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3598&typ=html

[19] DENG, Wen, Guoliang HOU, Shuangjian LI, Jiesheng HAN, Xiaoqin ZHAO, Xia LIU, Yulong AN, Huidi ZHOU a Jianmin CHEN. A new methodology to prepare ceramic-organic composite coatings with good cavitation erosion resistance. *Ultrasonics Sonochemistry* [online]. 2018, **44**, 115–119 [vid. 2018-03-24]. ISSN 1350-4177. Dostupné z: doi:10.1016/J.ULTSONCH.2018.02.018

[20] HU, Zupan, Wei LU, M.D. THOULESS a J.R. BARBER. Effect of plastic deformation on the evolution of wear and local stress fields in fretting. *International Journal of Solids and Structures* [online]. 2016, **82**, 1–8 [vid. 2018-03-25]. ISSN 0020-7683. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJSOLSTR.2015.12.031

[21] POŠTA, J. *Renovace strojních součástí* [online]. 2013. Dostupné z: http://mechanizaceweb.cz/renovace-strojnich-soucasti/

[22] HAMERNIK, J. *Koroze a ochrana před korozí* [online]. Dostupné

z: http://jhamernik.sweb.cz/Koroze.htm
[23] ČERNOVOL, M. a J. POŠTA. *Renovace součástí zemědělské techniky*. 1989.
[24] POŠTA J., HAVLÍČEK J., Černovol M.I. *Renovace strojních součástí*. 1998. ISBN 80-902015-6-3.
[25] WANG, Haichao, Zhijiang WANG, Pengfei BAI, Shengsun HU, Yanshen ZHANG a Ren WANG. Optimized segmented heat source for the numerical simulation of welding-induced deformation in large structures. *Advances in Engineering Software* [online]. 2018, **117**, 1–7 [vid. 2018-03-25]. ISSN 0965-9978. Dostupné z: doi:10.1016/J.ADVENGSOFT.2017.12.005
[26] VERDIAN, M.M. Fabrication of FeAl(Cu) intermetallic coatings by plasma spraying of vacuum annealed powders. *Vacuum* [online]. 2016, **132**, 5–9 [vid. 2018-03-25]. ISSN 0042-207X. Dostupné z: doi:10.1016/J.VACUUM.2016.07.016
[27] DAVIM, J. Paulo a Francisco MATA. A new machinability index in turning fiber reinforced plastics. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2005, **170**(1–2), 436–440 [vid. 2018-03-26]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/J.JMATPROTEC.2005.05.047
[28] HASTINGS, Daniel L., Mirko SCHOENITZ a Edward L. DREIZIN. High density reactive composite powders. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2018, **735**, 1863–1870 [vid. 2018-03-26]. ISSN 0925-8388. Dostupné z: doi:10.1016/J.JALLCOM.2017.11.345
[29] KOVÁŘ, J. Opotřebení nástroje při frézování zušlechtěných nástrojových ocelí. *Firemní katalog Nástroje ze slinutého karbidu firmy Walter*. 2013.

8 Seznam obrázků

Obr. 1 Mechanizmus adhezivního opotřebení [2] 14
Obr. 2 Mechanizmus vibračního poškození 16
Obr. 3 Vibrační poškození křížového kloubu 16
Obr. 4 Mechanizmus abrazivního opotřebení [2] 18
Obr. 5 Zkouška opotřebení na brusném plátně [13] 19
Obr. 6 Abrazivní opotřebení řetězového kola 19
Obr. 7 Mechanizmus erozivního opotřebení [2] 20
Obr. 8 Erozivní opotřebení kulového ventilu [15] 21
Obr. 9 Mechanizmus únavového poškození [2] 22
Obr. 10 Pitting boků zubů kuželového kola 23
Obr. 11 Mechanizmus kavitačního poškození [2] 25
Obr. 12 Deformace čepu z pásového vozidla v důsledku vzniku opotřebení 26
Obr. 13 Detail trhliny klínové řemenice 27
Obr. 14 Únavový lom hřídele elektromotoru 28
Obr. 15 Korozí znehodnocená součást 30
Obr. 16 Porovnání čepelí dvou stejných nožů 38
Obr. 17 Napěchování ocelové palice 39