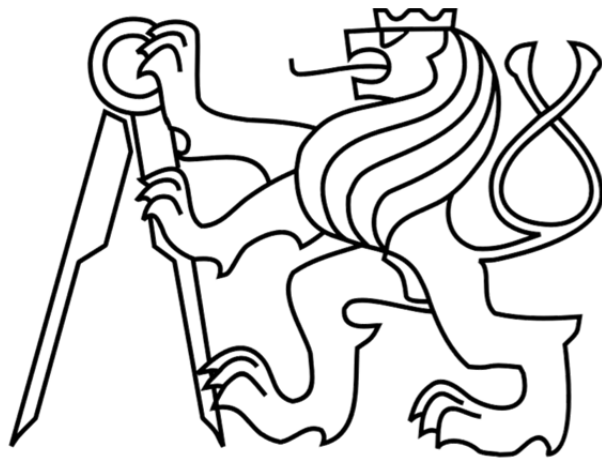


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

U12105 - Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



Diplomová práce

Vliv technologických úprav dvojice CoCrMo-UHMWPE na její
tribologické chování



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro: Bc. Adélu Pavlíkovou
program: **Strojní inženýrství**
obor: Biomechanika a lékařské přístroje

Název tématu:

Vliv technologických úprav dvojice CoCrMo-UHMWPE na její tribologické chování

Title:

How technological modifications of CoCrMo alloy and UHMWPE influence tribological behaviour

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte tribologické testy ke stanovení otěrových vlastností materiálových dvojic CoCrMo-UHMWPE. Posuďte zdroje chyb (vlivů) při experimentech.
2. Vhodným matematickým modelem popište vztahy mezi relevantními veličinami (součinitel tření, normálová síla, smykové napětí, drsnost povrchu, koeficienty otěru,...)
3. Na základě experimentálních dat zhodnoťte jednotlivé technologické úpravy CoCrMo a UHMWPE
4. Zformulujte doporučení pro výrobce kloubních náhrad z CoCrMo a UHMWPE

Rozsah grafických prací:15 stran

Rozsah průvodní zprávy: 50 stran

Seznam odborné literatury:

1. Wear Control Handbook, The American Society of Mechanical Engineers (1980)
2. Elastohydrodynamic lubrication analysis of metal-on-metal hip-resurfacing prostheses., Udofia IJ, Jin ZM., J Biomech. 2003 Apr; 36(4):537-44.
3. Wear analysis for Engineers, R.G.Bayer, HNB Publishing (2002)

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Kronek

Konzultant: Ing. Jaroslav Fencel

Datum zadání diplomové práce: 30. 10. 2015

Datum odevzdání diplomové práce: 18. 12. 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Zadání diplomové práce převzal dne:

.....

diplomant

prof. Ing. Milan Růžička, CSc.

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.

.....

vedoucí Ú 12 105

děkan FS ČVUT v Praze

V Praze dne 30. 10. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 8.1.2016

.....

podpis

Poděkování

Úvodem bych chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Jakubu Kronkovi, za vedení práce, jeho podnětné rady a připomínky i proškolení o obsluze na použitém zařízení v laboratořích ČVUT. Taktéž děkuji firmě BEZNOSKA za poskytnutí vzorků k provedení experimentu a umožnění měření na jejím zařízení. Dále pak jejím zaměstnancům Ing. Pavlu Čoupkovi a Ing. Jaroslavu Fenclovi za vedení při obsluze měřících zařízení. Rovněž chci poděkovat Ing. Zdeňce Jeníkové za možnost provedení DSC testů.

Chtěla bych také velice poděkovat svým rodičům za nesmírnou podporu a trpělivost, se kterou mě podporovali v průběhu celého studia a tvorbě této diplomové práce.

Anotace

Jméno autora :	Adéla Pavlíková
Název DP :	Vliv technologických úprav dvojice CoCrMo-UHMWPE na její tribologické chování
Rozsah práce :	stran
Šk. rok vyhotovení:	2015/20016
Škola:	ČVUT - Fakulta strojní
Ústav :	Ú12105 - Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedoucí DP :	Ing. Jakub Kronek
Konzultant :	
Zadavatel tématu :	ČVUT FS, Ú12105
Využití :	Zmapování problematiky vyhodnocení otěru. Zhodnocení vlivu technologických úprav pro materiálovou dvojici CoCrMo a UHMWPE na odolnost proti otěru.
Klíčová slova :	wear tests, wear, UHMWPE, CoCrMo
Anotace :	Předložená diplomová práce se zabývá metodikou provedení otěrového experimentu. Dále zkoumá vliv technologických úprav na otěrové vlastnosti dvojice CoCrMo a UHMWPE

Annotation

Author :	Adéla Pavlíková
Title of diploma thesis:	How technological modifications of CoCrMo alloy and UHMWPE influence tribological behaviour
Extent :	pages
Academic year :	2015/20016
Univerzity :	CTU – Fakulty of Mechanical Engineering
Deparrtment :	Ú12105 – Department of Mechanics, Biomechanics and Mechatronics
Supervisor :	Ing. Jakub Kronek
Consultant :	
Submitter of the teme :	CTU – Fakulty of Mechanical Engineering
Application :	Overview of the problem evaluation of abrasion. Assessing the impact of technological modifications for material pair UHMWPE and CoCrMo wear resistance.
Klíčová slova :	effective coefficient of friction, wear tests, total joint replacement, pollex, Hertz pressures
Anotace :	This thesis deals with the design methodology wear experiment. Further examines the impact of technological modifications on the wear properties of UHMWPE and CoCrMo

Přehled použitého značení, symbolů a zkratek:

c	cyklus	-
m	hmotnost	kg
F	síla	N
v	rychlost	m/s
t	čas	s
F_N	normálová síla	N
φ	poloha natočení, úhel flexe	°
E	Youngův modul pružnosti	Pa
ν	Poissonova konstanta	-
r	poloměr koule, jamky	m
a_H	poloměr vtisku koule z Hertzova tlaku	m
h	hloubka vtisku koule do jamky	m
S_H	plocha vtisku	m ²
p_{max}	maximální Hertzův tlak	Pa
p	tlak	Pa
μ	součinitel smykového tření	-

SST	součinitel smykového tření
UMT	univerzální zařízení k testování materiálu (Universal Materials Tester)
UHMWPE	vysoko molekulární polyethylen (Ultra high molecular weight polyethylene)
DSC	diferenciální snímací kalorimetrie (Differential scanning calorimetry)
sm. odchylka	směrodatná odchylka

1.	Úvod	11
2.	Rešerše literatury	12
2.1	Součinitel smykového tření	12
2.1.1	Vliv tribologických podmínek na součinitel smykového tření	12
2.1.2	Druhy mechanismů opotřebení	15
2.2	Matematické modely mezi relativními veličinami	19
2.3	Tribologická zařízení	25
3.	Cíle práce	41
4.	Materiál a metodika experimentální práce	41
4.1	Vzorky a použité materiály	41
4.2	Způsob vyhodnocení objemu	46
5	Popis zařízení	48
5.1	Popis zařízení a parametrů zkoušky, postupy měření na planetovém tribometru ve firmě BEZNOSKA	48
5.2	Popis zařízení a parametrů zkoušky, postupy měření na simulátoru pro testování kolenních náhrad ne ČVUT	50
6	Výsledky	52
6.1	Výsledky experimentů na planetovém tribometru	52
6.2	Výsledky experimentů na simulátoru KKK ELO 2007	54
7	Diskuze	60
7.1	Diskuze experimentů na planetovém tribometru	60
7.2	Diskuze experimentů provedených na simulátoru KKK ELO 2007	64
8	Přírůstky hmotnosti	67
8.1.1	Nasákavost a sušení	67
8.1.2	DSC testy	69

8.2	Srovnání závěrů z obou experimentů a použitých metod	71
9.	Závěr	73

Literatura

Seznam obrázků

Seznam příloh

1 Úvod

V současné době, kdy jsou kladeny vysoké životní nároky při zvyšující se délce života, dochází stále častěji k implantacím kloubních náhrad. Jen v ČR se implantuje přibližně 10000 totální endoprotéza kyčelního kloubu ročně přitom průměrný věk pacientů je přibližně 66 let [i20]. Ve vyspělých evropských zemích dokonce ročně připadá na 1000 obyvatel jedna implantace totální endoprotéza kyčelního kloubu[i19]. Životnost moderních endoprotéz se přitom pohybuje okolo 15 let [i22]. Příčinou omezené životnosti je otěr implantátu, jehož následkem dochází k opotřebení endoprotéz a zhoršení tribologických vlastností. Dále dochází k distribuci otěrových částic do organismu a tím i možnosti dalších komplikací v jiných funkčních soustavách. Na některých ortopedických pracovištích tvoří reoperace až 20% z celkového počtu implantací kloubních náhrad [i21], mezi nejčastěji uváděné příčiny patří uvolnění endoprotézy a infekční komplikace. Je proto snahou vytvořit kloubní náhrady s delší životností, dobrou biokompatibilitou a zaručenou funkčností. Těchto vlastností se dosahuje úpravou a vývojem materiálu endoprotéz za pomoci dlouholetého výzkumu.

2 Rešerše literatury

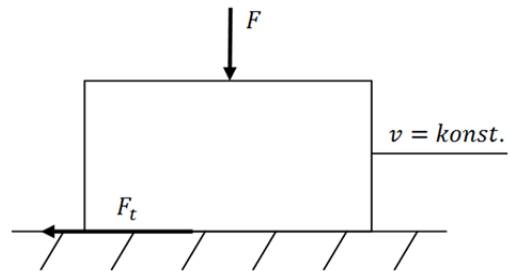
2.1 Součinitel smykového tření (SST)

klasická mechanika - makrogeometrie

Základní představa o součiniteli smykového tření v klasické mechanice vychází z makromodelu soustavy. Součinitel smykového tření vyjadřuje jako poměr přítláčné síly kolmé k povrchu a třecí síly působící proti směru pohybu Obr2.1.1.1.

$$F_t = \mu F$$

$$\mu = \frac{F_t}{F}$$



Obr2.1.1 tribologický makromodel

Tento vztah je známý jako Coulombův zákon. Podle tohoto zákona součinitel smykového tření nezávisí na velikosti dotykové plochy těles a je vlastností pouze drsnosti povrchu a materiálu dotýkajících se ploch. Základní teorie tření dále rozlišuje součinitel smykového tření za klidu a za pohybu, kde SST za klidu je větší než SST za pohybu a to přibližně 1,1 až 1,8 krát. Dále uvažuje SST jako nezávislý na velikosti rychlosti.

mikromodel - mikrogeometrie

Výpočet SST z Coulombova zákona je výhodný pro svoji jednoduchost, nicméně neuvažuje opotřebení ani deformaci stykových ploch a tedy platí pouze pro dokonale tuhá tělesa. Reálná tělesa nejsou ani dokonale tuhá ani dokonale hladká a je proto nutné zohlednit i topologii povrchu. Ve skutečnosti se na povrchu nacházejí mikronerovnosti, jejichž tvar a kvantita jsou ovlivněny způsobem výroby. [k2]

2.1.1 Vliv tribologických podmínek na součinitel smykového tření

Vliv rychlosti na SST

Vlivem rychlosti vzájemného pohybu třecích ploch na SST v mazaných spojích se zabýval Stribeck, který rozdělil tření na suché, smíšené a kapalinné tření Obr2.1.1.1.

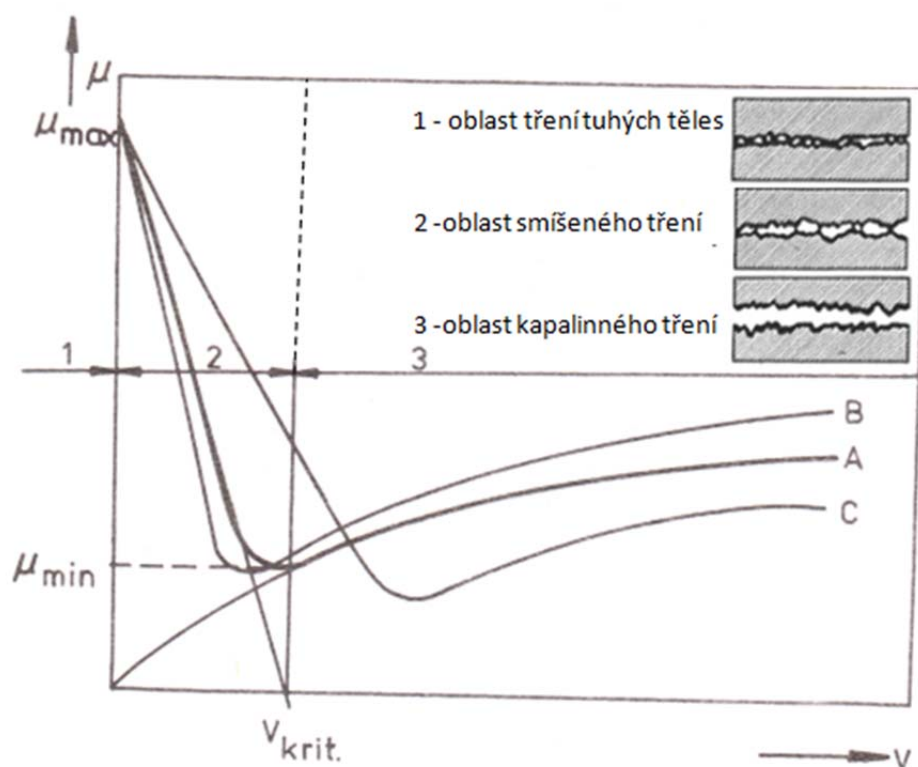
Stribeck

Ke kapalinnému tření dochází jsou-li povrchy těles zcela odděleny kapalinou. Tento případ je řešen jako laminární proudění maziva při kterém dochází ke tření pouze v kapalině. Na základě Newtonova zákona pro tečné napětí v kapalině je SST stanoven jako poměr tečného napětí v kapalině τ a tlaku p na kontaktní plochu.

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

$$\mu = \frac{\tau}{p}$$

Zde u je rychlost proudící kapaliny a η je dynamická viskozita kapaliny. U kapalinného tření nedochází k otěru a proto je snahou technologů provozovat třecí uzle právě za podmínek kapalného tření. K tomuto účelu se dnes používá široká škála maziv ať již tuhých, kapalných, či plastických nebo mazání plynnou mezivrstvou. Dobrá maziva by měly vykazovat dobrou přilnavost, malé vnitř tření a chemickou stálost.



Obr2.1.1.1 Průběh Stribeckovy křivky [k1]

Smíšené tření je stav který nastává u mazaných spojů tehdy, jsou-li třecí plochy v občasném kontaktu větších vrcholků mikronerovností kontaktních povrchů. Nastane-li stav, kdy tloušťka vrstvy maziva bude alespoň o velikosti několika molekul, smíšené tření přejde do kapalinného.

Suchým třením nazýváme stav při kterém se mezi třecími plochami nenachází mazivo. Jedná se tedy o spoje kde mazivo nebylo použito a nebo o spoje kde velkou přítláčnou silou bylo vytlačeno mimo dotykové plochy. [k1, k2, k3,c6]

Vliv drsnosti na SST

Následkem tření kontaktních ploch dochází k projevu vlivu povrchových vrstev a vzniku opotřebení. Jednotlivé mikronerovnosti se vzájemně obrušují vlivem působení řezných sil od mikronerovností s vyšší tvrdostí, dochází k plastickému přetvoření povrchu nebo k vytrhávání malých částic. Dále pak dochází k difuzím atomů mezi povrchy i mezi povrchy a

okolním prostředím. Všechny tyto faktory vedou ke změně velikosti relativních stykových ploch a tvaru mikroverovností. Tyto změny se následně projeví na zvětšení počtu a velikosti rázů ve stycích, zvyšováním třecích sil a častějším zadíráním. Opotřebení je způsobeno šesti jevy, které se vzájemně ovlivňují. Jsou jimi:

Vliv teploty na SST

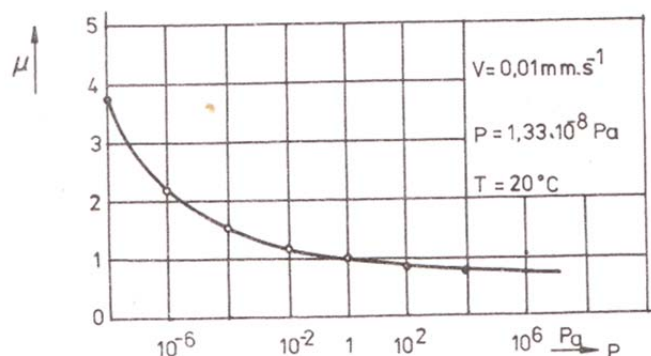
Vliv teploty na SST je zásadní. Obecně se teplo do třecího uzlu dostává jako následek procesu tření, který se projevuje v podobě třecí síly nebo třecího momentu. Takto disipovaná mechanická energie se přemění v opotřebení a teplo. Mechanickou energii přeměněnou v teplo, bez uvažování ztráty části energie na přetvoření povrchu, lze vypočítat jako:

$$P = F_t u = \mu F u$$

Na základě dodaného tepla se atomy v povrchových vrstvách více rozkmitají. Následkem je pak větší plasticita materiálu, větší náchylnost k vzniku adheze a rovněž i mikrosváru způsobeného difuzí atomů. Zvýšením teploty tělesa dochází taktéž ke změně fyzikálních vlastností jako je například hustota. [k2, k3]

Vliv okolního prostředí na SST

Vliv prostředí ve kterém se kontaktní plochy nachází na proces tření je patrný již z často používaného rozdělení těchto procesů na tření za sucha a tření s mazivem. Termín suché tření, však rozhodně neznačí absenci okolního prostředí, tím je v tomto případě vzduch. Sledování procesu tření bez vlivu okolního prostředí je možné ve vakuu. Vliv množství kyslíku na SST je patrný na obrázku Obr2.1.1.2. Jsou-li povrchy třecího spoje vystaveny působení chemicky agresivního prostředí dochází k jejich reakci s atomy z prostředí ve kterém se nalézají. Na povrchu dochází k adsorbci vody, objevují známky koroze která svým vznikem napomáhá k vytváření prohlubní nebo naopak dochází k vytvoření ochranné oxidycké vrstvy. Zoxidovaná vrstva materiálu má jiné chemické a fyzikální vlastnosti a proto se takový materiál chová jinak i v případě SST nebo otěru. Oxidycké vrstvy jsou obecně velmi tenké a proto se v průběhu několika cyklů na tribometrech otřou. Tento jev je pozorovatelný na počátku tribologického testu, když je v několika prvních cyklech SST odlišný, stejný jev však nastává i jako následek otírání povrchů na ustálený stav opotřebení. Mimo vlivu chemického má okolí prostředí i vliv mechanický. Použitím vhodného maziva je možné docílit oddělení třecích povrchů, včetně



Obr2.1.1.2 závislost SST Fe/Fe ve vakuu na postupném vyrovnávání tlaku přidáním kyslíku [k1]

mikronerovností, a vytvořit tak hydrodynamický kontakt, v němž by docházelo k pohybu bez otěru. Zbytky kapalin po obrábění nebo jiné nečistoty i podobě částic které se dostaly do třecího uzlu mohou zvýšit velikost opotřebení u obou ploch. V případě znečištění kontaktu tvrdými částčkami pak docházelo u některých zařízení k zvláštnímu jevu, kdy při kontaktu měkkého a tvrdého materiálu došlo i ke značnému opotřebení kontaktní plochy materiálu tvrdého. Příčinou tohoto jevu je vniknutí nečistot do kontaktu a jejich následné hluboké zaboření do měkkého materiálu. Takto uvízlé částice pak v průběhu pohybu vytváří rýhy na tvrdším tělese. [k1, k2, k3]

Vztah SST a opotřebení

V praxi se setkáváme se dvěma základními konstrukčními požadavky. Zaprvé je to minimalizace účinků třecích sil a momentů, tepla a opotřebení. Tento požadavek je například kladen u uložení a vedení mechanismů. Zadruhé je to maximalizace účinků třecích sil a momentů a minimalizace opotřebení. Nejběžnějším příkladem jsou brzdy. [k2]

2.1.2 Druhy mechanismů opotřebení

Opotřebení je dle ČSN 01 50 50 způsobeno šesti základními jevy. Tyto jevy se vzájemně ovlivňují. Jsou jimi:

1) adheze- je způsobena vnitřní energií částic dotýkajících se povrchů a jejich pohybem
Obr2.1.2.1.

K tomuto jevu dochází typicky při smýkání tuhých těles vzájemně přitlačovaných normálovou silou. Díky dostatečné energii částice a porušení povrchových adsorpčních i oxidových vrstev dojde ke vzniku mikrosvarů.

Jejich usmýknutí pak vede ke zpětnému rozpojení povrchů v místě

sváru bez přenosu materiálu nebo jejich usmýknutí pod oblastí sváru a tedy přenosu částic. V průběhu tohoto procesu může rovněž dojít i k uvolnění těchto částic a tedy vzniku volné částice. Vznik a vývoj adhezivního opotřebení pak ovlivní především hloubka vniknutí a poloměr zakřivení mikronerovností, velikost normálového zatížení, rychlost vzájemného pohybu a schopnost materiálů tvořit adhezivní spoje. Následkem adheze dochází k nárůstu třecí síly a k zvýšení teploty kontaktních ploch. Například u některých plastů tak nárůst teploty dotykových ploch vede k zvýšení míry adheze. Důsledkem zvýšeného odporu proti pohybu může docházet až k zadírání. Častou příčinou tohoto jevu je selhání maziva.

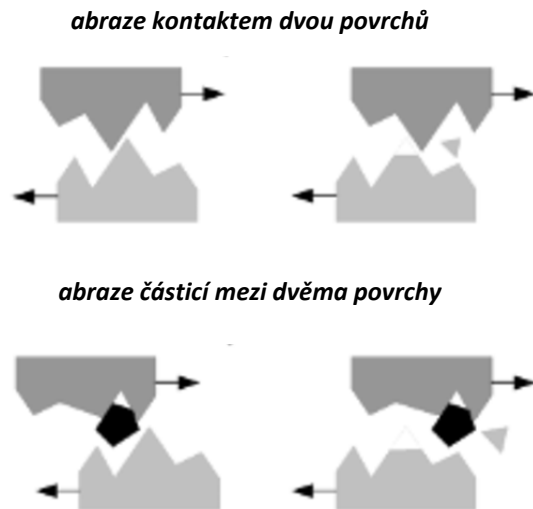


Obr2.1.2.1 adhezivní opotřebení [i12]

2) abraze - je způsobena zaklíněním nerovností povrchů nebo vnikem částic mezi tyto povrchy. Tyto částice pronikají mezi plochy z okolí třecího spoje, případně mohou být důsledkem předešlého opotřebení

Obr2.1.1.2.2.

Tento jev je typický při smýkání dvou drsných těles. Projevuje se odřezáváním a ulamováním výčnělků nerovností a vytvářením rýh především do měkčího materiálu. Případným vtlačení či zaklíněním uvolněných částic tvrdšího materiálu do materiálu měkčího pak vede rovněž i k vzniku rýh na tvrdším materiálu.

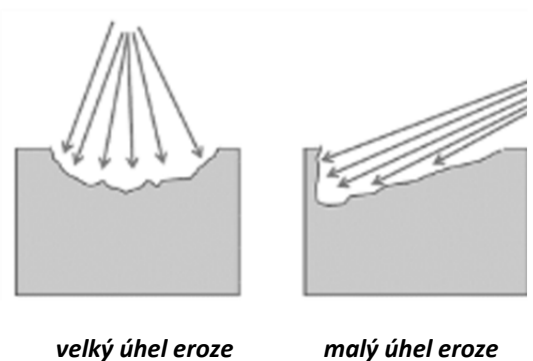


Obr2.1.1.2.2 abrazivní opotřebení [i12]

3) eroze- je poškození nesenými částicemi či samotným proudem kapaliny.

Obr2.1.1.2.3

Mechanismus tohoto poškození je podobný jako u abraze. Porušení rovněž vzniká nerovnoměrně. Erozí poškozený povrch je zvlněný a zvrásněný. Míra poškození je ovlivněna jednak vlastnostmi média tak vlastnostmi, rychlostí a úhlem dopadu případných částic.

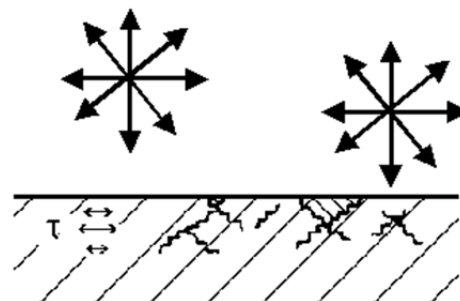


Obr2.1.1.2.3 erozní opotřebení [i12]

4) kavitace- je způsobeno kavitačními bublinami v kapalině, následkem jejich zanikání dochází ke vzniku hydrodynamických rázů a následnému oddělování částic z povrchu.

Obr2.1.1.2.3

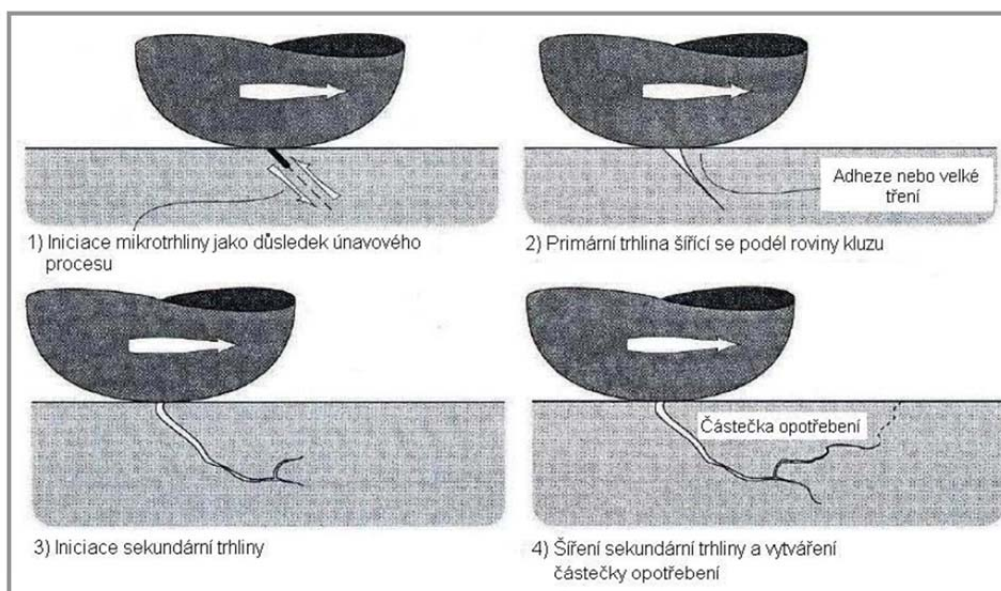
Ke vzniku kavitačních dutin dochází snížením tlaku pod hodnotu nasycených par, k tomu dochází například v místech se zúžením průtočného průřezu. Hlavními faktory ovlivňující vznik kavitace je obsah plynů v kapalině, teplota a tlak, povrchové napětí a viskozita kapaliny. Velikost dutin je ovlivněna jednak povrchovým napětím, u tekutin s větším povrchovým napětím jsou větší i kavitační dutiny, jednak teplotou kapaliny, při vyšších teplotách jsou dutiny sice menší, ale zvětšuje se jejich množství a s tím i velikost kavitačního opotřebení.



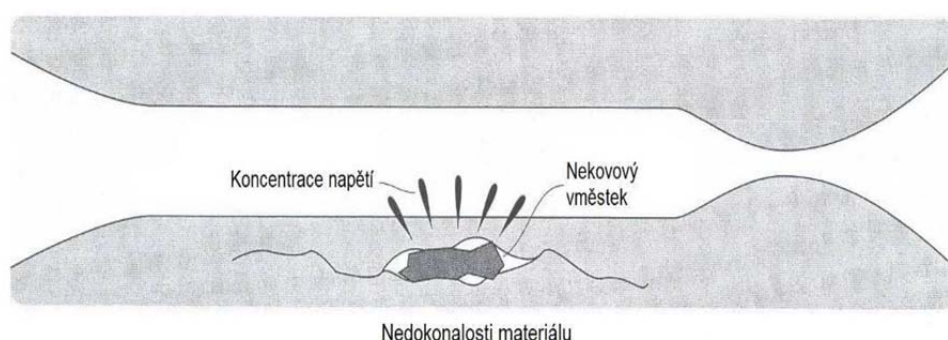
Obr2.1.1.2.4 kavitační opotřebení [i16]

5)únava - je způsobena kumulací poruch při proměnném či opakovaném namáhání, které vede ke vzniku a šíření trhlin

Proces únavy se projevuje vznikáním trhlin v oblastech s velkou koncentrací napětí. Tyto trhliny se dále šíří a spojují což vede k uvolňování a vylomení částice z povrchu, vznik dolíčků. Obr2.1.2.5 Vliv únavy na materiál se zvyšuje s jeho drsností i počtem a velikostí vměstků, příčinou je větší vrubový účinek. Obr2.1.2.6 Nižšího vlivu únavy lze pozorovat u tvrdších materiálů, tato vlastnost je lineární. Na základě velikosti kontaktního napětí lze hovořit o nízkocyklové únavě, při napětí nad mezí kluzu, a vysokocyklové únavě, při napětí pod mezí kluzu. Mimo kontaktních tlaků se na únavě podílí i skluz a tření v podobě smykového a tahového namáhání.



Obr2.1.2.5 únavové poškození při rozvoji povrchové trhliny [i18]



Obr2.1.2.6 přítomnost vmětku jako příčina kontaktní únavy [i18]

6)vibrační- vzniká při kmitavých tečných pružných deformacích a projevuje se vznikem částic odděleného materiálu případně i iniciací trhlin. Obr2.1.2.7

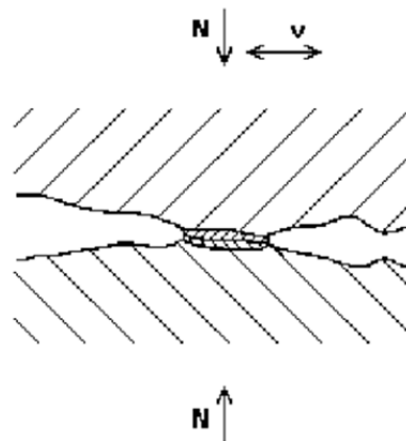
Vibrační opotřebení vzniká u pohybů jejichž amplituda vyvolává větší než pružné povrchové deformace s následkem skluzů v této vrstvě. U pohybu s větší amplitudou je vibrační opotřebení větší. Zatímco u větších frekvencí je vibrační opotřebení menší, důvodem je menší vliv oxidace na méně obnažený povrch. Tvrdost povrchu zpravidla zvyšuje odolnost proti vibračnímu opotřebení.

[k1, k2, k3,c13, i12,i16,i18]

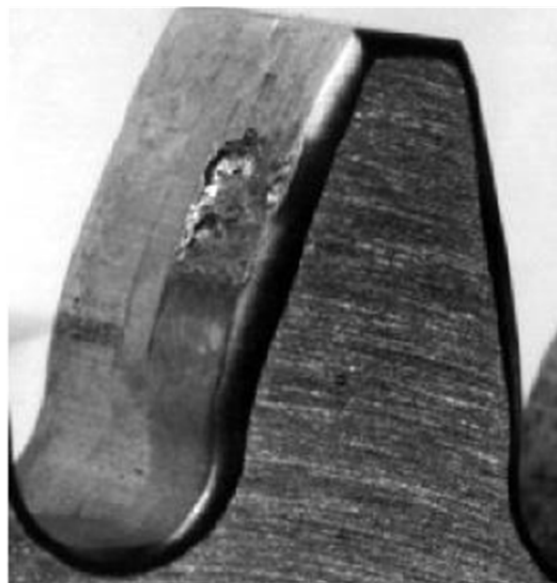
pitting

Pitting jinak také nazýván důlková koroze je zvláštním případem únavového opotřebení. Jak název napovídá toto opotřebení se projevuje tvorbou důlků obvykle okrouhlého tvaru, v určitých případech i protáhlého až lupínkového tvaru u tvrdších povrchů však i hranatého tvaru. Tento jev se iniciuje v drobných trhlinách na povrchu materiálu při smýkání dvou těles za podpory maziva. Účinkem kontaktního tlaku vniká mazivo do povrchových trhlin a v důsledku pohybu druhého tělesa je uzavíráno. V důsledku kontaktního namáhání se tlak v trhlíně zvyšuje a přispívá tak k dalšímu šíření trhlin až do vylomení částice.

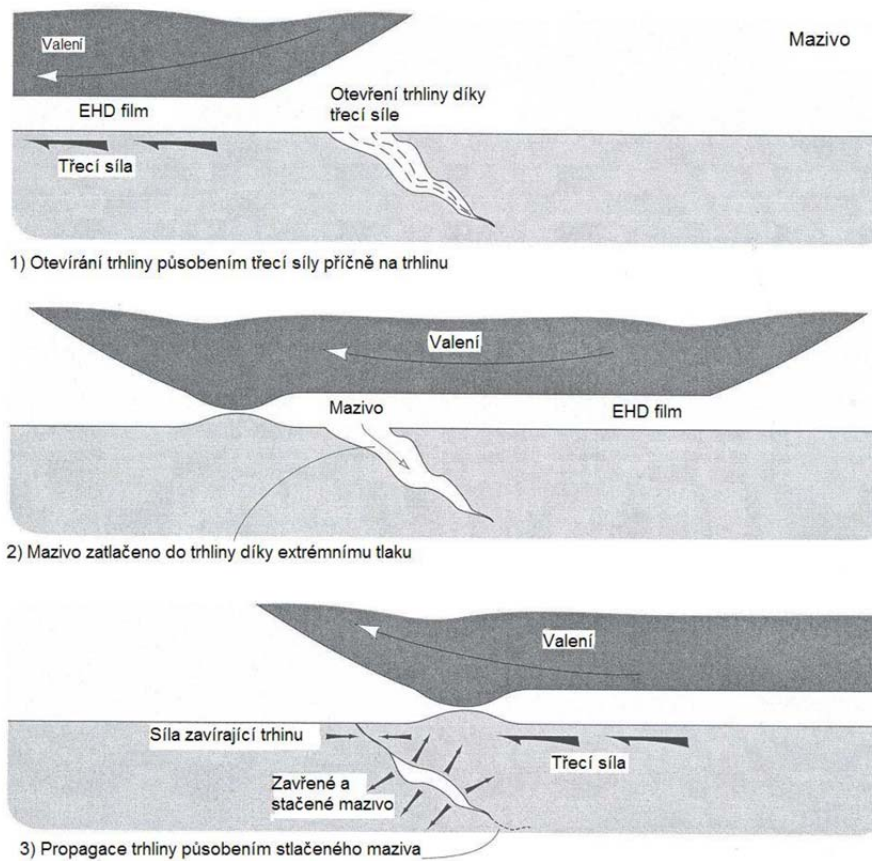
Obr2.1.2.9 Tento jev se vyskytuje například u ozubených kol při překročení mezního kontaktního tlaku v kontaktu vyobrazen na Obr2.1.2.8. [c13,i16,i18]



Obr2.1.2.7 kavitační opotřebení [i16]



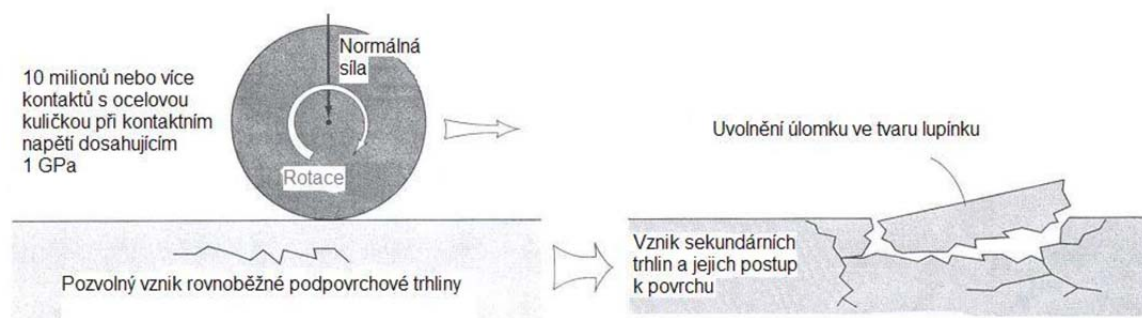
Obr2.1.2.8 zub poškozený pittingem [c13]



Obr2.1.2.9 šíření trhliny vnikem maziva [i18]

spalling

Spalling je dalším případem únavového opotřebení projevující se odlupováním povrchové vrstvy materiálu. Aktivátorem je působení podpovrchového smykové napětí vyvolaném opakovaným kontaktem dvou pohybujících se těles. V důsledku posunu vrstev vznikají malé trhlinky rovnoběžně s povrchem, ty se větví a šíří jak směrem k povrchu, dokud nedojde k odloupení vrstvičky materiálu, tak hlouběji pod povrch, kde iniciují vznik dalších vrstviček. Obr2.1.2.10 K tomuto jevu dochází například u povrchově tvrzených ozubených kol s malou tloušťkou tvrzené vrstvy. [i16,i18]



Obr2.1.2.10 vznik spallingu [i18]

2.2 Matematické modely mezi relativními veličinami

Povrchy tuhých těles nikdy nejsou dokonale hladké. Podle toho jak je povrch opracován se tvoří charakteristický reliéf makro, mikro a submikro nerovností. Ke styku dvou povrchů součástí pak nedochází v celé ploše, ale na velkém množství dotkových plošek. Jejichž tvorba je doprovázena elastickou i plastickou deformací vrcholků nerovností.

V první fázi dotyku vrcholků vzniká elastická deformace. Pokud dosáhne tlakové napětí v dotkové oblasti meze kluzu v tlaku σ_{Kd} , dochází postupně k plastickým deformacím povrchových vrstev materiálu s nižšími mechanickými vlastnostmi a během těchto deformací se mohou porušit v oblasti dotyku povrchové vrstvy. Na vzniklých dotkových ploškách se vlivem adhezivních sil tvoří mikrospoje.

Takto vzniklé mikrospoje se vlivem tangenciálních, nebo normálových sil porušují a to buď na původní ploše dotyku, nebo pod povrchem jednoho z dvojice materiálů. Při porušení mikrospoje potom dochází k přenosu částic jednoho materiálu na druhý.

Zajímavým přístupem k problematice adhezivního opotřebení je tzv. IBM Wear Model. Teorie je založena na představě, že opotřebení W je minimální, je-li τ_{max} (maximální smykové napětí v povrchových mikrooblastech exponovaných povrchů) nižší než napětí τ_y (mez kluzu ve smyku).

Pak platí vztah:

$$\tau_{max} \leq \left(\frac{2 \cdot 10^3}{N} \right)^{\frac{1}{9}} \cdot \gamma_R \cdot \tau_y$$

N je počet „průchodů“ (jediným „průchodem“ se rozumí délka kluzné dráhy, rovná rozměru stykové plochy ve směru kluzu). Přitom je nutno stanovit počet „průchodů“ zvlášť pro zatížený a nezatížený člen třecí dvojice.

γ_R – konstanta charakterizující iterační schopnost daného systému pro $N = 2000$.

Pro relativně dobré mazání lze uvažovat γ_R v mezích

$$0,54 \leq \gamma_R \leq 1,00$$

Pro podmínky mezního mazání, nebo bez maziv jsou uvažovány meze

$$0,20 \leq \gamma_R \leq 0,54$$

Obvykle se volí $\gamma_R = 0,54$ pro mazané povrchy a $\gamma_R = 0,20$ pro povrchy bez maziva.

Dalším významným přínosem je Kragelského molekulárně mechanická teorie tření a opotřebení. V této teorii je bráno v úvahu působení makronerovností a mikronerovností

stykových povrchů i meziatomárních vazebných sil. Celkem je rozlišováno 5 různých typů porušování ve styku nerovností dotykových povrchů.

1.

Mikronerovnosti se doformují elasticky, nepřekročí-li napětí ve stykové oblasti hodnotu $c \cdot \sigma_{Kd}$, kde c je součinitel zpevnění a σ_{Kd} je mez kluzu základního materiálu. Charakter deformace je závislý na hloubce vtlačení mikronerovnosti do druhého tělesa a na poloměru vtlačené mikronerovnosti. Platí tedy:

$$\frac{h}{R} < \left(\frac{c \cdot \sigma_{Kd}}{E} \right)^2$$

h – hloubka vtlačení mikronerovnosti

R – poloměr vtlačované mikronerovnosti

E – modul pružnosti v tlaku

Poměr $\frac{h}{R}$ bývá v praxi v rozmezí $1 \cdot 10^{-2}$ až $1 \cdot 10^{-4}$

2.

Je-li poloměr $\frac{h}{R}$ větší, nastává plastická deformace materiálu, která pokračuje až do vyčerpání jeho deformační schopnosti. Experimentálně bylo stanoveno, že poměr $\frac{h}{R}$ závisí na adhezivních silách které působí v oblasti dotyku. U povrchů bez maziva musí být poměr $\frac{h}{R}$ menší než $1 \cdot 10^{-1}$ až $2 \cdot 10^{-1}$ a u mazaných povrchů $5 \cdot 10^{-1}$ až $6 \cdot 10^{-1}$

3.

Rýhování materiálu se objeví v případech, kdy materiál zpevněný plastickou deformací není již schopen další plastické deformace. V tomto případě nastane značné poškození stykových ploch vytrháváním a odřezáváním částí materiálu. Rýhování nastává, je-li poměr $\frac{h}{R}$ pro nemazané povrchy větší než $1 \cdot 10^{-1}$ a pro mazané větší než $5 \cdot 10^{-1}$ až $6 \cdot 10^{-1}$

4.

Povrchové poškozování slabých meziatomárních mikrospojů bude probíhat v okamžiku, kdy jejich pevnost bude mnohem menší, než pevnost obou základních materiálů. Porušování mikrospojů bude probíhat prakticky bez poškození základních materiálů.

5.

K hloubkovému porušování pevného adhezivního mikrospoju, které je doprovázeno vytrháváním částic z povrchu základního materiálu, dochází v případech, kdy pevnost meziatomárních vazebných sil je větší než pevnost mřížky krystalu. Projevuje se intenzivním poškozováním stykových povrchů, přenosem materiálu a tvorbou volných částic.

Burwell odvodil kvantitativní vztah mezi vlastností objemového otěru W_O a působícím zatížením F za předpokladu, že je průměrná velikost jednotlivých dotkových plošek konstantní. S rostoucím zatížením stoupá počet jednotlivých dotkových plošek.

$$W_O = k \cdot F \cdot L$$

k – součinitel adhezivního opotřebení

L – kluzná dráha (m)

Archardův model pro opotřebení.

Archardova hypotéza umožňuje rozlišení mezi různými mechanismy opotřebení. Oba stykové povrchy se nahrazují soustavou různě rozložených polokulových nerovností. Objem částic otěru je úměrný druhé, nebo třetí mocnině poloměru dotkové plošky v závislosti na jejich tvaru. Nejdůležitější částí je předpoklad, že oterové částice se tvoří jen na určité malé části celkového počtu mikrospojů. Existuje tedy určitá pravděpodobnost K , že se na styku dvou mikronerovností utvoří částice.

$$W_O = K \cdot L \cdot \left(\frac{M}{1+q} \right) \cdot e \cdot \left[\frac{F \cdot (1+p)}{MC} \right]^{\frac{(1+q)}{(1+p)}}$$

K – faktor pravděpodobnosti

F – zatížení

M – počet mikronerovností na jednotkové dráze

p, q, e, C – různé konstanty (závisí na charakteru oddělovaných částic a deformaci v místě dotyku mikronerovností).

Po zjednodušení platí výraz

$$W_O = K \cdot \frac{F \cdot L}{3 \cdot p_m}$$

p_m – tlak potřebný k dosažení plastické deformace povrchových nerovností, který je zhruba porovnatelný s tvrdostí měkkého materiálu.

Model kontaktu třecích ploch

Model má obvykle kontakty vytvořeny stykem kulových výstupků. používá se situace kontaktu povrchu tvrdého materiálu s výstupky a dokonale rovným povrchem měkkého materiálu (model „tvrdý – měkký“ a „drsný – hladký“).

Pro získání náhledu na chování kontaktu použijeme jednodušší model „koule – rovina“, situace povrchů typu „drsný – hladký“. Pro elastický kontakt dvou koulí, koule s rovinou, dvou válců nebo válce s rovinou platí Hertzovy vztahy.

Jsou uvažovány náhradní hodnoty

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \quad \frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Pro poloměr kruhové stykové plochy a , maximální kontaktní napětí σ_{Hmax} a elastickou deformaci w (přiblížení středů) při kontaktu dvou koulí platí:

$$a = \left(\frac{3 \cdot F \cdot R'}{4 \cdot E'} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\sigma_{Hmax} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{6 \cdot E'^2 \cdot F}{R'^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{2 \cdot a \cdot E'}{\pi \cdot R'} = \frac{1,5 \cdot F}{\pi \cdot a^2}$$

$$w = \left(\frac{9 \cdot F^2}{16 \cdot E'^2 \cdot R'} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{a^2}{R'}$$

Podobně platí pro poloviční šířku stykového pásku a , maximální kontaktní napětí σ_{Hmax} a pružnou deformaci w v případě kontaktu dvou rovnoběžných válců o délce stykové čáry b .

$$a = \left(\frac{4 \cdot F \cdot R'}{\pi \cdot E' \cdot b} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{Hmax} = \left(\frac{F \cdot E'}{\pi \cdot R' \cdot b} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{a \cdot E'}{2 \cdot R'} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot a^2 \cdot b}$$

$$w = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot E' \cdot b} = \frac{a^2}{R'}$$

Obrysová kontaktní plocha A_c , je pro počet vln j_m na nominální stykové ploše A_a při zjednodušeném rovnoměrném rozložení sil $F_1 = \frac{F}{j_m}$ pro elastickou deformaci rovna

$$A_c = \pi \cdot a^2 j_m = \pi \cdot \left(\frac{3 \cdot F \cdot R'}{4 \cdot j_m \cdot E'} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot j_m^{\frac{1}{3}}$$

Působením normální síly F se plochy k sobě přibližují a vrcholky nerovností se pružně deformují. Pro model „drsný – hladký“ s kulovitými výstupky proti hladké rovině je vzdálenost střední čáry profilu nerovností drsné plochy od hladké roviny označena u a poměr $\frac{u}{\sigma^*} = u^*$. Podobně označíme poměr $\frac{y}{\sigma^*} = s$ a výraz

$$f_n(u^*) = \int_{u^*}^{\infty} (s - u^*)^n \cdot f^*(s) \cdot ds$$

$$f^*(s) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}s^2}$$

Při pružné deformaci kulového výstupku je normální síla F úměrná deformaci $w^{\frac{2}{3}}$. Je-li počet výstupků drsností na jednotku plochy na normální stykové ploše \mathbf{A}_n označen \mathbf{j}_k platí

$$F = \frac{4}{3} j_k \cdot a_a \cdot E' \cdot R_k^{\frac{1}{2}} \cdot (\sigma^*)^{\frac{2}{3}} \cdot f_{\frac{3}{2}}(u^*)$$

Pro modelování plastického kontaktu vyjdeme z Hertzova vztahu pro maximální kontaktní napětí v kontaktu koule s rovinou. Pro maximální kontaktní napětí platí

$$\sigma_{Hmax} = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{W}{E'}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot E'$$

Dosáhne-li toto napětí hranice plasticity, nastává při tomto napětí plastické tečení.

2.3 Tribologická zařízení

Základní metody testování součinitele smykového tření

Tyto metody většinou využívají vlastní tíhovou sílu nebo tíhovou silou závaží k pohyb vzorku nebo k jeho zatížení. K stanovení SST bývá využito základních fyzikálních vztahů. U těchto tribometrů se v konstrukci rovněž setkáváme s použitím siloměrů nebo pružiny k změření třecí jily.

Metoda hmotnostního poměru

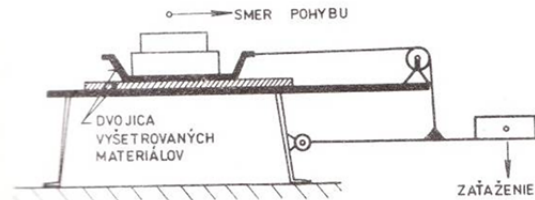
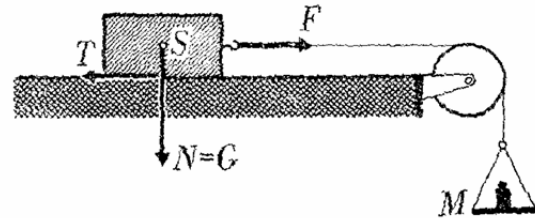
Tato metoda je jednou z nejstarších, používaná již od dob Leonarda da Vinciho. Zkušební kvádr umístěn na podložce je lanem spojen s miskou na závaží viz Obr2.3.1 S rostoucí hmotností závaží na misce se zvětšuje i tíhová síla závaží (na obr. F) až do okamžiku překonání třecí síly (T) a uvedení kvádr do pohybu. Z okamžiku rovnosti těchto sil je dopočten statický SST jako podíl hmotnosti závaží a hmotnosti kvádru .

$$\mu_0 = \frac{T}{N} = \frac{F}{N} = \frac{m_Z * g}{m_K * g} = \frac{m_Z}{m_K}$$

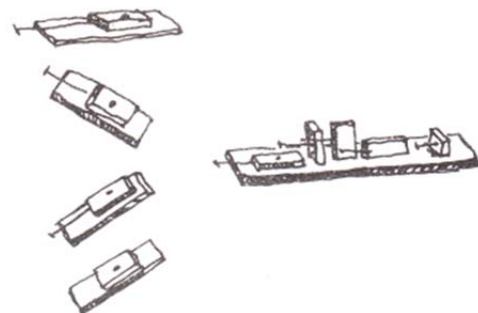
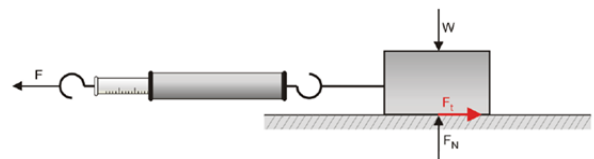
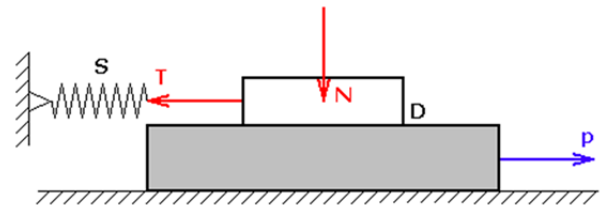
Během měření jsou zanedbány účinky tření od lana a v čepu, proto tato metoda není tolik přesná. Pomocí tohoto měření lze získat pouze statický SST. [k1, c6, i6]

Metoda kvádrů na pružině nebo siloměru

Tato metoda může být modifikací hmotnostní metody která umožňuje měřit i dynamický SST. Kvádr spojený s ukotvenou pružinou je umístěn na druhém kvádru. Ten je posouván po podložce. Posuv může být generován například ručně nebo pomocí kladky a závaží v tíhovém poli Země, obrodně jako u předešlé metody viz Obr2.3.2. Výhodou je odstranění vlivu tření lana a tření v čepu kladky oproti metodě předešlé, nicméně při měření dynamického SST není kvádr posouván konstantní rychlostí a vliv zrychlení musí být zanedbatelný. Tento problém je možno kompenzovat použitím setrvačnicku nebo různými mechanismy používaných například u hodin.



Obr2.3.1 Coulombův tribometr [k1, c6]



Obr2.3.2 Měření SST pomocí siloměru nebo pružiny [k1, c5, i13]

Statický SST je pak vypočítáván z maximální výchylky pružiny, před prokluzem horního kvádru, a její tuhosti. Dynamický SST je vypočítán z velikosti protažení v oblasti jeho ustálení v průběhu pohybu. Normálová síla je rovna tíhové síle na vrchní kvádr.

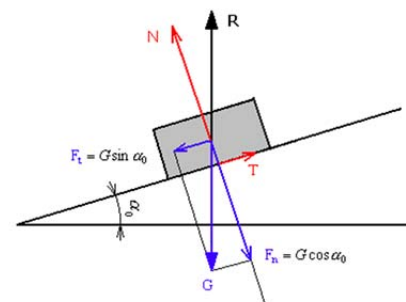
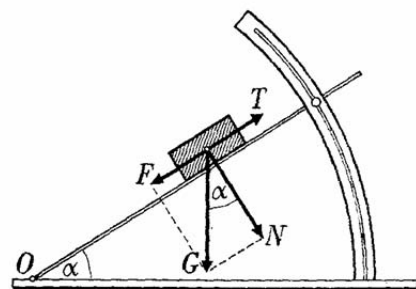
$$\mu_0 = \frac{T}{N} = \frac{k * \Delta l_{max}}{m_K * g} = \frac{F_{max}}{m_K * g} \quad \mu_d = \frac{T}{N} = \frac{k * \Delta l_{konst}}{m_K * g} = \frac{F_{konst}}{m_K * g}$$

Tato metoda bude pracovat stejně, nahradí-li se pružina siloměrem. Odečet bude však jednodušší. Zároveň je pak možno experiment zjednodušit ustavením spodního kvádru do stacionární polohy, jako podložku, a sílu generující pohyb umístit na druhý konec siloměru.

U jakéhokoliv konceptu této metody je přesnost měření přesností siloměru nebo stupnice pro délkové prodloužení a stanovení tuhosti pružiny.

Další možností úpravy tohoto testu je nahrazení druhé spodní desky kotoučem a posuvného pohybu v rotační.

Normálová síla je nastavitelná přes vahadlo cejchovaného mikrometrického šroubu. Na části vahadla je umístěn snímač, který registruje třecí sílu. [c5,c6, i6]



Obr2.3.3 metoda nakloněné roviny [k6, i13]

Metoda nakloněné roviny

Metoda nakloněné roviny se používá pro stanovení statického SST ale lze použít i k měření dynamického SST. Kvádr je umístěn na nakloněné rovině. Velikost tohoto úhlu je zvětšována, dokud velikost tíhové síly do směru pohybu F není větší než třecí síla T, a kvádr se nezačne pohybovat. Úhel nepatrně menší je tedy úhlem rovnováhy sil F a T a pro statický SST pak platí.

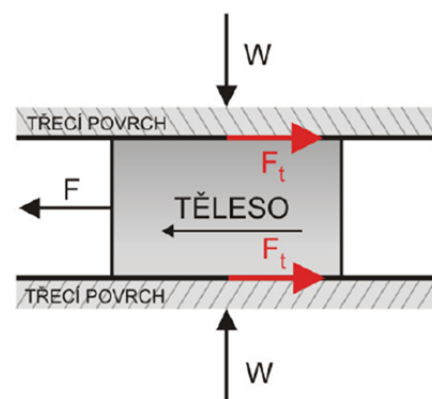
Obr2.3.3

$$\frac{F}{N} = \frac{G * \sin \alpha}{G * \cos \alpha} \rightarrow \mu_0 = \frac{T}{N} = \frac{F}{N} = \frac{G * \sin \alpha}{G * \cos \alpha} = \operatorname{tg} \mu_0$$

Touto metodou lze stanovit i dynamický SST, k jeho měření je však nutný snímač rychlosti kvádru.

$$\mu_d = \frac{T}{N} = \frac{F}{N} = \frac{m * g * \left(1 + \frac{s_0}{s}\right) - \frac{1}{2} * m \left(\frac{v^2}{s} + \frac{s}{t^2}\right)}{G * \cos \alpha}$$

[c5, c6, i6]



Obr2.3.4 metoda sevřeného kvádru [c5]

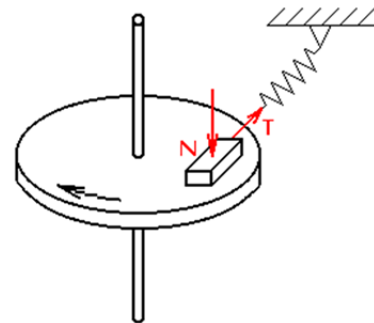
Metoda sevřeného kvádru

Těleso tvaru kvádru je uloženo mezi dvě rovnoběžné desky a zatíženo silou viz Obr2.3.4. Tato metoda se používá při stanovení statického SST při vyšších kontaktních tlacích. Na rozdíl od předešlých metod není velikost normálové síly funkcí hmotnosti třecího tělesa ale dá se tedy i regulovat. Celková třecí síla na obou plochách je pak minimální potřebnou silou k posunutí testovacího tělesa. Ve svislé poloze lze rovněž využít jednoduchý princip generace této síly zavěšením závaží. [c5]

$$\mu_0 = \frac{F}{2 * W}$$

Kvadr na pružině přitlačován silou

Další možností upravení metody kvádru na pružině je upevněním pružiny do rámu se zabudovaným cejchovaným mikrometrickým šroubem jehož vahadlem je nastavitelná přitlačná síla. Tímto je umožněno měřit statický i dynamický SST při různém zatížení.



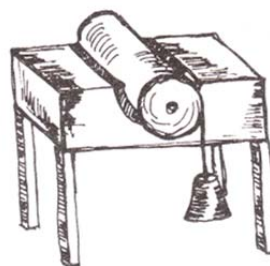
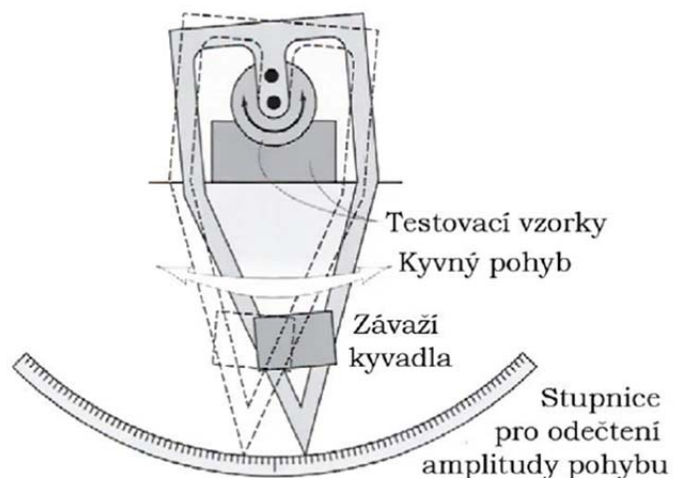
Obr2.3.5 Vyhodnocení SST pomocí kvádru na pružině a rotujícího kotouče [i13]

U některých tribometrů je nahrazena druhá spodní deska kotoučem a její posuvný pohyb

nahrazen rotačním. Obr2.3.5 [i13]

Čepové tření, využití kyvadla

Metoda kyvadla umožňuje měřit SST čepového tření. Jedním tělesem je deska s válcovou dírou nepohyblivě uloženou. Druhé testovací těleso ve tvaru válce je součástí kyvadla. Obr2.3.6 (nahore) Kyvadlo je rozkýváno vychýlením ručičky kyvadla na nenulovou hodnotu na stupnici a měřena doba do zastavení kyvadla. Na základě výchylky, hmotnosti kyvadla a změřeného času se stanoví SST. Tato metoda umožňuje měřit velmi malý SST. Pomocí této metody byl stanovován SST pro kontakt hřídele a ložiskových kroužků. Za předchůdce této metody se dá považovat da Vinciho tribometr čepového tření Obr2.3.6 (dole), chyba takto naměřeného SST je však podstatně větší. [k1, c5]



Obr2.3.6 mechanismus na bázi kyvadla k vyhodnocení SST (nahore) [c5]
mechanismus na bázi čepu k vyhodnocení SST (dole) [k1]

Pokročilé metody k měření SST a otěru

Metodiku zkoušek tribologických vlastností, ať již SST nebo různých typů opotřebení, je nezbytné volit s ohledem na podmínky procesu opotřebení a faktory ovlivňující vlastnosti třecího uzlu v provozu. Před samotným měřením je tedy nezbytné provést analýzu provozních podmínek, aby naměřená data co možná nejvíce odpovídala realitě.

Při laboratorních zkouškách se obvykle pozoruje vliv jen některých faktorů na charakter a intenzitu opotřebení nebo průběh SST jelikož zatím nebyla vytvořena univerzální metodika zajišťující reprodukovatelnost a přesné stanovení veličin bez ohledu na parametry zkoušky v rámci různých měření. Proto je při vyhodnocování SST dvou materiálů nezbytné uvádět parametry kterými jsou například zatížení, rychlost pohybu nebo materiál a geometrii ploch. Jednotlivé metody se dají rozdělit na základě:

- a) druhu vzájemného pohybu materiálu a zkoumaného tělíska
- b) způsobu styku a geometrie tělíska (triboelementu)

Univerzální zařízení k testování materiálu UMT (Universal Materials Tester)

Jedná se o univerzální zařízení. Pohyb vzorků u těchto zařízení bývá vyvolán motoricky, přítlačná hydraulicky. Zařízení jsou často přestavitelná pro provádění rotačních nebo lineárních zkoušek s různými parametry třecího uzlu pro testování za v různých způsobech kontaktu. Snímání sil zprostředkovávají elektronické silové snímače nebo tenzometry, takže je možné sledovat síly v závislosti na čase nebo poloze vzorku. Po provedení simulace otěru je stopa vzniklá jako následek opotřebení analyzována. Měřením opotřebení a zkoumáním stopy jsou vyhodnoceny informace o opotřebení a určen charakter otěru.

UMT slouží k porovnání kvality povrchových nátěrů a základních materiálů používaných k povlakování, porovnání efektivity tepelného zpracování a srovnání kvality maziva, vyhodnocení SST a otěrových vlastností při tření dvou materiálů, utčení tvrdosti

běžný průběh měření :

- 1) vznik opotřebení, nárůst opotřebení SST, ve vrstvách se objevují trhlinky
- 2) ustálený průběh opotřebení, vytvořená ustálená vrstva - nízký SST a opotřebení
- 3) narušení vrstvy - velké opotřebení a SST

[k2, c1, c5]

Měření síly

Při měření SST jsou základním měřícím prvkem elektronické snímače sil a deformací. Za tímto účelem jsou používány piezoelektrické snímače síly nebo snímače napětí (tenzometry).

Používání tenzometrů je bezesporu levnější možností s vlastností snímat téměř libovolné zatížení. Jejich použitelnost je však omezena jen na měření nižších frekvencí změny třecí síly. Použití tenzometrů je proto nevhodné u zařízení s vratným pohybem o vysoké frekvenci (viz zařízení Bowden-Leben). Řešením tohoto problému jsou piezoelektrické snímače. U těchto snímačů je nutné se vyvarovat snímání frekvencí které by mohli způsobit vlastní oscilaci piezoelektrického krystalu nebo měřeného objektu. Příčinou bývá špatně upevněný snímač nebo drsnost vzorku. Piezoelektrické snímače jsou naopak nevhodné při měření stabilních třecích sil. Rozhodujícím faktorem při volbě druh snímačů je tedy rychlost změny třecí síly, toto kritérium platí rovněž i pro měření okamžité zatěžovací síly. Význam měřit okamžitě jmenovité zatížení je patrný z jeho odchylky od jmenovitého zatížení. Důvodem této odchylky je vliv drsnosti povrchu. Zatímco výpočtem SST jako poměru okamžité třecí síly a jmenovitého zatížení je jeho průběh odrazem disipované energie. Při výpočtu SST z poměru okamžité třecí síly a okamžitého jmenovitého zatížení je SST výsledkem mikroskopických procesů při tření. Vhodnou korelací závislostí průběhů se tak dá eliminovat vliv konstrukce zařízení a vibrace způsobené například špatnými ložisky, nedostatečnou tuhostí rámu tribometru a nebo špatným upnutím vzorku. [c5]

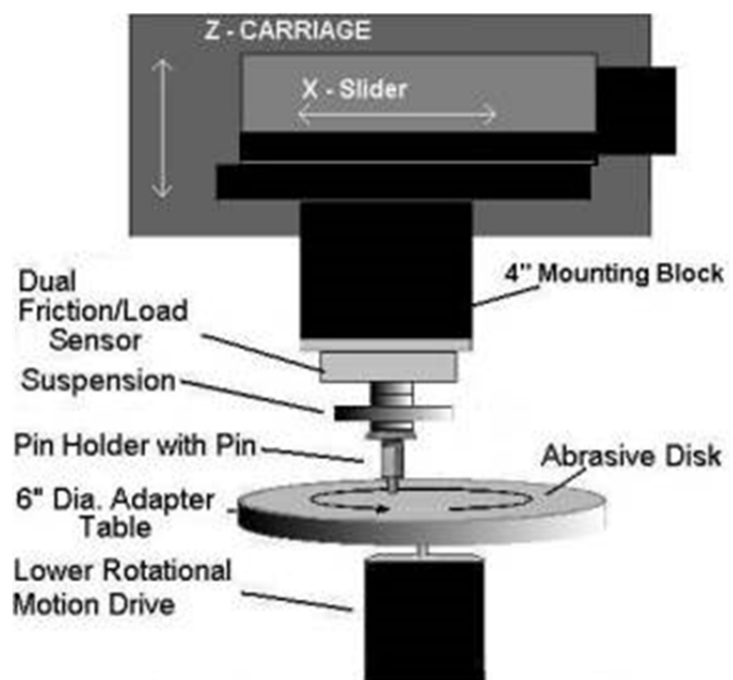
Univerzální zařízení dle druhu vzájemného pohybu:

a) bodový dotyk

PIN on disc

Metoda PIN on disc je velmi často aplikovanou metodou. Jelikož je to metoda, která bude později i aplikována, je v tomto textu popsána hlouběji.

PIN tělíčko ve tvaru kuličky nebo válečku či čepu s půlkruhovým zaoblením je usazeno do kontaktu se vzorkem tvaru disku ve zvolené vzdálenosti od jeho středu. Následně je PIN tělíčko zatíženo přitlačnou silou. V průběhu testu zkušební disk rotuje s nastavenou frekvencí a počtem otáček. PIN tělíčko staticky uložené ve sklíčidlech tak vykonává pohyb po kružnicové trajektorii Obr2.3.7. V průběhu testu vznikne následkem opotřebení na povrchu vzorku stopa po celé dráze pohybu PIN tělíška. Po dokončení testu je stopa analyzována. Nejčastěji se metoda využívá ke zjišťování lubrikačních vlastností maziv, k laboratornímu výzkumu procesu



Obr2.3.7 konfigurace PIN on disc experimentu [i1]

tření a opotřebení, měření její závislosti na rychlosti nebo ke stanovení míry opotřebení PINů. Zajímavým řešením je umístění PIN kuličky do kontaktu se spodní stranou disku, u tohoto konceptu je tak zajištěn lepší odvod otřených částeczek materiálu [c5] Testování metodou PIN on disc ošetřuje například norma ASTM G 99-95a.

Vlastnosti takového třecího uzlu jsou funkcí jednak kinematických a mechanických veličin nastavovaných na zařízení a zároveň vlastnostmi členů tohoto třecího uzlu.

tribometr: zatěžující síla, počet cyklů, zvolená frekvence, poloměr stopy

členy třecího uzlu: teplota povrchu vzorku, použité mazací látky případně prostředí v okolí kontaktu, měřený vzorek (kvalita povrchu a materiál), zvolené pin tělísko (velikost, geometrie, materiál)

PIN tělísko

Nejčastěji používaným tvarem PIN tělíška je kulička například dobře dostupná ocelová kulička ČSN 14 109. Při dotyku kuličky s diskem dochází k bodovému dotyku. Otěr tělíška má však za následek změnu geometrie a vlastností stykové plochy. Styková plocha se v průběhu testu nerovnoměrně zvětšuje a s ní i množství otřených částic. Nevýhodou je také jeho dražší výroba. Vzhledem k častému používání PIN tělíška tvaru kuličky se pro tento druh testu zažilo označení ball-on-disc.



Obr2.3.8 ukázka pin tělísek a disku [i6]

Vlastnostmi, včetně výhod a nevýhod, velmi podobné je tělíško tvaru čepu s půlkruhovým zaoblením.

Dalším používaným PIN tělíškem je váleček. Kontakt válečku s diskem probíhá na ploše podstavy válečku. Na rozdíl od výše uvedených PIN tělísek se tedy zatížení rozloží do větší plochy a je tedy možné testovat s větší zatěžovací silou. Další výhodou je, že následkem jeho otěru nemění velikost dotykové plochy s diskem a tedy ani velikost tlaku na dotykové ploše.

Při testování tvrdých vzorků dochází k problematickému otěru tělíška a ulpívání otřeného materiálu na vzorku. Adhezi otřených částeczek na disku se mění tření materiálu vzorku a PIN tělíška na tření PIN tělíška a materiálu tohoto tělíška ulpělého na disku. Toho je nutné se vyvarovat například vhodnou změnou materiálu a nebo použitím PIN válečku většího průměru. Ukázka pin tělísek na Obr2.3.8.

poloměr stopy

Poloměr stopy rovněž ovlivňuje opotřebení PIN tělíška. Zvětšováním poloměru stopy se prodlužuje dráha v jednom cyklu, zvyšuje se tak opotřebení kuličky na jeden cyklus a tedy i mění otěrová stopa a SST. Zvětšením dráhy se mění i relativní rychlost, pro zachování

rychlostních podmínek je tedy nutné upravit i frekvenci otáčení. Zvětšením poloměru se všaklepší odvod tepla z kontaktních míst do okolí, dá se tak snížit vliv teploty na plasticitu materiálu. U tvrdých materiálů je přesto podstatnější volit menší poloměr s ohledem na snížení otěru tělíška.

drsnost kontaktních ploch

Experimentální vzorky mají oproti reálným třecím spojům vyleštěný povrch, proto naměřené hodnoty neodpovídají skutečným třecím uzlům. Vliv drsnosti se analyzuje pomocí normalizovaných i nenormalizovaných charakteristik, kterými je možné popsat strukturu povrchu. Vyhodnocováním SST u vzorků s velkou drsností bývá komplikované, neboť při tření dochází k přeskokům a naměřené hodnoty SST mají velký rozptyl. Neodpovídající tvar nerovnosti vzniklých obráběním povrchu tvaru testovací dráhy může způsobit změnu naměřeného SST v závislosti na poloze testovacího tělíška na vzorku, tato změna bude patrná především u hrubě obrobených povrchů. U takovýchto vzorků se hodnoty SST ustálí až po dostatečném množství cyklů kdy se povrch obrobí na ustálený stav opotřebení.

vliv teploty

Se zvyšující teplotou vzrůstá i SST jako následek adheze a nárůstu oxidačního opotřebení nestabilní povrchové vrstvy. Požadované podmínky lze napodobit přidavným ohřevem disku.

tloušťka vrstvy

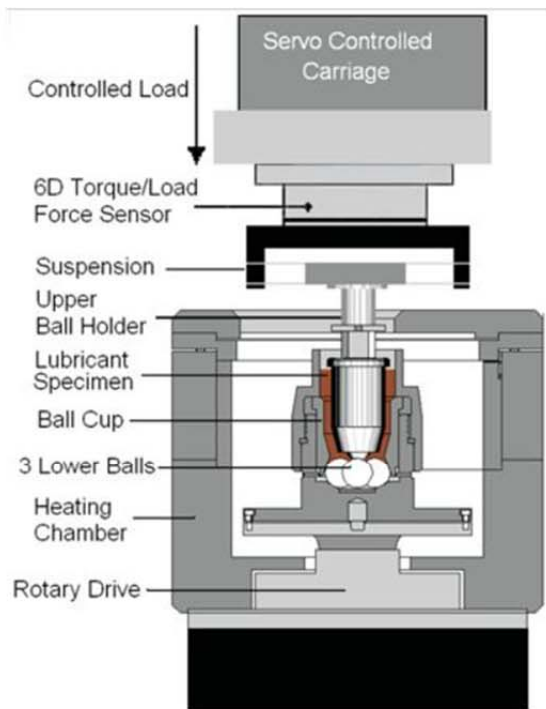
Vliv mazací vrstvy klesá se zvyšováním zatížení. Při dostatečném množství měkkých makročástic dochází ke vznikům a porušením váznuocí vrstvy což vede k výchytkám SST.

U vertikálně postaveného kontaktního uzlu se používá i varianta vložení PIN tělíška mezi dvě desky [k4, c4, c5].

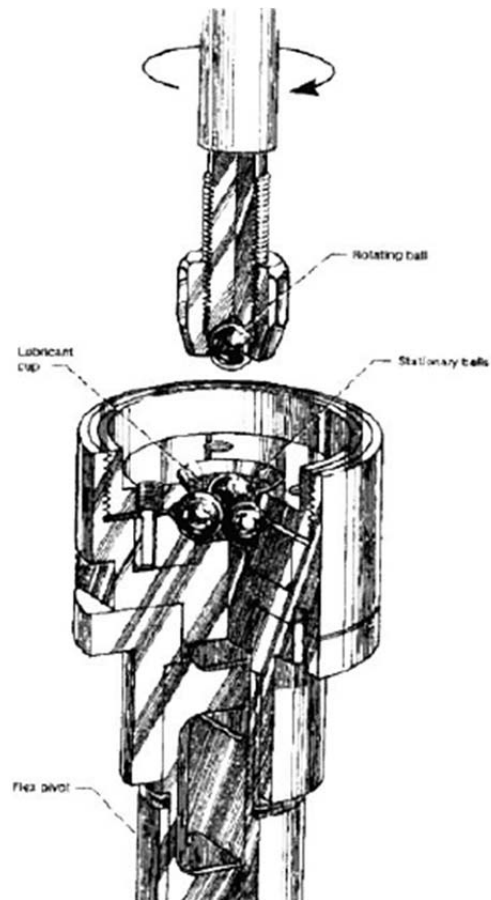
Four ball

Princip tribometru je založen na teoreticky třech bodových kontaktech čtyřech kuliček. Tři kuličky jsou staticky uloženy v pánvi a jedna umístěna na nich. Vrchní kulička vykonávající rotační pohyb je zatížena normálovou silou viz Obr2.3.9. Použití této metody je ošetřeno například normami ASTM D 2783-88 a IP 239/97.

Tato metoda patří rovněž mezi často používané. Výhoda této metody spočívá v samovolném vystředění kuliček během testu. Její nevýhodou je však stejně jako u ball on disc změna geometrie a vlastností stykových ploch kuliček v průběhu testu. [i9, c4, c5]

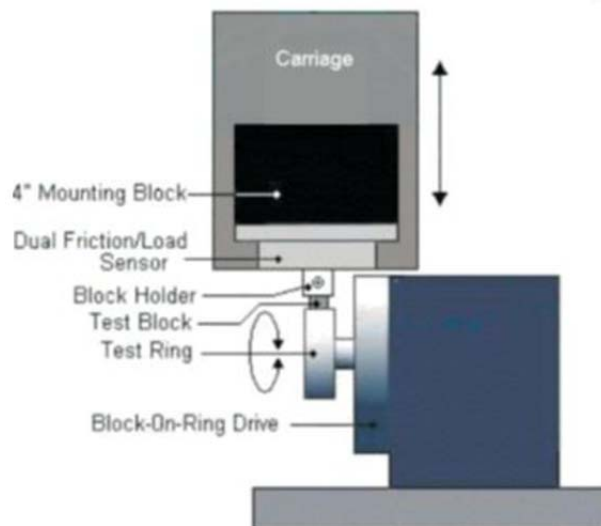


Obr2.3.9 Four ball test [i4],
upnutí vzorku pro metodu Four ball [c5]



PIN on ring, Block on ring

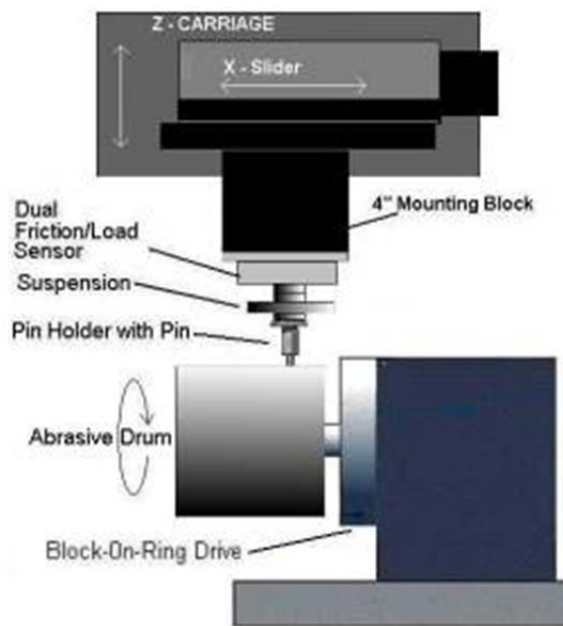
Zkoušený vzorek tvaru kroužku rotuje okolo své osy. Staticky uložené PIN tělíčko nebo těleso tvaru kvádra (block) je ustaveno do kontaktu s vnější nebo vnitřní plochou kroužku, tedy kolmo k ose rotace. Obr2.3.10 Obdobně jako u metody PIN on disc a použití kuličky dochází k bodovému dotyku což má za následek stejné výhody i nevýhody při měření. V případě PIN tělíška ve tvaru válce nebo použití kvádra (Block on ring testu) však dochází k dotyku čárovému. PIN on ring metoda se s výhodou používá při měření tření a především míry opotřebení ložisek, hlavně pak varianty PIN tělíška ve tvaru kuličky k simulaci radiálních kuličkových ložisek. Z tohoto důvodu PIN tělíško i kroužek bývají často zhotoveny z materiálů, používaných pro výrobu ložisek. [c4, c5]



Obr2.3.10 Block-on Ring otěrový test [i4]

PIN on drum

Zkoušený vzorek tvaru dutého válce (drum) rotuje okolo své osy. Pin tělísko ustaveno do kontaktu kolmo na osu válce vykonává posuv ve směru osy rotace. Obr2.3.11 Výslednou trajektorií vzájemných pohybů pin tělíska a vzorku je šroubovice. [c4, c5]



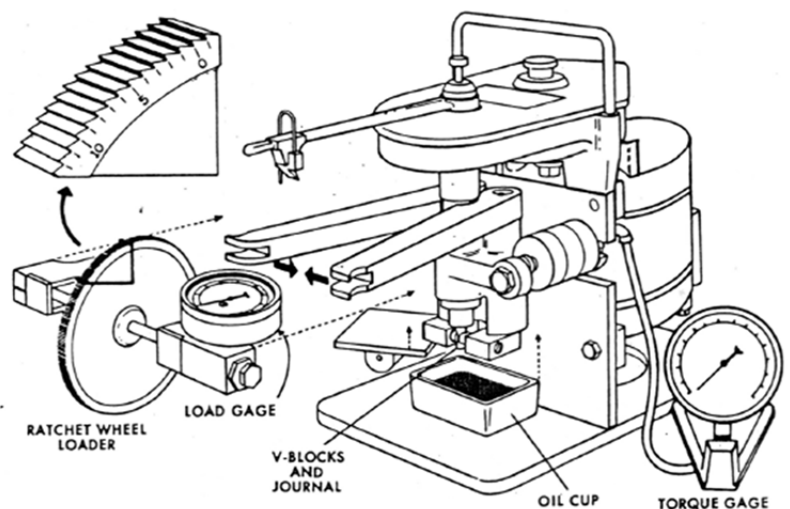
Obr2.3.11 konfigurace Pin-on-Drum [i1]

b)čárový dotyk

PIN a V-block, PIN a Vee bock (Falex test)

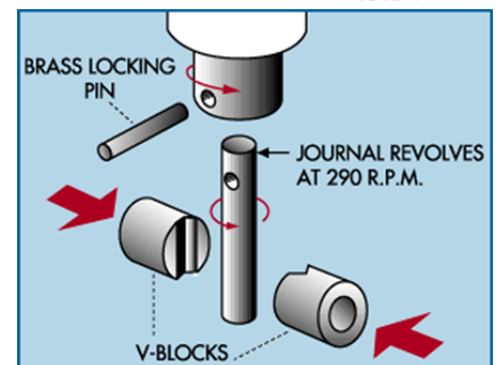
Dvě desky s výřezem tvaru V svírají PIN tělísko válcového tvaru které koná rotační pohyb. Normálová síla působí na V desky a stlačuje je k sobě viz Obr2.3.12(vpravo).

Dochází tak k čárovému dotyku ve čtyřech oblastech mezi PIN válcem a V deskami což rovněž vede ke změnám tlaku v průběhu zkoušky. Metoda je používána k zjištění míry opotřebení, maximální hodnotu zatěžující síly, než dojde k zadření a hodnoty koeficientu tření. Metoda je rovněž používána k posuzování různých typů maziv. Testovací zařízení jsou schopna aplikovat velmi vysoké zatížení, a zároveň běžet po celou dobu životnosti maziva. S výhodou lze uplatnit při testování kvality pro měření některých šarží (podle normy ASTM D 2625) například kovových částí kostry letadla [i7]. Průběhy zkoušky jsou prováděny například na



Obr2.3.12 falex tribometr (nahore) [c4]

V bloky a válcové těleso pojištěné čepem (vpravo)[i7]



základě těchto norem: ASTM D 2670, ASTM D 3233-93 a IP 241/84. Tato metod bývá někdy nazývána Falex což vzniklo od názvu společnosti Falex Corporation vyvíjející zařízení s tímto mechanismem Obr2.3.12(nahore). [i7, k4, c4, c5]

Timken teste (O.K. Load, Score Load)

Testovacím tělískem v této metodě je kroužek vytvářející přímkový kontakt s deskou. Tělísko je uloženo na hřídeli a provádí rotační pohyb. Deska je uložena nepohyblivě v loži. Zatěžovací síla působí na testovací tělísko, které vtlačuje do desky. Výhodou této metody je snadná výroba vzorků. Metoda je s výhodou využívána k testování maziv. Určuje se maximální zatížení do vzniku scorlingu (rýh) nazýváno "O.K. Load", nebo minimální zatížení které způsobuje vznik scorlingu nazýváno "Score Load". Testování touto metodou je upraveno například normami ASTM D2509, ASTM D2782-94, IP 240, IP 326, JIS K2220, JIS K2519. [i9, k4, c4, c5]

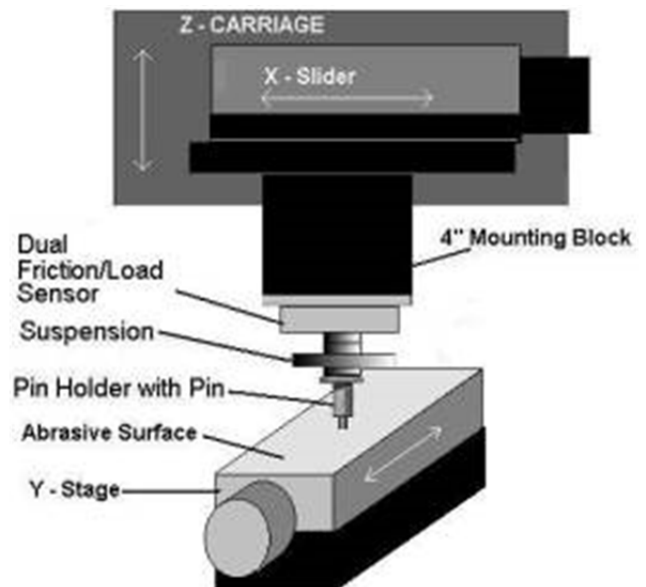
Ring-on-ring

V případě této metody je PIN tělísko stacionární a kroužek proti němu koná rotační pohybu druhý kroužek. Tato metoda je vhodná zejména pro testování radiálních kluzných, válečkových, jehlových a kuličkových ložisek, zejména pak na zkoumání jejich únavové život. Dále se užívá k stanovení schopnosti snižovat koeficient tření a negativní účinky opotřebení pro různé druhy maziv, k zkoumání procesu tření a opotřebení. Mezi nesporné výhody této metody patří možnost simulace tření a valení současně. Dále lze realizovat druhy třecích kontaktů, které odpovídají jednotlivým druhům ložisek a simulovat jimi různé režimy mazání. [c4, c5]

c) plošný dotyk

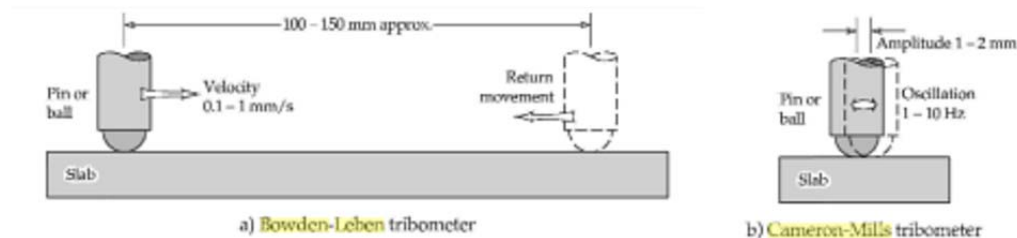
Pin on slab (Pin on Flat)

U této metody má testovaný vzorek tvar desky. PIN tělísko se používá různých tvarů obdobně jako u metody pin on disc. PIN tělísko válcového tvaru s půlkulovou podstavou nebo PIN tělísko tvaru kuličky vytváří s deskou bodový kontakt, zatímco čistě válcové PIN tělísko se testuje v plošném kontaktu podstavy. V průběhu testu je pin tělísko staticky uloženo ve sklíčidlech zatímco deska vykonává posuvný vratný pohyb Obr2.3.13. Tato zařízení jsou používána k studii tření a opotřebení mezi povrchy různých dvojic materiálů. Často se používají i k vyhodnocení tvrdosti. S válcovým PIN tělískem se rovněž hodí k posuzování vlivu povrchových nerovností na součinitel smykového tření.



Obr2.3.13 UMT Hardware Configuration for Non-Rotating Pin-on-Flat [i1]

V případě testování na strojích typu Cameron-Mills se měří s vyšší frekvencí a kratší trajektorií pohybu, takže velká část experimentu tak probíhá v oblasti opotřebení po ustáleném stavu. U Bowden- Leben tribometrů je frekvence trajektorie pohybu dostatečně dlouhá aby byl zabezpečen dobrý přestup tepla, experiment probíhá do porušení ustáleného stavu opotřebení Obr2.3.14. [c4, c5, k4]



Obr2.3.14 Cameron mil's a Bowden-Leben tribomert [k4]

Ring on disc

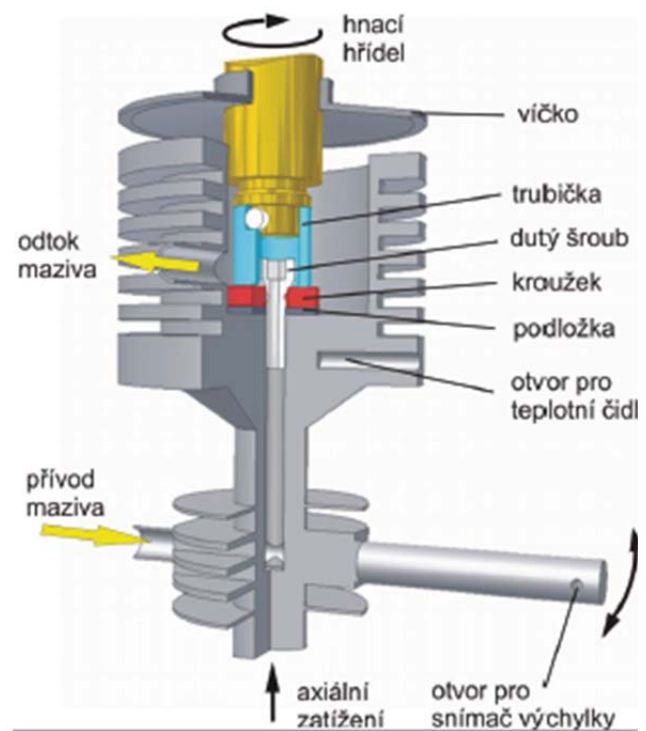
Zkušebními vzorky jsou v tomto případě disk a prsteneček. Oba dva vzorky jsou souose uloženy v poloze na sobě. Kroužek je staticky upevněn a disk koná rotační pohyb Obr2.3.15. [c5]

Rider and Plate Test

Tyto testy jsou prováděny za použití válcového jezdce s kontaktní plochou tvaru mezikruží vyrobené z nerezové oceli 440C a ploché obdélníkové desky z nerezové oceli 17-4PH. Plochá deska je upevněna ke stolu a vratně se pohybuje pod jezdcem pomocí mechanického hnacího systému. Metoda je používána k testování kvality povlakových vrstev. [i7]

Reichert Tester

Testovacími vzorky jsou váleček a třecí prsteneček, geometrie a kinematika testu odpovídá metodě ring-on-ring. Test začíná jako nemazaný kluzný kontakt mezi plochami. Postupně dochází k utváření mazacího filmu mezi plochami a to až do fáze hydrodynamického mazání. Zařízení je vhodné k testování maziv a aditivních přísad. Testuje se jejich otěrová ochrana (WP) a únosnost (EP). Test je zároveň určen pro stanovení bodu vytvoření mazacího filmu mezi dvěma zkušebními plochami. Test je jedinečný tím, že tvorba mazacího filmu je primárně identifikována náhlým

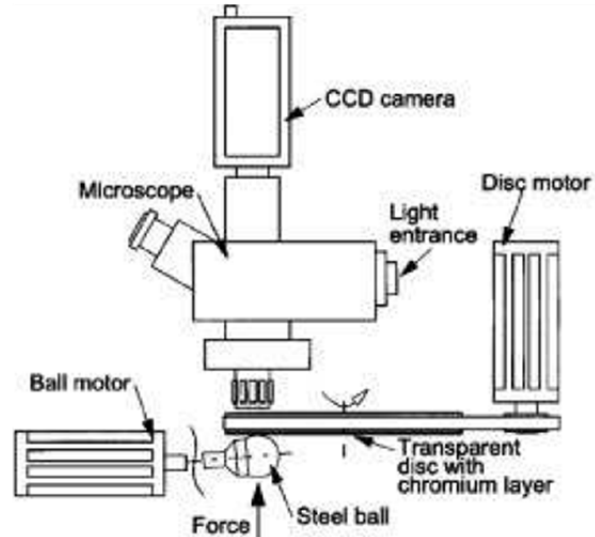


Obr2.3.15 metoda Ring on disc, geometrie ploch a upnutí vzorků [i5]

poklesem ve skřípění, zvukem způsobovaným nenamazaným kontaktem kovových ploch. Oddělováním ploch tekutinou klesá skřípot a akustické čidlo detekuje pokles skřípění pomocí elektroniky určené k detekci akustického poklesu. Oblast opotřebení testovacího kolíku se pak měří za účelem výpočtu únosnosti maziva. [i9]

Optický tribometr typu ball on disk

Na rozdíl od klasických tribometrů se zde pro simulaci kontaktu používá disk z optického skla s vrstvičkou chromu na kontaktní ploše. Tento disk je v kontaktu s vyleštěným povrchem ocelové kuličky. Polopropustná chromová vrstva umožňuje měření tloušťky mazacího filmu pomocí optické interferometrie. Potřebné osvětlení zajišťuje zdroj trichromatického světla. Obr.2.3.16 Tyto přístroje se používají především pro studium tření, maziv či pro výzkum utváření mazacího filmu. Testy se běžně provádí s vyleštěnými povrchy, jen výjimečně se používá zdrsňené kuličky nebo kuličky s mikrostrukturou. [c4, c7]



Obr2.3.16 optický tribometr [c7]

Tribometry pro extrémní podmínky

Tyto tribometry jsou konstruovány pro testování v extrémních podmínkách jako jsou extrémně nízké či vysoké teploty nebo speciální prostředí jako vakuum, chemicky agresivní a korozi podporující prostředí. Tyto požadavky jsou důsledkem nejen implementování přídavných senzorů k sledování doplňkových veličin, ale i přizpůsobení konstrukce tribometru těmto požadavkům. Dále je nutné uvážit, zda tyto podmínky nebudou mít negativní vliv na kvalitu naměřených dat za použití běžných senzorů. Takovým případem může být nevhodně použitý snímač síly.

Vakuové tribometry - UHV tribometry

Tyto tribometry jsou navíc vybaveny vakuovou komorou a pumpou. Zařízení bývá rovněž používáno k experimentům i v jiném než atmosférickém prostředí nebo ve vakuu.

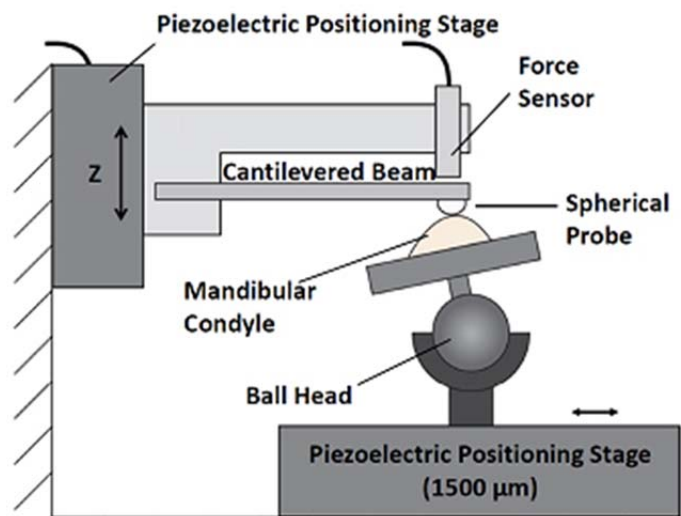
Vysokoteplotní a nízkoteplotní tribometry

Tribometr je vybaven komorou ve kterých lze dosáhnout vysokých teplot až 900 °C. U zařízení používající elektronový paprsek lze dosáhnout až teplotu 1200 °C.

Nízkých teplot u nízkoteplotních tribometrů nebo také kryotribometrů se dosahuje za pomoci tekutého dusíku. [c5]

Speciální tribometr na vzorky rozmanitých tvarů

Na univerzitě v Delaware sestrojili speciální tribometr k měření SST na temporomandibulárním kloubu viz Obr2.3.17. [i5]



Obr2.3.17 Speciální tribometer k měření SST na temporomandibulárním kloubu [i5]

Zařízení dle druhu vzájemného pohybu:

1) adhezivnímu opotřebení

Adhezivně-kohezivním chování se vyhodnocuje na UMT často současně s vyhodnocováním SST. Adhezivní chování je především velkou mírou ovlivněno použitým materiálem kontaktních těles a použitého maziva. Adhezi ovlivňuje rovněž stav povrchu, oxidické vrstvy na povrchu těles například snižují její velikost. Při měření adhezivního opotřebení má velký vliv geometrie třecích ploch na základě toho lze rozdělit zařízení dle dotkových ploch.

a) bodový dotyk

Příkladem přístroje pro simulaci adhezivního opotřebení jsou čtyřkuličkové přístroje nebo zařízení se zkříženými válci. Výhodou přístrojů s bodovým dotykem je jejich jednoduchá konstrukce, vysoká rychlost bez drahého pohonného systému. Nevýhodou je pak drahá výroba zkušeb. vzorků (kulička, čep s půlkruhovým zaoblením) a pokles měřených tlaků na dotkovou ploše při opotřebení

b) čárový dotyk

Příkladem přístroje pro čárový dotyk jsou přístroje s kotoučem a příložkou, příložkou a dvěma příložkami a nebo s dvěma kotouči, vhodných především pro modelování procesů únavového opotřebení na bocích ozubených kol, zkoušky maziv. Jejich výhodou je jednoduchý tvar vzorku se snadnou výrobou, široké rozmezí zkušeb. parametrů a krátká doba zkoušky a reálnější model kontaktu oproti bodovému dotyku. Nevýhodou je rovněž pokles měřených tlaků na dotkovou ploše při opotřebení.

c) plošný dotyk

Příkladem je válcové pin tělísko a disk.

2) abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení mohou způsobovat nejen narážející mikrovýčnělky nerovností povrchu ale i segmenty oddělené z povrchové vrstvy pohybující se mezi povrchy a částice z okolního prostředí. Stroje k abrazivnímu opotřebení lze rozdělit podle způsobu úpravy abrazivních částic.

a) přístroje s vázanými částicemi

zařízení k testování abrazivního opotřebení - forma brusného plátna

Používá se ke zkouškám kovových materiálů. Výhodou je její jednoduchost, spolehlivost a malý rozptyl výsledků v řádu pěti procent. Nevýhodou je proměnlivá kvalita plátna kterou je nutné kompenzovat etalony, klesající abrazivita během zkoušky jako následek otupování a vylamování částic a znečištění povrchu otěrovými částicemi. Zkoušky brusným plátnem v rotačním pohybu se provádí na základě normy ČSN 01 5084.

zařízení k testování abrazivního opotřebení - forma kotouče

Jedná se o stroje s vratným i přímočarým pohybem. Vzhledem k podobnosti se stroji k měření SST se používá stejného zařízení UMT. Na rozdíl od brusného plátka je jsou kotouče použitelné i za vysokých teplot. Stejně jako u brusného plátka však dochází ke klesání abrazivity během zkoušky, vylamování částic a znečištění povrchu otěrovými částicemi.

b) přístroje s volnými částicemi

zařízení k testování abrazivního opotřebení - s brusnou nádobou

Hlavní částí zařízení je nádoba s abrazivními částicemi. Vzorky jsou do nádoby vnořeny a následně provádí rotaci okolo osy. Výhodou metody je možnost použití různých druhů částic čímž dojde k přiblížení skutečným podmínkám. Různě velké částice různých materiálů mají však odlišnou hmotnost a tedy i rychlost dopadu, proto se častěji používají standardní velikosti. Další výhodou je možnost použití metody i za vysokých teplot. Mezi nevýhody metody patří snížená reprodukovatelnost měření a pokles abrazivity částic během měření. Další zařízení s volnými částicemi jsou například zařízení s pružným kotoučem, bubnové přístroje. Jejich vlastnosti jsou obdobné

c) přístroje s vrstvou volných částic mezi dvěma stykovými povrchy

Zařízení je obdobné jako k testování abrazivního opotřebení pomocí brusného kotouče. Tento koncept je však k měření méně vhodný, neboť vrstva vzniklá mezi povrchy je nerovnoměrně vyplněna částicemi, zároveň je problematické řídit odvod a přívod nových částic do středu této vrstvy.

3) eroze

Zařízení jsou různá podle charakteru eroze. Realizují proud kapaliny nebo plynu s částicemi za pomoci odstředivé síly, urychlovacího zařízení či pouze princip volného pádu. Dělí se na tryskací se změnitelným úhlem dopadu či na bázi brusné nádoby. Užití brusných nádob má však omezený rozsah zkušebních podmínek a nedefinovaný úhel relativní rychlost.

4) kavitace

Zařízení jsou založena na proměnném průřezu kanálu, otvoru v rotujícím disku, úderu vodního proudu případně vibraci, ta může být realizována ať již mechanicky nebo elektricky či magneticky. Poslední metoda je často používaná vzhledem ke své jednoduchosti.

5) únava

Zařízení jsou různá podle charakteru eroze. Experimenty jsou finančně i časově náročné.

6) vibrační

Jsou jimi obecně přístroje se vzájemným kmitavým pohybem. Slouží k sledování vlivu frekvence a amplitudy

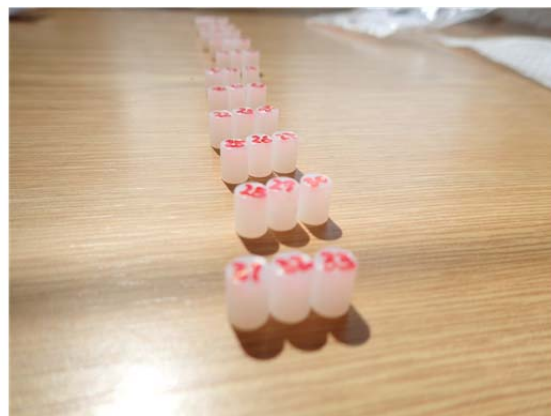
3. Cíle práce

Provedení tribologických experimentů ke stanovení otěrových vlastností modifikovaných materiálových dvojic CoCrMo a UHMWPE. Na základě experimentálních dat zhodnotit jednotlivé technologické úpravy CoCrMo a UHMWPE a zformulovat doporučení výrobci. Dále posoudit vliv použitého experimentálního zařízení na vyhodnocené výsledky a zhodnotit vliv chyb. Vytvořit model experimentu.

4. Materiál a metodika experimentální práce

4.1 Vzorky a použité materiály

Jedním z cílů této práce je vyhodnotit vliv modifikace materiálů UHMWPE a CoCrMo na jejich otěrové vlastnosti. U polymerního materiálu z Ultra high molecular weight polyethylene UHMWPE je pro výrobu vzorků použit tyčový polotovar od výrobce MediTECH s interním označením Chirulen 1020 [i13]. Jedná se o polotovar vyráběný metodou tlakového formování (compres moulding) z práškového polotovaru GUR 1020 [i14]. Materiál je vyráběn v deskách, řezán a obráběn na tyčový polotovar. Polotovar je certifikován dle DIN EN 10204-3.1 a splňuje charakteristiky ISO 5834. V této práci jsou porovnávány vzorky vyrobené z tohoto základního tyčového materiálu a vzorky z upraveného crosslingovaného materiálu dle certifikovaného postupu firmy BEZNOSKA. Crosslingovaný materiál se dá označit za UHMWPE třetí generace dle charakteristik v literatuře [c9], materiál je dvoufázově ozářen a tepelně revitalizován [i17]. Materiál CoCrMo je vyhodnocován v sedmi materiálových modifikacích základního materiálu CoCrMo (ISO 5832-4) zahrnujících tvářený CoCrMo a litý s variacemi použité technologie a to změny lící teploty, použití inokulačního činidla případně použití příměsí křemíku nebo titanu. Poslední modifikace CoCrMo je technologická úprava povrchu. U poloviny vzorků je poslední povrchovou úpravou leštění. U druhé poloviny vzorků je výrobní proces zakončen planarizací. Planarizace byla tedy provedena na všech sedmi materiálových modifikacích slitiny CoCrMo. Planarizace je způsob



Obr4.1.1 Válečkové vzorky pro měření na planetovém tribometru v Beznosce.



Obr4.1.2 Disky pro měření na planetovém tribometru v Beznosce.

povrchové úpravy při kterém dochází k odstraňování výstupků na povrchu. V principu se jedná o leštění povrchu s použitím pasty s chemickým složením které povrch vzorku naleptává. Postup je patentován firmou BEZNOSKA. Značení jednotlivých modifikací materiálu je převzato od firmy Beznoska. Označení vzorků a způsoby modifikace na jednotlivých vzorcích viz tabulka Tab4.1.1 a Tab4.1.2

Význam některých zkratk ve značení materiálu případně vzorků:

N	necrosslingovaný	C	crosslingovaný
B	bez inokulačního činidla	M	s inokulačním činidlem
T, V	změna lící teploty	K	kován
B/Si	bez inokulačního činidla, příměs křemíku	B/Ti	bez inokulačního činidla, příměs titanu
plan	planarizován	neplan	neplanarizován

Vzorek Disk	Značení BEZNOSKA	Planarizován	Materiál - značení BEZNOSKA	materiál	Specifikace lití
D1	B150_plan	ANO	B-2015	CoCrMo(ISO 5832-4)	Stávající teplota lití Bez inokulačního čidla
D2	B180_neplan	NE	B-2015	CoCrMo(ISO 5832-4)	Stávající teplota lití Bez inokulačního čidla
D3	MT150_neplan	NE	MT-2015	CoCrMo(ISO 5832-4)	úprava licí teploty S inokulačním čidlem
D4	MT180_plan	ANO	MT-2015	CoCrMo(ISO 5832-4)	úprava licí teploty S inokulačním čidlem
D5	B/Si 150_neplan	NE	B/Si-2015	CoCrMo(ISO 5832-4) + Si	Stávající teplota lití Bez inokulačního čidla
D6	B/Si 180_plan	ANO	B/Si-2015	CoCrMo(ISO 5832-4) + Si	Stávající teplota lití Bez inokulačního čidla
D7	B/Ti 150_plan	ANO	B/Ti-2015	CoCrMo(ISO 5832-4) + Ti	Stávající teplota lití Bez inokulačního čidla
D8	B/Ti 180_neplan	NE	B/Ti-2015	CoCrMo(ISO 5832-4) + Ti	Stávající teplota lití Bez inokulačního čidla

Tab4.1.1 Seznam disků pro testy na planetovém tribometru a specifikace jejich výroby.

Vzorek Kulička	Materiál - značení BEZNOSKA	Planarizován	Specifikace výroby
K1	CO-M	NE	litý Stávající teplota lití S inokulačním čidlem
K2	CO-M	ANO	litý Stávající teplota lití S inokulačním čidlem
K3	CO-B	NE	litý Stávající teplota lití Bez inokulačního čidla
K4	CO-B	ANO	litý Stávající teplota lití Bez inokulačního čidla
K5	A-V-2012 (MT)	NE	litý úprava licí teploty S inokulačním čidlem
K6	A-V-2012 (MT)	ANO	litý

			úprava licí teploty S inokulačním činidlem
K7	C-IV-2013 (BT)	NE	litý úprava licí teploty Bez inokulačního činidla
K8	C-IV-2013 (BT)	ANO	litý úprava licí teploty Bez inokulačního činidla
K9	5832-12 K	NE	Tvářen
K10	5832-12 K	ANO	Tvářen

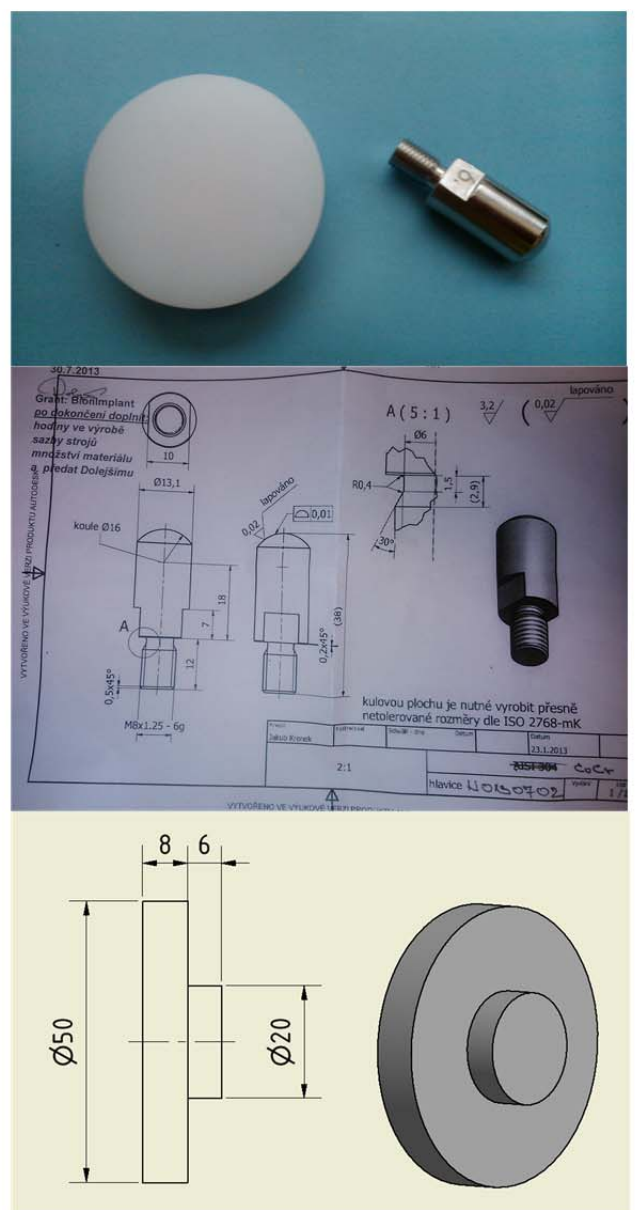
Tab4.1.2 Seznam kuželek pro testy na tribometru a specifikace jejich výroby.

Tvar vzorků je volen s ohledem na použitý tribometr a zbylá zařízení užitá při vyhodnocení otěru. Rovněž je navržen s ohledem na požadavky této práce. Na planetovém tribometru byly použity válcové vzorky s průměrem 6 mm z UHMWPE (Obr4.1.1). Protikusem je disk z CoCrMo o průměru 150 případně 180 mm (Obr4.1.2). Druhý experiment simuluje invertní úlohu, kdy CoCrMo kuželka s kulovým vrchlíkem o průměru 8 mm je otírána o rovinnou desku z CoCrMo(Obr4.1.1).

Některé specifikace použitého materiálu:

UHMWPE (Chirulen) - dle výrobce [i13]

hustota	936 kg/m ³
mez kluzu	22,8 MPa
mez pevnosti v tahu	51,1 MPa
Youngův modul pružnosti	660 MPa
Poissonovo číslo	0,46
nasákavost (při 23 °C)	< 0,05 %
teplota tání (DSC - 10K/min)	137,3 °C
teplota krystalizace	126,21 - 143,54 °C



Obr4.1.3 Vzorok pro měření na tribometru na ČVUT.

nahoře fotografie vzorků
ve středu výkres kuželky
dole rozměry desky

CoCrMo [i15]

mez kluzu	450-480 MPa
mez pevnosti v tahu	660-1280 MPa
Youngův modul pružnosti	210-250 GPa
Poissonovo číslo	0,3

4.2 Způsob vyhodnocení objemu

Výpočet otřeného objemu a vytvoření meše

Vstupní data ve formátu xyz obsahují matici jejíž sloupce jsou souřadnice x,y,z a řádky jsou skenované body povrchu, kde číslo řádku odpovídá pořadí naskenování bodu. Mračno naskenovaných bodů tvoří šroubovici jejíž vlastnosti jsou určeny nastavenými parametry ve skeneru: počet bodů na otáčku, počet otáček a šířka naskenované oblasti.

Vytvoření sítě

Sít je vytvořena spojením naskenovaných bodů a pro její kvalitu je určující kvalita naskenovaných dat. Spojení těchto bodů má podobu matic elementů, kde každý element sítě, řádek v matici, je popsán jeho uzly, čísla odpovídající pořadí naskenovaného bodu. Pro její vytvoření jsou použity tři for cykly. První cyklus spojí body v prostředku šroubovice, v obr červená barva. Každé dva sousední body z prvního vnitřního závitu šroubovice jsou spolu spojeny a tvoří element propojením s uzlem jedna. Druhý cyklus vytvoří elementy, trojúhelníky, které vrcholem směřují do středu šroubovice, zelená barva v obrázku. Tyto elementy jsou tvořeny rovněž spojením sousedních bodů ve zbývajících závitech šroubovice a spojením těchto dvojic s protějším uzlem na šroubovici blíže ke středu. Třetí cyklus vyplní plochu černými trojúhelníky, jejichž vrcholy směřují od středu šroubovice. Elementy jsou tvořeny spojením sousedních bodů ve šroubovici a spojením těchto dvojic s protějším uzlem na šroubovici dále od středu. Ilustrativní obrázek vytvořené sítě je pro zjednodušení a přehlednost zobrazen pro parametry 8 bodů na otáčku a 3 otáčky. Reálně použité parametry jsou 720 bodů na otáčku a 100 otáček. Výsledná síť je tedy tvořena "" trojúhelníkovými elementy a každý její element je jiné velikosti a tvaru. Plochu každého elementu, jejíž velikost se pohybuje od "" do "", je vypočtena jako polovina vektorového součinu dvou vektorů popisující stranu elementu. třetí souřadnice vektorového součtu je 0. Vynásobením ploch elementů jejich výškou, viz dále, pak získáme jejich objem a součtem těchto objemů otěr.

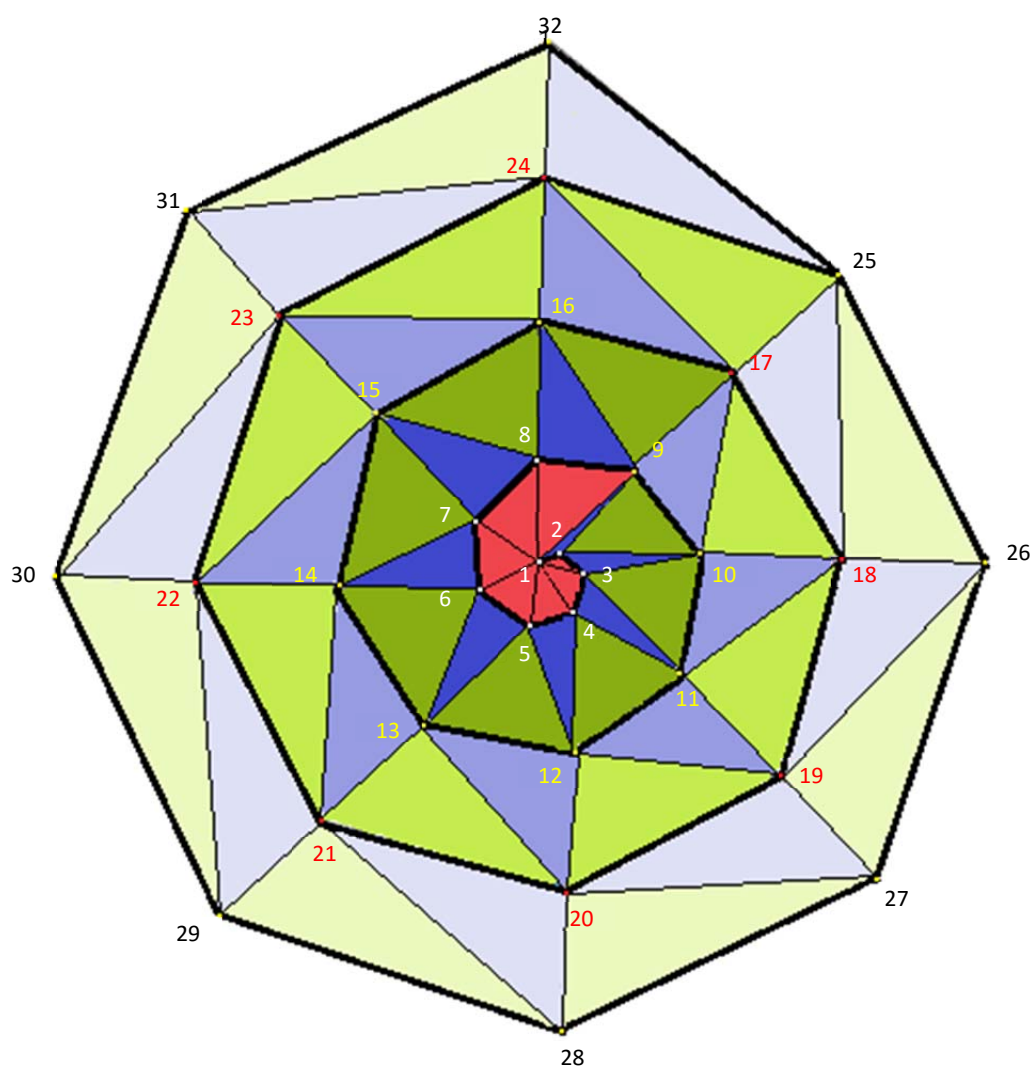
Výška elementu

Naměřená data obsahují vzdálenost měřeného bodu na povrchu vzorku od počátku souřadnicového systému skeneru. Tato vzdálenost však pro jeden vzorek u dvou různých skenování je jiná. To je důsledkem dvojího nestejného upnutí vzorku při skenování před a po otěru. Je tedy nutné souřadnice Z před a po otěru sesadit, přiložit na sebe. Zároveň je nutné si uvědomit že ani jeden z povrchů není zcela rovný. Proto jsou plochy u obou skenování proloženy ideálně rovnou rovinou. U neotřeného ideálně rovného vzorku by tato rovina byla totožná s jeho povrchem. U zdeformovaného vzorku s nulovým otěrem by jej pak tato rovina dělila tak, aby objem vyteklého materiálu nad touto rovinou ($V_M, V_S = +$ stejně jako výška elementu $Z_M, Z_S = +$) byl roven objemu vtlačení v materiálu pod touto rovinou ($V_M, V_S = -$ stejně jako výška elementu $Z_M, Z_S = -$). Výsledný objem je tedy nula. Jednalo-li by se o plasticky zdeformovaný vzorek s otěrem, tak by rozdíl těchto objemů odpovídal objemu otřenému viz obr. Určení této roviny na 3D skenu otřeného vzorku je komplikovanější, proto je zvolena pomocná rovina s touto rovinou rovnoběžná. Posunutím roviny se výsledný otřený objem nezmění, přírůstky či úbytky na obou skenech, vzniklé posunutím roviny, se ve výsledku odečtou viz obr. Předpokladem pro správné určení polohy pomocné roviny vůči oběma vzorkům je fakt, že známe oblast, kde se vzorek po otěru nezměnil "neotřenou oblast". Zvolíme-li tuto oblast stejnou na obou vzorcích a zároveň dostatečně velkou, pak průměrná velikost souřadnice Z určuje vzdálenost

pomocné roviny od počátku. Při usazení vzorku pro jednotlivá skenování bývá vzorek různě natočen. Je tedy dobré volit neotřenou oblast ve tvaru prstence, několik šroubovic, aby poloha pomocné roviny byla vypočítána ze stejných bodů.

Výpočet otřeného objemu

Výsledný otřený objem je rozdílem objemu vypočteného z dat po otěru a objemu z dat před otěrem. Oba tyto objemy jsou počítány vůči stejné referenční rovině a jsou sumou všech parciálních objemů nad i pod ní. Všechny tyto parciální objemy mají trojúhelníkovou podstavu dle elementu meše kterému náleží. Výška je určena jako průměr ze tří vzdáleností souřadnice Z od referenční roviny v uzlových bodech elementu.



Obr. 4.2.1 Způsob vytvoření meše

5 Popis zařízení

5.1 Popis zařízení a parametrů zkoušky, postupy měření na planetovém tribometru ve firmě BEZNOSKA

Příprava vzorků a měření

Po měření drsnosti byly vzorky omyty lihem, osušeny, znovu označeny a vloženy do předem připravených sáčků s označením materiálu a číslem vzorku Obr5.1.1 a Obr5.1.2. Vážení bylo provedeno na vahách KERN ABT 120-5DM s přesností na pátém desetinném místě. Hmotnosti jednotlivých vzorků před a po otěru byly vyhodnoceny z minimálně třech vážení s maximální odchylkou vážení $1,8 \cdot 10^{-5}$ g viz tabulka Tab3.1.

Zařízení pro otěrový experiment

Otírání vzorků bylo provedeno na speciálním tribometru vlastní konstrukce firmy Beznoska. Šest válcových vzorků je umístěno do horní rotující hlavy Obr5.1.3. Crosslingované a Necrosslingované vzorky jsou střídavě rozmístěny. Kotouč z CoCrMo slitiny je uložen do vany zaplněné destilovanou vodou. V průběhu testu pak vykonává rotační pohyb. Výsledný pohyb tribometru se dá označit jako planetový. Přítlak je na tribometru realizován závažím. Tribometr je na obrázku Obr5.1.4. Na Obr5.1.5 je pak vyobrazen tribometr v průběhu testu. Za účelem snížení odparu destilované vody a zvýšením teploty přibližně na teplotu lidského těla je tribometr zakryt.



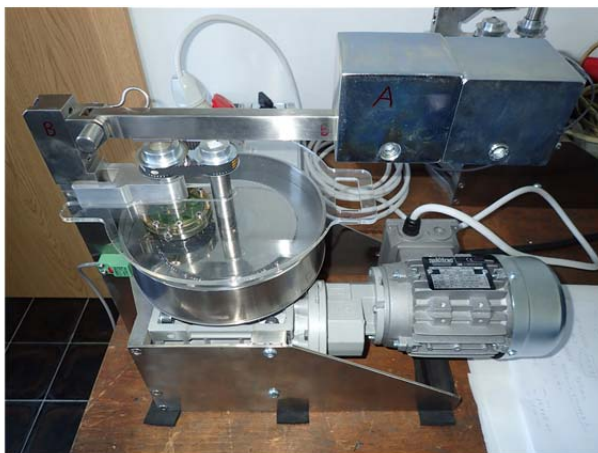
Obr5.1.1 Příprava vzorků před měřením: čištění, sušení, označení a třídění do sáčků.



Obr5.1.2 Sáčkování a omytí vzorků.



Obr5.1.3 Hlavice se vzorky. Na obrázku je již po otěru.



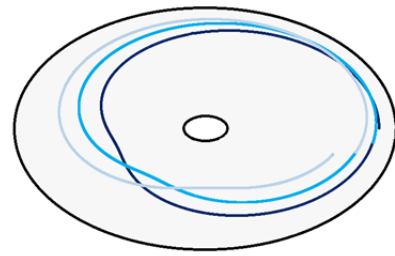
Obr5.1.4 Planetový tribometr konstruovaný a vlastněný firmou Beznoska. (vlevo)



Obr5.1.5 Zakrytí tribostroje igelitovým pytlím za účelem snížení odparu vody a pozitivním vlivem na zvýšení teploty přibližně na teplotu lidského těla. (vpravo)

Otěrové podmínky

U prvního experimentu vyvinulo závaží přítláčnou sílu přibližně 70 N na každý vzorek (váleček). U zbylých experimentů byla tato síla navýšena přibližně na 130 N pomocí přídatného závaží a to z důvodu neprokázaného úbytku hmotnosti u některých vzorků z prvního měření. U zbylých testů byla rovněž prodloužena doba testu z 3 dnů na 7. To odpovídá 69 000 cyklům a průměrné rychlosti 0,07 m/s pro 3 dny a 104 000 cyklům a průměrné rychlosti 0,07 m/s pro 7 dnů. Dráha opsaná středem válce v každém cyklu byla spočtena 0,409 m což odpovídá 42558m za týden. Trajektorie pohybu válečkového vzorku viz Obr5.1.6.



Obr5.1.6 Trajektorie jednoho z válečkových vzorků po disku v prvních třech cyklech

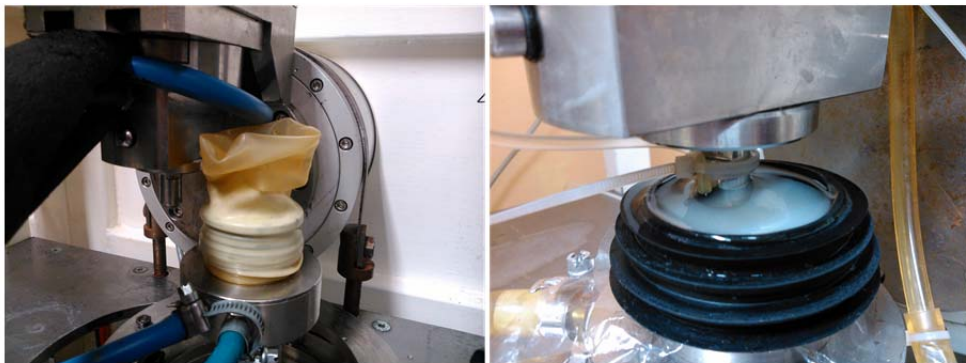
5.2 Popis zařízení a parametrů zkoušky, postupy měření na simulátoru pro testování kolenních náhrad na ČVUT

Příprava vzorků a měření

Před otěrovým experimentem byly vzorky naskenovány na 3D skeneru a zváženy. Vážení bylo provedeno na vahách Explorer Pro na čtyři desetinná místa. Vzorky byly váženy přímo před experimentem. Po experimentu byly ponechány oschnout a znovu zváženy.

Zařízení pro otěrový experiment

Otírání vzorků bylo provedeno na simulátoru pro testování kolenních náhrad v prostorách ČVUT. Deska byla nasunuta do těsnění a upnuta do simulátoru. Po připevnění kuličky byla přes těsnění navléknu latexová punčoška a natažena přes horní upínku. Obr5.2.1 vlevo. Přestože se při předchozích experimentech (například v práci [c11]) punčoška osvědčila jako velmi efektivní ochrana proti vniknutí prachových částic z okolního prostředí a účinný prostředek k zabránění odparu maziva bylo nutné jí odstranit. Vzhledem k většímu rozsahu pohybu do stran docházelo k mírnému stahování punčošky a v rámci několika dnů i k protržení. Aby nedošlo k následnému vyschnutí destilované vody a vniku zbytků z protržené punčošky do experimentu bylo nutné ji za den až dva vyměnit. Doplnění odpařované vody bylo realizováno kapátkem viz Obr5.2.1 vpravo.

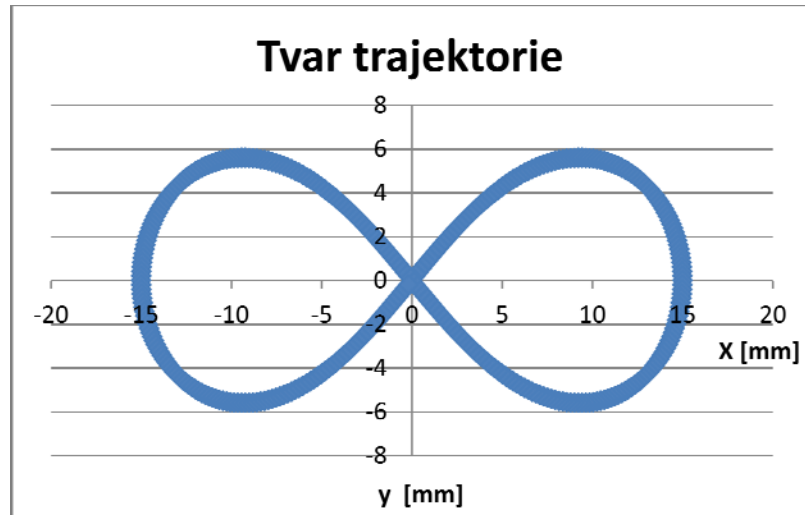


Obr5.2.1 Upnutí vzorku v simulátoru. Vlevo použita latexová punčoška, vpravo aplikace kapátka

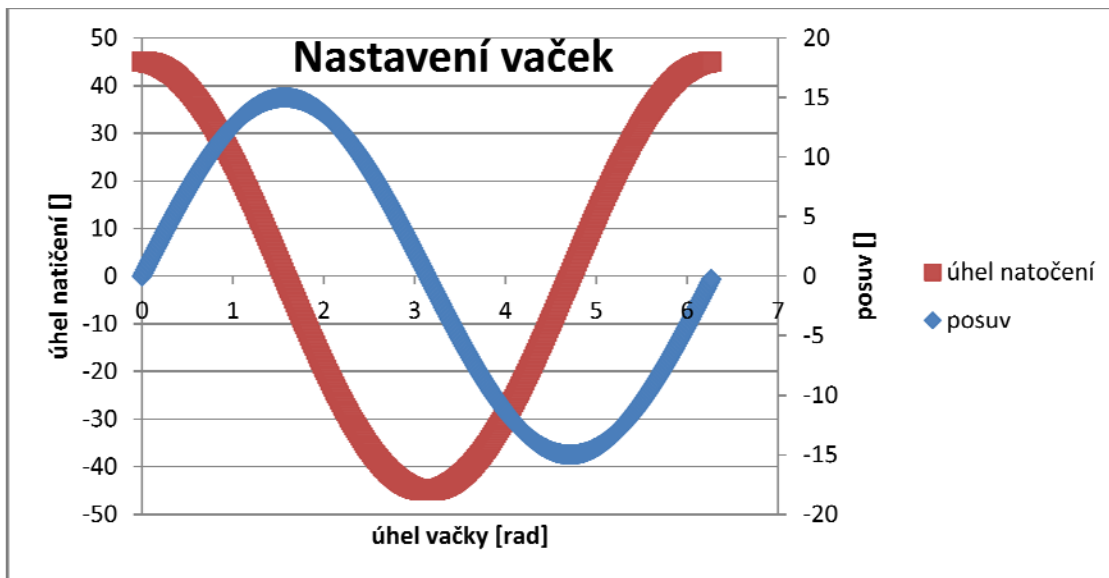
Otěrové podmínky

Parametry jako celková dráha a doba experimentu byly voleny na základě již použitých parametrů při předešlém měření na planetovém tribometru, aby bylo možné tyto otěrové testy porovnat. A to celková dráha jako 42557m, počítáno pro vrcholový bod kuličky, a délka experimentu jeden týden, což odpovídá průměrné rychlosti 0,07m/s. Jako trajektorie byla zvolena dráha tvaru osmičky Obr5.2.2, jako výsledný pohyb kombinace posuvu v rozsahu ± 15 mm a rotace kuličky $\pm 45^\circ$. Rotace i posuv pro jeden cyklus jsou na obrázku Obr5.2.3. Dráha vrcholového bodu v jednom cyklu pak odpovídá 0.079951m pro jednu osmičku. Z toho vyplývá nastavení parametrů zkoušky na 532294 cyklů na jeden experiment a jejich frekvenci 0.88Hz. Experimenty byly prováděny s přitlačnou silou 50N, 100N, 213N nebo 500N.

Důvodem navyšování síly při jednotlivých experimentech byla snaha nalézt takové tribologické podmínky, při nichž by bylo možné dobře porovnat otěr s minimální chybou od parazitických jevů jako je nasákavost.



Obr5.2.2 trajektorie vrcholku kuličky



Obr5.2.3 rotace kuličky a posuv desky pro jeden cyklus

6 Výsledky

6.1 Výsledky experimentů na planetovém tribometru

Vyhodnocení

Po provedení otěrového experimentu byly vzorky osušeny a v následujících dnech opět zváženy viz příloha P_Tab6.1.1. U vzorků byl vyhodnocen úbytek hmotnosti. Dále byla u vzorků provedena optická kontrola povrchu pod mikroskopem a u některých vzorků byl pořízen 3D sken povrchu.

Zhodnocení úbytku hmotnosti

V tabulce P_Tab6.1.2 je možné porovnat úbytky hmotnosti po otěru u jednotlivých vzorků. U prvního měření M1 je patrný velmi malý úbytek hmotnosti či nepatrný přírůstek, který může být důsledkem chyby vážení, ulpěním cizích částic na povrchu vzorku a nebo následkem nasáknutí maziva do vzorku. Jedná se o měření provedené s menší přitlačnou silou i kratší délkou zkoušky. Právě na základě velkého poměru rozptylu naměřených úbytků hmotností vzorků vzhledem k jejich velikosti bylo měření shledáno neprůkazným a byla zvýšena přitlačná síla a navýšen počet cyklů. Pro neprůkaznost a jiné otěrové podmínky je toto měření vyloučeno z výsledného posouzení vlivu modifikací obou otíraných materiálů na výsledný hmotnostní úbytek viz v tabulce Tab6.1.2.

Hmotnostní otěr pro různé kombinace materiálu [g*10⁻⁵]					
		průměrná Δm	sm. Odchylka	max	min
B150_plan	N	-8	2.160246	-5	-10
	C	-5	2.624669	-1	-7
B180_neplan	N	-141	12.657891	-126	-157
	C	-67	5.249338	-62	-74
MT150_neplan	N	-7	0.816496	-6	-8
	C	-6	3.265986	-2	-10
MT180_plan	N	-430	43.08389	-371	-472
	C	-87	1.247219	-85	-88
B/Si 150_neplan	N	-70	5.715476	-63	-77
	C	-52	5.436502	-45	-58
B/Ti 180_neplan	N	-5	0.816496	-4	-6
	C	-3	1.247219	-1	-4
B/Ti 150_plan	N	3.7	0.471404	4	3
	C	3	1.632993	5	1

Tab6.1.2 Tabulka otěru N=necrosslingovaný UHMWPE; C=crosslingovaný UHMWPE

Zhodnocení materiálových modifikací

Při posuzování hmotnostního úbytku materiálu u vzorků z UHMEPE byl zjištěn největší úbytek u válečků otíraných v kombinaci se základní materiálovou modifikací (bez IČ a změny lící teploty) a to $141 \cdot 10^{-5}$ g pro necrosslingovaný UHMWPE a $66 \cdot 10^{-5}$ g pro crosslingovaný. Nejlepších výsledků, tedy nejmenšího otěru, bylo dosaženo s upraveným CoCrMo s dotací titanu a to $5 \cdot 10^{-5}$ g pro necrosslingovaný UHMWPE a $2 \cdot 10^{-5}$ g pro crosslingovaný. Jen nepatrně horšího výsledku bylo naměřeno v kombinaci s kotoučem z CoRrMo s upravenou lící teplotou a to $7 \cdot 10^{-5}$ g pro necrosslingovaný UHMWPE a $6 \cdot 10^{-5}$ g pro crosslingovaný. Nejmenšího snížení hmotnostního otěru válečků bylo naměřeno v kombinaci s CoRrMo s dotací křemíku a to $70 \cdot 10^{-5}$ g pro necrosslingovaný UHMWPE a $50 \cdot 10^{-5}$ g pro crosslingovaný, což je přibližně desetkrát víc než u zbylých dvou modifikací materiálu kotouče. To však může být do značné míry ovlivněno právě poškozením kotouče v průběhu testu. Dále se prokázalo že planarizací základní materiálové modifikace se docílí srovnatelného snížení hmotnostního úbytku jako u ostatních materiálových modifikací a to $8 \cdot 10^{-5}$ g pro necrosslingovaný UHMWPE a $4 \cdot 10^{-5}$ g pro crosslingovaný UHMWPE. Planarizací titanem dotované slitiny se rovněž prokázalo snížení otěru ve srovnání s jen leštěným diskem a to do té míry, že nebyl prokazatelně zjištěn hmotnostní úbytek na vzorcích z UHMWPE. Přesto se nedá říci, že by planarizace obecně zlepšovala otěrové vlastnosti. Prokazatelné je to při porovnání planarizovaného a neplanarizovaného disku s upravenou teplotou lití. U planarizovaného materiálu je výsledný hmotnostní úbytek na protikusech víc jak desetkrát větší, u necrosslingovaných válečků můžeme hovořit dokonce i o dvacetinásobku. Konkrétní hodnoty jsou $430 \cdot 10^{-5}$ g pro necrosslingovaný UHMWPE a $87 \cdot 10^{-5}$ g pro crosslingovaný UHMWPE. Vliv planarizace na kotouč s příměsí křemíku se nepodařilo vyhodnotit, disk praskl při samotné výrobě. Dále se ve všech měřeních prokázalo, že crosslingovaný UHMWPE má menší hmotnostní otěr než UHMWPE necrosslingovaný.

Zhodnocení otěru pod mikroskopem

Všechny vzorky z UHMWPE byly prohlédnuty a nafoceny pod mikroskopem Dino-Lite Premier(20-250) ve stejném měřítku. Tyto snímky jsou seřazeny do tabulky P_Tab5.1.4. Dále byly pořízeny snímky tribologicky zajímavých oblastí vzorků, které jsou zhodnoceny v diskuzi. Rovněž byly nafoceny i disky před a po otěru viz tabulka P_Tab5.1.6.

6.2 Výsledky experimentů na simulátoru KKK ELO 2007

Vyhodnocení

V rámci měření bylo provedeno 22 experimentů na 19 deskách a sedmi kuličkách. Vzhledem k časové náročnosti a hledání vhodných podmínek se nepodařilo provést experimenty se všemi materiálovými modifikacemi. Postupně byly provedeny dva experimenty při 100N a mazaném kontaktu, dva experimenty při 213N a mazaném kontaktu a jeden dvoutýdenní test s 50N v mazaném kontaktu. Zbýlá měření byla provedena při 500N, a to dva bez maziva a zbylých třináct experimentů v kontaktu mazaném.

Po provedení otěrového experimentu byly vzorky osušeny a v následujících dnech opět zváženy viz příloha P_Tab6.2.1. U vzorků byl vyhodnocen úbytek hmotnosti. Dále byla u vzorků provedena optická kontrola povrchu pod mikroskopem a pořízen 3D sken povrchu. Změna hmotnosti, změna objemu a specifikace jednotlivých zkoušek jsou zaneseny v tabulce P_Tab6.2.1. Změny hmotnosti pro jednotlivé materiálové modifikace při 500N jsou zobrazeny v grafu Obr6.2.2.

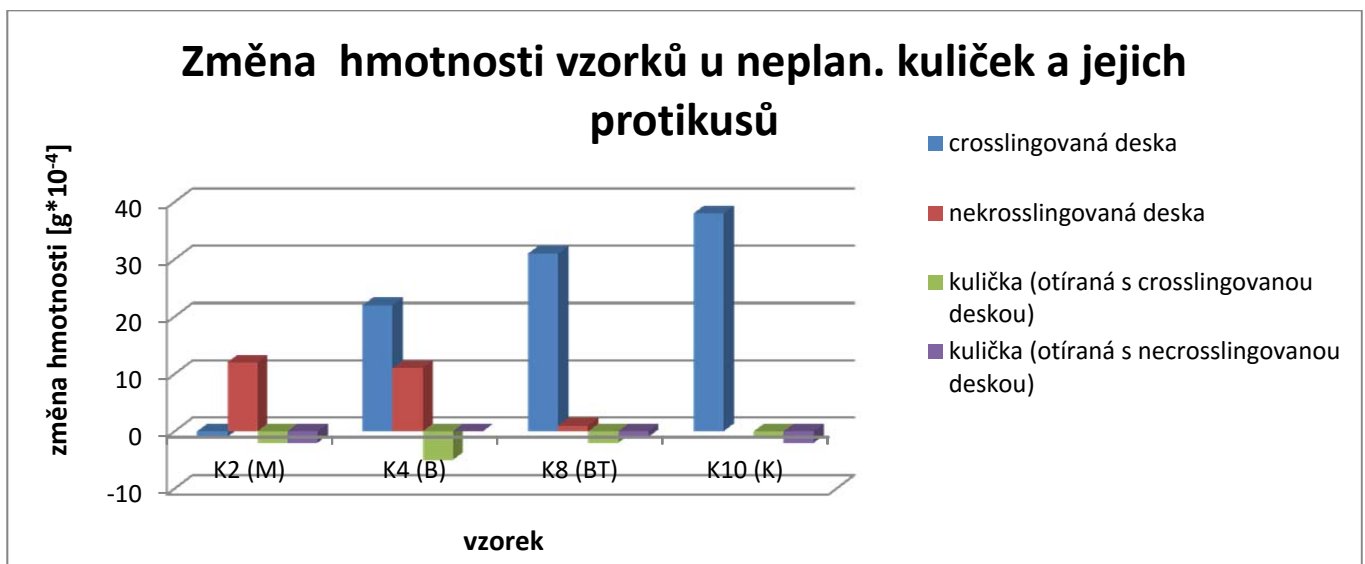
Vyhodnocení otěru změnou hmotnosti

Výsledky změny hmotnosti po otěrovém experimentu u dvojic otíraných v mazaném kontaktu viz P_Tab6.2.1, ukazují celkem zajímavou skutečnost, že většina vzorků z UHMWPE po otěru ztěžkla, zatímco CoCrMo kuličky zlehkly. Tato skutečnost je naprosto v rozporu s obecnou představou o otěru a původním předpokladem, kde je očekáván velmi malý otěr tvrdšího materiálu, v naše případě CoCrMo, na úkor měkkého UHMWPE. Tento fenomén je důkladněji diskutován v kapitole 8.1.1. Aby bylo možné výsledky mezi sebou porovnat a z naměřených dat vyhodnotit potenciálně nevhodnější úpravu materiálové dvojice je přijat předpoklad, že UHMWPE disky byly otřeny a tím u nich došlo k úběru materiálu. Skutečnost, že po otěrovém experimentu je naměřena vyšší hmotnost UHMWPE vzorků je předpokládána jako důsledek absorpce vody či jejich částic, která je vzhledem k hmotnostnímu úbytku po otěru značně větší. Bude však uvažována jako shodná pro experimenty se stejnými podmínkami.

a) Z hlediska materiálu

Experimenty je tedy možné mezi sebou porovnat. Obecně lze konstatovat, že rozptyl hodnot naměřených u UHMWPE je podstatně větší, než je tomu u kuliček z CoCrMo. Vezmeme-li v úvahu jen neplanarizované vzorky graf6.2.2, je z hlediska nejmenšího otěru logicky nejlepší disk s největším přírůstkem hmotnosti. Toho bylo dosaženo v kombinaci kulička K10 (kovaný CoCrMo) a jamka z crosslingovaného materiálu. V rámci dalších měření s crosslingovaným materiálem, bylo jen nepatrně horších výsledků dosaženo s kuličkou K8 (se změnou lící teploty). U kuličky K4 (bez inokulačního činidla) byl předpokládaný otěr ještě větší. Nejhůře dopadl experiment s kuličkou K2(s přidaným inokulačním činidlem). Celkem překvapivým výsledkem se vykazuje porovnání změn hmotnosti u crosslingovaných a necrosslingovaných desek, u kterého pro zmíněné materiály dochází k obrácenému výsledku. V kombinaci s

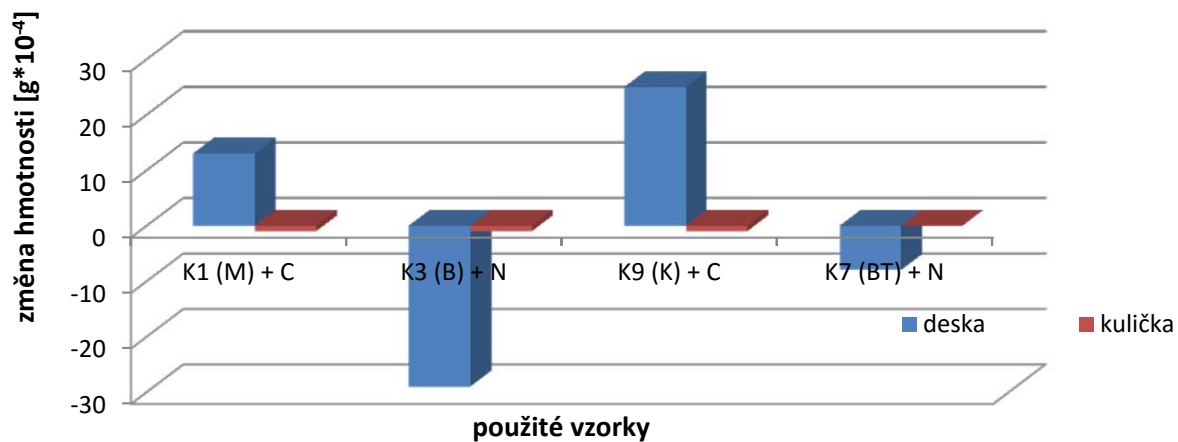
necrosslingovanou deskou je předpokládán nejmenší otěr u kuličky K2. Pozn. U dvojice K10 a necrosslingované desky došlo k selhání dodávky destilované vody, jako náhrady odpařeného maziva, část experimentu tedy probíhala v nemazaném kontaktu, výsledek tedy nebyl zanesen do grafu ani porovnáván. Z hlediska posouzení velikosti otěru na CoCrMo kuličkách je rozsah naměřených dat velmi malý a to úbytek v rozsahu 0 až $-5 \text{ g} \cdot 10^{-4}$. Vzhledem k velikosti chyby vážení tak lze pouze konstatovat, že ke zřetelněji většímu otěru došlo v kombinaci kuličky K4 a crosslingované desky.



Obr6.2.2 graf změny hmotnosti po otěrovém experimentu při 500N s neplanarizovanými kuličkami

Pro experimenty s planarizovanými kuličkami se jako nejvhodnější kombinace ukázala kulička K9 (kovaný materiál) v kombinaci s crosslingovanou deskou. viz Obr6.2.3 Horších výsledků bylo dosaženo u kombinace kuličky K1 (s přidaným inokulačním činidlem) s rovněž crosslingovaným protikusem. Jako nepřilíš vhodné z hlediska otěru se ukázalo kombinovat planarizaci u CoCrMo vzorku a desku z necrosslingovaného materiálu. Největší úbytek hmotnost po otěru byl pozorován u kuličky K3 (bez přidaného inokulačního činidla) v kombinaci s necrosslingovanou deskou, vzorek ztratil $29 \text{ g} \cdot 10^{-4}$ ze své původní hmotnosti. U kuličky K7 (bez IČ a se změnou teploty lití) v kombinaci s necrosslingovanou deskou byl tento úbytek třetinový než u vzorku K3. Úbytek hmotnosti CoCrMo nepřesáhl $1 \text{ g} \cdot 10^{-4}$.

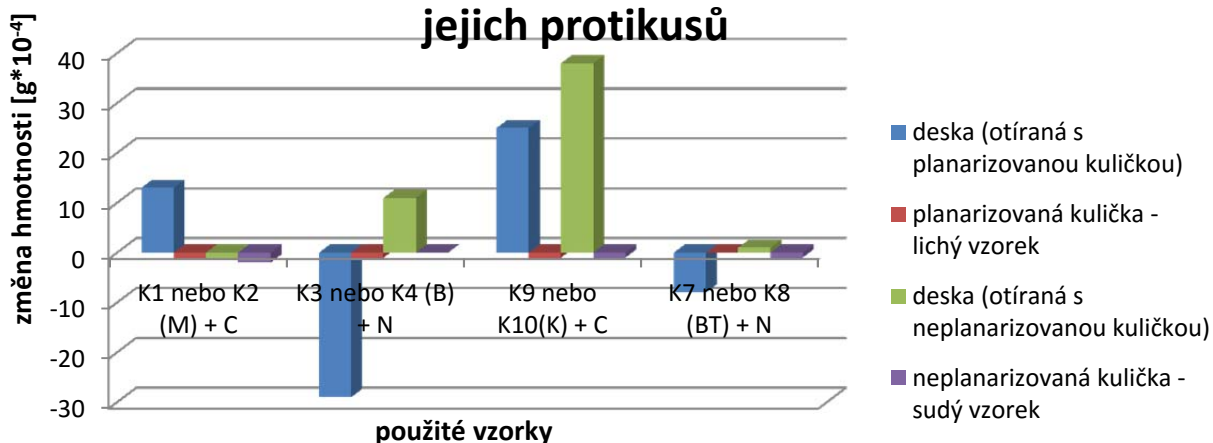
Změna hmotnosti vzorků u planarizovaných kuliček a jejich protikusů



Obr6.2.3 graf změny hmotnosti po otěrovém experimentu při 500N s planarizovanými kuličkami

Z gravu na obrázku Obr6.2.4 je patrné, že v rámci experimentů nebylo prokázáno, že proces planarizace jednoznačně zhoršuje či zlepšuje otěrové vlastnosti na UHMWPE vzorcích, ale že zlepšení či zhoršení souvisí i s volbou materiálu kuličky. Zlepšení otěrových vlastností jako důsledku planarizace bylo pozorováno pouze v kombinaci CoCrMo slitiny, kde bylo přidáno inokulační činidlo (vzorky K1 a K2), a crosslingovaného materiálu. Zbylé tři kombinace vykazovaly zhoršení.

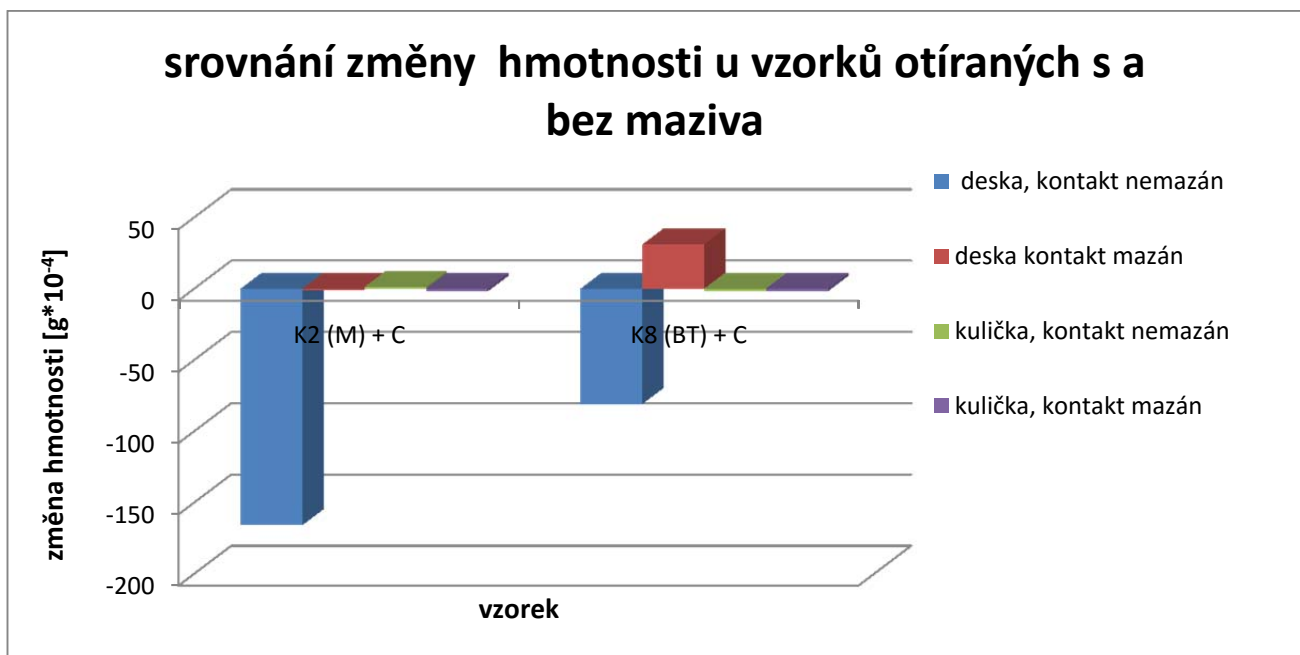
Porovnání změny hmotnosti vzorků u planarizovaných a neplanarizovaných kuliček a jejich protikusů



Obr6.2.4 změna hmotnosti po otěrovém experimentu při 500N s planarizovanými a neplanarizovanými kuličkami

b) Z hlediska použití maziva

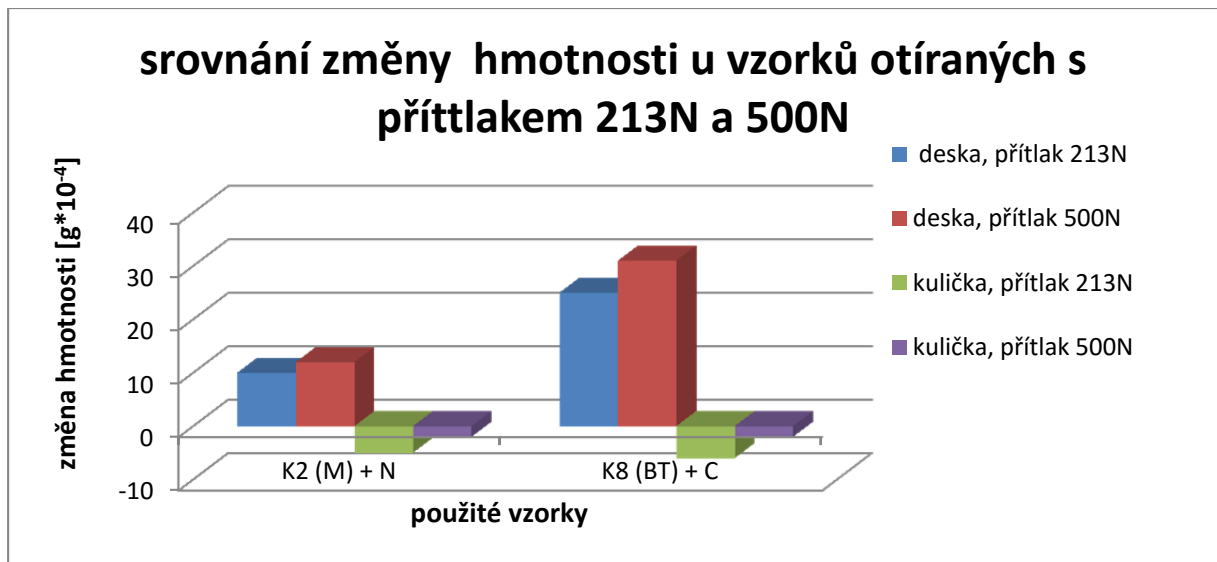
Vzhledem k již zmíněnému nabývání vzorků byly provedeny dva referenční otěrové experimenty bez použití destilované vody, tedy při nemazaném kontaktu, a se zatížením 500N . Jejich srovnání se stejnými materiálovými dvojicemi při mazaném otěru je v grafu na Obr.6.2.5. Z grafu je jednoznačně patrné, že rozdíl mezi změnou hmotnosti vzorku po nemazaném a mazaném tribologickém experimentu je na deskových vzorcích značný. U desek otíraných s kuličkou K2 je tento rozdíl $167 \text{ g} \cdot 10^{-4}$ a desek otíraných s kuličkou K8 je $112 \text{ g} \cdot 10^{-4}$. Tento rozdíl však není ukazatelem zvýšení otěru při nemazaném kontaktu. Číslo je spíše jeho průnikem s vlivem považovaným pravděpodobně za nasákavost. Vliv na otěr kuličky je v řadu chyby experimentu a nedá se posoudit.



Obr6.2.5 srovnání změny hmotnosti po otěrovém experimentu při 500N při mazaném a nemazaném tribologickém experimentu

c) Za předpokladu jiného zatížení

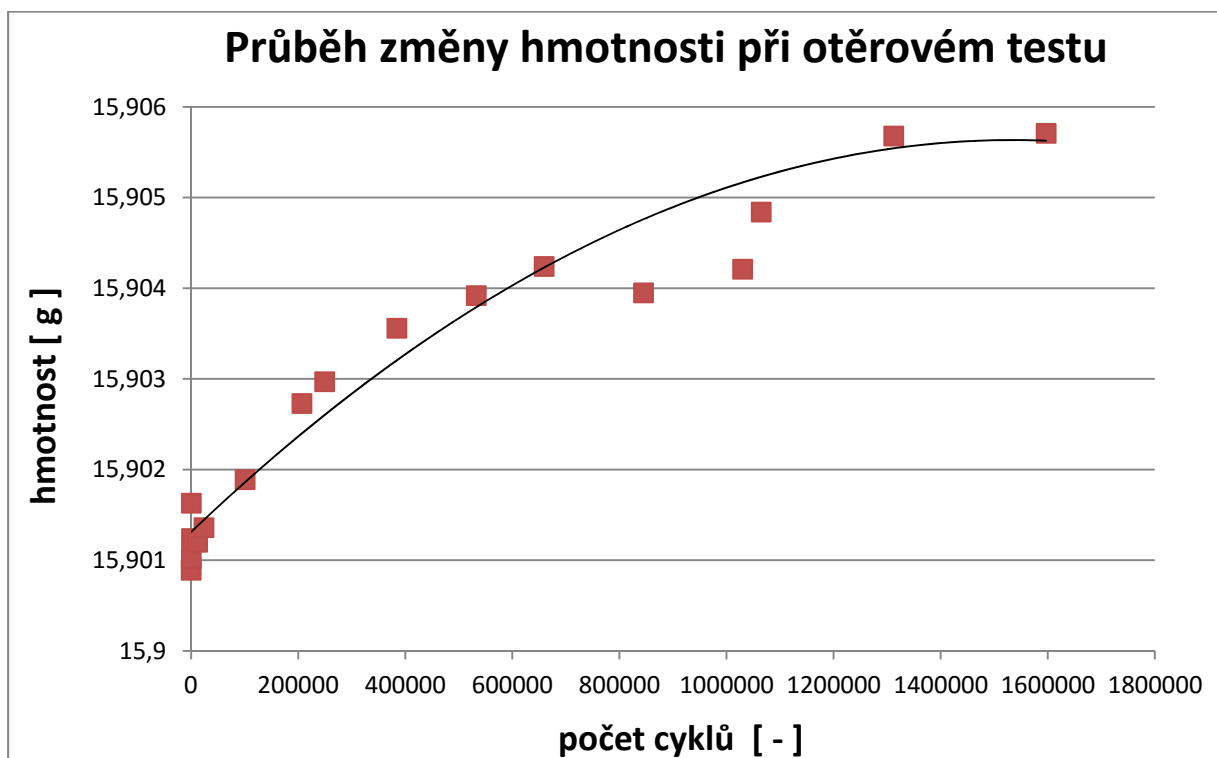
Jelikož byly provedeny první experimenty při jiných zatíženích je možné porovnat vliv změny přítlčné síly na naměřená data. V grafu na obrázku Obr6.2.6 jsou zaneseny změny hmotnosti při 213N a 500N. Z grafu je patrné, že disky otírané s větším přítlakem mají větší přírůstek hmotnosti, zatímco kuličky s větším přítlakem mají menší úbytek hmotnosti. Z grafu rovněž vyplývá, že provedeme-li srovnání dvou materiálových dvojic při 213N i 500N, jeho výsledek je stejný, tedy z hlediska posouzení dvou materiálů a stanovení doporučení výrobci.



Obr6.2.6 srovnání změny hmotnosti po otěrovém experimentu při zatížení 213N a 500N

c) Sledování průběhu vývoje změny hmotnosti

Skutečnost, že při otěrovém experimentu hmotnost narostla přímo vybízí k proměření průběhu tohoto procesu. Průběh nárůstu hmotnosti byl sledován pro Kuličku K8 a desku C2. Aby bylo možné lépe zmapovat celý proces byla délka experimentu prodloužena z jednoho týdne na tři. Celkem bylo tedy odjeto 1596882 cyklů. Závislost hmotnosti vzorku na počtu cyklů je vidět na Obr6.2.7. Z grafu je patrné, že nárůst hmotnosti má klesavou tendenci. Pozornost budí tři odchýlené body z nichž v jednom hmotnost nepatrně klesla. Jedná se o chybu měření vzniklou erorem na zařízení a chybným nastavením nulové polohy. Vzorek vyjel z vychozené drážky a absolvoval několik cyklů.

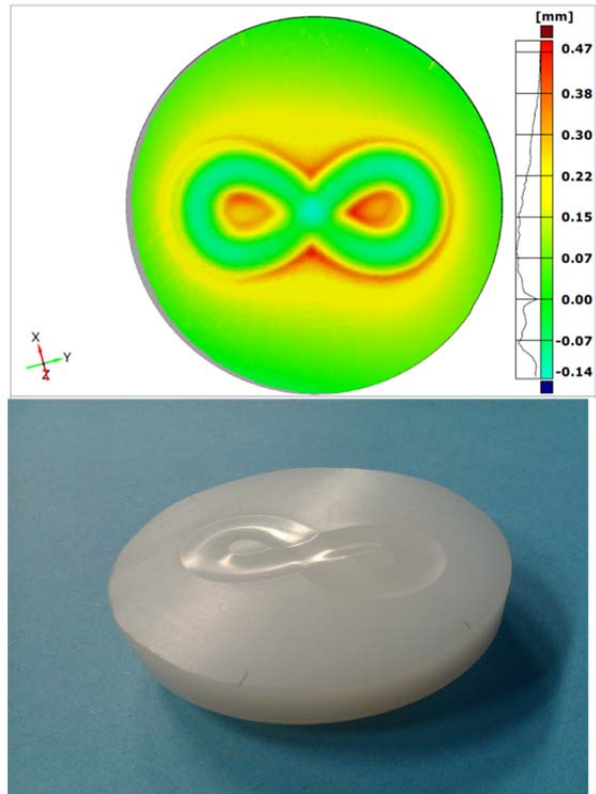


Obr6.2.7 Průběh změny hmotnosti při otěrovém testu pro vzorky K8 a C2.

Vyhodnocení povrchu vzorků

Desky

Desky byly před otěrem a po otěru naskenovány. Následně byly skeny sesazeny pomocí softveru GOM a vytvořena mapa změny objemu. Vzorky byly nafoceny a zhodnoceny pod mikroskopem. Vyhodnocená data jsou sestavena do tabulek v příloze. Desky odírané při 500N v kontaktu s neplanarizovanými hlavicema v příloze P_Tab6.2.2, Desky při různém tlakovém zatížení a desky otírané bez maziva v příloze P_Tab6.2.3 a desky otřené s planarizovanými kuličkami při 500N v příloze P_Tab6.2.4. Ukázka vyhodnocené změny objemu je na Obrázku Obr6.2.8.



Obr6.2.8 Ukázka vyhodnocení změny objemu u vzorku N9 otíraném s kuličkou N8

Kuličky

Kuličky byly rovněž nafoceny pod mikroskopem v tabulce P_Tab6.2.5 je vidět vliv planarizace na povrch kuliček. Vliv otěru na povrch kuliček a jejich opotřebení je vidět z tabulky P_Tab6.2.6 pro neplanarizované hlavice po otěru a pro planarizované hlavice v tabulce P_Tab6.2.7

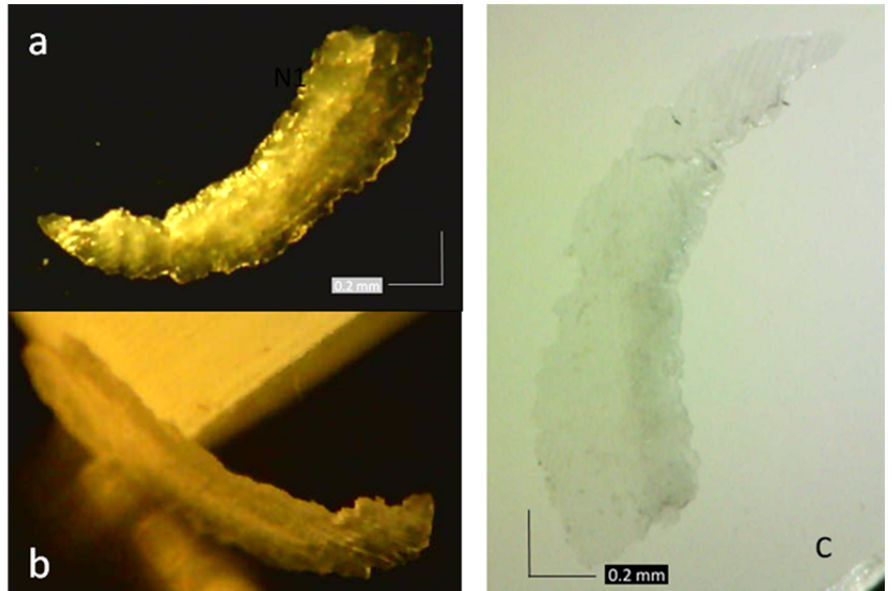
7 Diskuze

7.1 Diskuze experimentů na planetovém tribometru

Diskuze výsledků z mikroskopu

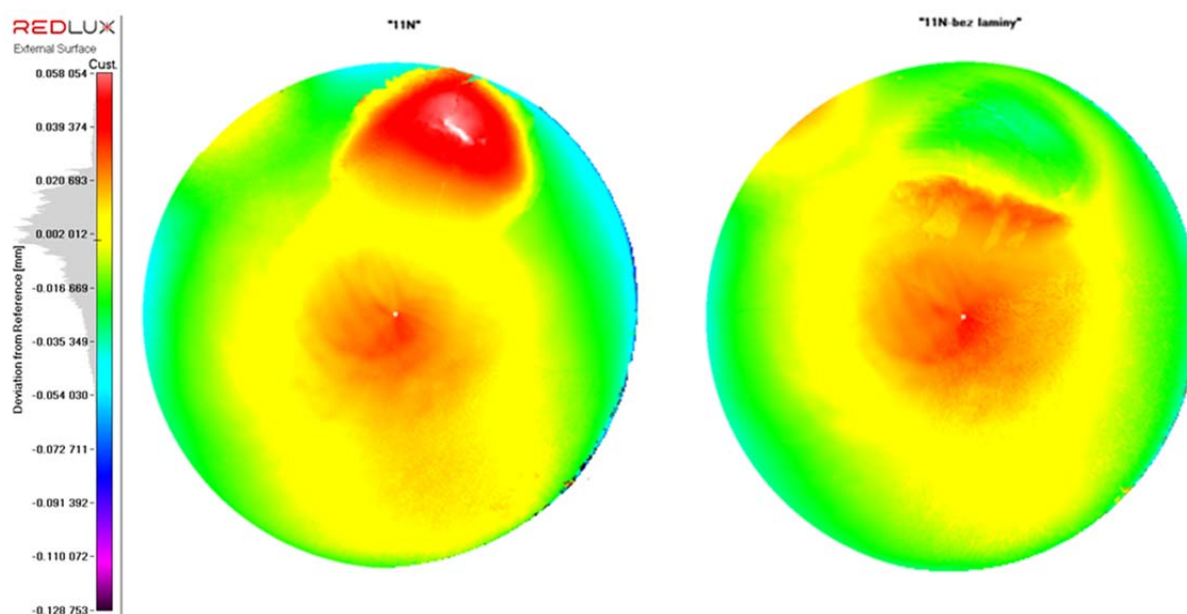
Jak je vidět z tabulky P_Tab5.1.4, projevují se u vzorků z jednoho měření stejné fenomény. U vzorků z měření M5 jsou patrné výrazné rýhy s hloubkou okolo 0,046 mm. Tyto rýhy pravděpodobně vznikly jako následek otírání vzorku o prasklinu v kotouči. M5 je měření s kotoučem s příměsí křemíku. Vznik vměstků při výrobě vedl ke vzniku trhliny v disku a tedy i vzniku rýh na vzorcích. Vzhledem k míře zbrzdění povrchu hlubokými rýhami došlo k vytvoření tak značné trhliny na povrchu

kotouče spíše ke konci experimentu. U měření M1, M2, M4 a M7 jsou vizuálně viditelné jinak barevné oblasti na povrchu vzorků. V těchto zřetelně odlišně zbarvených místech dochází k delaminaci vrstvy polymeru, a tedy k narušení celistvosti povrchové materiálu. K odtržení takto vzniklé vrstvy pak dochází za použití malé síly. Na obrázku Obr7.1.1 je možné vidět odtrženou laminu ze vzorku C12, ta byla oddělena při čištění vzorku hadříkem před mikroskopováním. U vzorků N11 a N12 byl proto proveden 3D sken povrchu před a po odtržení laminy. Vzorek N11 je na obrázku Obr7.1.2 a N12 na Obr7.1.3. Provedením 3D skenu se ukázalo, že v místě laminy je povrch vyvýšený a naopak jejím odtržením vznikne ve vzorku prohlubeň. Tento jev může být způsoben jak čistou delaminací povrchové vrstvy způsobenou primárně narušením struktury materiálu, tak delaminací jako následku jevu, kdy dochází k napékání otřeného materiálu na povrch vzorku, jeho vyboulení a tedy i jeho následného většího namáhání při otírání které vede k delaminaci napečeného materiálu i s částí povrchu vzorku. U obou vzorků je rovněž vidět vyvýšenou (červeně zbarvená na 3D skenu) vznikající oblast uprostřed vzorku a u vzorku N12 i na straně proti lamině. Při bližším zkoumání delaminované oblasti je možné si povšimnout větší koncentrace drobných rýh v této oblasti viz Obr7.1.4 To vysvětluje fakt, že tyto vystouplé oblasti jsou pod větším kontaktním tlakem a dochází k hlubšímu vtisknutí nerovností kotouče a tvorbě viditelných rýh. Díky pohybu zde pak může docházet i k namáhání stříhem. S tímto způsobem

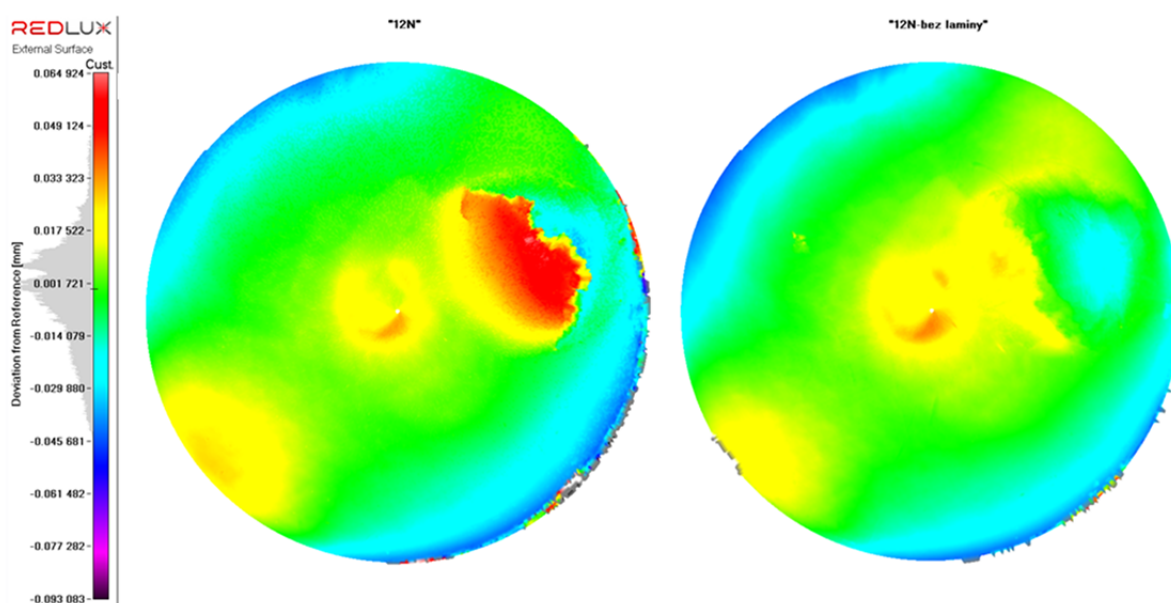


Obr7.7.1 Odstraněná lamina ze vzorku C12. a), c) lamina položena na rovném podkladě b) natočená lamina

opotřebení se setkáváme i na bocích ozubených kol s rovněž tlakově-smykovým (skluz a tření)



Obr7.1.2 3D sken povrchu vzorku N11 před (vlevo) a po (vpravo) odtržením laminy

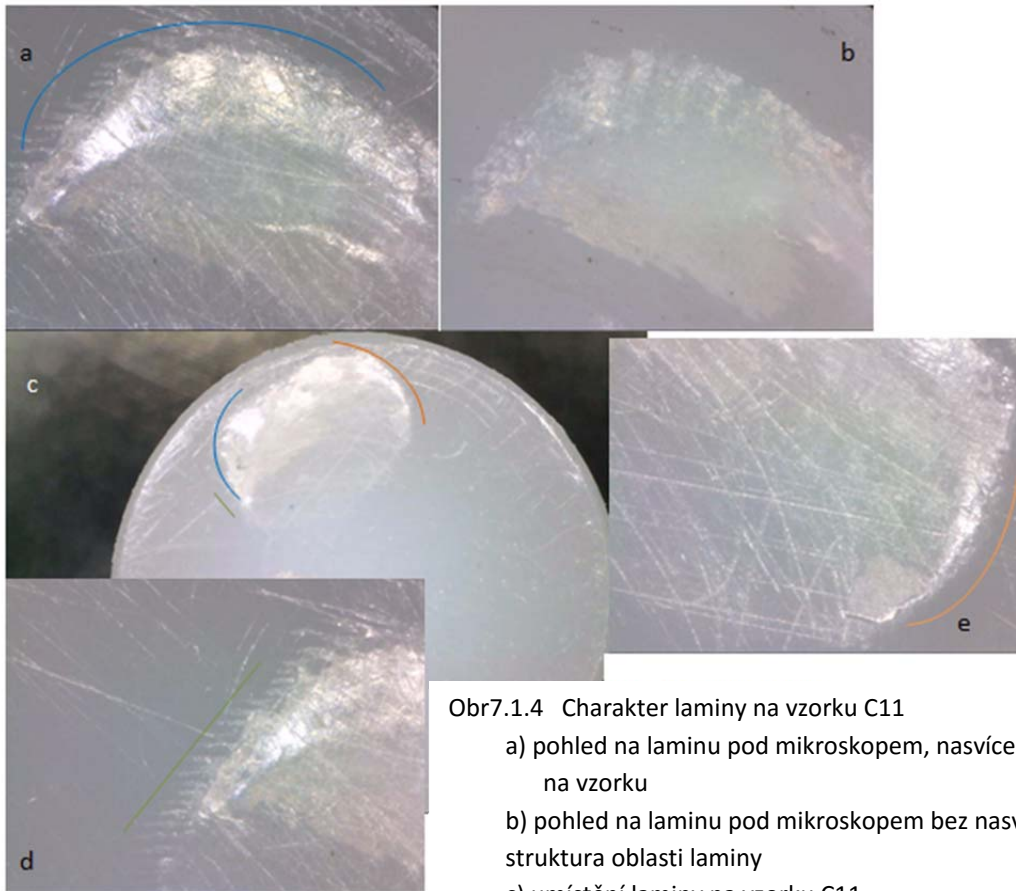


Obr7.1.3 3D sken povrchu vzorku N12 před (vlevo) a po (vpravo) odtržením laminy

cyklickým charakterem deformace [c13]. Nazývá se pitting. Účinkem kontaktního tlaku vniká

mazivo do iniciačních trhlin s ostrým úhlem sklonění vůči povrchu, následkem pohybu je pod povrchem uzavíráno a zvýšený tlak iniciuje šíření trhliny až do odloupení vrstvy materiálu. Tento jev má destruktivní účinky a k jeho odstranění se doporučuje snížení zatížení. viz rešerše a obr2.1.2.9. Podobný projev má i spalling, který vzniká u povrchově tvrzených ozubení [i16] (pozn. autora v případě měřeného válečku může povrchové vytvrzení představovat adhezí napečená vrstva směsi z otěrových částic a nebo oblast s tepelně

ovlivněnou strukturou. Tento předpoklad by vysvětloval výsledek z měření M1, kde jsou laminy zvýrazněny šedým zabarvením. Jelikož se jedná o první měření, mohly by to být napečené prachové částice ulpělé v tribometru), a liší se iniciací trhliny.



Obr7.1.4 Charakter laminy na vzorku C11

- a) pohled na laminu pod mikroskopem, nasvícení zvýrazňuje vrypy na vzorku
- b) pohled na laminu pod mikroskopem bez nasvícení, vyniká barevná struktura oblasti laminy
- c) umístění laminy na vzorku C11
- d) pravá část laminy, před její zřetelně bílou hranicí je viditelná oblast s menší četností vrypů, za ní je naopak větší
- e) levá část laminy, se zřetelnými rýhami před oblastí laminy

Zde vysoká podpovrchová smyková napětí způsobují vznik podpovrchových trhlin, později

dochází k prolomení povrchové vrstvy. Její vliv se odstraňuje zlepšením kvality povrchu nebo změnou rychlosti. Použitím této zkušenosti na otřené vzorky je onou předpokládanou iniciační, ať již s povrchově či podpovrchově vzniklými trhlinami, oblastí bíle zbarvený okraj laminy, na obrázku Obr7.1.4a,c,e naznačen modrou a červenou čarou. Směr iniciace trhlin má být shodný se směrem pohybu, což můžeme rovněž pozorovat na detailu Obr7.1.4a,e. Směry pohybu vzorku odhalují směry vrypů na povrchu laminy. Jejich keříkovité křížení je důsledkem rotace a vytváří dojem dvou barevně naznačených iniciačních oblastí. Na detailu Obr7.1.4b je pozorovaná oblast znovu, ale bez nasvícení, vyniká tak původně nevýrazné zabarvení povrchu laminy. To může být právě známkou strukturální změny materiálu následkem vzniklého tepla a míst s povrchovými či podpovrchovými šířícími se trhlinami. V konečném důsledku by právě jev spallingu nebo pittingu mohl mít významný vliv jak na výsledek tribologického testu, tak se může zásadně podílet i na výsledném opotřebení kloubních komponent a to především v případě dlouhodobého otírání, jak je tomu u kloubních implantátů. Dalším zajímavým jevem pozorovatelným na obrázku Obr7.1.4 je množství krátkých rovnoběžných rýh před oblastí laminy, zelené zvýraznění na detailu

Obr7.1.4d,c. Směr těchto vrypů či prasklin není totožný se směrem pohybu vzorku. Může se však jednat o důsledek prodělení kapaliny, případně kapaliny nesoucí již otřené částice, kontaktem. U zbylých měření M3, M6 a M7 nejsou pod mikroskopem tyto delaminace výrazně patrné. I zde je však na 3D skenech patrná vyvýšená oblast, která by se při větším počtu cyklů mohla vyvinout v laminu viz P_Tab5.1.4.

Zajímavým faktem je, že se jedná o měření s naprosto odlišným hmotnostním otěrem, tedy tím největším u měření M3 a nejmenším u M7 a M6. Právě větší otěr povrchu a s tím spojené pravidelné ohlazování může být důvodem včasného otření mikrotrhlin dříve než dojde k jejich

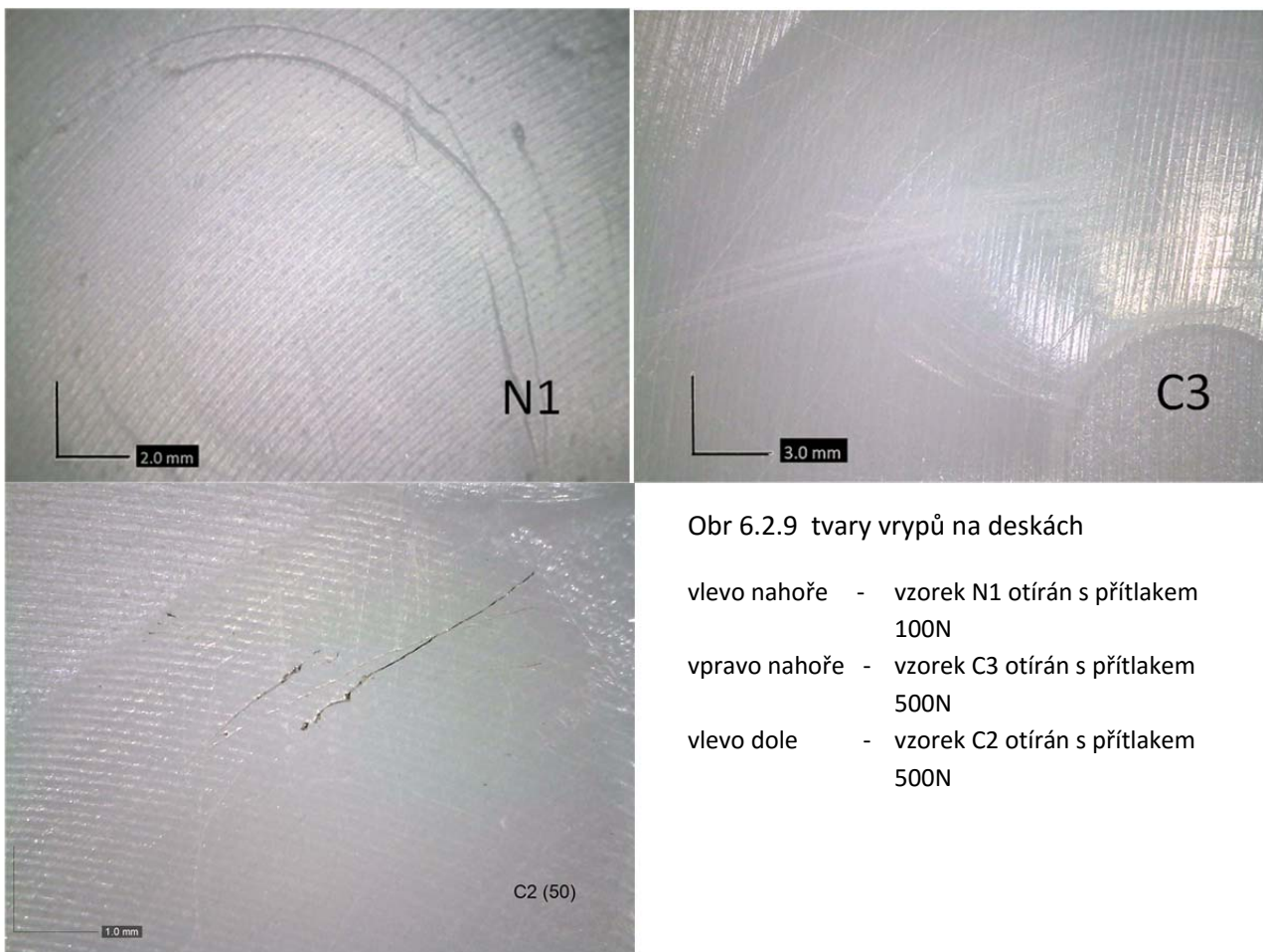
šíření a vysvětlovat absenci lamin na vzorcích u měření M3. Pokud však přijmeme myšlenku, že na iniciaci lamin se podílí adhezí napečená vrstva již otřeného materiálu, pak právě skutečnost malého otěru může zapříčinit rovněž zpomalení vzniku lamin. Nevyloučitelným důvodem, proč u těchto měření viditelné laminy nevznikly, může však být i lepší kvalita povrchu kotouče, což by se dalo vyloučit pouze 3D skenem povrchu kotouče. Měření drsnosti ve vybraných úsecích toto vyloučit nedokáže. U měření M7 byl dále pozorován vznik drobných špon na okraji vzorku a ulpění a zachycení drobných částíček na Obr7.1.5. Pro porovnání vizuální, pod mikroskopem, a prostorové, jako 3D sken, na povrchu jednoho vybraného vzorku z každého měření možno nahlédnout do tabulky P_Tab5.1.4. V případě hlubšího zájmu výrobce o prozkoumání a posouzení příčin tvorby lamin doporučuji provedení nanoindentace povrchu s potenciálem pro tvorbu lamin a oblasti neovlivněné a rovněž provedení zkoumání vzniku a šíření trhlin na řezech vzorků.



Obr7.1.5 Špony na okraji vzorku N22

7.2 Diskuze experimentů provedených na simulátoru KKK ELO 2007

Když se podíváme na rozsah abraze na jednotlivých vzorcích, všimneme si, že u vzorků s menším zatížením má jiný charakter než u vzorků s větším zatížením. Zatímco u vzorku N1 který byl zatížen přítlakovou silou 100N jsou patrné větší a hlubší rýhy vytvořené tažením částice kuličkou, které jsou méně četné. U vzorku C3 zatíženém 500N jsou pozorovatelné drobnější četné rýhy které spíše odpovídají abrazivnímu poškození od kuličky. Abrazivní účinek částicí byl ale pozorován na vzorku C2 rovněž otíraném s přítlakem 500N i zde je vidět malá

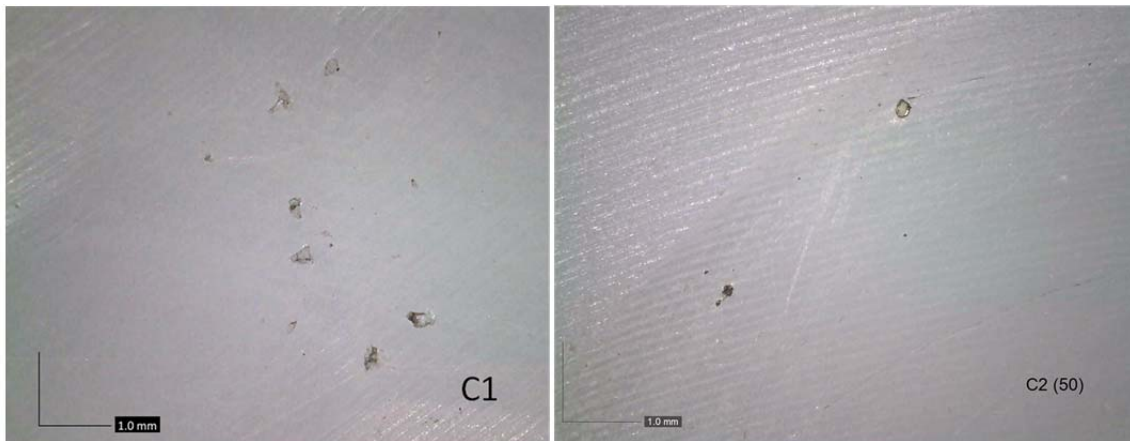


Obr 6.2.9 tvary vrypů na deskách

- vlevo nahoře - vzorek N1 otírán s přítlakem 100N
- vpravo nahoře - vzorek C3 otírán s přítlakem 500N
- vlevo dole - vzorek C2 otírán s přítlakem 500N

hloubka rýh ve srovnání se vzorkem N1 viz Obr6.2.9. Na základě těchto poznatků se dá shrnout, že u vzorků s malým zatížením byl kontakt lépe hydrodynamicky mazán a v kontaktu s deskou bylo jen málo nerovností kuličky. U těchto výstupků docházelo k "pružným" nárazům na nerovnosti desky a vzniku trhliny, ta se šířila podél zrn až došlo k vytržení částice. U vzorků s vyšším přítlakem byly nerovnosti v bližším kontaktu byla tak lépe umožněna adhezní forma opotřebení desek, díky většímu množství kontaktních bodů také docházelo více k opotřebení polymerního materiálu abrazí. Následkem tohoto jevu docházelo k vyplnění nerovností polymerem a které vedli ve výsledku k menším úbytkům kuličky na úkor desky. Tento závěr odpovídá naměřeným změnám hmotnosti po otěru.

Vtlačení částic do materiálu. U vzorku C1 s přitlakem 213N je pozorován efekt kdy v důsledku větší přitlačné síly dochází rovněž k vytrhávání částic z kuličky, tyto částice však v důsledku většího vniku jsou ulomeny a zaklíněny v desce. Tento jev byl rovněž pozorován i jednoho u vzorku s přitlakem 500N. Jedná se však o sporadický výskyt jen u vzorku C2. Obr6.2.10



Obr6.2.10 Planetový tribomert konstruovaný a vlastněný firmou Beznoska.

Vliv velikosti zátížení na tvar drážky na Obr6.2.11.



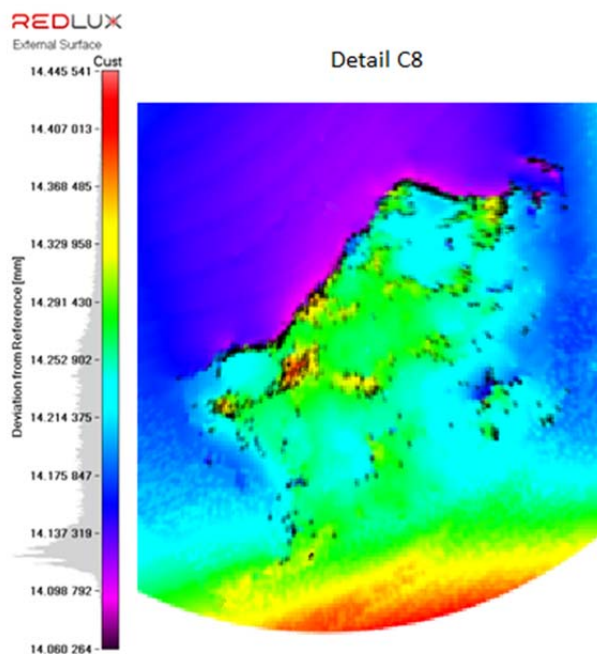
Obr6.2.11 Tvar otěrové drážky při 50N, 100N, 213N a 500N

- vlevo nahoře - vzorek N3 otírán s přitlakem 100N
- vpravo nahoře - vzorek C7 otírán s přitlakem 500N
- vlevo dole - vzorek N5 otírán s přitlakem 213N
- vpravo nahoře - vzorek C5 otírán s přitlakem 50N

U některých vzorků se zatížením 500N bylo vidět zažloutnutí povrchu a to především v oblasti středu. Toto zažloutnutí je projevem horšího odvodu tepla způsobeného třením, které vede ke změně změny struktury polymeru polymeru. U vzorku C8 tak materiál na povrchu zkřehnul a došlo k vylámaní polymeru. Obr 6.2.12



Obr.6.2.12 Opatřebení v oblasti středu osmičky vzorku C8 testovaném s použitím maziva.
Vlevo - detail pod mikroskopem
Vpravo - detail oblasti z 3D skeneru



8 Přírůstky hmotnosti

8.1.1 Nasákavost a sušení

Při vyhodnocování dat se ukázal zajímavý fenomén, kdy u UHMWPE vzorků byla naměřena vyšší hmotnost vzorků po otěrovém testu než před ním. Tento jev byl pozorován 20 z celkem 28 provedených experimentů. Vzhledem ke skutečnosti, že se s tímto jevem setkáváme na obou otěrových zařízeních, nejedná se o jev spojený s konkrétním tribometrem. Nicméně nutno konstatovat, že při měření na simulátoru KKK ELO 2007, se setkáváme s hmotnostními přírůstky u většiny měření a v podstatně ve větších hodnotách než tomu bylo pozorováno u planetového tribometru. Největší nárůst hmotnosti byl pozorován u vzorku C2 a to více jak 0,03%. Nutno konstatovat, že je jednalo o třítydenní experiment v průběhu kterého byl pozorován pravidelný nárůst hmotnosti. Zaměříme se tedy na toto měření.

Celkem logickým důvodem pro ztěžknutí jednoho tělesa z tribologické dvojice je jeho dotování otěrovými částicemi z tělesa druhého. Přestože u některých vzorků byly pod mikroskopem drobné otěrové částice CoCrMo v UHMWPE deskách pozorovány, nutno konstatovat že úbytek hmotnosti na kuličkách byl značně menší, u vzorku C2 asi 6% z přírůstkem hmotnosti na desce. V této hmotnostní bilanci zjevně figuruje hmota navíc.

Nasáknutí

Jednou z možností je absorpce vody do UHMWPE vzorku v průběhu experimentu. Výrobce garantuje, že nasákavost je menší než 0,05% při teplotě 23°C. Nicméně v literatuře se běžně setkáváme s hodnotou nižší a to 0,01% [C14]. Aby bylo možno určit konkrétní množství nasáknuté vody bylo uděláno orientační měření nasákavosti při laboratorní teplotě. Ukázalo se, že přírůstek hmotnosti u těchto vzorků je přibližně desetkrát menší. V průběhu experimentu však můžeme v oblasti kontaktu očekávat podstatně vyšší teplotu. Orientačně byla tedy změřena nasákavost u vzorků ponořených do vody o teplotě 100 °C. Nasákavost UHMWPE je tedy zcela evidentně ovlivněna teplotou. Pokud by tedy měla být provedena

Vliv nasákavosti při laboratorní teplotě

vzorek	otřen*	delta (po-před namočením) [g*10 ⁻⁴]
N1	A	0,00248%
N2	A	6
C4	A	4
C9	A	-2
N5	A (T)**	3

*A sušení bylo provedeno s otřeným vzorkem; N sušení bylo provedeno s neotřeným vzorkem

** (T) - vzorek byl v těsnění, v kontaktu s vodou nebyl celý povrch vzorku

Vliv nasákavosti za zvýšené teploty (100 °C)

vzorek	m(1) [g] počáteční	m(2) [g] po 1h15min	delta [g*10 ⁻⁴] (m2-m1)	m(3) [g] 2h 30min	delta [g*10 ⁻⁴] (m3-m2)	celkem [g*10 ⁻⁴]
N1	16.1408	16.1427	19	16.1432	5	24
C9	16.3103	16.3122	19	16.3126	4	23

korekce nasákavosti bylo by nezbytné měřit teplotu v kontaktu v průběhu experimentu. Je však zároveň nutné si uvědomit, že další veličinou, která nasákavost může ovlivnit je tlak. Korekce nasákavosti se tedy ukázala jako natolik komplexní problém který není možné v rámci této práce postihnout.

Tab3.2 Nasákavost plastového vzorku

Sušení

Dalším řešením tohoto problému by mohlo být sušení. Bylo tedy provedeno orientační sušení několika vzorků v peci. Výsledný úbytek hmotnosti byl nulový. Za vyšších teplot bude řešen pomocí DSC. Dalším z pokusů jak vodu odstranit bylo sušení v excikátoru. Zde byl úbytek hmotnosti pozorován, ale nepřesáhl ani 50% z původního přírůstku hmotnosti.

Sušení v peci (60 °C po 1 h)

vzorek	otřen*	m před sušením [g]	m po sušení [g]	delta [g*10 ⁻⁴]
N3	A	16.3346	16.3346	0
N5	A	16.3277	16.3277	0
C3	A	16.316	16.316	0

*A sušení bylo provedeno s otřeným vzorkem; N sušení bylo provedeno s neotřeným vzorkem

Sušení exsikátorem

vzorek	otřen*	m před [g]	m po [g]	delta [g*10 ⁻⁴]	procentuálně z hmotnostního přírůstku
N1	A	16.1402	16.1399	-3	8%
N2	A	16.3173	16.3167	-6	37%
N3	A	16.3348	16.3336	-10	43%
C9	A	16.3091	16.3085	-6	15%
N7	N	15.1842	15.184	-2	-
N10	N	16.3525	16.3523	-2	-

*A sušení bylo provedeno s otřeným vzorkem; N sušení bylo provedeno s neotřeným vzorkem

8.1.2 DSC testy

Jako doplňková metoda pro vyhodnocení strukturálních změn byly provedeny DSC testy. Měření bylo provedeno na přístroji NETZSCH STA 409 PC/PG s níže uvedenými nastavením podmínek. V příloze P_Obr8.1.2 je možno nahlédnout na graf průběhu ohřevu, DSC i TG v závislosti na čase.

Podmínky provedení DSC testů:

atmosféra: ochranná N₂

reference: prázdná

kelímek: DSC/TG pan Al (vrchní i spodní)

ohřev: 10 °C/min

rozsah ohřevu: 20 °C až 180 °C

ochlazení: 5 °C/min

ochlazení: 175 °C až -80 °C

Provedení experimentu

Ze vzorků byla pomocí ostrého nože odříznuta požadovaná vrstva materiálu, seříznuta na požadovanou velikost a hmotnost $14,7 \pm 0,5$ g. K zhodnocení materiálů byl použitý materiál získán ze středové oblasti válcových vzorků. U otřených vzorků byla použita tenká vrstva z otřené oblasti.

Srovnání UHMWPE materiálů

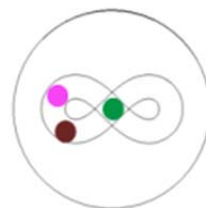
Pomocí DSC tesy byly srovnány vlastnosti crosslingovaného a necrosslingovaného UHMWPE.

P_Obr8.1.2.2 U necrosslingovaného materiálu byla naměřena teplota tání 143,9 °C a energie dodaná při tání 136 J/g a pro croslingovaný materiál teplota tání 144 °C a energie 122 J/g. Naměřená teplota základního necrosslingovaného materiálu ve srovnání s hodnotou uváděnou výrobcem [i13] je o 6,6 °C vyšší. Teplota tání je úměrná tloušťce a dokonalosti krystalických oblastí v polymeru [i17]. Experiment tedy prokázal dokonalejší strukturu crosslingovaného materiálu, tento výsledek odpovídá závěrům výrobce [i17].

Vyhodnocení vlivu otěru

Další experimenty byly zaměřeny pouze na crosslingovaný materiál se záměrem vyhodnotit vliv otěrového experimentu na jeho strukturu. První srovnání je provedeno za účelem posouzení vlivu otěrového experimentu na vlastnosti povrchové vrstvy materiálu u vzorku

typu váleček. P_Obr8.1.2.3 Z grafu je patrná nepatrně vyšší teplota tání a podobný tvar DSC křivky jako u neotíraného materiálu. Zajímavého výsledku dostáváme na základě druhého srovnání v grafu P_Obr8.1.2.4 Zde jsou vyobrazeny DSC křivky z materiálu získaného ve třech oblastech téhož vzorku C4 typu deska viz. obrázek Obr8.1.2.1. Dva odběry byly provedeny z oblouku osmičky kde dochází k jednosměrnému namáhání. Teplota tání takto získaných vzorků a tvar jejich DSC křivek je přibližně stejný a zároveň odpovídá teplotě a tvaru křivky vyhodnocené z otřeného válečku. Třetí odběr je z oblasti středu osmičky, kde je materiál namáhán ve dvou směrech a dá se očekávat efekt cross-shear. Tento vzorek vykazuje jednak nižší teplotu tání a zároveň jiný tvar DSC křivky, což může svědčit jednak o větší míře amorfní složky polymeru či menší dokonalosti krystalických oblastí. Důvodem těchto změn může být právě namáháním ve dvou směrech které způsobuje deformaci a natahování těchto krystalických oblastí nebo změna struktury spojená se vznikem tepla v průběhu otěru, které je ze středové oblasti hůře odváděno. V příloze P_Obr8.1.2.5 je pak srovnání DSC křivek ze středové oblasti osmičky pro tři různé desky. Zde je vidět, že v rámci třech otěrových experimentů došlo k ovlivnění DSC křivky v jiném rozsahu.



Obr8.1.2.1 Místa odměru materiálu pro DSC testy

8.2 Srovnání závěrů z obou experimentů a použitých metod

Delaminace

V rámci zkoušek na planetového tribometru se úspěšně povedlo vyhodnotit míru otěru a porovnat jednotlivé modifikace materiálů. Zároveň se však ukázalo, že u většiny vzorků docházelo k výslednému opotřebení právě vznikem, rozrůstáním a oddělováním lamin a to prokazatelně u čtyřech měření z osmi. Skutečnost, že tribometrické zkoušky s reálnými implantáty z těchto materiálů budou upřednostňovat stejné kombinace materiálů je tedy závislá na skutečnosti, že k tomuto jevu dochází i při experimentech se samotnými náhradami. Z měření na simulátoru KKK ELO 2007 se proces tvoření lamin nepovedlo jednoznačně prokázat vůbec a oblast s vytrkanými částicemi byla pozorována u jediného vzorku ze šestnácti mazaných vzorků. Tyto výsledky ukazují na skutečnost, že vznik lamin je značně ovlivněn tvarem povrchu třecí plochy, přičemž vzorek s větším zaoblením kontaktní plochy je k tvorbě lamin méně náchylný. Při vyslovení tohoto závěru je však nutné si uvědomit, že vzhledem k invertnosti tribologických úloh byl u planetového tribometru každý bod povrchu válečku vystaven po celou dobu podmínkám tribologického kontaktu. U zkoušek ze simulátoru byli jednotlivé body v tribologickém kontaktu pouze v určité fázi cyklu. V rámci dlouhodobějších experimentů by se tedy jev mohl ukázat i na vzorcích ze simulátoru. Zde si však dovolím poznamenat, že delaminace nebyla pozorována ani v případě trojnásobné doby otěru byť bylo měření aplikováno jen na jednom vzorku, což předpoklad vlivu tvaru plochy na jev delaminace potvrzuje. Při porovnání provedených experimentů se zkouškou s implantátem je nutné ještě upozornit na odlišný způsob pohybu vzorku. Oba typy experimentů provádí pouze posuv a rotaci, u reálných komponent je to hlavně kyv, rotace případně u kolenních náhrad i posuv. Skutečnost, že při testování náhrad opravdu dochází k delaminaci je popisována například v práci [c11], zde konkrétně pro testy s totální náhradou kolenního kloubu. Právě u těchto implantátů volba experimentu s vlivem delaminace pro porovnání vhodnosti materiálu se jeví výhodnější i s ohledem na větší radius povrchu kolenních náhrad.

Adheze

Jelikož se jedná o inverzní úlohy, i zde můžeme říci, že zatímco v případě simulátoru je otěr kovových kuželek realizován na celkově relativně malé oblasti, jelikož tato oblast je po dobu experimentu stejná (v případě zanedbání změny plochy kontaktu jako následku plastické deformace v průběhu experimentu), tak v případě planetového tribometru je celkově v kontaktu s polymerem značně větší plocha. Důvodem je posouvání konkrétní kontaktní oblasti v průběhu experimentu. Jak se prokázalo prohlédnutím kobalt-chrom-molybdenových vzorků pod mikroskopem, při otěru dochází k ulpívání UHMWPE v nerovnostech povrchu. Logicky se dá předpokládat, že na větší ploše disku je větší množství nerovností, které umožní větší míru adheze UHMWPE na povrchu disku. Kvalita a struktura povrchu disku se více promítne do výsledného otěru těchto vzorků. Výsledný otěr je rovněž více ovlivněn kvalitou provedení samotné výroby povrchu bez ohledu na technologii. To se

může projevit značným rozptylem naměřených dat u stejných materiálů za stejných podmínek, horší opakovatelností. Jelikož bylo pro účely této práce provedeno pouze jedno měření, není v rámci této práce míra opakovatelnosti prokázána. K rozptylu dat ale skutečně dochází. Celkem elegantním řešením by však mohlo být doplněním rysek na vzorky a na úchyty aby bylo možné vyjmout vzorky v průběhu otěru a převážít. Provedení více vážení v rámci jednoho otěrového experimentu by tak umožnilo získat průběh otěru a odstranit vliv prvotní fáze záběhu.

Inverze úloh

U planetového tribometru je otěr polymerních válečků realizován na celé ploše válečku po celou dobu experimentu. V případě simulátoru je v kontaktu větší plocha polymeru, ale konkrétní oblast jen v určitých fázích cyklu. Budeme-li uvažovat vliv nasákavosti u jednotlivých vzorků, bude větší přírůstek hmotnosti u vzorků s větší plochou na které je otěr realizovaný. Poměr otřené hmotnosti ku nasáknuté hmotnosti pak klesá a výsledný otěr bez korekce na nasákavost je zatížen značnou chybou. Výsledná změna hmotnosti v rámci experimentu vypovídá velikostně spíše o vlivu nasákavosti než otěru. Pro zvýšení tohoto poměru je pak nezbytné zvýšit velikost otěru ať již změnou tribologických podmínek (drsnost, tvar trajektorie, přítlak,...), což není vždy realizovatelné a z hlediska vazby parametrů na předpokládaného využití i mnohdy nevhodné, nebo prodloužení doby experimentu, což je finančně i časově náročné. Z tohoto pohledu se pro vyhodnocení otěru na polymerním materiálu ukazuje jako výhodnější jeho realizace na planetovém tribometru.

Z hlediska vyhodnocení otěru u kovového protikusu se jako výhodnější metoda ukazuje realizovat otěr na simulátoru. Vzhledem k velké hmotnosti disků je provedení přesného vážení hůře realizovatelné a nebylo proto provedeno. Dá se však předpokládat, že větší množství částic připečených na povrchu disku by vypovídalo spíše o otěru polymeru než samotného disku. Aby bylo možné získat skutečný úbytek hmotnosti na kobalt-chrom-molybdenovém protikuse bylo by nutné napečený polymer odstranit. Zvážením CoCrMo vzorku před a po tomto procesu by navíc umožnilo získat informaci o konkrétní míře adheze u jednotlivých vzorků.

9. Závěr

Povedlo se zpracovat dvě sady experimentů u nichž byl posouzen charakter opotřebení. Rovněž byly vyhodnoceny změny hmotnosti následkem otěru. Výsledky experimentu značně ovlivnila nasákavost UHMWPE. Zhodnocení tribologických materiálů tedy bylo provedeno pouze srovnáním naměřených dat, nikoliv vyhodnocením otěru. V první sérii testů na planetovém tribometru se jako nejvhodnější dvojice materiálu ukázala kombinace CoCrMo s dotací titanem crosslingovaného UHMWPE. Při otěrových experimentech na simulátoru KKK ELO2007 byla jako nejlepší varianta zvolena kombinace kovaného CoCrMo a crosslingovaného UHMWPE

Zdroje:

[k1] Tribológia, Ing. Pavel Blaškovič, CSc, Doc. Ing. Josef Balla, CSc, Ing. Marián Dzimko, CSc, Vydavateľstvá Alfa, Bratislava 1990, ISBN 8005006330

[k2] TRIBOLOGIE, Doc. Ing. Jan Bečka, CSc, Vydavateľstvá ČVUT Praha 1997, ISBN 8001016218

[k3] Tření a opotřebenění součástí, M. Vocel a kolektiv, 1976 Praha SNTL

[k4] Experimental Methods in Tribology, Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor, Grazyna B. Stachowiak, ELSEVIER May 2004, ISBN 978-0-444-51589-6

https://books.google.cz/books?id=xfuAD1iSQ_0C&pg=PA29&lpg=PA29&dq=Bowden+Leben+Cameron-Mills&source=bl&ots=hLB3TwAjjR&sig=cF6_UxzGsdSG_-SEuTBWZ-9ttrY&hl=cs&sa=X&ei=SVm-VLSTLdXvavmHgbAL&ved=0CCMQ6AEwAA#v=snippet&q=ring%20on%20ring&f=false

[k5] DOWSON, D.: *History of tribology*, 1998 Wiley. 768s. ISBN: 186058070X

[k6] HLAVIČKA, Alois., BĚLAŘ, Antonin., KRMEŠSKÝ, Julius., ŠPELDA,

Antonin. Fyzika pro pedagogické fakulty. Praha: SPN, 1971

[k7]

[c1] Tribologická analýza PIN-ON-DISC / PIN-ON-DISC tribological test, A. Kříž, Hradec nad Moravicí, METAL 2004

http://www.ateam.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf

[c2] c11

[c3] c12

[c4] *Konstrukce tribometru pro studium vlivu opotřebenění*, J. TATÍČEK, Brno, Vysoké učení technické v Brně 2013

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64219

[c5] Přehledsoučasných metod a zařízení pro měření koeficientu tření v mazaném kontaktu třecích povrchů, V. Nešpor, Brno, Vysoké učení technické v Brně 2011

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40449

[c6] Fyzika tření, J. Janík, Brno, Masarykova Univerzita 2008

http://is.muni.cz/th/199446/pedf_b/Fyzika_treni.pdf

[c7] LORD, J. a R. LARSSON. Effects of slide–roll ratio and lubricant properties on

elastohydrodynamic lubrication film thickness and traction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part J*. 2001, č. 215.

[c8] Contact-evolution based prediction of fratingfatigue life: Effect of slip amplitude, J.J. Madge, S.B.Leen, I.R. Mccoll, P.H. Shipway, Elsevier B. V. 2006

[c9] Současné poznatky o vlivu technologie výroby a sterilizace na strukturu, vlastnosti a životnost UHMWPE v kloubních náhradách, D. Pokorný, M., M. ŠLOUF, P. FULÍN Praha, I. Ortopedická klinika 1. LF UK Praha, FN Motol a Ústav makromolekulami chemie AV ČR 2012

http://www.achot.cz/dwnld/achot_2012_3_213_221.pdf

[c10] Řízení přístroje pro testování umělých kloubních náhrad, M. Mezera, České vysoké učení technické v Praze 2009

[c11] Realistická simulace otěrové tribologie velkých lidských kloubů Realistic simualtion of wear tribology of human joints : disertační práce, L. Franta, Praha 2010, České vysoké učení technické v Praze. Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky,

[c12] Mechanické vlastnosti slitiny CoCrMo pro ortopedické implantáty, V. Haiblíková, Praha, KMAT FJFI ČVUT 2013

[c13] ČELNÍ OZUBENÁ KOLA Z PLASTŮ/PLASTIC SPUR GEARS, J. Jordán, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ 2008

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5746

[i1] http://www.cetr.com/ASTM_Standard/ASTM_G132-96.htm

[i4] http://www.inspectionengineering.com/Bruker_Tribology.htm

[i5] http://www.me.udel.edu/research_groups/lu/research.htm

[i6] <http://www.tribology-abc.com/sub5.htm>

[i7] <http://www.npi-lube.com/wearlife.html>

[i8] <http://www.bruker.com/>

[i9] <https://tribology.wordpress.com/2012/01/10/lubricant-testing-evaluating-tribological-behavior-of-lubricating-oils-and-greases/>

[i10] <http://www.phoenix-tribology.com/cat/at2/index/prodlistcontact.htm>

[i11] <http://www.lehigh.edu/~intribos/tribodesign.html>

[i12] http://www.dviaviation.com/Wear_Friction_Testing.html

[i12]

http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjZi8-XhJHKAhWmD3IKHRcqDvkQFggcMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.kod.tul.cz%2Fpredmety%2FSTE%2Fdalsi_podklady%2FSTE-04-samostatn%25C4%259B%2520-m%25C4%259B%25C5%2599en%25C3%25AD%2520t%25C5%2599en%25C3%25AD.doc&usg=AFQjCNGKdqs49we2V9el0Tfy1lsfTj_OfA

[i13] <http://www.quadrantplastics.com/eu-en/products/meditech-R-life-science-grades/implantable-polymers.html>

[i14] [http://www.hipolymers.com.ar/pdfs/gur/disen/GUR%20\(PE-UHMW\).pdf](http://www.hipolymers.com.ar/pdfs/gur/disen/GUR%20(PE-UHMW).pdf)

[i15] <http://www.makeitfrom.com/material-properties/UNS-R30075-ASTM-F75-ISO-5832-4-Co-Cr-Mo-Alloy>

[i16] http://degradace.tf.czu.cz/Dgrd_txt/Mngr_ram_txt2.htm

[i17] <http://www.beznoska.cz/wp-content/uploads/2013/11/000870.pdf>

[i18] http://old.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_souborfe1c.pdf?id=266

[i19] <http://zdravi.e15.cz/clanek/priloha-lekarske-listy/totalni-endoproteza-kycelniho-kloubu-137777>

[i20] <http://www.tribune.cz/clanek/4216-operaci-kycelniho-kloubu-podstupuje-v-cr-rocne-zhrubalidi>

[i21] <http://www.darkov.cz/o-nas/pise-se-o-nas-ze/reoperace-umelych-kloubu-za-posledni-dekadu-staly-pres-miliardu.aspx> (4.5.2013)

[i22] <http://zdravi.e15.cz/clanek/priloha-lekarske-listy/totalni-endoproteza-kycelniho-kloubu-137777> (4.5.2013)