

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ



DISERTAČNÍ PRÁCE

2010

ING. LENKA PFEFFEROVÁ

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra materiálu



Disertační práce

**Analýza tribologických vlastností
keramických materiálů**

Ing. Lenka Pfefferová

2010



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálu

Studijní program: P2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3911V011 Materiálové inženýrství

Analýza tribologických vlastností keramických materiálů

Tribological properties analysis of ceramics

Ing. Lenka Pfefferová

Školitel: Doc. Ing. Karel Daďourek, CSc.

Externí školitel: Ing. Daniel Šída, PhD.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	105
Počet obrázků:	54
Počet tabulek:	10
Počet grafů:	27
Počet příloh:	4

V Liberci, dne 21. 12. 2010



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálů

Studentská 2, 461 17 Liberec, Tel: 48 535 3236, Fax: 48 535 3535

ANOTACE

Jméno: Pfefferová Lenka, Ing.
Fakulta: Strojní – Katedra materiálů
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství
Téma disertační práce: Analýza tribologických vlastností
keramických materiálů
Školitel: Doc. Ing. Karel Dad'ourek, CSc.
Externí školitel: Ing. Daniel Šída, PhD.

Tato disertační práce se zabývá podrobným studiem tribologických vlastností specifického systému, který reguluje ve vodovodních bateriích teplotu a množství průtoku pitné vody vzájemným rotačním vratným pohybem destiček z korundové keramiky. Dále je zkoumáno využití získaných výsledků při kontrole kvality termostatických ventilů. V současné době je v rámci kontroly jakosti většina tribologických analýz prováděna metodou Pin on disk. Tato metoda ovšem pro daný systém pohybu korundových destiček není ideální. Testování tribologických vlastností bylo tedy v souladu s reálným pohybem destiček prováděno metodou Pin on disk s vratným pohybem pro doplnění chybějících informací o tomto konkrétním systému pohybu. Byla dopracována a rozšířena metodika vyhodnocení koeficientu tření (vliv rychlosti zatěžování) a metodika k hodnocení opotřebení z experimentu Pin on disk s vratným pohybem.

Klíčová slova: Tribologie, Oxidová keramika, Metodika, Pin on disk, Korund



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálů

Studentská 2, 461 17 Liberec, Tel: 48 535 3236, Fax: 48 535 3535

ANNOTATION

Name:	Pfefferová Lenka, MSc.
Faculty:	Mechanical – Department of material science
Specialization:	Mechanical engineering
Focusing:	Material engineering
Theme of thesis:	Tribological properties analysis of ceramics
Leader of thesis:	Doc. Ing. Karel Daďourek, CSc.
External leader:	Ing. Daniel Šída, PhD.

The aim of this dissertation thesis is a detailed study of tribological properties for a particular system. This system regulates a temperature and a flow quantity of drinking water by mutual rotary motion reciprocating of alumina. Further is investigated an utilization of obtained outcomes for a quality control of a thermostatic valves. Currently is within the quality control provided most of tribological tests by Pin on disc. This method is not ideal for testing of this system. Because of that was the testing of tribological properties according to the real motion of pellets made by a method Pin on disk reciprocating to fill missing informations about this particular system of movement. In this work was completed and expanded a methodology for evaluation of friction coefficient (influence of loading rate) and methodology for classification of wear from the experiment Pin on disk reciprocating.

Keywords: Tribology, Oxide ceramics, Methodology, Pin on disc, Alumina



Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat náhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím disertační práce a externím vedoucím disertační práce.

Datum: 21. 12. 2010

Podpis:

Velice děkuji Doc. Ing. Karlu Dad'ourkovi CSc. za trpělivost, cenné rady a za čas, který mi věnoval. Rovněž děkuji Ing. Danielu Šídovi PhD. za podnětné připomínky a poskytnutí informací.

Kromě toho děkuji všem, kteří přispěli ke vzniku této práce a jejichž rady byly velmi přínosné, zejména: Prof. Jamalu Takadoumovi a Ing. Miroslavu Liškovi.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala svým rodičům za pomoc a podporu během mého studia a vytváření této práce.

Obsah disertační práce:

Úvod	12
------------	----

Dosavadní stav

2. Oxidová keramika	13
2.1 Rozdělení a vlastnosti oxidové keramiky	14
2.1.1 Korundová keramika	15
2.2 Materiálové vlastnosti s ohledem na tribologii	19
3. Tribologie	20
3.1 Teorie tření	21
3.2 Průběh opotřebení povrchu	25
3.3 Tribologické zkoušky	27
3.3.1 Rozdělení a princip tribologických zkoušek	28
3.3.1.1 Pin on disk	32
3.3.1.2 Pin on disk s vratným pohybem	35
3.4 Vliv substrátu a technologického postupu na tribologické vlastnosti	38
3.5 Maziva	42

Experimentální část

4. Zkušební vzorky	45
5. Studie a zkoušky	45
5.1 Rentgenová difrakce	46
5.2 Houževnatost trhliny materiálu	47
5.3 Mikrotvrdost materiálu	49
5. 4 Drsnost materiálu	51
5.4.1 Měření a zobrazení drsnosti	51
5.4.2 Závěry z měření a zobrazení drsnosti	60

5.5 Tribologické zkoušky materiálu.....	61
5.5.1 Tribologické zkoušky za sucha	62
5.5.2 Tribologické zkoušky s vodou.....	66
5.5.3 Porovnání tribologických vlastností.....	69
5.5.3.1 Koeficient tření.....	69
5.5.3.2 Opotřebení.....	77
5.5.3.3 Analýza vynesných částic.....	83
6. Vliv kvality povrchu na tribologické vlastnosti.....	86
6.1 Mikrostruktura materiálu	86
<i>Závěr</i>	89

Seznam použitých symbolů

Symbol	Název	Jednotka
μ	součinitel tření	[1]
μ_s	statický koeficient tření	[1]
μ_d	dynamický koeficient tření	[1]
μ_{sm}	koeficient kluzného (smykového) tření	[1]
μ_v	koeficient valivého tření	[1]
ρ	hustota	$[g \cdot cm^{-3}]$
η	viskozita maziva	$[Pa \cdot s]$
ω	úhlová rychlost smyku	$[s^{-1}]$
ν (ν_1, ν_2)	Poissonův poměr (různé materiály)	[1]
2θ	difrakční úhel	$[^\circ]$
a_H	poloměr vzniklého kruhového vtisku	[m]
C	délka trhliny	$[\mu m]$
d	průměr zrna	$[\mu m]$
d_r	difrakční intenzita	$[A^\circ]$
E	modul pružnosti	[GPa]
E'	redukovaný modul pružnosti materiálu	[GPa]
E_1, E_2	Youngův modul pružnosti (různé materiály)	[GPa]
F	zatěžující síla	[N]
F_N	normálová síla	[N]
$F_{N'}$	normálová síla (posunutá)	[N]
F_T	třecí síla	[N]
h	hloubka opotřebování destičky	$[\mu m]$
H, HV	tvrdost dle Vickerse	[1]
K_c	lomová houževnatost	$[MPa \cdot m^{1/2}]$
K_{oho}	horní odhad opotřebování s vodou při zatížení blízké se nule	$[\mu m^3/mapa]$
l	délka kluzné dráhy	[m]
l'	délka kluzné dráhy (kratší o 10 % délky)	[mm]
l_1	délka kluzné dráhy při statickém koeficientu tření	[m]
l_2	délka kluzné dráhy při dynamickém koeficientu tření	[m]

l_c	délka kluzné dráhy za jeden cyklus	[m]
M_T	třecí moment	[N/m]
$n (n_1, n_2)$	otáčky (různá tělesa)	[1]
n_z	počet cyklů životnosti	[1]
p_{max}	Hertzův tlak (maximální přítlak)	[MPa]
p_d	reálný přítlak destiček	[MPa]
p_o	vynesená plocha opotřebením za 1 cyklus	[mm ²]
p_v	nanesená plocha opotřebením za 1 cyklus	[mm ²]
r	poloměr pinu	[mm]
r_t	poloměr zakřivení těles	[m]
R_a	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu (2D)	[μm]
R_f	pevnost v ohybu	[Mpa]
R_{pt}	pevnost v tahu	[MPa]
R_{pd}	pevnost v tlaku	[MPa]
S_a	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu (3D)	[μm]
S_{ku}	špičatost posuzovaného profilu	[1]
S_p	maximální výška výstupku	[μm]
S_q	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
S_{sk}	šikmost posuzovaného profilu	[1]
S_v	maximální hloubka prohlubně profilu	[μm]
S_z	výška nerovností profilu z deseti bodů	[μm]
S_H	plocha kruhového vtisku	[μm ²]
v_{max}	maximální rychlost posuvu Pinu	[mm/s]
v_{min}	minimální rychlost posuvu Pinu	[mm/s]
$v_{prům}$	průměrná rychlost posuvu Pinu	[mm/s]
V_m	objem vznesených částic	[mm ³ /m]
V_n	objem nanesených částic	[mm ³ /m]

1. Úvod

Využití nových keramických materiálů v různých odvětvích současné technologie vede ke zlepšování funkčnosti, kvality a výkonu strojírenských součástí a systémů (Czichoz H., 1995).

Keramické materiály mají stejně jako všechny ostatní materiály své specifické vlastnosti. U keramiky je to především její vysoká teplota tavení, vysoká tvrdost, unikátní elektrické vlastnosti i to, že je antikorozní. Je proto široce využívána jak v chemickém, strojním a elektrotechnickém průmyslu, tak ve zdravotnictví a dalších oblastech. Na finální výrobky jsou stále vyšší technické a užitné nároky, které jsou přímo závislé jak na kvalitě surovin (prášků a jejich granulace), jejich zpracování i konečné kontroly. Díky tomu se snižuje počet vad finálních výrobků a zvyšuje produktivita. Ztráty způsobené nesprávnou aplikací tribologických zásad se v průmyslově vyspělých zemích odhadují na 30% vyrobené energie. Kvůli škodám z opotřebování se vyřazuje 80 – 90% strojů (Štěpina V. et al, 1985), přičemž dochází k opotřebovávání jen tenkých povrchových vrstev.

Tato disertační práce byla zpracovávána pro firmu Saint-Gobain Ceramics v Turnově, která se zabývá jak výrobou těsnících destiček do vodovodních baterií a termostatických ventilů, tak keramických řezných destiček pro obrábění, keramických filtrů pro slévárenství, součástek z elektrokeramiky, či prototypů z High-Tech keramiky.

Cílem práce je podrobné studium tribologických vlastností specifického systému, který reguluje ve vodovodních bateriích teplotu a množství průtoku pitné vody vzájemným rotačním vratným pohybem destiček z korundové keramiky. Dále bude zkoumáno využití získaných výsledků při kontrole kvality termostatických ventilů. Práce je zpracovávána ve spolupráci s firmou Saint-Gobain Advanced Ceramics jako monopolního výrobce těchto korundových destiček a L'école Nationale Supérieure de Mécaniques et Microtechniques de Besançon.

V současné době je v rámci kontroly jakosti většina tribologických analýz prováděna metodou Pin on disk. Tato metoda ovšem pro daný systém pohybu korundových destiček není ideální. Tribologické vlastnosti nejsou materiálové, ale technologické vlastnosti, a proto je potřeba podmínky měření maximálně přiblížit reálným provozním podmínkám. Testování

tribologických vlastností bylo tedy v souladu s reálným pohybem destiček prováděno metodou Pin on disk s vratným pohybem pro doplnění chybějících informací o tomto konkrétním systému pohybu.

2. Oxidová keramika

Keramika je obecně rozdělena na:

- Keramiku v soustavě $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$
(Steatitová, Cordieritová, Forsteritová)
- Oxidovou keramiku
(Korundová, Zirkoničitá, ...)
- Keramiku na bázi karbidů a nitridů
- Rutilovou keramiku
- Keramiku na bázi titaničitů
- Feritovou keramiku
- Supravodivou keramiku

Pod pojmem *oxidová keramika* rozumíme materiály tvořené jedním oxidem nebo směsí několika málo oxidů. Všechny tyto materiály mají jako základní výchozí látku syntetický práškový oxid definovaných vlastností.

Příprava směsí oxidové keramiky probíhá suchým, či mokřým mletím. V této fázi je podstatné minimalizovat znečištění nežádoucími látkami. Suchým lisováním, plastickým způsobem (s přidáním organických plastifikátorů), či litím ze suspenze do sádrových nebo polymerních forem se provádí tvarování (Hanykýř V. et al., 2000.) Poté dochází ke slinování za vysoké teploty. Výsledkem je hutný, jemnozrný polykrystalický materiál, stabilní za vysokých teplot v oxidační atmosféře s vysokou mechanickou pevností.

V oxidové keramice tvoří krystalickou fázi $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Struktura korundu je tvořena z oktaedrů a tetraedrů $\text{OAl}_{4/6}$ (viz obr.1).



Obr. č. 1: Struktura $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

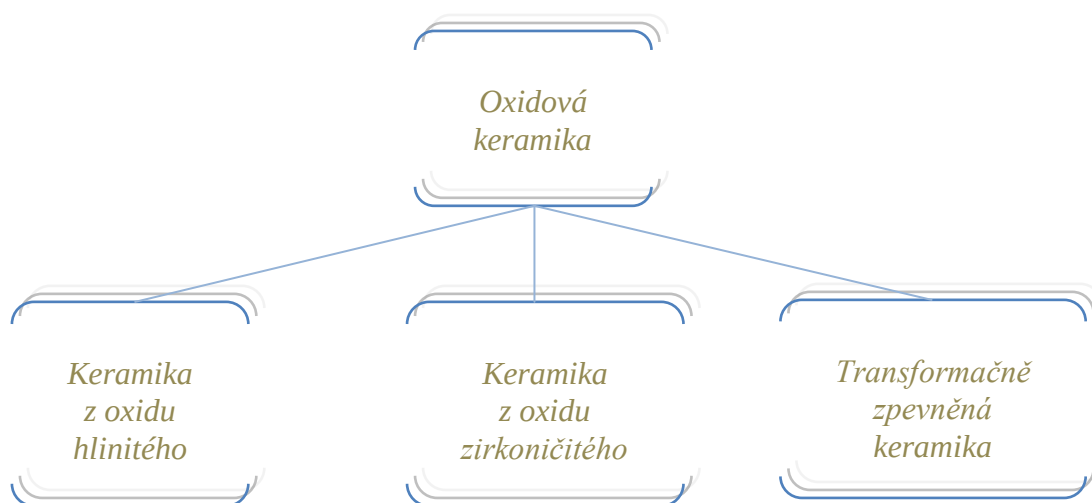
(šedě jsou označeny atomy hliníku, bílé atomy kyslíku (Matoušek J., 1992))

Použití oxidové keramiky je různé a pro dané použití je většinou možné využít několik druhů oxidových materiálů. Pro výběr toho nejvhodnějšího materiálu se vychází ze znalostí:

- podmínek použití (předpokládaných, daných)
- vlastností oxidových materiálů
- zpracovatelnosti na požadovaný materiál
- ceny a dosažitelnosti materiálu (Čech B. et al., 1966)

2.1 Rozdělení a vlastnosti oxidové keramiky

Oxidová keramika se rozděluje podle chemického složení:



Obr. č. 2: Rozdělení oxidové keramiky (Hanykýř V. et al. 2000)

Keramika z oxidu hlinitého (korundová keramika)

Korundová keramika se používá nejvíce nejen v rámci oxidové keramiky, ale keramiky obecně (Hanykýř V. et al. 1989). Keramika z oxidu hliníku nazývaná též korundová keramika je rozdělena do 4 skupin podle obsahu Al_2O_3 . Obsah oxidu hlinitého (a tím samozřejmě i příměsí) významně ovlivňuje vlastnosti korundové keramiky. Se snižujícím se obsahem oxidu hlinitého klesá součinitel délkové teplotní roztažnosti. Teplotní vodivost se stoupající teplotou, pórovitostí a s klesajícím obsahem Al_2O_3 se výrazně snižuje. Mechanická pevnost korundové keramiky spolu se zvyšujícím se obsahem Al_2O_3 a odpovídající mikrostrukturou stoupá. Youngův modul pružnosti je výraznou funkcí pórovitosti a se vzrůstající pórovitostí klesá lomová energie (Hanykýř V. et al. 1989).

Díky svým vlastnostem nachází korundová keramika využití velmi často na otěrových součástech, filtrech, pancéřování, membránách a používá se i pro biokeramické implantáty.

Keramika z oxidu zirkoničitého

Oxid zirkoničitý patří ke sloučeninám, které mají vysoký bod tání (nad 2500 °C). V přírodě se objevuje běžně a čistou formu oxidu zirkoničitého v přírodě nazýváme minerálem baddeleyitem (Čech B. et al., 1966). Polymorfismus oxidu zirkoničitého (ZrO_2) silně ovlivňuje použití tohoto oxidu (Hanykýř V. et al. 1989).

Keramika transformačně zpevněná

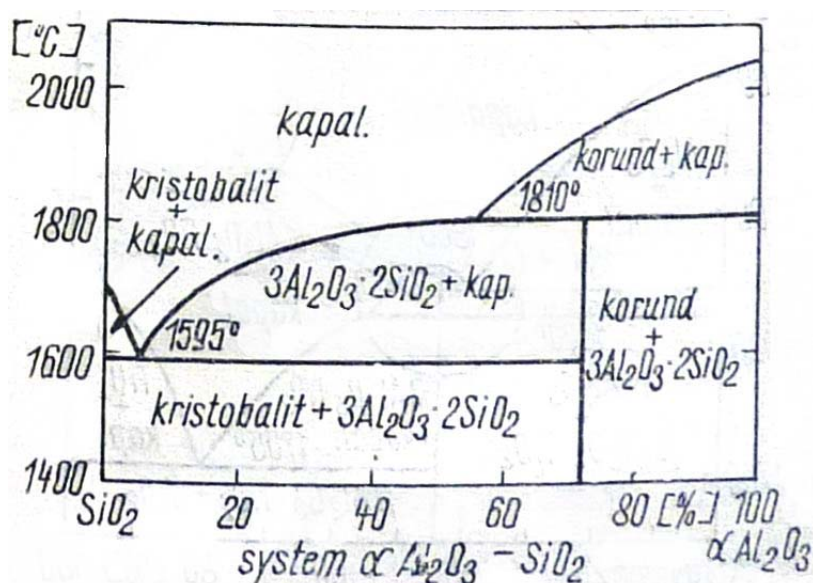
Transformačně zpevněná keramika využívá martenzitické přeměny ZrO_2 . Tím je možné příznivě ovlivnit mechanickou pevnost této keramiky, především její lomovou houževnatost (Hanykýř V. et al. 2000).

2.1.1 Korundová keramika

Hlavní složkou korundové keramiky je oxid hlinitý (Al_2O_3). Ten je v keramické technologii nejpoužívanějším oxidem (Hanykýř V. et al., 2000). Oxid hlinitý je podstatnou částí zemské kůry. Ta je složena z 50% SiO_2 a 25% Al_2O_3 . Vhodné fyzikální vlastnosti a snadná dostupnost Al_2O_3 byly již na začátku minulého století důvodem k jeho zpracování pro různé technické využití. V čisté formě se ovšem oxid hlinitý vyskytuje v přírodě sporadicky. Všechny ostatní korund je v přírodě vázán různých sloučeninách (hlinitokřemičitany, beztvaré a krystalické

oxidy hlinité – „bauxity“,...). Bauxit je v současné době pro výrobu Al_2O_3 prakticky jedinou surovinou (Čech B. et al., 1966).

Průmyslová výroba oxidu hlinitého spočívá ve zpracování přírodního bauxitu podle různě upraveného Bayerova postupu, či přípravy speciálních oxidů hlinitých pro keramiku, zajišťující vysoký obsah korundu tzv. mineralizací. Krystaly korundu připravovaného touto metodou mají destičkovitý tvar a podle podmínek se jejich velikost pohybuje v rozsahu $d = 5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$. Pomocí dalších postupů (např. tepelným rozkladem podvojného síranu hlinito - amonného) je možné získat velmi čisté oxidy hlinité.



Obr. č. 3: Systém $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (Bowen N., Greig J.)

Na rovnovážném diagramu je vidět jak je bod tání SiO_2 (1710°C) přidáváním $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ snižován až na hodnotu 1595°C . Obsah $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ je v této části je 6 %. To odpovídá prvnímu eutektiku tohoto systému. Zvyšujeme-li i nadále obsah $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, teplota tání příslušných směsí stoupá (nejdřív velice rychle, poté pozvolna). Průběh křivky likvidu nemá maximum. Při obsahu 55% $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ a teplotě 1810°C je na křivce zlom (peritektikum) a odpovídá druhému eutektiku. Poté křivka likvidu roste až do bodu tání Al_2O_3 .

Korundová keramika se podle obsahu Al_2O_3 se dělí do čtyř skupin:

- Keramika s obsahem 80 – 86 hmotn.% Al_2O_3
- Keramika s obsahem 87 – 95 hmotn.% Al_2O_3
- Keramika s obsahem 96 – 99 hmotn.% Al_2O_3

- Keramika s obsahem 99 hmotn.% Al_2O_3 a více

Jak je vidět v tabulce (Tab. č. 1) vlastnosti korundové keramiky jsou množstvím oxidu hlinitého silně ovlivněné.

Tab. č. 1: Vlastnosti korundové keramiky podle obsahu korundu (Hanykýř V. et al., 2000)

Vlastnost	Symbol	Jednotka	Hodnota při obsahu Al_2O_3 (hmotn.%)			
			80 - 86	87 - 95	96 - 99	>99
Hustota	ρ	gcm^{-3}	3,5-3,6	3,6-3,7	3,7-3,8	3,8-3,9
Modul pružnosti	E	GPa	200	300	400	400
Pevnost v ohybu	Rf	Mpa	200	250	280	300
Pevnost v tahu	Rpt	MPa	120	130	140	150
Pevnost v tlaku	Rpd	MPa	2000	2000	2000	3000
Tvrdost dle Vickerse	HV	-	1500	1500	1600	2000
Poissonův poměr	ν	-	0,23	0,23		0,23
Lomová houževnatost	K_C	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	3.4	3.4		4.5

Materiály mající nižší obsah oxidu hlinitého mají vyšší obsah SiO_2 , MgO a CaO ve formě spinelů a silikátů. Velmi podstatný je pro vlastnosti korundové keramiky je ovšem nejen obsah Al_2O_3 , ale též jeho mikrostruktura. Přidáním například MgO je možná blokáce nežádoucího růstu velkých krystalů na úkor menších. Velká zrna v matrici z malých zrn vedou k nižší mechanické pevnosti výsledného materiálu. Při normální teplotě mají jemnozrnné materiály vyšší mechanické vlastnosti, než hrubozrnné. Ovšem při vysokých teplotách klesá pevnost těchto materiálů daleko rychleji, než u hrubozrnných.

Al_2O_3 je velmi málo elektricky vodivý i při vyšších teplotách a je velice odolný vůči působení zásad a kyselin. Bohužel relativně nízká lomová houževnatost omezuje využití tohoto materiálu (Hanykýř V. et al. 1989).

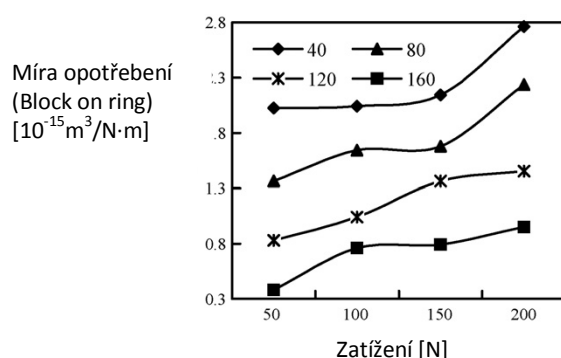
Se zvyšováním obsahu oxidu hlinitého mechanická pevnost a tvrdost korundové keramiky stoupá (Hanykýř V. et al., 2000).

Pro zjištění koeficientu tření byla testována metodou Block on ring 99,99% korundová keramika s velikostí zrna 0,5-1 μm . Materiál byl testován bez lubrikantu.

Tab. č. 2: Závislost koeficientu tření na rychlosti rotace a normálovém zatížení

Rychlost rotace [rpm]	Normálová síla [N]			
	50	100	150	200
40	0.7619	0.7475	0.7065	0.6630
80	0.7485	0.7236	0.6382	0.6238
120	0.7172	0.6780	0.6550	0.6005
160	0.6972	0.6164	0.5820	0.5391

Graf č. 1: Změna míry opotřebení s normálovým zatížením působící rychlostí



Převažující mechanismus opotřebení byl v tomto případě vzájemné spojování částic kombinované s mikro-trhlinami a vytrháváním mikro-zrnek materiálu (Liu CH. et al., 2008).

V dalším případě byl koeficient tření zjišťován metodou Ball on block při oscilujícím smykovém pohybu. Byla testována destička z běžně dostupného korundu vůči korundové kuličce o průměru 10 mm. Testování probíhalo při teplotě 28 °C a relativní vlhkosti 50%RH. Výsledný koeficientu v tomto případě vychází v rozmezí od 0,65 do 0,72 (Zum Gahr K.-H. et al., 1999).

Při testování 99,7% korundové keramiky metodou Ball on plate (smykový pohyb) při malé tangenciální rychlosti 8,3 μm/s vyšel statický koeficient tření (při zatížení 10N) leštěného vzorku kolem 1,5 a broušeného vzorku kolem 1,75 (Hwang D.- H. et al., 2003). V tomto případě se při statickém zatížení vytváří určitá skutečná plocha dotyku. Začíná působit rostoucí tečná síla, narůstá dotyková plocha a dojde k mikroposuvům těles. Narůstá třecí odpor a ve chvíli, kdy mikroposuv přejde na makroposuv začíná klouzání. Statický koeficient tření je maximální dosažený třecí odpor (Oliva V. et al., 1978).

Při měření metodou Pin on disk je koeficient tření naměřen v rozmezí od 0,49 do 0,55 (Novak S. et al., 2001). Testování probíhalo ve vodní lázni, při zatížení 50 N po dobu 2 hodin.

2.3 Materiálové vlastnosti s ohledem na tribologii

Tvrdost

Díky malému objemu prostorové mřížky a vysokého mocenství Al, patří α - Al_2O_3 k velmi tvrdým materiálům. Vzdálenost atomů korundu v prostorové mřížce je ze všech kyslíčnicků trojmocných kovů (Fe_2O_3 , Cr_2O_3) nejmenší a korund je z nich také nejtvrdší.

Tvrdost korundové keramiky je závislá na kyslíčnicku použitém při výrobě, jeho zrnitosti, dokonalosti slinutí a na porózitě zkoumaného vzorku. Zvýšení tvrdosti základního korundového zrna celkovou tvrdost slinutého tělesa významně nezvýší, jelikož zde působí více faktorů. Vliv velikosti základního zrna na výslednou tvrdost vzorku je daleko podstatnější. Důležitý je též tepelný režim slinování, který může tvrdost negativně ovlivnit pokud:

- je překročena teplota a optimální doba slinování čímž nastala rekrytalizace zrn
- nedošlo k dosažení optimální teploty a slinutí nenastalo, čímž soudržnost krystalů není dostatečná

Tvrdost slinutého tělesa ovlivňuje též porózita. Póry v místě měření tvrdosti způsobují vydrolování a měřená hloubka vtisku je o to větší. To snižuje naměřenou tvrdost (Černý V., 1964).

Chemická stálost

Korundová keramika je chemicky stálá. Pokud porovnáme vlastnosti dalších kyslíčnicků, které jsou zpracované keramickou technologií, slinutý korund je díky svým vlastnostem jeden z nejstálejších materiálů.

Inertnost v tribologickém prostředí

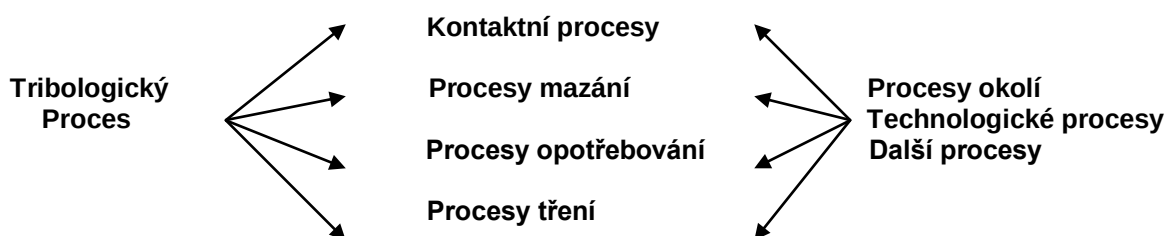
V průmyslu se korundová keramika často využívá pro tvrdost a otěruvzdornost i při vyšších teplotách (korund má vysokou odolnost ke změnám teploty). Slinutý korund má vysokou pevnost (Černý V., 1964).



3. Tribologie

Tribologie je vědní disciplínou o tření, opotřebení a mazání aplikovanou na pohybující se styky mezi tělesy. Zahrnuje v sobě fyzikální, chemické a materiálové poznatky. Cílem je především snížení tření, opotřebení a snížení energetických ztrát (Šťáva P. et al., 2006).

Na tribologický proces mají vliv materiálové interakce třecích těles, látky mezi povrchy a samotné okolí. Vzájemné vazby mezi částmi v tribologickém procesu jsou znázorněny v obr. č. 4.



Obr. č. 4: Vazby v tribologickém systému

Interakce povrchů

Při kontaktu povrchů je důležité počítat s materiálovými i tvarově-rozměrovými vlastnostmi vzájemně se stýkajících ploch, jejich reakcemi a vazbou mezi nimi (fyzikální, materiálovou, chemickou, atd.). Díky tomu je nutné uvažovat nad těmito vlivy:

- Makrogeometrie a mikrogeometrie stýkajících se ploch
- Rozměr ploch při kontaktu
- Mechanické, fyzikální, chemické vlastnosti těles
- Charakteristický druh deformace mezi tělesy
- Typ a rychlost vzájemného relativního pohybu

„Hlavní úlohou tribologie je zajistit, aby vzájemný pohyb povrchů v přítomnosti i nepřítomnosti maziva se děl s nejmenší ztrátou energie a materiálů.“ (Štěpina V. et al., 1985).

3.1 Teorie tření

Tření je přírodní proces, který je vázán na vzájemný relativní pohyb stýkajících se prvků v tribologickém systému. Jsou se dva pohledy výzkumu v závislosti na hloubce zkoumání třecích ploch:

- makromodel – zohlednění celého systému, získáváme údaje z vnějších měřitelných veličin tribologického systému (třecí síla při tangenciálním pohybu, třecí moment při rotačním pohybu, třecí práce)
- mikromodel – na tření se nahlíží jako na elementární proces

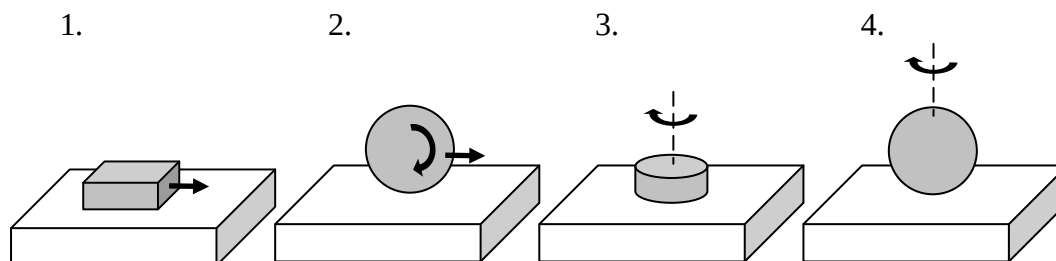
Nejznámější obecná definice tření říká:

„Tření je odpor proti relativnímu pohybu mezi dvěma k sobě potlačovanými tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů v tangenciálním směru.“ (Vocel, et al., 1976)

Tato definice popisuje vnější tření, ale nevystihuje už tření vnitřní. Proto je nová definice, která říká:

„Tření je ztráta mechanické energie při pohybu navzájem se dotýkajících materiálových oblastí.“ (Vocel, et al., 1976)

Aby bylo tření možno klasifikovat, je podstatný relativní pohyb funkčních povrchů (obr. č. 5). Rozlišujeme tedy tření, které vzniká při kluzném (smykovém) pohybu dvou těles (1), valivé tření při odvalování těles (2) a jejich kombinaci - valivé tření s větším, či menším prokluzem funkčních povrchů.



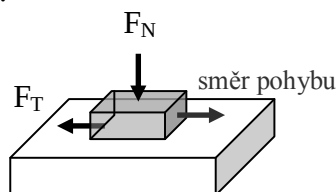
Obr. č. 5: Ukázky relativního pohybu těles

Mimo prokluzu při valivém tření jsou i případy nerovnoměrného prokluzu při kluzném tření (Vocel, et al., 1976). Tento případ nastane, pokud jsou různé kluzné rychlosti u stýkajících se

povrchů. Velikost prokluzu je přímo závislá na vzdálenosti od osy rotace (3). Speciálním případem je vrtné tření (4). Nastává, pokud dojde ke styku těles v ose rotace. V tomto místě je teoreticky nulová relativní rychlost.

Pomocí následujících vztahů můžeme vyjádřit tření jako odpor proti pohybu vznikající mezi dvěma tělesy v oblasti jejich dotyku.

Kluzné (smykové) tření:



Obr. č. 6: Model kluzného (smykového) tření (Oliva V. et al., 1978)

$$F_T = \mu_{sm} \times F_N \quad \text{a} \quad \mu_{sm} = F_T / F_N \quad [1], [2]$$

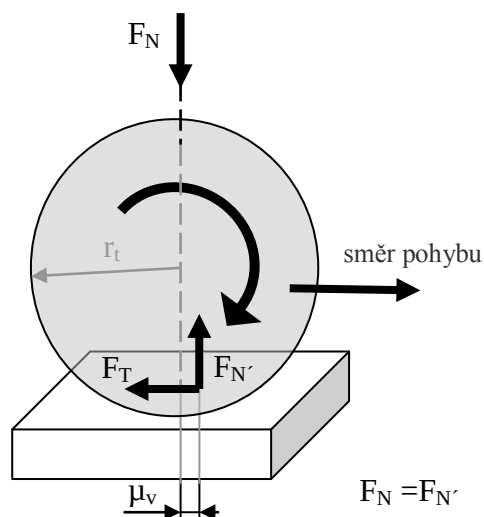
F_T - třecí síla [N]

F_N - kolmé zatížení třecí plochy [N]

μ_{sm} - koeficient kluzného (smykového) tření

Jak je zde patrné, ukazatelem velikosti tření je koeficient tření jako poměr třecí síly ke kolmému zatížení třecích ploch (Štěpina V. et al., 1985).

Valivé tření:



Obr. č. 7: Model valivého tření (Oliva V. et al., 1978)

$$M_T = F_T \times r_t = \mu_v \times F_N \quad [3]$$

$$\mu_v = (F_T / F_N) \times r_t = M_T / F_N \quad [4]$$

M_T - třecí moment

μ_v - součinitel valivého tření

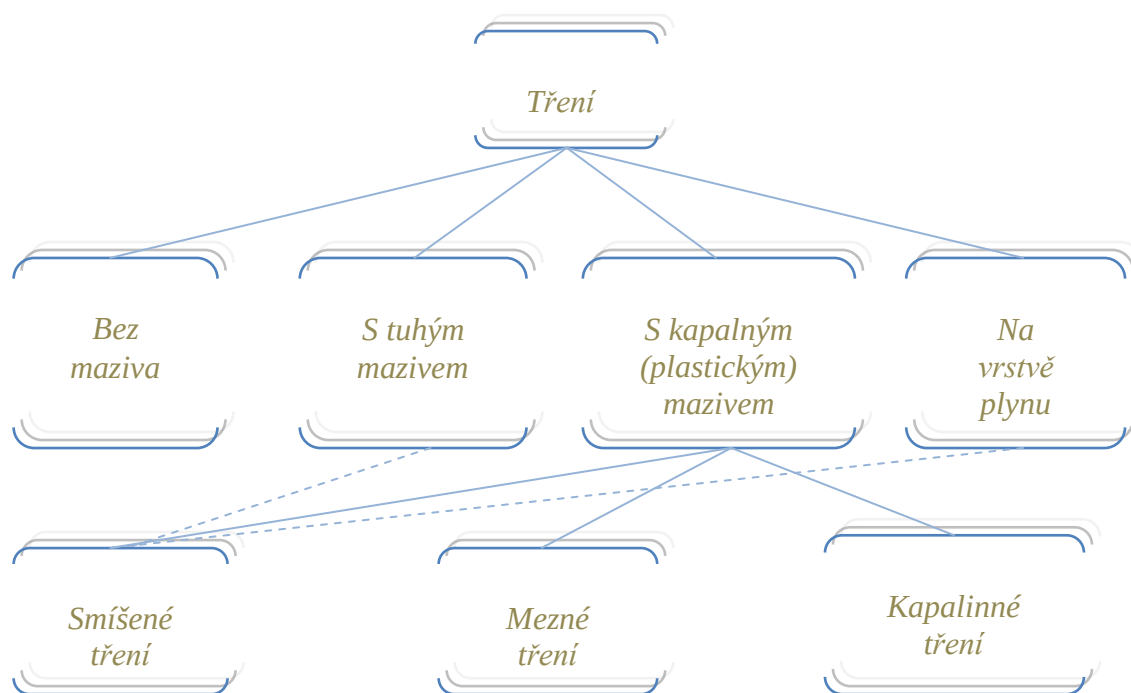
r_t - poloměr zakřivení tělesa

Z rovnic je patrné, že ukazatelem velikosti tření je zde součinitel tření jako poměr třecího momentu ke kolmému zatížení. Pro stejné materiály a zatížení jsou součinitele valivého tření menší, než součinitele smykového tření (Štěpina V. et al., 1985), (Oliva V. et al., 1978).

Při statickém tření (tření za klidu) dochází k odporu proti působení vnější síly, právě postačující k uvedení tělesa do pohybu. Jako dynamické tření, neboli tření za pohybu se označuje tření těles v relativním pohybu (Vocel, et al., 1976). Statické tření bývá větší, než dynamické, ale ostrý přechod mezi nimi není (Štěpina V. et al., 1985).

Vždy je nutné vztahovat součinitel tření k určité materiálové dvojici a kontaktním podmínkám tření. Velikost tohoto součinitele závisí na řadě faktorů, ovšem nejvíce je ovlivněna čistotou kluzných povrchů (Oliva V. et al., 1978).

Vycházíme-li ze základního tribologického systému, nastává několik základních stavů tření:



Obr. č. 8: Rozdělení tření podle média ve styčné ploše (Vocel, et al., 1976)

Na obrázku (viz obr. 8) je znázorněno rozdělení tření podle toho, zda je mezi styčnými povrchy mazivo, či jiná látka nebo jde o dotyk tuhých těles bez maziva.

Tření bez maziva (suché tření)

Toto tření nastává při dotyku suchých povrchů dvou těles, které jsou v relativním pohybu (Štěpina V. et al, 1985).

Suché tření má aspekt deformační, kde se víc uplatňuje mechanika a aspekt adhezní, kde se více uplatňuje chemie. Oba dva ovlivňují vlastnosti povrchů - topografie, velikost povrchu, tepelné a mechanické vlastnosti, chemické složení včetně nečistot, adsorbovaných, reakčních a nanesených tuhých vrstev a chemická reaktivita.

Tření kapalinné

O kapalinném tření mluvíme, jsou-li povrchy při tření odděleny vrstvou maziva nebo jiného kapalného média.

Tření plynné

Tření plynné je podobné kapalinnému tření, s tím rozdílem, že charakteristická vrstva, má vlastnosti plynu.

Mezné tření

Mezné tření nastává mezi suchým a kapalinovým třením (Šťáva P. et al., 2006) Jedná se o limitní případ kapalinného tření, při kterém se vlastnosti tenké vrstvy kapaliny liší od jejich objemových vlastností.

Smišené tření

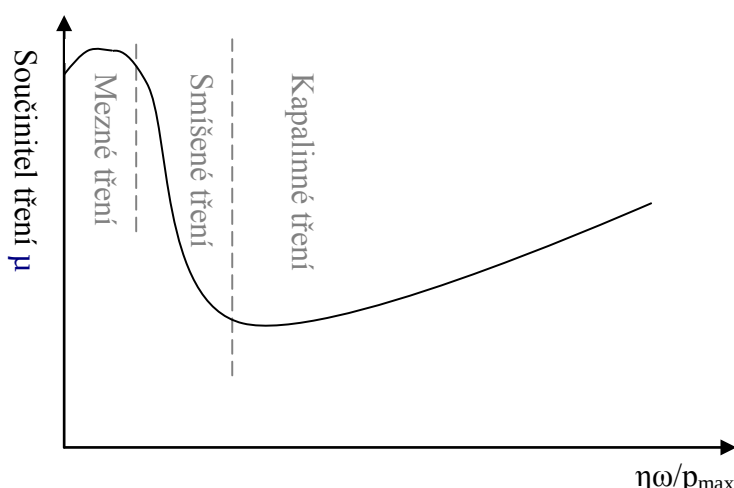
Pokud dochází za přítomnosti maziva k občasným dotykům povrchových mikronerovností stýkajících se těles, nazýváme toto tření smíšené (Vocel, et al., 1976).

Jednotlivé třecí stavy se většinou samostatně nevyskytují, ale nastává jejich kombinace.

Stribeckův diagram (obr. č. 9) znázorňuje závislost mezi jednotlivými typy tření. Ukazuje závislost třecího součinitele μ na bezrozměrném součiniteli $\frac{v}{v_{max}}$, který se nazývá Gumbelovo číslo. Gumbelovo číslo zahrnuje viskozitu maziva a úhlovou rychlost smyku

vyjádřenou jako frekvenci [s^{-1}] ω a maximální přítlak p_{max} , což je tlak na jednotku geometrického povrchu [Pa]. S rostoucím Gumbelovým číslem se přechází z oblasti suchého tření ($\eta\omega/p_{max}=0$) do oblasti mezního tření s tloušťkou tekutinového filmu blízkému se nule, oblasti smíšeného tření, kdy film tekutiny má tloušťku přibližně rovnou drsnosti profilu povrchu a kapalného tření, kdy film tekutiny je silnější, než nejvyšší hroty drsného profilu (Šťáva P. et al., 2006; Štěpina V. et al, 1985).

V případě použití korundových destiček v kartuši je mazivem voda, jejíž viskozita je 1000 [Pa·s], úhlová rychlost smyku pohybujících se destiček při testování je (rychlost je rovna 96mm/min $\sim f = 0,015 [s^{-1}]$) a maximální přítlak destiček ve vodovodní kartuši je 0,316 MPa. V případě testování korundových destiček vychází Gumbelovo číslo 0,000047 a drsnost povrchu je $Sa = 0,000021$ m. V tomto případě se tedy jedná o tření smíšené (Štěpina V. et al, 1985).



Obr. č. 9: Stribeckův diagram (Šťáva P. et al., 2006)

3.2 Průběh opotřebení povrchu

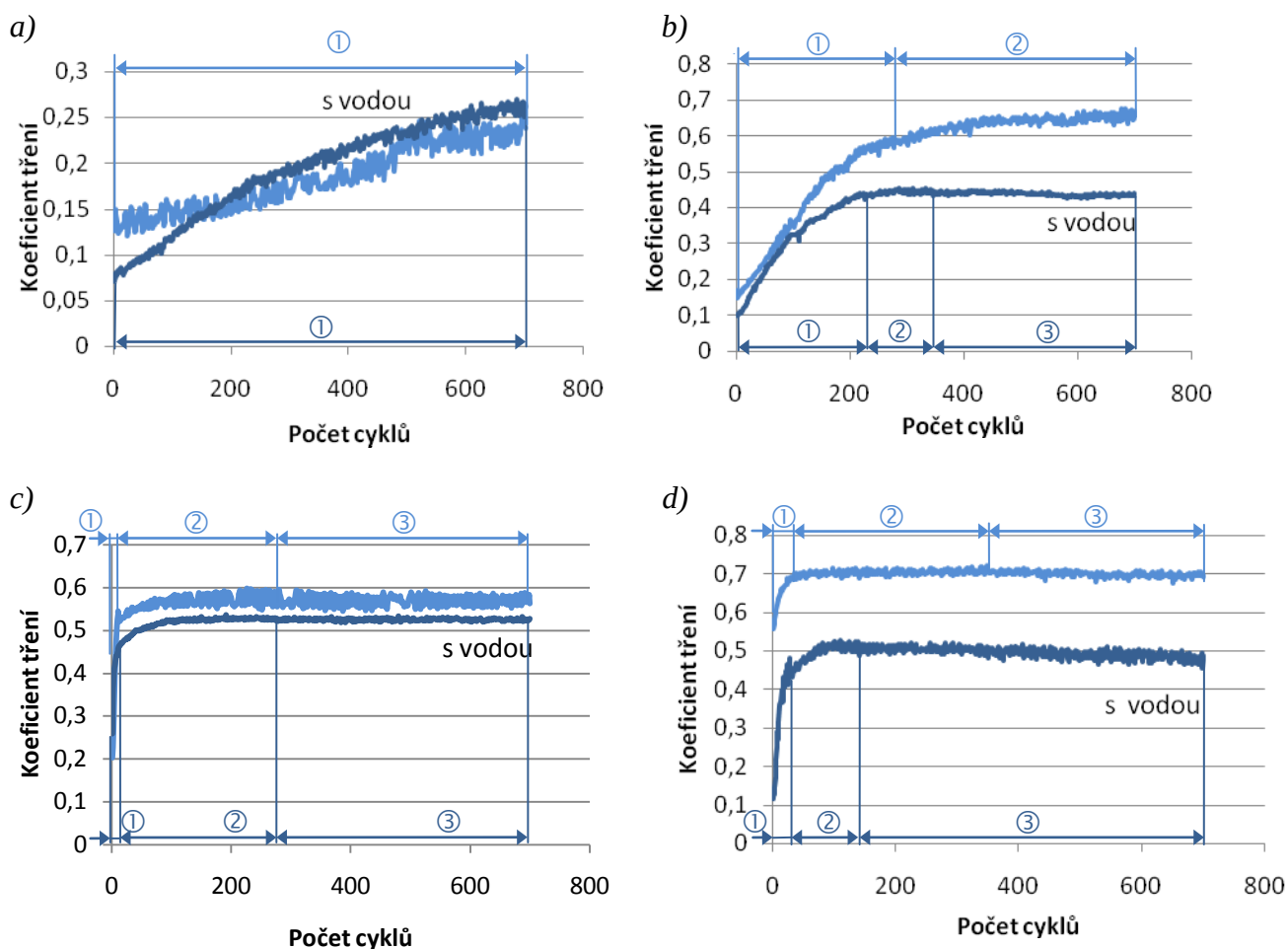
Odolnost proti opotřebení závisí na konkrétní třecí dvojici, na prostředí a na podmínkách při kterých interakční proces probíhá. Navzdory tomu, že není přímá závislost mezi třením a opotřebením, zjednodušeně platí, že malé tření způsobuje malé opotřebení (a naopak). I malé změny ve velikosti tření můžou způsobit rychlý vzrůst rychlosti opotřebení.

Velikost opotřebení nejčastěji vyjadřují úbytky hmotnosti, či objemu na jednotku kluzné dráhy. Odolnost proti opotřebení není z hlediska kvantifikace až tak jednoznačně definovaná a má spíš porovnávací význam. Odolnost proti opotřebení je přímo úměrná převrácené hodnotě opotřebovaného objemu. Tento vzájemný vztah je možné aplikovat pouze v ustáleném stavu, například při abrazivním opotřebení, či adhezivním opotřebení po záběhu.

Opotřebení povrchu tvrdých materiálů, a následné vytvoření tribologické stopy lze rozdělit do tří režimů:

- ① inicializace opotřebení - růst součinitele tření a velikosti opotřebení
- ② formování, utváření vrstvy (přizpůsobování kontaktních ploch) – velký součinitel tření a velké opotřebení
- ③ ustálený režim opotřebení – nízký součinitel tření a malé opotřebení (Kříž A., 2004)

Na obr. č. 10 je možné vidět tyto režimy přímo na měření korundových destiček.



Obr. č. 10: Zobrazení režimů opotřebení korundových destiček --- bez vody a --- ve vodě při různých zatíženích (a, zatížení 5 N; b, zatížení 10 N; c, zatížení 30; d, zatížení 50 N)

Povrchy třecích ploch je možné charakterizovat tak, že:

- nejsou hladké (mají úchytky tvaru, vlnitost a drsnost způsobenou opracováním)
- podléhají elastickým a plastickým deformacím díky mechanickým vlivům
- podléhají chemickým a fyzikálním vlivům z prostředí – adsorpce, či chemická reakce na povrchu (Štěpina V. et al, 1985)

3.3 Tribologické zkoušky

Způsoby zjišťování tribologických vlastností je možné rozdělit podle druhu vzájemného pohybu působícího tělíska a testovaného materiálu, formou styku a geometrického tvaru tělíska (triboelementu) (Kříž A., 2004).

Při posuzování třecích procesů je třeba kvantifikování parametrů, které je charakterizují. Nejčastějším kvantifikačním parametrem třecího procesu je velikost třecí síly (či třecího momentu u rotujících třecích ploch). Podle těchto parametrů se odvozuje základní veličina charakterizující proces tření – koeficient tření (Blaškovič P., 1990).

Proměnnými jsou na tribometrech:

- materiál tuhých třecích prvků, jejich složení, fyzikální a chemické vlastnosti, jejich mikrogeometrie a makrogeometrie
- zatížení plochy bodem, hranou, plochou (možnost statického trvalého nebo dynamického a přerušovaného zatížení)
- systém pohybu
- teplota systému
- rychlost vzájemného pohybu (pohyb jednoho nebo obou třecích povrchů)
- čas trvání zkoušky, ujetá dráha, pokrytá plocha

Získání přesných informací o tribosystému je složité (i díky problematickému přenosu výsledků testů). Pro to by se testy měly provádět v laboratoři, na modelovém zkušebním zařízení a výjimečně přímo v provozu.

Opotřebení a energetické ztráty doprovázejí proces tření povrchů. Tribologické testovací metody jsou zaměřené na stanovení součinitele tření a jeho změny během testování

pro kombinaci materiálů, hodnoceného substrátu, tělíska se specifickými parametry a testovacího prostředí. Díky tření styčných povrchů – testovaného materiálu a použitého tělíska, se vytváří stopa po opotřebení (Kříž A, 2004). Měřením opotřeбенé plochy-dráhy profilometrem a zkoumáním okolí i samotné stopy pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu, se získávají důležité informace o procesu opotřebení a tím i o chování materiálu.

Znalost vlivu vnějších parametrů a jednotlivých stádií tribologického opotřebení je důležitou podmínkou pro porozumění sledovaných tribologických vlastností materiálu.

Další podstatný hodnotící parametr je charakter a velikost tribologické stopy. Pro vyhodnocení opotřebení se využívá světelný mikroskop nebo přesnější řádkovací elektronový mikroskop. Cílem je získání komplexní informace o procesech, které se ve styčné ploše tribologické analýzy odehrály.

Důležitou informací je i profil tribologické stopy. Profil stopy je možné získat jak z profilometru tak z příčného výbrusu nebo lomu.

Tyto dokumentační možnosti vedou ke získání informace o tribologické stopě. Informaci o míře poškození vzorku, geometrii stopy a přesné stanovení údajů odehrávajících se v dynamickém procesu (Kříž A, 2004).

3.3.1 Rozdělení a princip tribologických zkoušek

Měření koeficientu tření:

Pro určení koeficientu tření je k dispozici mnoho zkušebních metod. Testovací zařízení (tribometr) je vybírán tak aby v rámci možností co nerealističtěji napodobil skutečný tribosystém.

Tribometry mohou být rozděleny:

o z hlediska kontaktní plochy:

- *Bodový dotyk* (viz obr. 12 a,b,c,d)

- *Přímkový dotyk* (viz obr. 12 e)
- *Plošný dotyk* (viz obr. 12 f)

o z hlediska vektoru zatížení vzhledem k vektorům hlavních směrů pohybu na :

- *Tribometr s přitlačným tělískem* (kolík, destička, váleček, kotouč, rovná plocha (kotouč))
- *Jedno, či více kuličkový tribometr*
- *Tribometr s válečkem proti válečku, či s válečky křížem*
- *Tribometr s rovnou plochou proti rovné ploše*
- *Tribometr s tyčovými třecími prvky*
- *Nárazový, kyvadlový tribometr a jiné* (Štěpina V. et al, 1985)

Měření velikosti opotřebení:

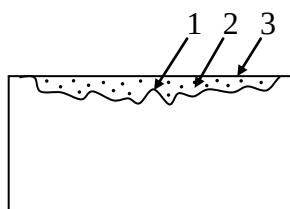
Velikost opotřebení a v některých případech i intenzitu opotřebení je možné měřit následujícími kvantitativními metodami:

- *Určení velikosti opotřebení změnou hmotnosti*
Principem této metody je určení změny hmotnosti vzorků v jednotlivých fázích zkoušky. Rozdíl hmotnosti vztáhnutý na třecí dráhu, či čas trvání třecího procesu je střední intenzitou opotřebování zkoušených materiálů. Přesnost měření určují technické možnosti. Čím menší rozdíl ve změně hmotnosti, tím je potřeba citlivější metoda měření.
- *Určení velikosti opotřebení změnou lineárních rozměrů*
Principem metody je změření rozměrů zkoumaného vzorku před opotřebováním a po něm. Přesnost měření je závislá na citlivosti měřících zařízení.
- *Určení velikosti opotřebení změnou objemu*

Měření velikosti změn objemu určuje i celkové opotřebení. Metoda měření změny hmotnosti je často praktičtější, operativnější a často i přesnější a proto se před touto metodou upřednostňuje (Blaškovič P., 1990).

- *Určení velikosti opotřebení profilografickým*

Při této metodě se dělá profilogram zkoumaného povrchu před zkouškou a po zkoušce a získané profilogramy se porovnávají. Tato metoda velmi přesně určuje rozložení opotřebení vzorků. Obvykle se tato měření provádějí kolmo na směr tření. Přesnost výsledků závisí na způsobu zpracování profilogramu. Mechanické metody jsou méně přesné, optické metody jsou pracnější (Blaškovič P., 1990).



Obr. č. 11: Ukázka využití profilogramu

(1-profil po opotřebení, 2-opotřebení, 3-původní profil před opotřebením)

- *Určení velikosti opotřebení autoradiografickou metodou*

Tato metoda se využívá především na určení lokálního opotřebení. Je založená na fotochemických účincích záření. S využitím jemnozrnné autoradiografické emulze je možné stanovit opotřebování v mikroobjemech.

- *Určení velikosti opotřebení pomocí snímačů*

Jedná se o využití snímačů založených na mechanických, pneumatických, elektrických a tenzometrických principech.

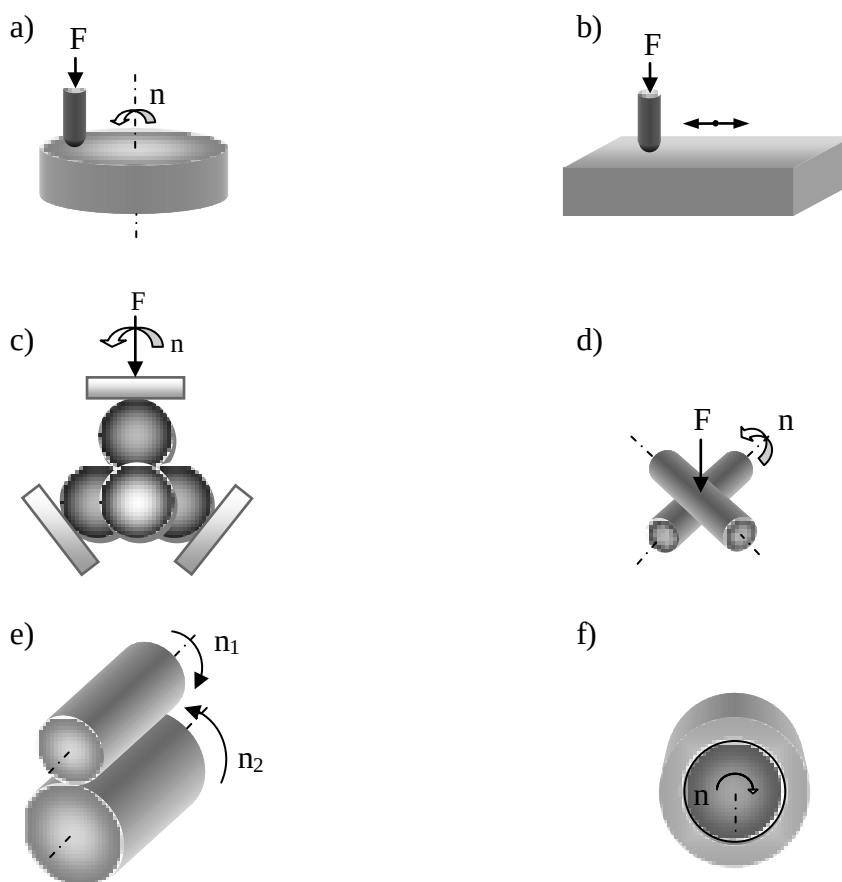
- *Určení velikosti opotřebení s využitím radioizotopů*

Metoda spočívá ve skutečnosti, že radiační aktivita hmoty je úměrná její hmotnosti, takže pokud je známá radiační aktivita hmoty, je z radiační aktivity částic opotřebení možné určit velikost opotřebení.

Z důvodu velké otěruvzdornosti korundové keramiky nebylo možné využít nejčastěji používanou metodu „Určení velikosti opotřebení změnou hmotnosti“, takže s použitím optického mikroskopu byla pro výpočet opotřebení využita metoda „Určení velikosti profilografováním“.

Testovací přístroje rozdělené podle kontaktní plochy:

- Bodový dotyk (viz obr. 12 a,b,c,d)
- Přímkový dotyk (viz obr. 12 e)
- Plošný dotyk (viz obr. 12 f)

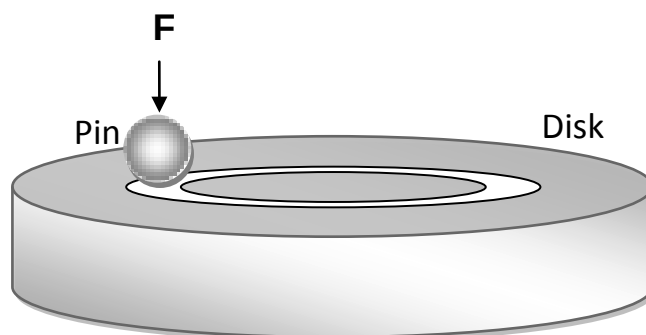


Obr. č. 12: Základní principiální uspořádání tribologických zkoušek
(a,b,c,d – bodový dotyk, e – přímkový dotyk, f – prostorový dotyk)

3.3.1.1 Pin on disk

Tribometr Pin on disk je využíván ke komplexnímu studiu opotřebení (Hegadekatte et al., 2008). Metoda Pin on disk je v současnosti využívána jak k popsání tribologických vlastností systému, tak k určení míry odolnosti povrchu vůči opotřebování při konstantním zatížení. I když je již tato metoda často používána při laboratorním testování, nebyla zatím zpracována dostatečná metodika měření, zajišťující reprodukovatelnost a přesné stanovení jednotlivých veličin v závislosti na parametrech testu.

Při metodě Pin on disk (viz obr. 13) je na povrch vzorku ve tvaru kruhové destičky přiloženo pin tělísko ve formě nerotující kuličky, či válečku. V předem zvolené vzdálenosti od středu vzorku je pin tělísko zatíženo předem definovanou silou. Disk - kruhová destička se začne otáčet zvolenými otáčkami a vykoná předem stanovený počet kol. Pin tělísko tak vytvoří na povrchu vzorku stopu, u které je možno analyzovat její tvar, hloubku, její okolí, apod. (Kříž A., 2004).



Obr. č. 13: Systém pohybu Pin on disk

Pro metodu Pin on disk jsou získané výsledky testu, koeficientu tření a rozsahu opotřebení závislé hlavně na:

- použité zatěžující síle
- velikosti kontaktní plochy, která je závislá na geometrii pin tělíska
- relativní rychlosti pohybu mezi pinem a diskem
- zvoleném počtu cyklů
- teplotě kontaktního povrchu vzorku
- použití testovacího prostředí (maziva)
- stavu a kvalitě povrchu vzorku
- fyzikální i mechanické vlastnosti testovaného materiálu pinu i disku

Zvolení parametrů zkoušky vyžaduje velkou pozornost. Mezi nejfrekventovanější problémy patří volba pinu tělíska z vhodného materiálu. Pro tělísko pinu bývá volen tvrdší materiál, než je materiál disku. Opotřebení tak má menší hodnoty a též se zabrání adheznímu ulpívání pinu na povrchu disku. Tento jev zatěžuje následné vyhodnocení koeficientu tření a způsobu opotřebení, při sledování vytvořené tribologické stopy pomocí optické, či řádkovací elektronové mikroskopie (Kříž A., 2004).

Jako vhodný pin se tedy pro testování korundové keramiky hodí diamant, či korund. Z těchto dvou materiálů byl díky přizpůsobení zkoušky reálným podmínkám a zanedbatelnému adheznímu ulpívání pinu na disku vybrán pro analýzu korund.

U tribologické zkoušky Pin on disk ihned po rozjezdu nastává statické zatížení a tvoří se určitá plocha dotyku. Začne-li rostoucí tečná síla působit, plocha dotyku roste a dochází k mikroposuvům obou těles. Třecí odpor narůstá až do chvíle, kdy mikroposuv přejde v makroposuv a začne klouzání. Maximální dosažený třecí odpor je součinitel tření za klidu μ_s (též známý jako statický koeficient tření). Dynamický koeficient tření je většinou menší, než statický koeficient tření. V případě kontinuálního pohybu při zkoušce Pin on disk se uplatňuje především koeficient dynamický a vliv statického koeficientu na měření je zanedbatelný (Oliva V. et al., 1978). Tím se tato metoda od prováděné zkoušky Pin on disk s vratným pohybem liší. Rychlost pohybu pinu po disku je v případě klasického Pin on disk v podstatě konstantní, v případě zkoušky Pin on disk s vratným pohybem se rychlost pohybu pinu mění podle sinusovky.

Analýza opotřebení:

Velmi důležitým hodnotícím kritériem kromě koeficientu tření je velikost a charakter opotřebení tribologické stopy. Analýza opotřebení poskytuje komplexnější informace o procesech nastávajících v kontaktní ploše tribologické analýzy (Kříž A., 2004).

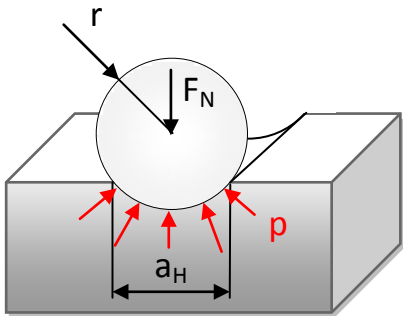
Jednu z hlavních rolí hrají rozměry ploch styku, které zprostředkovávají přenos pohybu. Pokud by se jednalo o dvě dokonale hladká pružná tělesa (ideální případ) používají se pro výpočet tlaku mezi pinem a diskem Hertzovy vztahy. Při zatížení normálovou silou F_N nastává elastická a plastická deformace. Pro běžné použití v praxi je tedy odvození

Hertzových tlaků přibližné a může se použít jen v případě, že zatížení odpovídá Hookovu zákonu.

Pro vnik pinu s poloměrem r do roviny platí pro maximální Hertzův tlak:

$$p_{max} = 1,5 \cdot \frac{F_N}{\pi a_H^2} \sqrt{1 - \left(\frac{1}{a_H}\right)^2} \quad [5]$$

kde a_H je poloměr vzniklého kruhového vtisku a vypočítá se z:



$$a_H = \left(\frac{3r}{2E'}\right)^{\frac{1}{3}} F_N^{\frac{1}{3}} \quad [6]$$

Obr. č. 14: Styk kuličky s rovinou

E' jako redukovaný modul pružnosti materiálu se vypočítá ze vzorce:

$$E' = \frac{1}{2} \left[\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right] \quad [7]$$

kde E_1 , E_2 jsou Youngovy moduly pružnosti a v_1 , v_2 jsou Poissonovy konstanty jednotlivých materiálů.

Pro plochu kruhového vtisku S_H platí:

$$S_H = \pi a_H^2 = \pi \left(\frac{3r}{2E'}\right)^{\frac{2}{3}} F_N^{\frac{2}{3}} \quad [8]$$

(Štěpina V. et al, 1985)

Jelikož dochází k ubývání kuličky pinu, mění se i její tvar. Mění se (narůstá) styková plocha a snižuje se tak tlak působící na tuto plochu. Opořezávání pinu tak má u různých materiálů disků různý průběh, což zkresluje výsledky. Díky tomu je pro tvrdé materiály vhodnější

použít kuličku či váleček o malém průměru, síla tak působí na stále stejné ploše a tlak zůstává konstantní. Jinak je též možné použít kuličku pinu z jiného, tvrdšího materiálu, čímž bude opotřebení mít menší hodnoty a zabráni se adheznímu ulpívání kuličky pinu na povrchu vzorku.

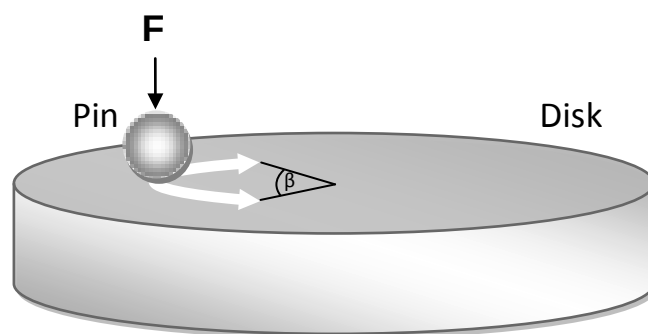
Pin se pohybuje po předem zvoleném poloměru. Tento poloměr se projeví především na velikosti jeho opotřebení. Opotřebení, jeho velikost i charakter se promítá do vzniklé tribologické stopy. Pin opisováním většího průměru kružnice urazí za stejný počet cyklů delší dráhu. Delší dráha tělíska (větší poloměr opisované kružnice) má tedy za následek větší opotřebení pinu. Proto je pro tvrdé analyzované materiály výhodnější zvolit trajektorii pinu s menším poloměrem. Relativní rychlost se však směrem do středu zmenšuje až na nulovou hodnotu. Pro zachování stejné relativní rychlosti je třeba zvýšit rychlost otáčení (otáčky). Tak zůstane zachována rychlost na hodnotě odpovídající většímu průměru a při stejném počtu kol, ovšem pin je zatížen menší vykonanou dráhou.

Jiný poloměr se ovšem promítne na teplotě funkčních kontaktních ploch pinu a analyzovaného vzorku. Na menším poloměru nemá teplo tolik času přejít do okolní atmosféry a dochází ke sdílení menšího množství tepla, čímž je i vyšší teplota v kontaktní ploše při stále stejné relativní rychlosti (Kříž A., 2004).

3.3.1.2 Pin on disk s vratným pohybem

V současné době je v rámci kontroly jakosti většina tribologických analýz prováděna metodou Pin on disk. Tato metoda ovšem pro daný systém pohybu korundových destiček není přímo ideální. Jelikož tribologické vlastnosti nejsou zkouškou materiálovou, ale technologickou, na metodice zkoušení vzorku velmi záleží. Testovací metoda by měla být co nejpodobnější reálnému pohybu keramických destiček v termostatickém ventilu. Testování tribologických vlastností bylo tedy v souladu s reálným pohybem destiček prováděno metodou Pin on disk s vratným pohybem pro doplnění chybějících informací o tomto konkrétním systému pohybu.

Systém testování spočívá v tom, že na povrch vzorku tvaru disku je přiložen pin (tělísko ve formě nerotující kuličky). Pin je zatěžován předem definovanou silou a disk se otáčí po obvodu úseku kružnice o předem definovaném poloměru a předem definovaného úhlu a poté se vrací zpět.



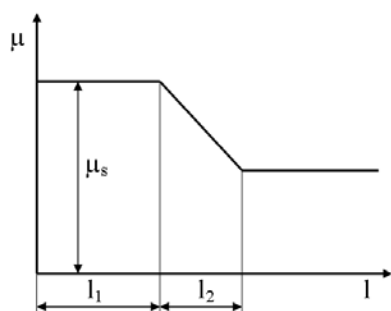
Obr. č. 15: Systém pohybu Pin on disk s vratným pohybem

Metoda Pin on disk s vratným pohybem spočívá v tom, že při statickém zatížení dochází k vytvoření určité skutečné plochy dotyku. Pokud začne působit rostoucí tečná síla, plocha dotyku narůstá a dochází k mikroposuvům obou těles. Třecí odpor vzrůstá až do chvíle, než mikroposuv přejde v makroposuv a začne klouzání. Největší dosažený třecí odpor je statický koeficient tření μ_s . Ve chvíli porušení mikrospojů je třecí odpor vlastně nulový. Díky vytváření nových mikrospojů je ovšem potřeba pro udržení pohybu i nadále tečnou sílu, která určuje dynamický koeficient tření a která je většinou menší než síla, která odpovídá statickému koeficientu tření (Oliva V. et al., 1978).

Mnohé stránky přechodu mezi ulpěním materiálu a jeho skluzem nejsou plně pochopeny (Polycarpou A. A. et al, 1994).

Závislost součinitele tření na kluzné dráze lze vyjádřit dle obr. č. 16. Vzdálenosti l_1 , l_2 se pohybují řádově v rozmezí 10^{-3} až 10^{-4} cm.

Snížení koeficientu tření je dáno závislostí tvorby pevných mikrospojů na době jejich stacionárního kontaktu.



Obr. č. 16: Závislost součinitele tření na kluzné dráze

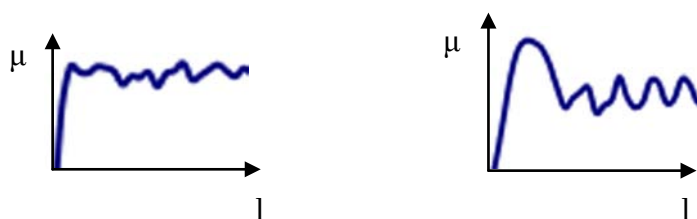
Při pohybu je doba kontaktu mezi oběma soustavami výčnělků velice malá, řádově v milisekundách a dynamický koeficient tření je díky tomu menší, než statický koeficient tření, kdy je doba kontaktu o několik řádů vyšší. Narůstající odpor zatížených kontaktních ploch vzhledem k tečnému pohybu s časem je přitom vysvětlován creepovým chováním mikrospojů.

Z toho vychází, že během kluzného tření není vlastně možné čekat ideálně plynulý pohyb. V malých okamžicích, kdy mikrospojy porušovány nejsou, je třecí odpor vysoký a oba členy kluzné dvojice na sobě ulpívají. Při porušení mikrospojů dojde k intenzivnímu prokluzu a klesnutí třecího odporu. Střídáním adheze a porušování spojů je charakterizován přerušovaný pohyb při tření. Tento pohyb je v jistém rozmezí zatížení výrazný především u materiálů rozdílného typu.

K přerušovanému pohybu dochází především pokud má jedno z klouzajících těles určitý stupeň pružné volnosti. Ovšem i u poměrně tuhých soustav je možné, že dojde k přerušovanému pohybu. To závisí i na mechanických vlastnostech podpovrchové vrstvičky do které je přenášen účinek třecích sil (Oliva V. et al., 1978).

V případě měření koeficientu tření není pohyb při tření výrazně přerušovaný. Soustava při měření byla poměrně tuhá a pin byl vyroben z korundové keramiky, stejně tak jako disk.

Na následujícím obrázku vidíme průběhy koeficientů tření měřené korundové keramiky (viz obr. 17).



Obr. č. 17: Naměřená závislost součinitele tření na kluzné dráze

Jak je vidět na naměřené závislosti součinitele tření na kluzné dráze, statický koeficient tření μ_s výrazně nenarůstá, jelikož v případě testování korundové keramiky touto metodou téměř nedochází k mikrospojům. Nárůst statického koeficientu tření u kovů je způsobován difuzními můstky, které v případě keramiky téměř nenastávají.

Jelikož creep nastává nad 40 % teploty tání a provozní podmínky u korundových destiček těchto teplot nedosahují, creep nenastává.

3.4 Vliv substrátu a technologického postupu na tribologické vlastnosti

Vliv relativní vlhkosti na tribologické vlastnosti

Při testování Al_2O_3 za nízké vlhkosti trpí materiál silným opotřebením, které je charakteristické praskáním hranic zrn a jejich vyštěpováním (Takadoun, 1993).

Při testování korundové keramiky (99,7 hmot.% Al_2O_3) a oceli AISI 52100 metodou Pellet on disk bylo zjištěno, že při nižších rychlostech koeficient tření se stoupající vlhkostí plynule klesá (Zum Gahr K.-H. et al., 2004). Další testy metodou Ball on block ukázaly, že nezávisle na volbě kluzné dvojice je maximální hodnota koeficientu tření a opotřebení při relativní vlhkosti 3% a minimální pokud byla na kontaktní ploše přítomna destilovaná voda (Zum Gahr K.-H. et al., 1999).

Výzkum prováděný metodou Pin on disk na korundové keramice obsahující 95 hmot.% Al_2O_3 ukazuje, že sledované opotřebení se stoupající vlhkostí značně klesá (Gee M.G. et al., 1995). Důvodem tohoto chování je tvoření tenkých vrstev hydroxidu hlinitého tribochemickou reakcí na ploše styku, kde dochází k opotřebení. Tyto vrstvy částečně zakrývají opotřebovávanou plochu. Poměr vrstev na povrchu se zvyšuje se stoupající vlhkostí. Zpočátku je stupeň opotřebení při testech poměrně vysoký, jelikož se během prvotní části testování hydroxid hlinitý nevytváří. Při nízké vlhkosti dochází k velkému opotřebení se značným objemem nanesené drti. Při testování za vysoké vlhkosti v podstatě k opotřebení nedochází, ani se nevytváří nanesená drť. Hydroxid hlinitý (AlOOH) je tvořen reakcí velice jemné drti korundu vytvářené během opotřebovávání a vodním výparem. Vrstvy hydroxidu na opotřebovávaných plochách jsou nesouvislé, oddělené oblasti původního korundu. Destičky hydroxidu jsou pokresleny sítí prasklinek, které často oddělují hydroxidové oblasti od korundu. Velké množství malých trhlinek je orientováno kolmo ke směru relativního pohybu.

Vliv drsnosti materiálu na tribologické vlastnosti

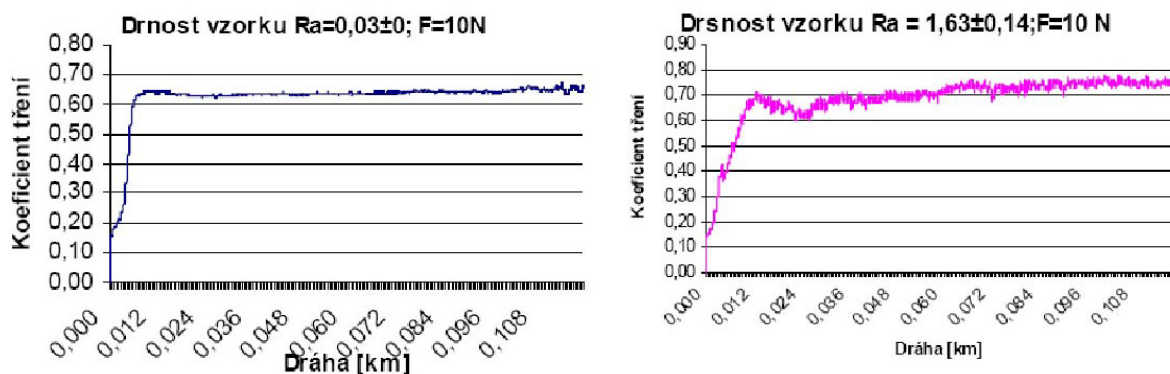
Velikost opotřebení a součinitel tření a má jednoznačnou spojitost s drsností kontaktních ploch. U měření drsnosti je potřeba sledovat jednotlivé parametry drsnosti povrchu a povrchového stavu vzorku z hlediska výskytu různých necelistvostí, včetně trhlin. Defekty na kontaktních plochách mohou v systému fungovat stejně tak jako vruby vyvolávající koncentraci napětí při tepelném i mechanickém namáhání.

Většina laboratorních experimentů je dělána na testovacích vzorcích s vyleštěným povrchem, což neodpovídá praxi. To způsobuje, že laboratorní výsledky se skutečnými hodnotami vyplývajícími z praxe nesouhlasí. Na druhé straně je často složité až nemožné dělat analýzy s požadovanou přesností na drsném laboratorně neupraveném povrchu. Vzájemným porovnáním hodnot drsnosti reálného a leštěného povrchu je možné zjistit případný vliv těchto drsností na konečné vlastnosti systému. Pro toto srovnání výsledků je podstatné charakterizovat povrch právě těmi veličinami drsnosti, které plně zachycují potřebné informace o povrchu kontaktních ploch. K popisu slouží normalizované a nenormalizované charakteristiky povrchu (Kříž A., 2004).

Pro získání přesnější informace o drsnosti korundových destiček, drsnost odpovídala reálné drsnosti korundových destiček v praxi. Pro lepší názornost bylo provedeno i 3D zobrazení kontaktního povrchu destiček.

Při testování materiálu tribologickou zkouškou Pin on disk dochází při vysoké drsnosti povrchu k přeskokům pin tělíska a následkem toho pak i k velkému rozptylu hodnot.

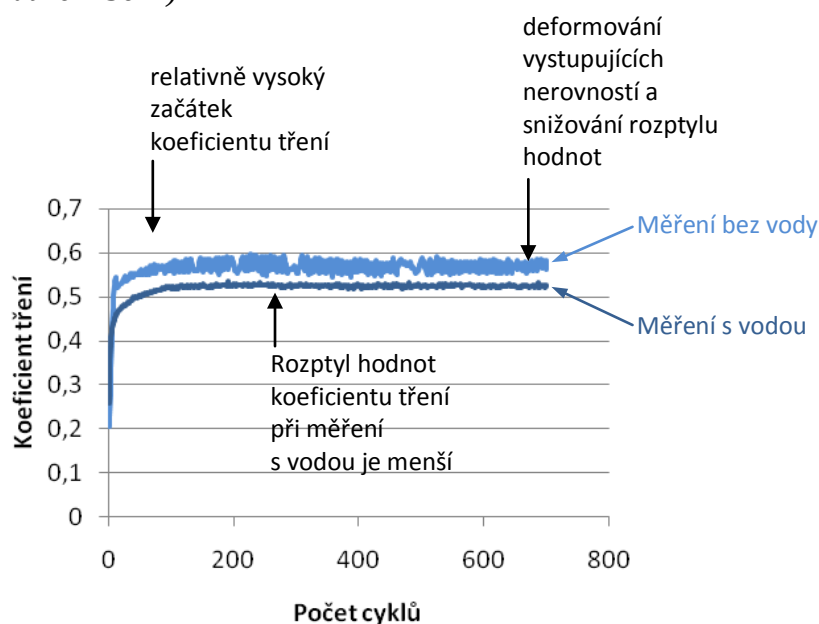
S ohledem kruhovou trajektorii pinu je odlišný průběh i způsob opotřebení tribologické stopy v místě podélném a kolmém k brusným stopám povrchu. Vystupující nerovnosti jsou deformovány a postupně tak dochází ke snižování rozptylu hodnot (Kříž A., 2004). Má-li povrch malou drsnost, ihned se tvoří souvislá tribologická stopa. To je patrné i na průběhu koeficientu tření (viz obr. 18). Koeficient tření má v tomto případě menší rozptyl a kvůli vytvoření adhezní, váznoucí vrstvičky je od začátku relativně vysoký.



Obr. č. 18: Vliv drsnosti na koeficient tření (Kříž A., 2004)

V případě korundových destiček je drsnost kontaktního povrchu vzorků malá a koeficient tření tudíž nemá velký rozptyl hodnot. U měření s vodou je patrné, že koeficient tření má menší rozptyl hodnot, než měření bez vody. Začátek je relativně vysoký, jak u měření bez vody, tak s vodou (viz graf 2).

Graf č. 2: Vliv drsnosti kontaktního povrchu u korundových destiček při měření bez vody a s vodou (zatížení 30 N)



Vliv teploty na tribologické vlastnosti

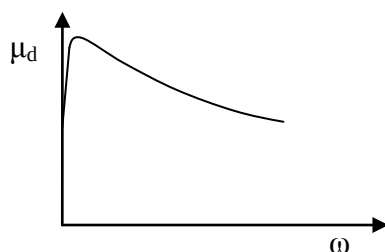
Při testování vlivu teploty na koeficient tření bylo zjištěno, že vlivem teploty rostoucí z 28°C do 110°C na korundovou keramiku dochází k narůstání koeficientu tření z průměrné hodnoty

kolem $\mu = 0,75$ až k hodnotě $\mu = 1,05$ (Zum Gahr K.-H. et al., 1999). V rozmezí teplot 110°C až 500°C je koeficient tření a stupeň opotřebení na teplotě téměř nezávislý.

Testované korundové destičky svým pohybem nedosahují rychlostí, při kterých by teplota koeficient tření ovlivňovala. Ovšem při používání korundových destiček v termostatickém ventilu jsou destičky ve styku s médiem – vodou, která může dosahovat teplot až do 70 °C. Jelikož měřicí zařízení neumožňovalo vliv teploty více prozkoumat, byl její vliv při těchto experimentech zanedbán.

Vliv smykové rychlosti na tribologické vlastnosti

Dynamický součinitel tření je funkcí rychlosti pohybu povrchů (viz obr. 19).



Obr. č. 19: Dynamický součinitel tření jako funkce úhlové rychlosti smyku

Na obrázku je vidět, že se zvyšující se smykovou rychlostí dynamický koeficient přechodně vzroste a poté zpravidla klesá (Štěpina V. et al, 1985).

Vliv konečného opracování výrobku (broušení)

Podstatou broušení je mechanické narušování povrchu. Velké množství brusných zrn odstraňuje materiál ve formě malých částecek. Brusný nástroj vykonává vůči opracovávanému povrchu relativní posuvný pohyb poměrně vysokou rychlostí. Podle následného použití mají brusná zrna rozměry od 1 – 100 μm . Nástrojem jsou brusná zrna vtlačována do povrchu a smýkají (někdy i odvalují) se po něm. V těchto místech kontaktů zrn a povrchu vznikají vysoká napětí a může dojít i k plastickým mikrodeformacím. Materiál je oddělován vylamováním a vytrháváním částecek smykovým úsilím brusných zrn. Trhlíny vytvořené předešlou činností brusiva tomu napomáhají.

Při použití volného brusiva je povrch drsný stejněměrně. Broušení vázaným brusivem zanechává na materiálu stopy jdoucí jedním směrem. Drsnost povrchu je tím pádem menší ve směru opracování, než kolmo k tomuto směru. Kromě mikronerovností na povrchu se v materiálu vytváří narušená podpovrchová oblast s mikrotřlinami. Tloušťka této oblasti je několikanásobně vyšší, než tloušťka vrstvy mikronerovností na povrchu (Menčík J., 1990).

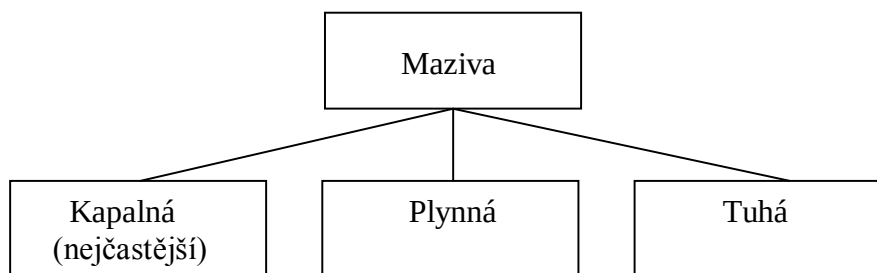
Korundové destičky byly broušeny s použitím suspenze brusného zrna (diamantu) a oleje. Byly broušeny krouživými pohyby. Broušené destičky byly ke kotouči mechanicky přitlačovány. Celý systém je v průběhu broušení chlazen. Nejprve byly destičky broušeny suspenzí s hrubějším zrnem a poté bylo provedeno jemné broušení.

3.5 Maziva

Tření i opotřebení je možno zmenšit a to díky možnosti využití maziv. Úkolem maziv je zabránění bezprostřednímu styku povrchů ve vzájemném pohybu a tím zmenšení tření mezi nimi a jejich opotřebení. Kromě této funkce mají na systém další pozitivní vlivy:

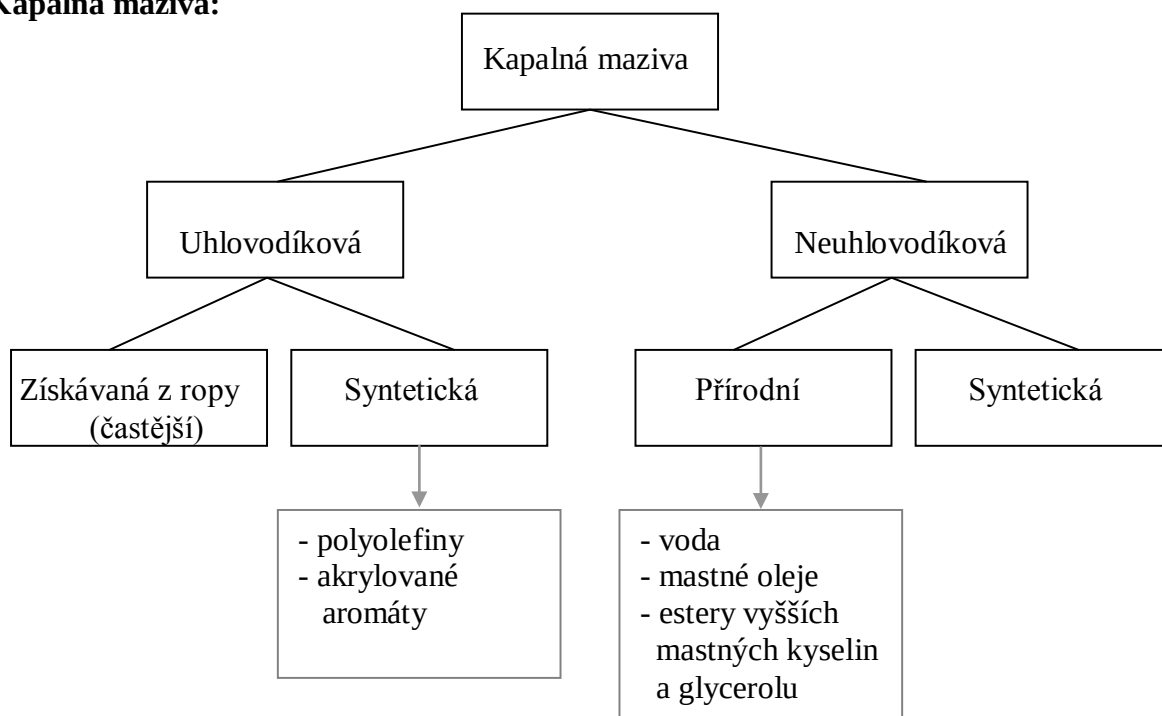
- Zabezpečení odvodu tepla
- Působení jako těsnící činitel
- Zbavování třecí plochy nečistot
- Ochrana před korozí (to především u kovových ploch)

Klasifikace maziv z hlediska skupenství:



Klasifikace maziv z hlediska chemického složení:

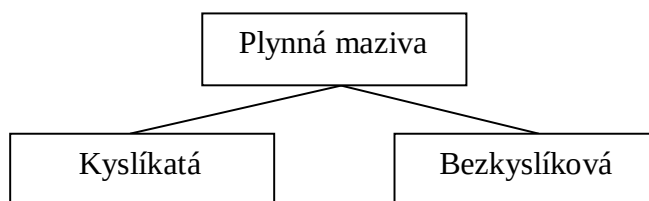
Kapalná maziva:



Přírodní maziva byla první kapalná maziva, ale jejich význam prudce poklesl. Na významu nabírají syntetické oleje, hlavně pro speciální účely (např.: estery organických kyselin a alkoholů, estery kyseliny fosforečné, či křemičité). Dále jsou zde éterová maziva, halogenované oleje, či polysiloxany-silikonové oleje. K neuhlovodíkovým kapalným mazivům patří i voda a vodné roztoky, emulze a taveniny.

Právě voda byla použita jako mazivo pro testování korundových destiček, jelikož jsou destičky v praxi využívány pro regulaci pitné vody.

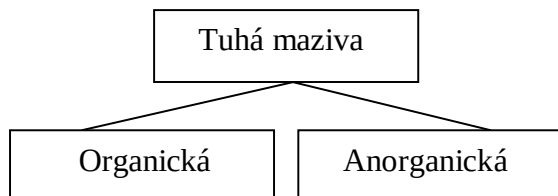
Plynná maziva:



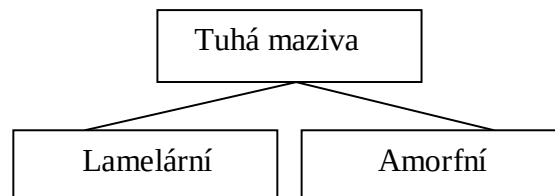
Jejich oblast použití je omezená, ovšem roste jejich význam. Ke kyslíkatým plynovým mazivům patří vzduch a k bezkyslíkatým se nově přiřazují i procesové tekutiny jako pára, či spaliny z turbín.

Tuhá maziva:

Z hlediska chemického složení:



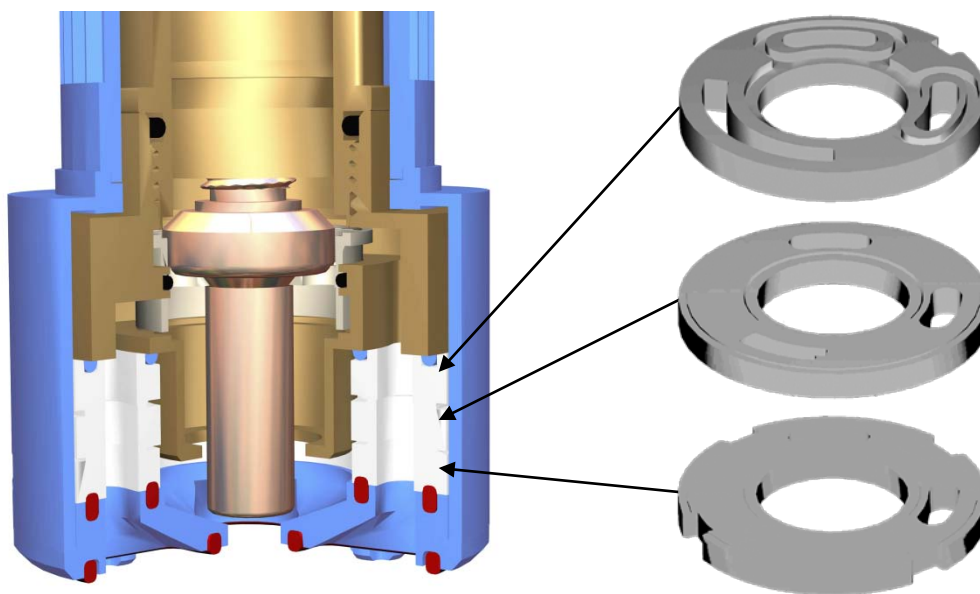
Z hlediska struktury:



Tuhá maziva zmírňují suché tření (Štěpina V. et al, 1985).

4. Zkušební vzorky

Vzorky pro analýzu vlastností jsou získány náhodným výběrem přímo ze sériové výroby firmy SGAC. Jde o zabroušené, vzájemně se překrývající keramické destičky s otvory, na jejichž vzájemném pohybu závisí teplota a množství průtoku pitné vody. Jedná se o destičky o průměru 37 mm a tloušťce 4 mm z korundové keramiky.



Obr. č. 20 : Umístění testovaných vzorků RO 2325, RO 2334 a RO 2327
v kartuši vodovodní baterie

Před testem byl vzorek očištěn ultrazvukem a následně osušen, či bylo provedeno další upravení povrchu materiálu podle konkrétních testovacích metod.

5. Studie a zkoušky

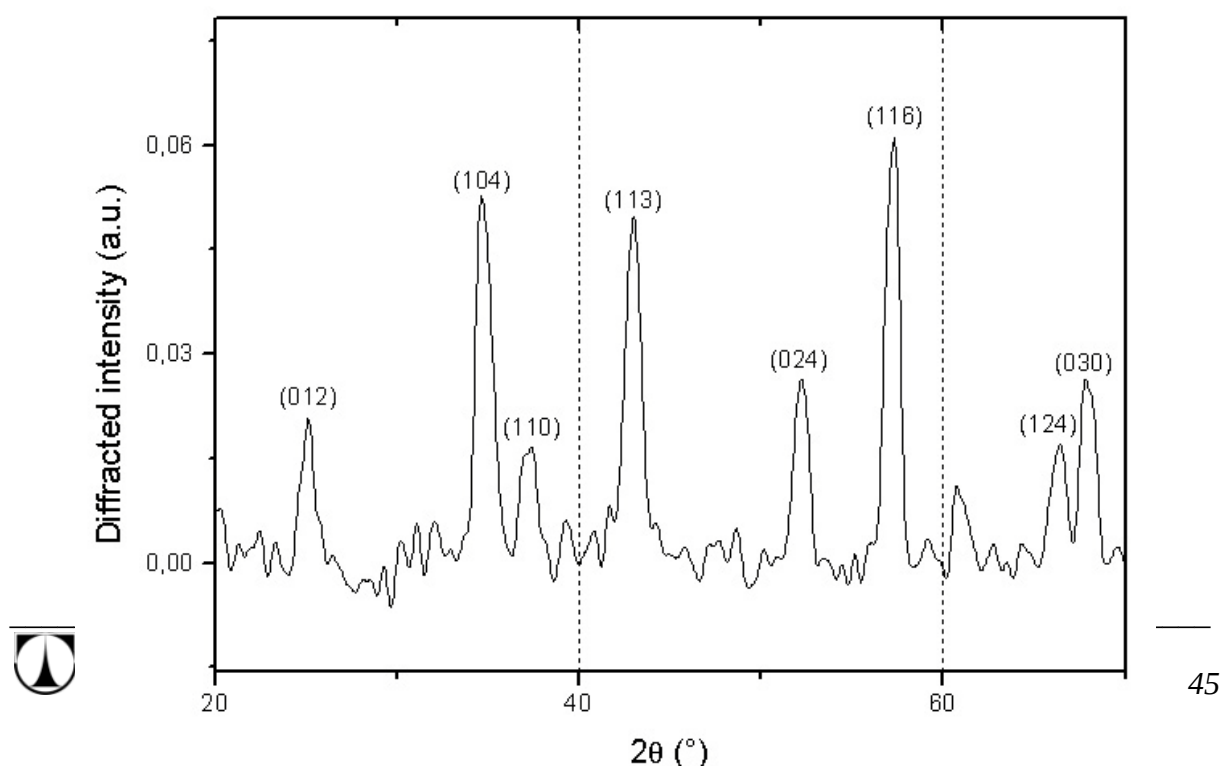
Vlastnosti materiálu byly zanalyzovány měřením mikrotvrdosti, drsnosti, houževnatosti materiálu, povrch byl prozkoumán rastrovacím elektronovým mikroskopem a byla provedena rentgenová difrakce. Pro zjištění tribologických vlastností testovaného materiálu byla použita metoda Pin on disk s vratným pohybem. Díky těmto testům bylo možné prozkoumat daný systém a jeho tribologické vlastnosti.

5.1 Rentgenová difrakce

Měření je provedeno difraktometrem typu INEL. Použito bylo záření Cu K α (vlnová délka 0,1548 nm) a pomocí programu Origin byly určeny difrakční úhly základních difrakčních čar a porovnány s teoretickými hodnotami z kartotéky JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) pro α -Al₂O₃ (viz graf 3 a tab. 3).

Graf č. 3 : Difraktogram zkoumaného materiálu po zpracování v programu Origin.

Nad čarami jsou uvedeny příslušné úhlové indexy pro α -Al₂O₃.



Tab. č. 3: Porovnání difrakčních úhlů α -Al₂O₃ z JCPDS a u zkoumaného materiálu

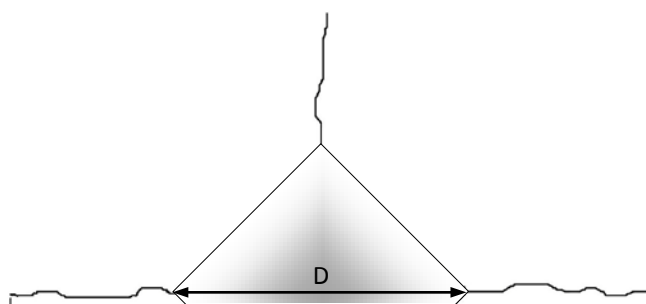
d_r (Å°)	2θ (°) hodnoty Al₂O₃	hkl	2θ (°) hodnoty zkoumaného vzorku	rozdíl hodnot 2θ(°)
2,085	43,39	113	42,99	0,4
2,552	35,16	104	34,66	0,5
1,601	57,57	116	57,28	0,29
3,479	26,31	012	25,12	1,19
1,374	68,25	030	67,82	0,43
1,74	52,6	024	52,19	0,41
2,379	37,32	110	37,41	-0,09
1,404	66,61	124	66,39	0,22

Rentgenovou difrakcí byla u zkoumaného materiálu provedena pozitivní identifikace. Podle podkladů firmy SAGC se jedná o korundovou keramiku s obsahem 95 hmotnostních procent Al₂O₃. Dle analýzy vzorku bylo zjištěno, že tato čistota korundu byla dodržena. Provedená analýza vzorku rentgenovou difrakcí s pomocí kartotéky JCPDS potvrdila požadovanou přítomnost fáze α -Al₂O₃. Jako příměsi by mohl materiál obsahovat určité množství prvků: K, Na, Si, Ca, Cu Fe, Mg, Pb, B, Cr, Li, Mn a Ni.

5.2 Houževnatost trhliny materiálu

Cílem měření bylo určit houževnatost zkoumané korundové keramiky. Jako kalibrační měření bylo použito měření houževnatosti křemíku.

Pro tuto měřicí metodu byl zvolen mikrotvrdoměr HMV-M3 Shimadzu na katedře Laboratoire de microanalyse des surfaces univerzity Ecole Nationale Supérieure de Mécaniques Microtechniques de Besançon, kterým byl vytvořen vtisk indentorem ve tvaru jehlanu do materiálu a pro měření byly zadány podmínky: zatížení působí na měřené tělísko po dobu 15 sekund, zatížení dle měřeného materiálu. Poté byla změřena délka trhliny *C* způsobená indentorem mikrotvrdoměru.



Obr. č. 21: Ukázka měření vtisku a trhliny

Naměřená data byla dále zpracována v programu Microsoft Excel a poté byla vypočítána houževnatost trhliny Kc pomocí vzorce [9].

$$Kc = 0,016 \times \sqrt{\frac{E}{H}} \times F \times C^{\frac{-3}{2}} \quad \left[MPa \times m^{\frac{1}{2}} \right] \quad [9]$$

kde F je aplikované zatížení, E a H reprezentují Youngův modul a tvrdost materiálu podle Vickerse.

Kalibrační měření

Materiál: křemík

Aplikované zatížení F , velikost trhliny způsobené mikrotvrdoměrem C a tvrdost materiálu podle Vickerse H jsou zaneseny do tabulky.

Tab. č. 4: Naměřené a dopočítané hodnoty pro křemík

(C_1, C_2, C_3 ; (H_1, H_2, H_3) je označení tří nezávislých měření)

$F [N]$	$C_1 [m]$	$C_2 [m]$	$C_3 [m]$	$H_1 [MPa]$	$H_2 [MPa]$	$H_3 [MPa]$
4900	0,000034	0,000047	0,000055	9500	10800	8800
9800	0,000073	0,000047	0,0001	9600	10800	8200

Tab. č. 5: Výsledná houževnatost Kc

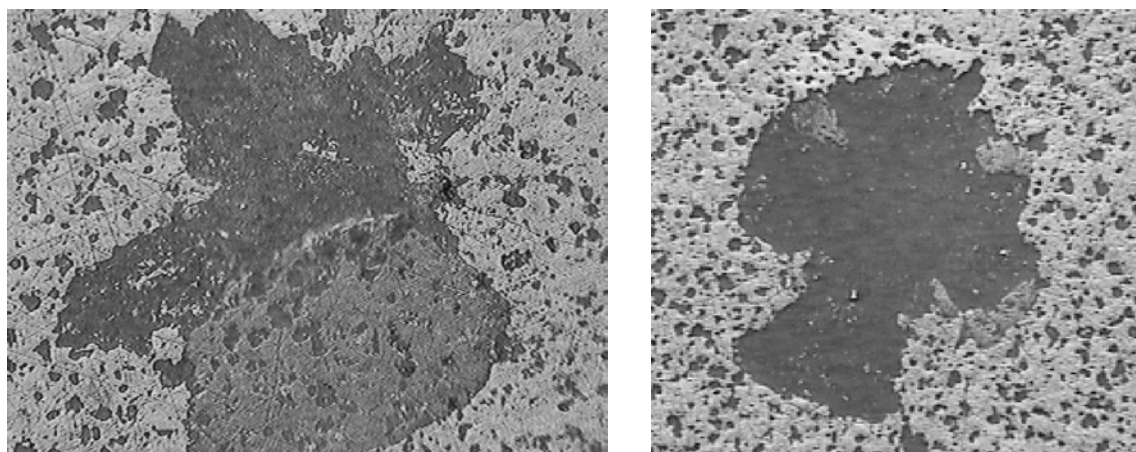
Zatížení [g]	Kc_1 [MPa·m ^{1/2}]	Kc_2 [MPa·m ^{1/2}]	Kc_2 [MPa·m ^{1/2}]
500	1,636	0,962	0,839
1000	1,054	1,562	0,711

Výsledky koeficientu Kc pro křemík z literatury odpovídají získaným výsledkům.

Měření zkoumaného vzorku

Materiál: Al_2O_3

Pro testování korundové keramiky bylo použito zatížení 300 N.



Obr. č. 22: Trhliny v Al_2O_3 způsobené indentorem

Při pokusech o získání radiálních trhlin bylo zjištěno, že korundová keramika lisovaná uniaxiálně nelze změřit. Výsledky nejsou použitelné, jelikož trhlina nejde kolmo k povrchu, ale souběžně s ním. Domnívám se, že po hranicích zrn se trhlina dostává k nehomogenní pórovitosti, kde dochází ke změně směru šíření trhliny a povrch materiálu se loupe. Uniaxiální lisování může způsobovat vnitřní pnutí pod povrchem vzorku. Literatura (Černý V. a kol., 1964) potvrzuje, že u korundové keramiky je určování houževnatosti obtížné.

Jelikož nebylo možné změřit houževnatost, byla zkontrolována homogenita materiálu (střed - povrch) měřením mikrotvrdosti.

5.3 Mikrotvrdost materiálu

Měření mikrotvrdosti proběhlo na mikrotvrdoměru HMV-M3 (Shimadzu) na katedře Laboratoire de microanalyse des surfaces univerzity Ecole Nationale Supérieure de Mécaniques Microtechniques de Besançon. Naměřená data byla dále zpracována v programu Microsoft Excel.

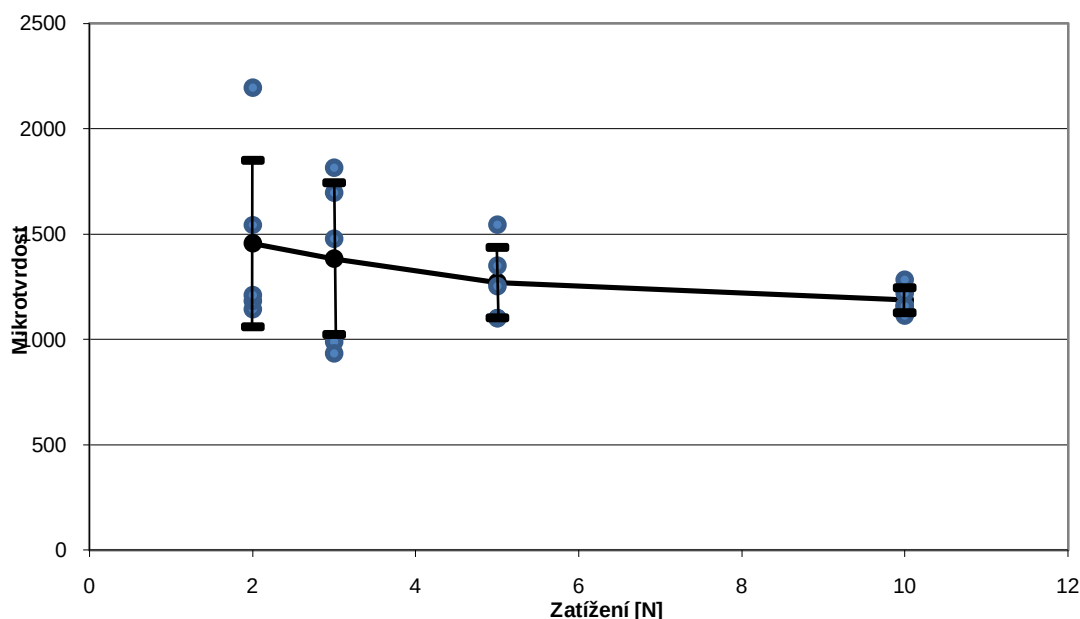
Tab. č. 6: Přehled naměřených hodnot mikrotvrdosti

	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4	Vzorek č. 5
HV 200	1145	1184	2195	1211	1544
HV 300	990	934,4	1698	1478	1817
HV 500	1102	1102	1545	1351	1253
HV1000	1159	1284	1114	1159	1219

Tab. č. 7: Přehled vypočítaných průměrných hodnot mikrotvrdosti

	Průměr	Směrodatná odchylka
HV 200	1500	400
HV 300	1400	400
HV 500	1300	200
HV1000	1190	60

Graf č. 4: Závislost mikrotvrdosti na zatížení



Graf č. 4 znázorňuje jednotlivá měření tvrdosti při různých zatíženích. Graf je proložen křivkou, která spojuje průměrné hodnoty při jednotlivých zatíženích.

Na grafu je vidět zvyšující se rozptyl naměřených hodnot se snižující se zátěží, který je způsoben rozdílem zásahu zrna, či hranice zrna. Při nižším zatížení je vyšší elastická deformace, než při použití vyšších zatížení, což způsobuje menší stopu po indentoru a vyšší tvrdost.

Průměrná mikrotvrdost materiál vychází $HV = 1300$.

Dle literatury (www.vscht.cz) odpovídá pro rozpětí $HV = 1000 - 1500$ tvrdost korundové keramiky s obsahem Al_2O_3 v rozmezí od 80 do 95 hmotnostních procent.

V tomto případě byla měřena mikrotvrdost, jelikož při měření tvrdosti nebylo možné změřit velikost vpichu indentorem (dochází k odlupování keramiky po povrchu). V případě mikrotvrdosti tento problém nenastal.

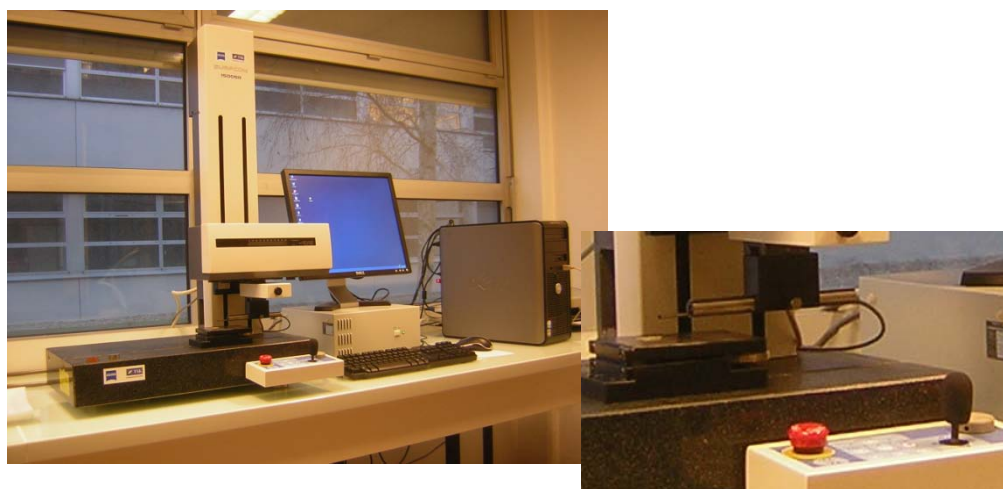
Experimentálně zjištěné hodnoty mikrotvrdosti odpovídají hodnotám naměřené tvrdosti z literatury.

Měřením mikrotvrdosti byla zkontrolována homogenita vzorku. Použitím různých zatížení bylo zkoumáno, zda se u vzorku vyskytl povrchový efekt a zda je vzorek u povrchu zhutněnější. Nehomogenita se v tomto případě neprokázala. Vzhledem k tomu, že se mikrotvrdost a v celém průřezu příliš nelišila, měření potvrdilo, že u povrchu vzorku větší zhutnění nenastalo.

5.4 Drsnost materiálu

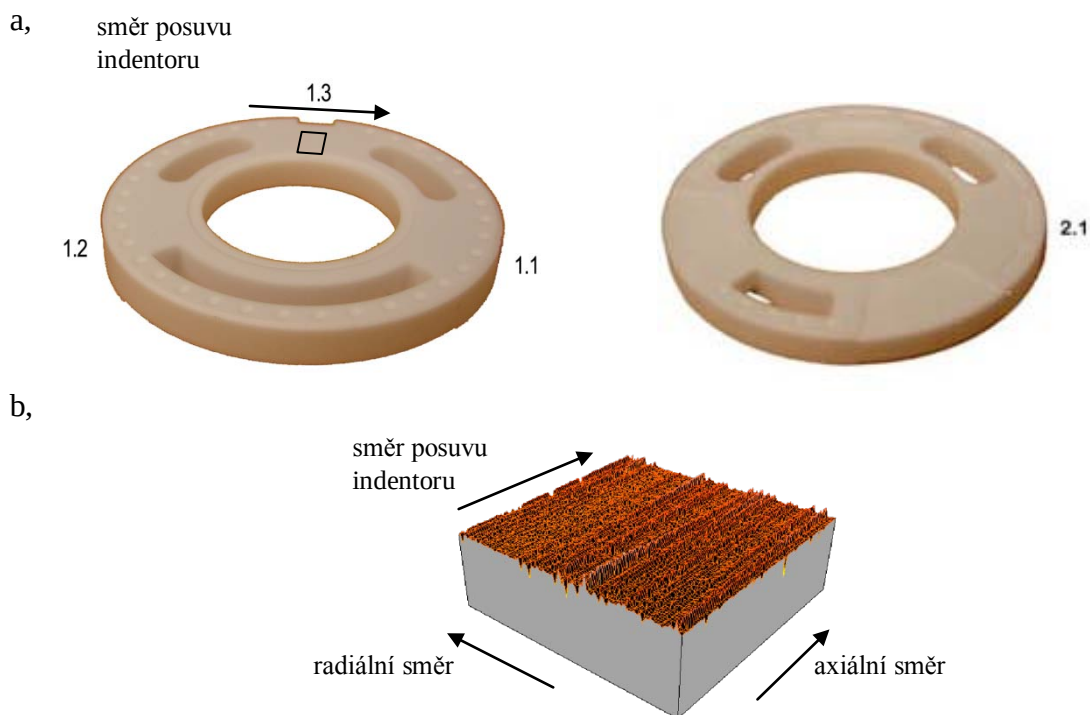
5.4.1 Měření a zobrazení drsnosti

Drsnost vzorku byla sledována s pomocí měřicího zařízení Surfcom 1500 SD (viz obr. 23)



Obr. č. 23: Měřicí zařízení Surfcom 1500 SD

a pomocí počítačového programu Shortcut to TIMS byly zadány podmínky měření drsnosti materiálu (rastr měření, rychlost indentoru, maximální pohyb indentoru na ose x a y). Vzorek byl měřen na různých místech (viz obr. 24) a při různých měřicích podmínkách (rastr měření, rychlost indentoru, maximální pohyb indentoru na ose x a y).



Obr. č. 24: a) místa na vzorku, kde byla prováděna měření a směr posuvu indentoru

b) detail směru posuvu indentoru

Naměřená data byla dále zpracována v programu Surfcom Map Standard 4.1.

Tab. č. 8: Podmínky měření

	Místo měření na vzorku	Rychlost indentoru[mm/s]	Maximum na ose X [m]	Maximum na ose Y [m]
1.Měření	1.1	0,3	0,005	0,005
2.Měření	1.1	0,3	0,001	0,001
3.Měření	1.1	0,3	0,002	0,002
4.Měření	1.2	0,3	0,002	0,002
5.Měření	1.3	0,3	0,002	0,002
6.Měření	2.1	0,3	0,002	0,002

Tab. č. 9: Naměřené hodnoty drsností

	Sa [μm]	Sq [μm]	Sp [μm]	Sv [μm]	Ssk [μm]	Sku [μm]	Sz[μm]
1.Měření	0,271	0,452	1,41	7,44	-3,39	23,60	6,89
2.Měření	0,189	0,366	2,04	5,97	-4,08	31	7,31
3.Měření	0,212	0,387	1,78	5,48	-4,01	28,2	6,05
4.Měření	0,22	0,4	1,27	6,32	-3,69	26,3	6,61
5.Měření	0,223	0,408	1,67	5,84	-3,71	26,3	6,71
6.Měření	0,183	0,358	1,45	5,69	-4,32	37,9	6,79

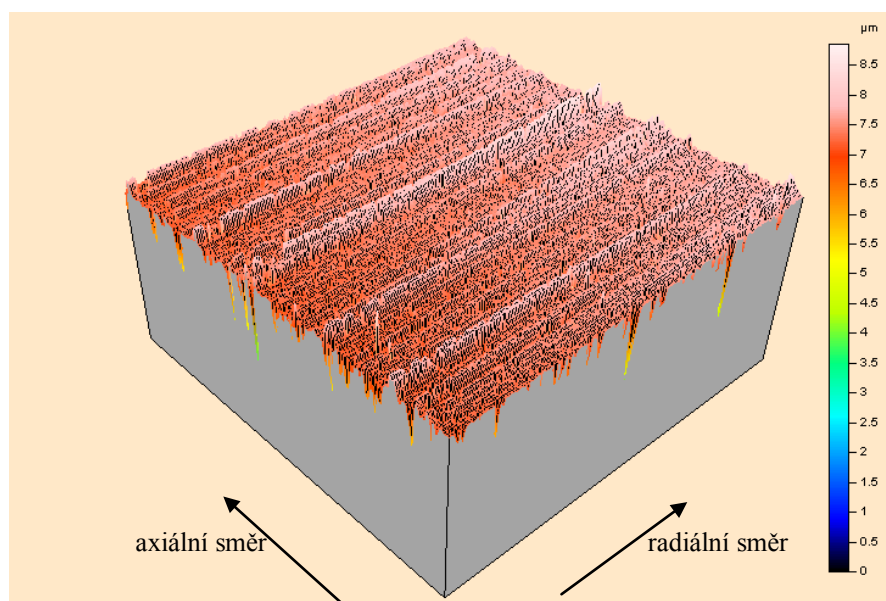
Tab. č. 10: Průměry a směrodatné odchylky drsností

	Průměr	Směrodatná odchylka
Sa [μm]	0,22	0,03
Sq [μm]	0,4	0,03
Sp [μm]	1,6	0,3
Sv [μm]	6,1	0,6
Ssk [μm]	-3,9	0,3
Sku [μm]	29	5
Sz [μm]	6,7	0,4

Trojrozměrné zobrazení povrchu

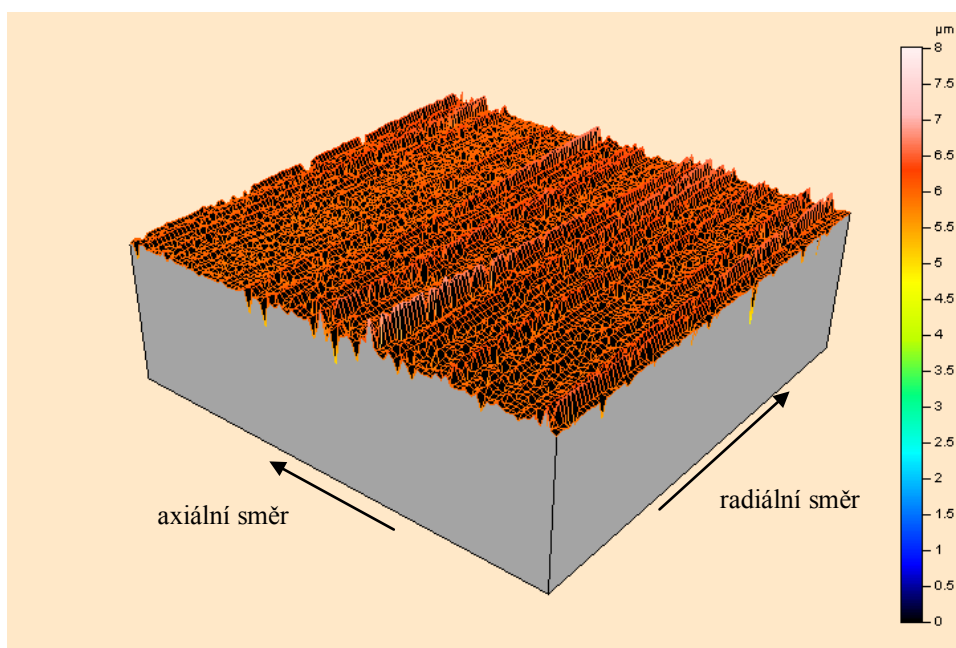
Trojrozměrné zobrazení bylo vytvořeno též pomocí programu Shortcut to TMS kvůli názornější představě o drsnosti povrchu.

1. Měření

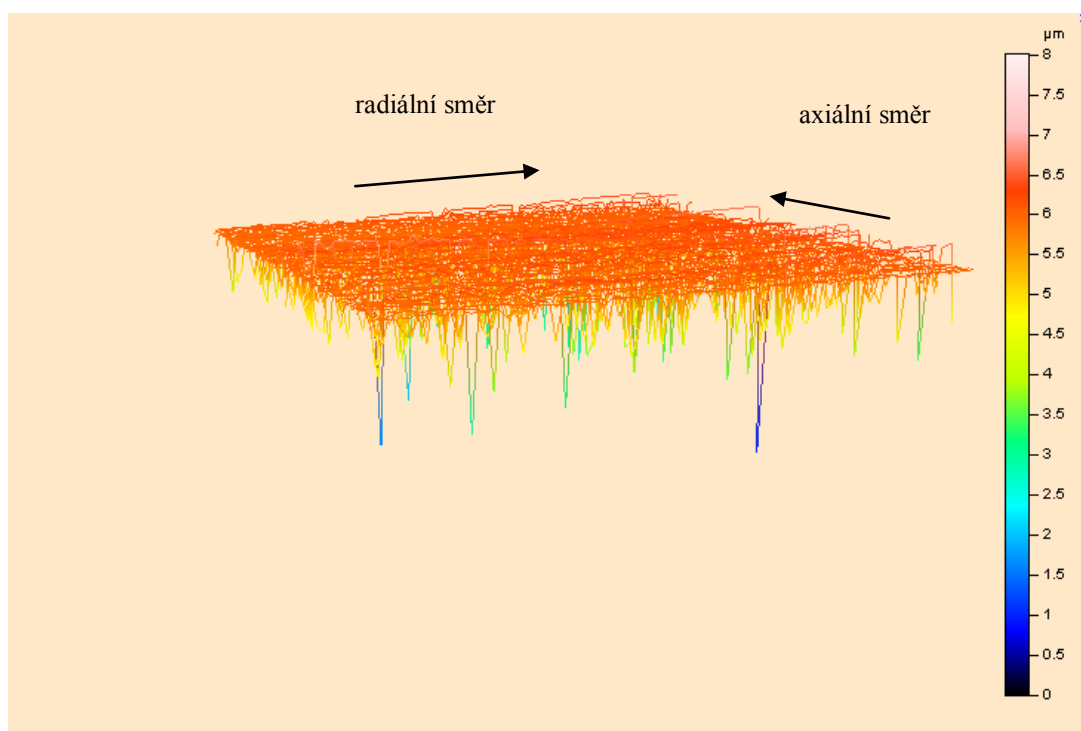


Obr. č. 25: 3D zobrazení povrchu vzorku (měření č.1)

2. Měření

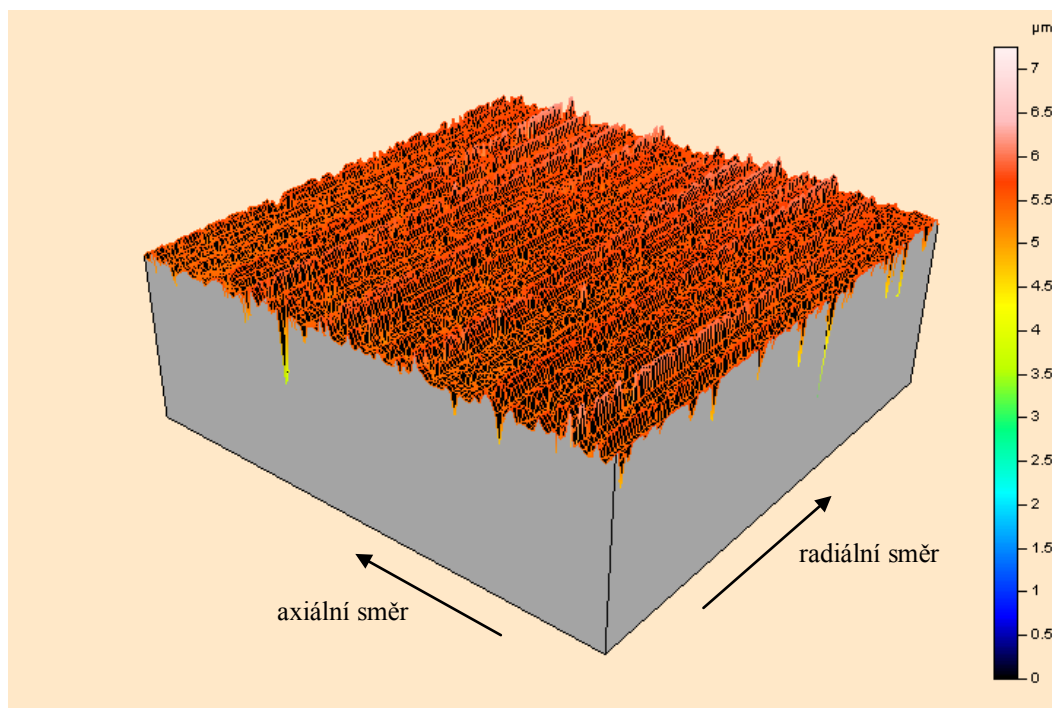


Obr. č. 26: 3D zobrazení povrchu vzorku (měření č.2)

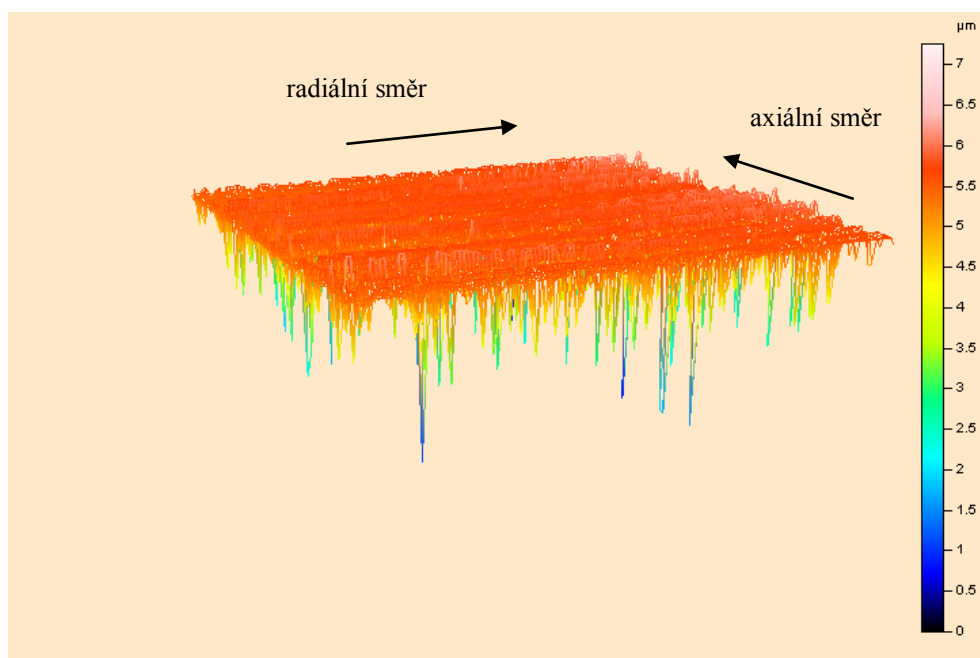


Obr. č. 27: Síťové 3D zobrazení povrchu vzorku – vrcholů (měření č.2)

3. Měření

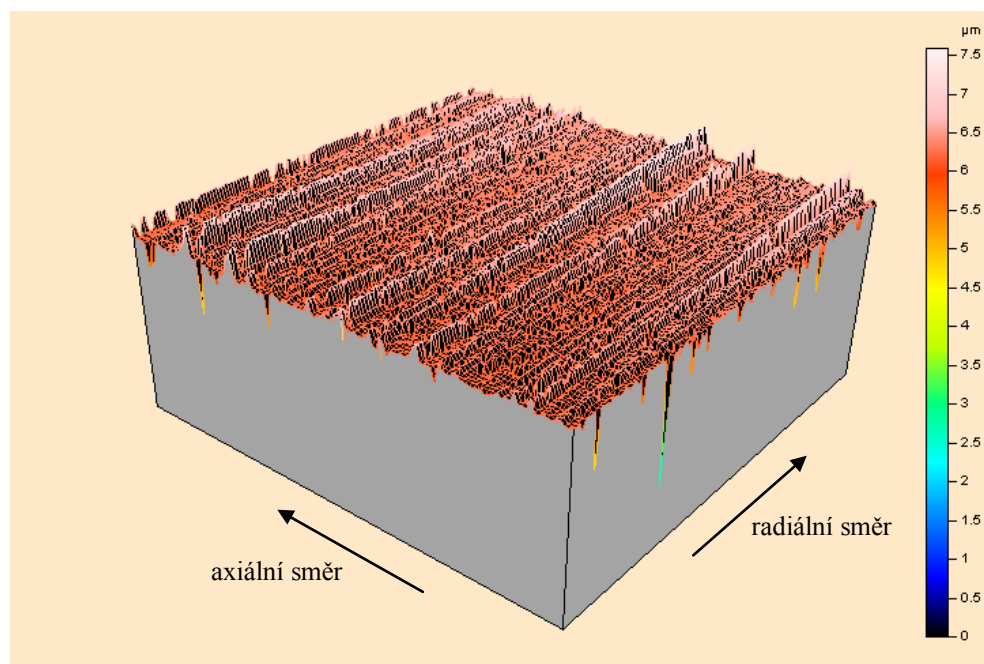


Obr. č. 28: 3D zobrazení povrchu vzorku (měření č.3)

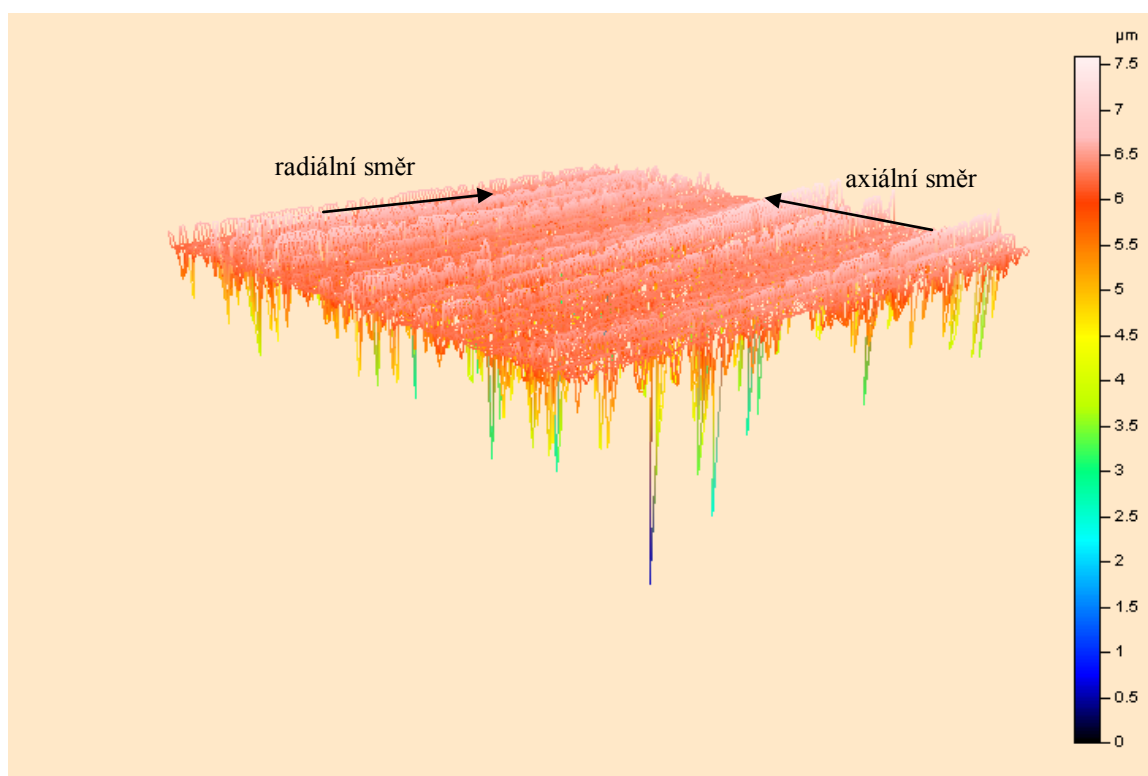


Obr. č. 29: Síťové 3D zobrazení povrchu vzorku – vrcholů (měření č.3)

4. Měření

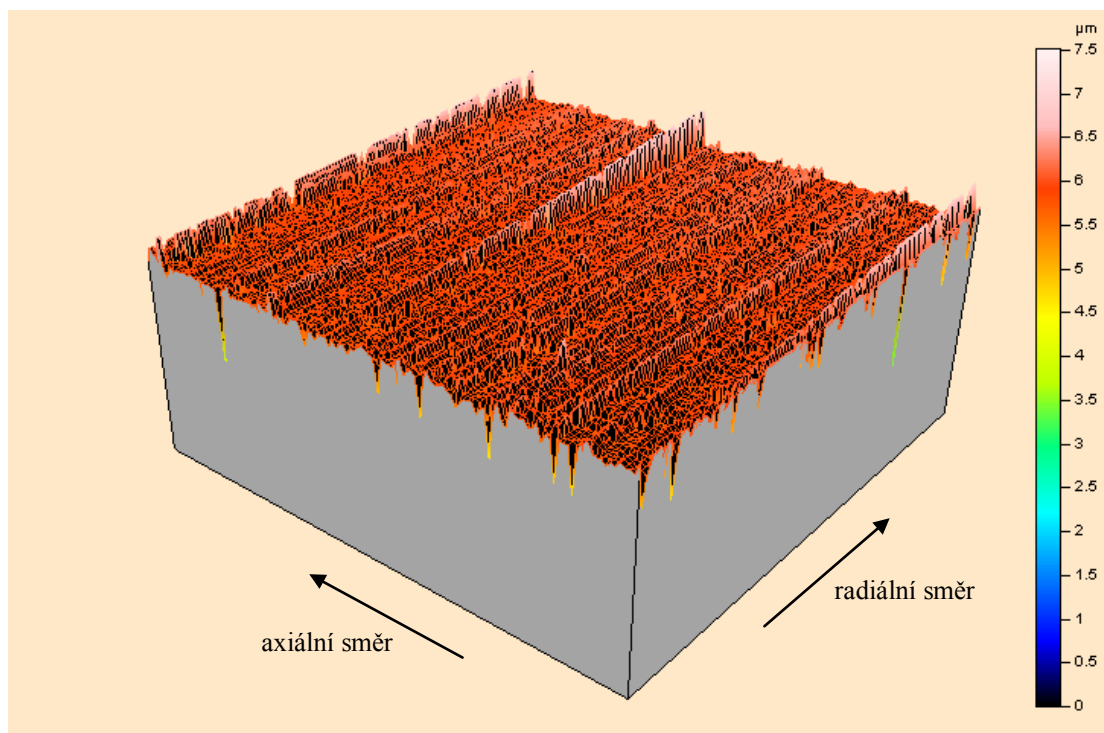


Obr. č. 30: 3D zobrazení povrchu vzorku (měření č.4)

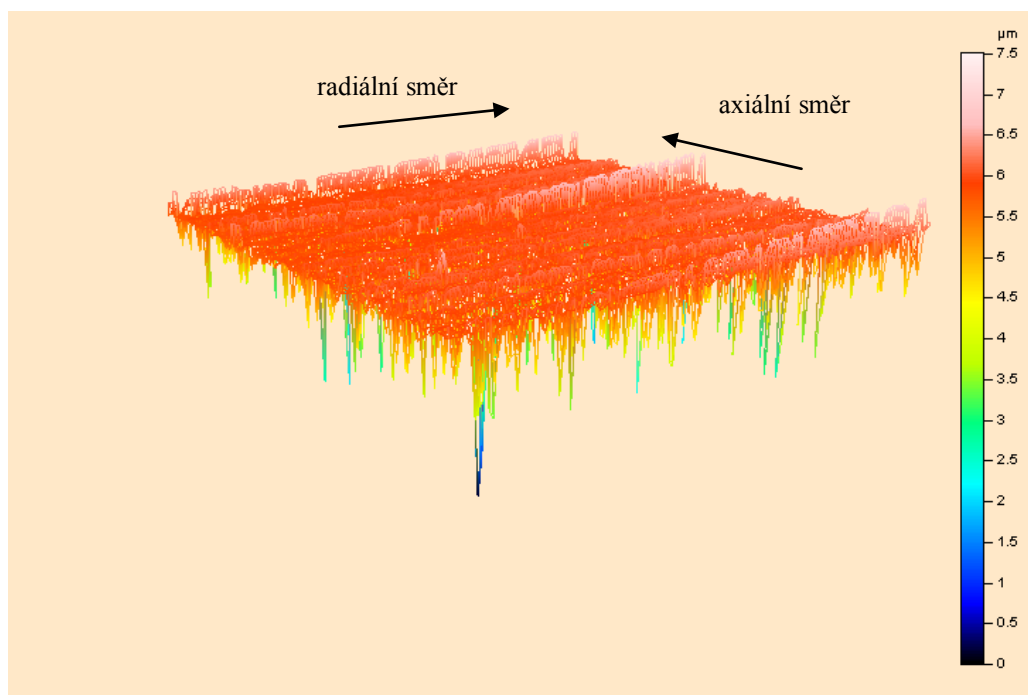


Obr. č. 31: Síťové 3D zobrazení povrchu vzorku – vrcholů (měření č.4)

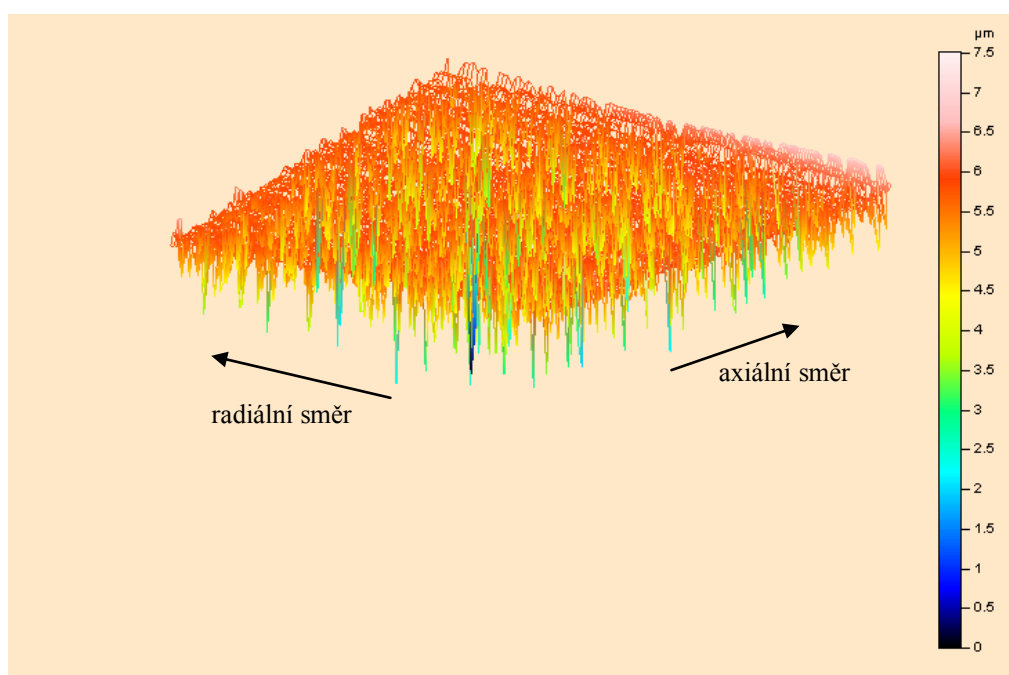
5. Měření



Obr. č. 32: 3D zobrazení povrchu vzorku (měření č. 5)

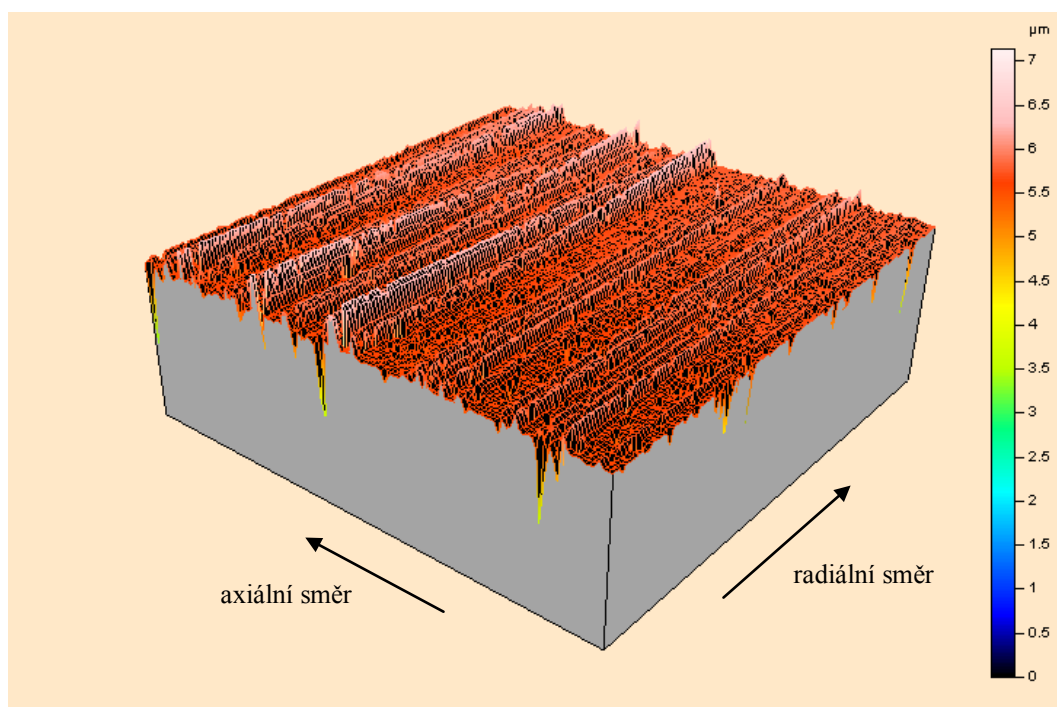


Obr. č. 33: Síťové 3D zobrazení povrchu vzorku – vrcholů (měření č. 5)

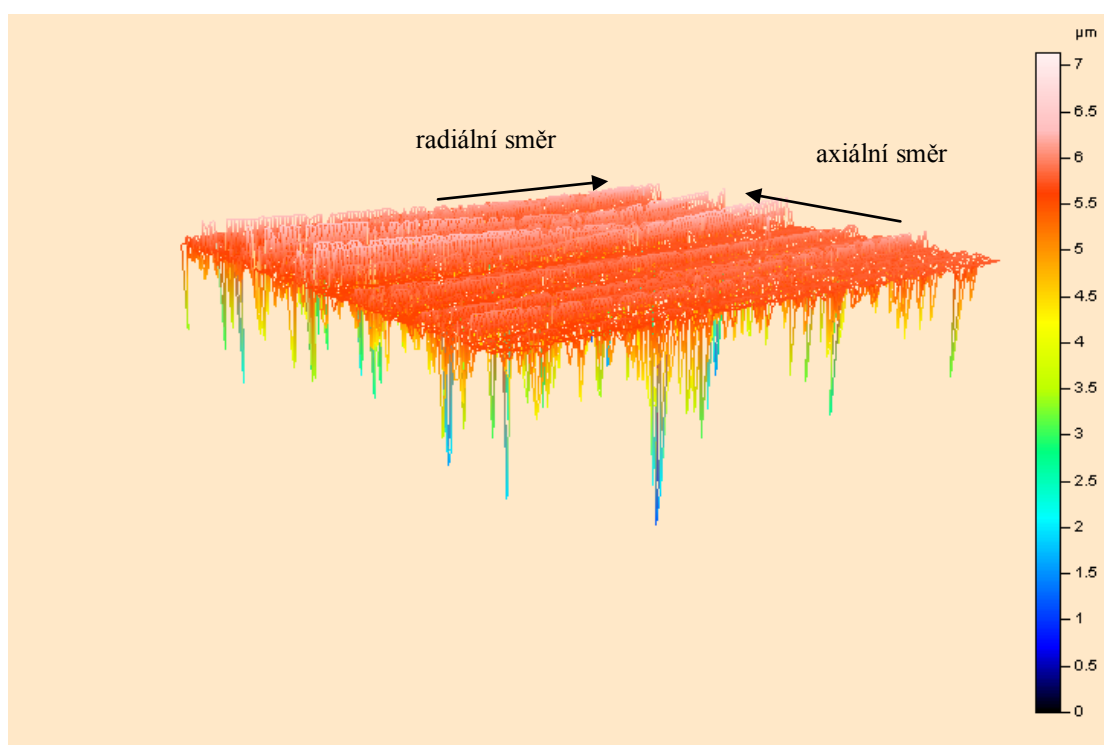


Obr. č. 34: Síťové 3D zobrazení povrchu vzorku – pórů (měření č. 5)

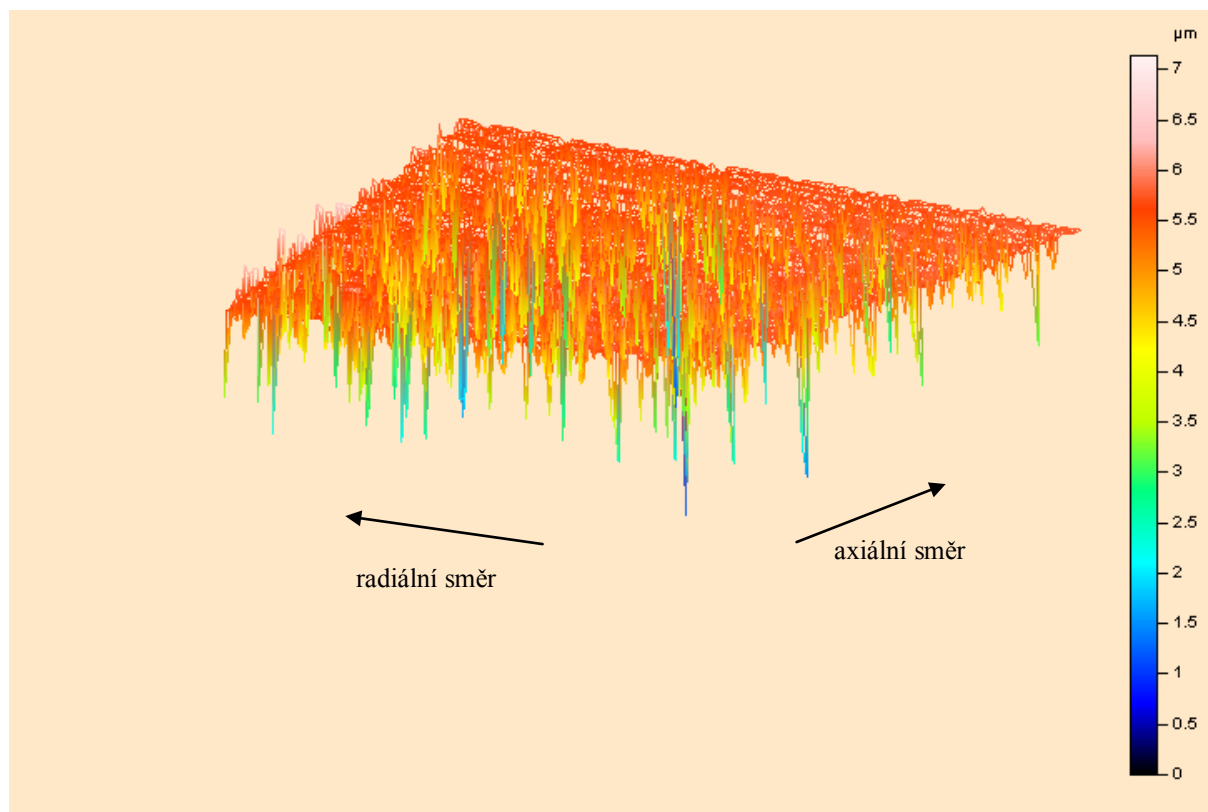
6. Měření



Obr. č. 35: 3D zobrazení povrchu vzorku (měření č.6)



Obr. č. 36: Síťové 3D zobrazení povrchu vzorku – vrcholků (měření č.6)



Obr. č. 37: Síťové 3D zobrazení povrchu vzorku – pórů (měření č.6)

5.4.2 Závěry z měření a zobrazení drsnosti

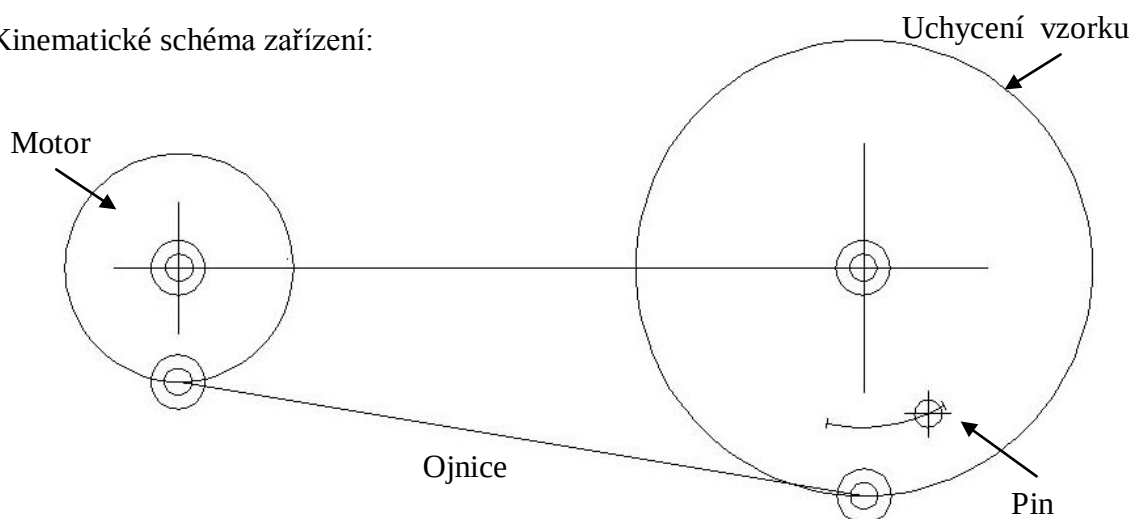
Drsnost povrchu měřená na přístroji Surfcom 1500 SD a zobrazení povrchů vzorků upozorňuje na velikost anizotropie drsnosti (závislosti na směru konečného broušení materiálu).

- a) Drsnost v rámci jednoho vzorku se na různých místech neliší a je rovnoměrná, což je patrné z měření č. 1, měření č. 4 a měření č. 5.
- b) Drsnost se mezi vzorky neliší, což je patrné z měření č. 5 a měření č. 6.
- c) Průměrná drsnost všech vzorků je $S_a = 0,2163 \mu\text{m}$ se směrodatnou odchylkou rovnou 0,0286.
- d) Ze získaných výsledků je patrné, že drsnost je u všech vzorků stejná a všechny vzorky jsou stejně kvalitní.

5.5 Tribologické zkoušky materiálu

Tribologické vlastnosti materiálu byly zjišťovány vzhledem ke specifickému pohybu sledovaných keramických destiček metodou Pin on disk s vratným pohybem na unikátním přístroji katedry Laboratoire de microanalyse des surfaces univerzity Ecole Nationale Supérieure de Mécaniques Microtechniques de Besançon. Na povrch vzorku tvaru disku (Disk) je přiložen Pin, což je tělísko ve formě nerotující kuličky. V tomto případě šlo o kuličku o průměru 6 mm z Al_2O_3 . Pin je zatěžován předem definovanou silou a disk se otáčí po kružnici daného poloměru v předem definovaném úhlu a poté se vrací zpět. Pin vytváří na povrchu vzorku stopu, která může být následně analyzována pod optickým mikroskopem. Z hodnot síly, potřebné k pohybu pinu po disku prostřednictvím počítačového programu Lab View 7, kam jsou zadávány podmínky jednotlivých měření (doba měření a aplikované zatížení), získáváme graf koeficientu tření v závislosti na čase.

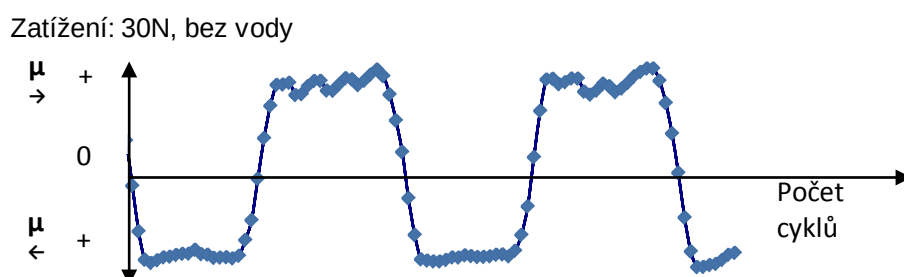
Kinematické schéma zařízení:



Obr. č. 38 : Kinematické schéma zařízení

Výsledky byly shromážděny v programu Lab View 7. V následujícím grafu (viz graf 5) jsou výsledky ukázány (pro jeden soubor bylo naměřeno 68 000 hodnot).

Graf č. 5: Zobrazení výsledků z programu Lab View 7



Kladné a záporné hodnoty odpovídají dvěma směrům pohybu. Kladné a záporné hodnoty nebyly zcela symetrické a proto byly symetrizovány v programu Microsoft Excel. Šikmá část svědčí o tom, že statický koeficient tření (při zastavení Pinu) je menší, než dynamický koeficient tření. Pro vyhodnocení dynamického koeficientu tření byla vyloučena šikmá část (což bylo vždy v rozmezí 15% doby pohybu).

Měření byla prováděna při zátěži 5, 10, 30, 50 N. V částech „Tribologické zkoušky za sucha“ a „Tribologické zkoušky ve vodě“ jsou podrobněji rozebrána měření při zatížení 30N a 50N, jelikož při nižších zatíženích nedošlo k ustálení hodnot a stopy opotřebení na korundové keramice jsou příliš malé. Z tohoto důvodu byly podkapitoly „Opotřebení“ a „Analýza vynesných částic“ zpracovány též pro tato dvě měření. V kapitole „Porovnání tribologických vlastností“ – „Koeficient tření“ jsou rozebrána zatížení 5, 10, 30 a 50 N.

5.5.1 Tribologické zkoušky za sucha (vlhkost 20 – 50% RH)

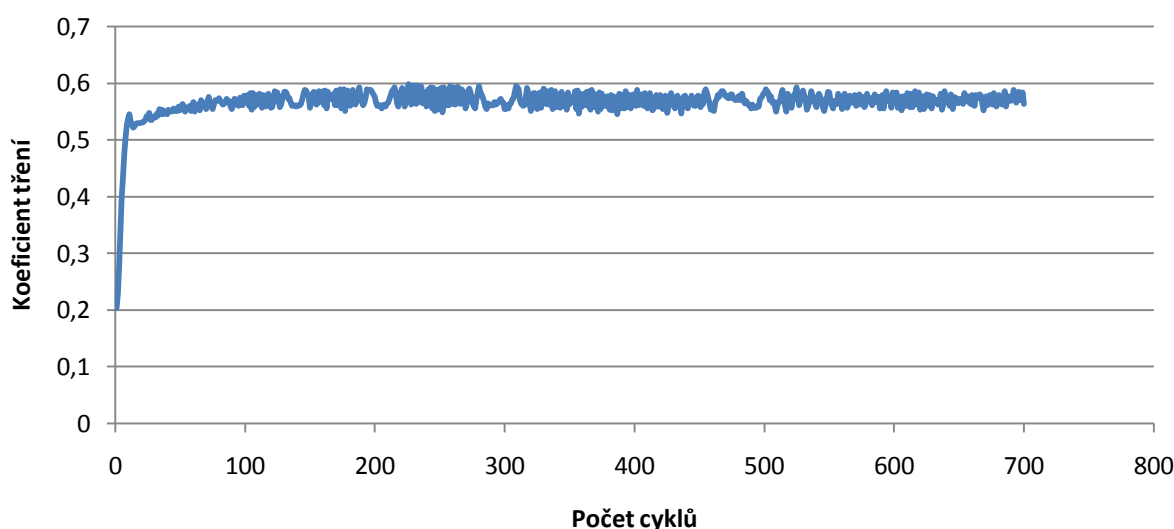
1. Měření

Podmínky měření:

Aplikované zatížení: 30 N

Doba měření: 60 min

Graf č. 6: Průběh koeficientu tření v závislosti na počtu cyklů (měření č.1)

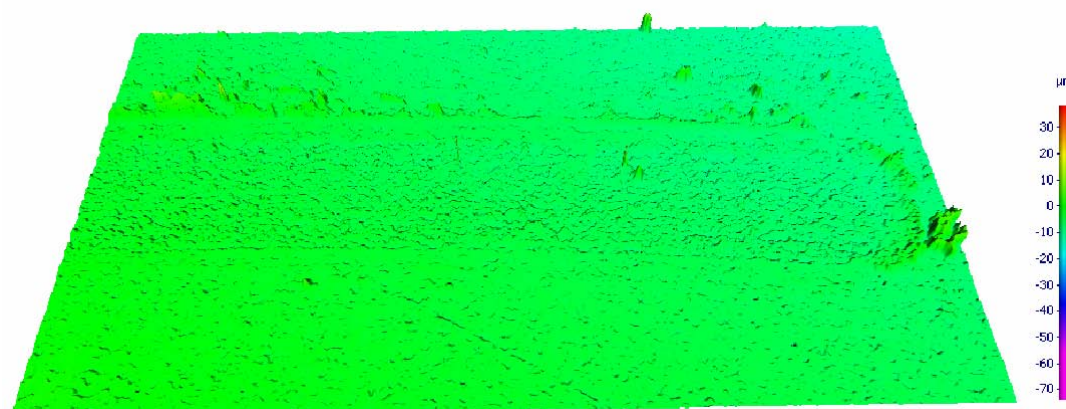


Průměrný koeficient tření po stabilizaci při zadaných podmínkách je 0,57

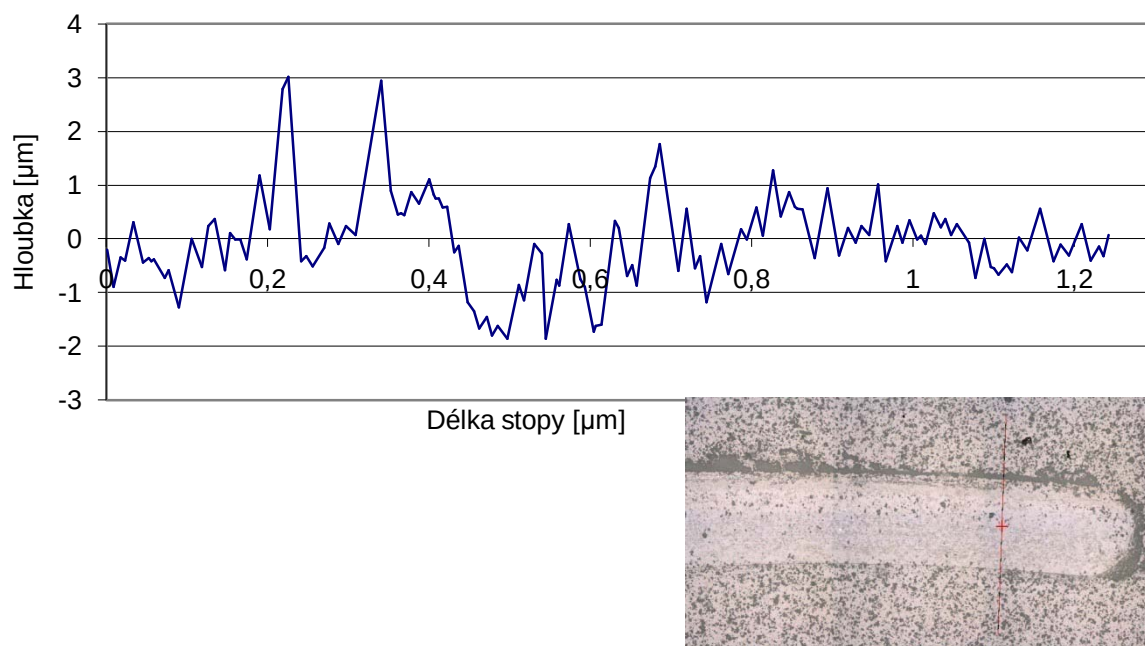
Analýza stopy po indentoru:



Obr. č. 39: Stopa po tribologické zkoušce (měření č.1)



Obr. č. 40: 3D zobrazení tribologické stopy (měření č.1)



Obr. č. 41: Příčný průřez tribologické stopy (měření č.1)
(obrázek obsahuje graf znázorňující průřez této stopy)

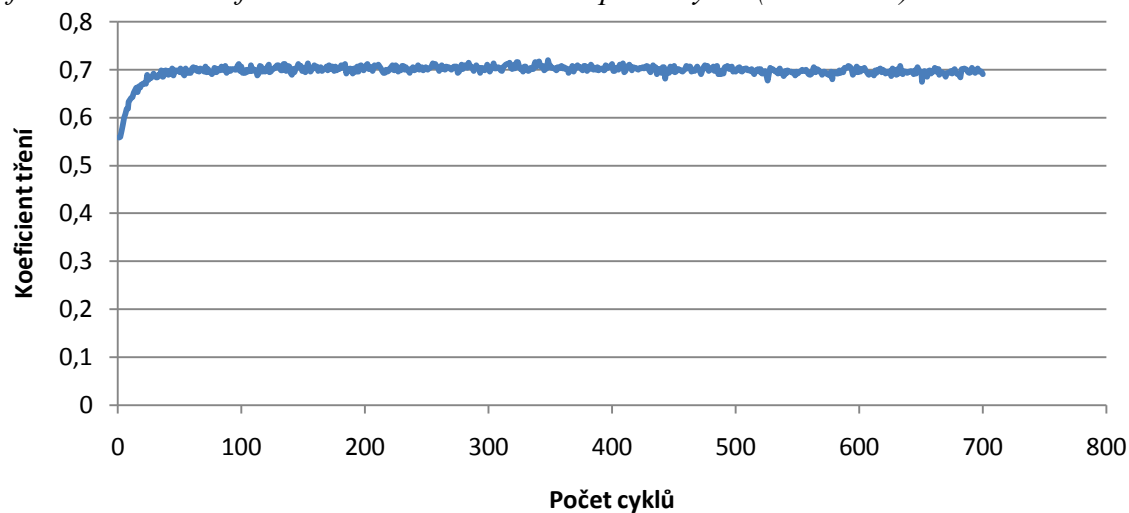
2. Měření

Podmínky měření:

Aplikované zatížení: 50 N

Doba měření: 60 min

Graf č. 7: Průběh koeficientu tření v závislosti na počtu cyklů (měření č.2)

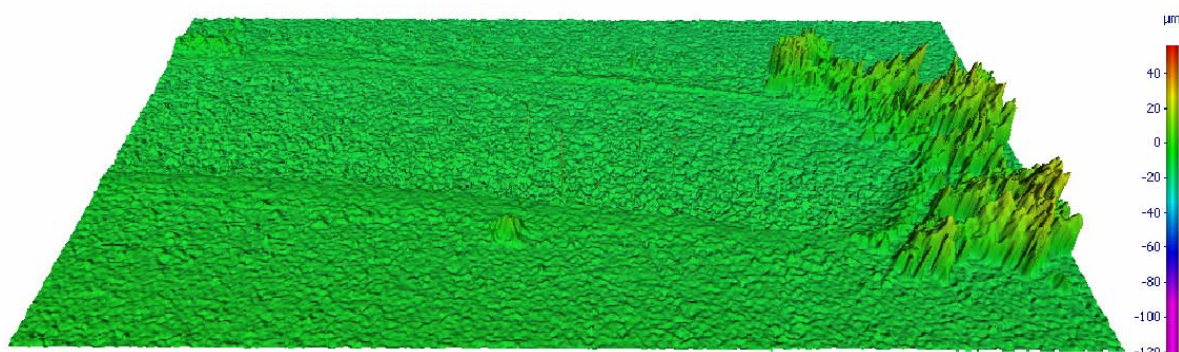


Průměrný koeficient tření po stabilizaci při zadaných podmínkách je 0,7.

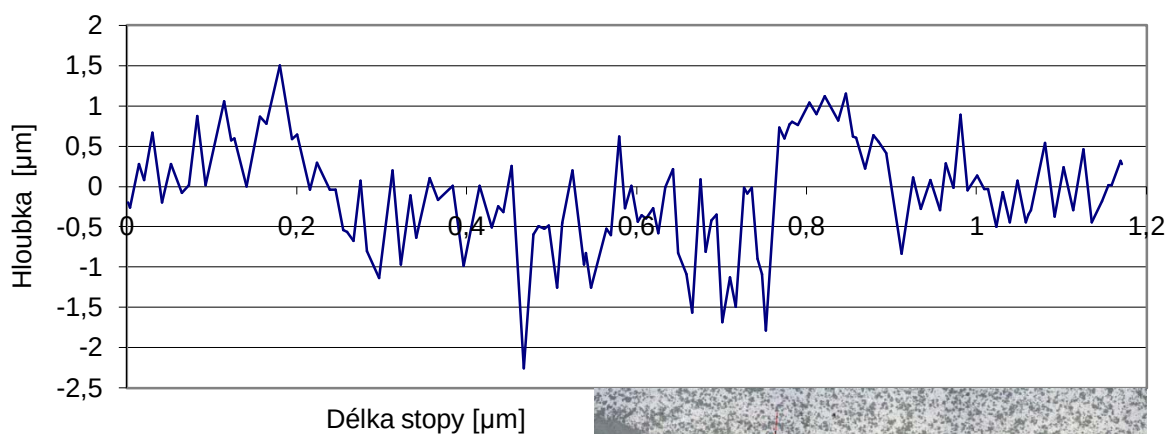
Analýza stopy po indentoru:



Obr. č. 42: Stopa po tribologické zkoušce (měření č.2)



Obr. č. 43: 3D zobrazení tribologické stopy(měření č.2)



Obr. č. 44: Příčný průřez
tribologické stopy (měření č.2)
(obrázek obsahuje graf
znázorňující průřez této stopy)



5.5.2 Tribologické zkoušky ve vodě

Pro toto měření byly vzorky ponořeny do vodní lázně a ve vodní lázni uchyceny do tribometru. Další postup měření je totožný s předešlým měřením.

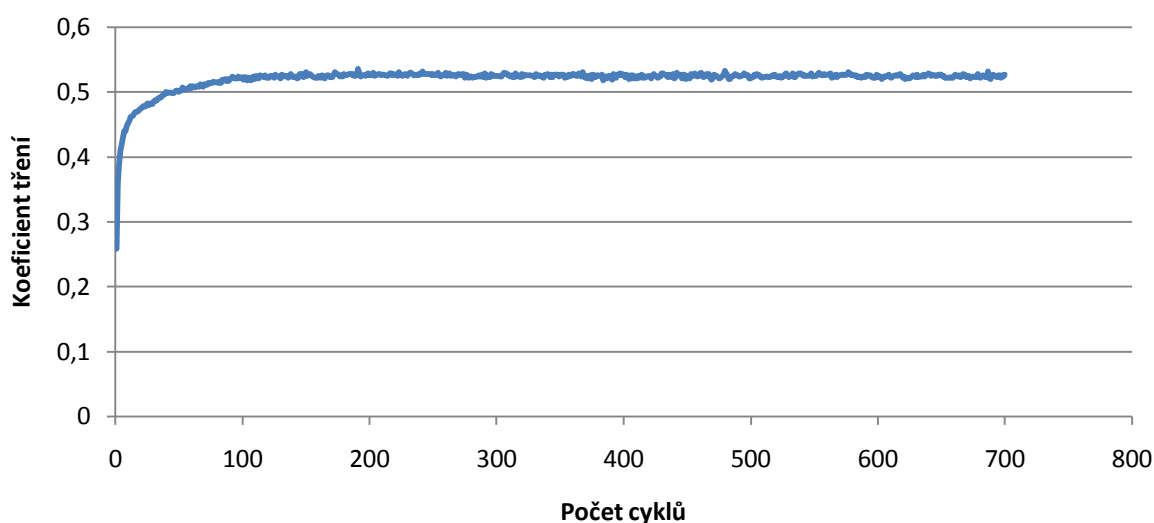
3. Měření

Podmínky měření:

Aplikované zatížení: 30 N

Doba měření: 60 min

Graf č. 8: Průběh koeficientu tření v závislosti na počtu cyklů (měření č. 3)



Průměrný koeficient tření po stabilizaci při zadaných podmínkách je 0,53.

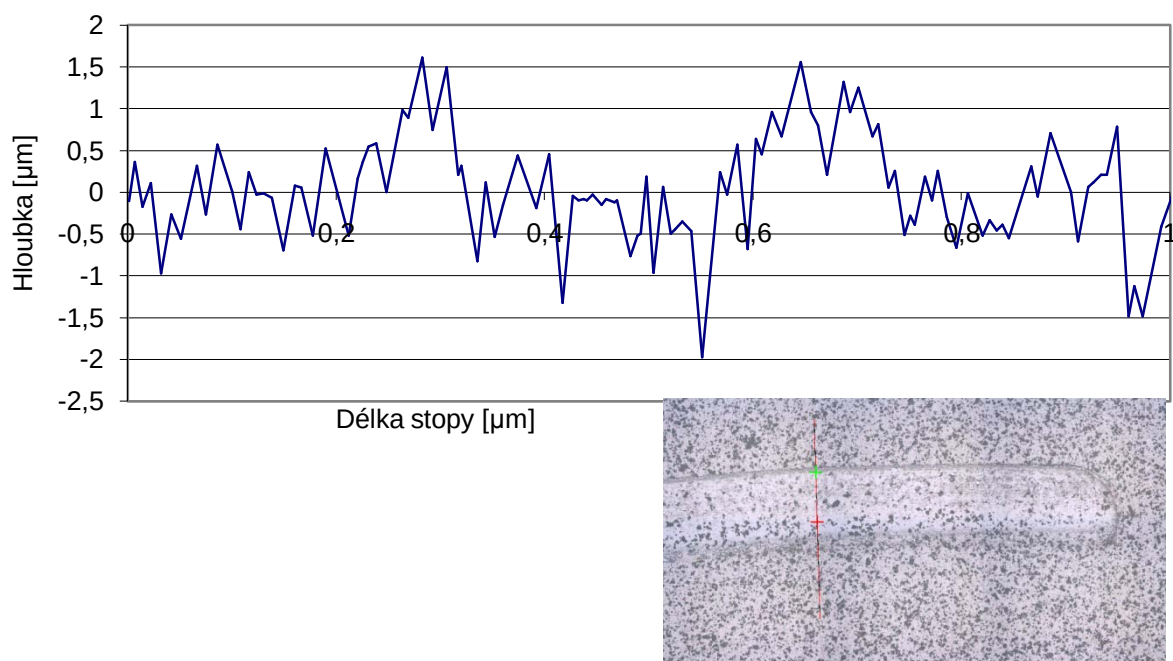
Analýza stopy po indentoru:



Obr. č. 45: Stopa po tribologické zkoušce (měření č.3)



Obr. č. 46: 3D zobrazení tribologické stopy(měření č.3)



Obr. č. 47: Průřez tribologické stopy (měření č.3)
(obrázek obsahuje graf znázorňující průřez této stopy)

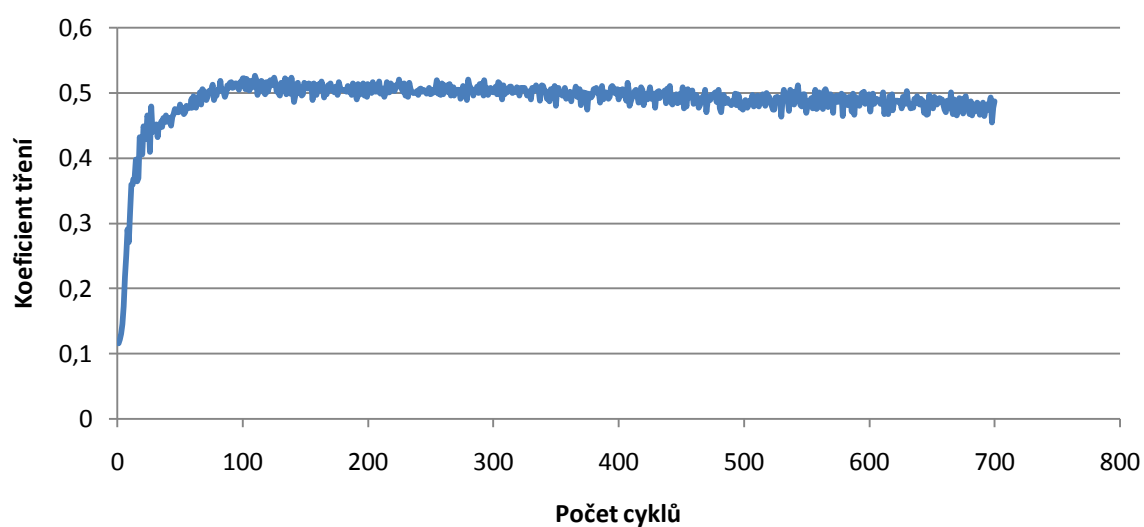
4. Měření

Podmínky měření:

Aplikované zatížení: 50 N

Doba měření: 60 min

Graf č. 9: Průběh koeficientu tření v závislosti na čase (měření č. 4)

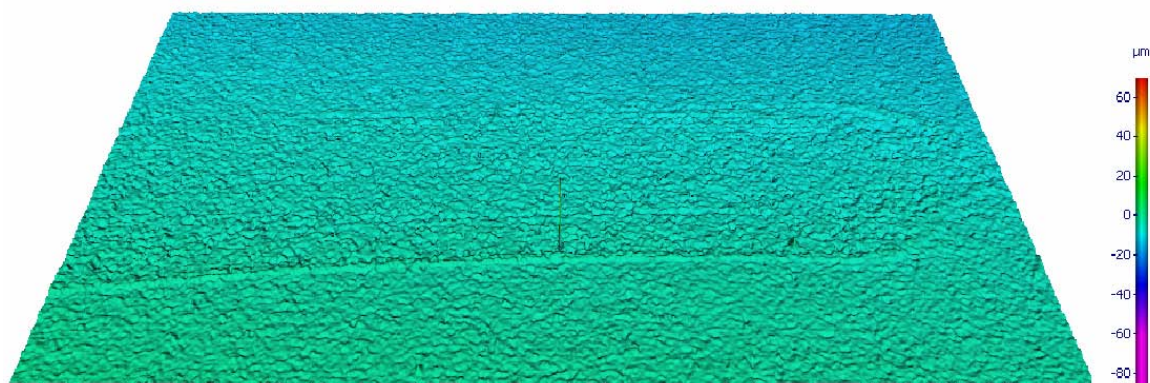


Průměrný koeficient tření po stabilizaci při zadaných podmínkách je 0,48.

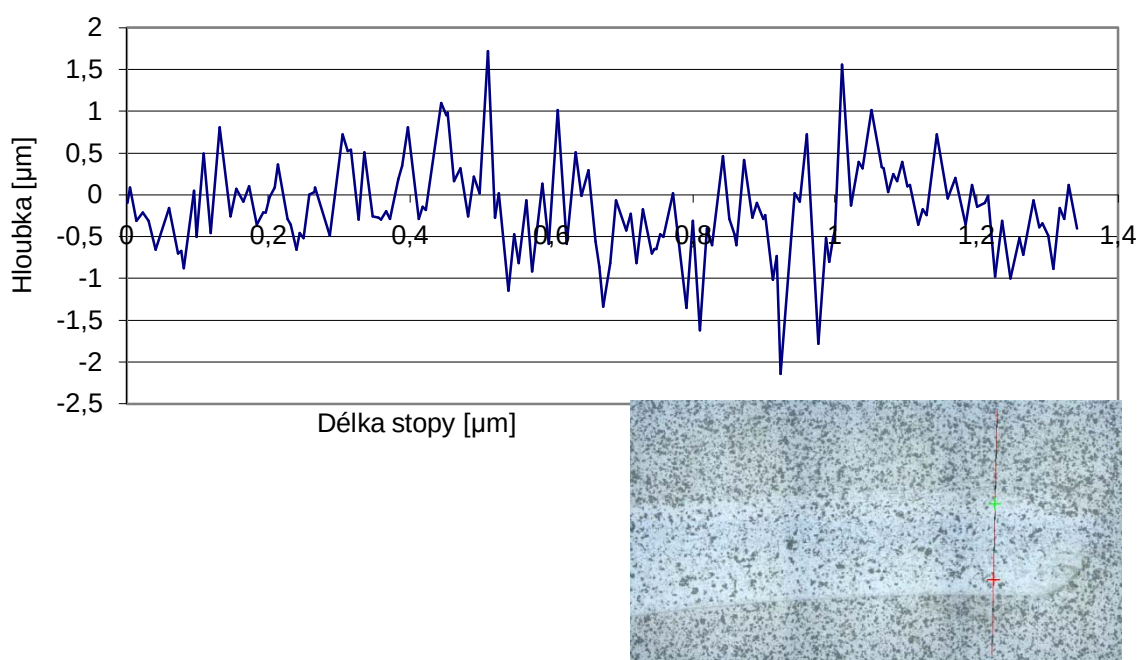
Analýza rýhy po indentoru:



Obr. č. 48: Stopa po tribologické zkoušce (měření č.4)



Obr. č. 49: 3D zobrazení tribologické stopy (měření č.4)



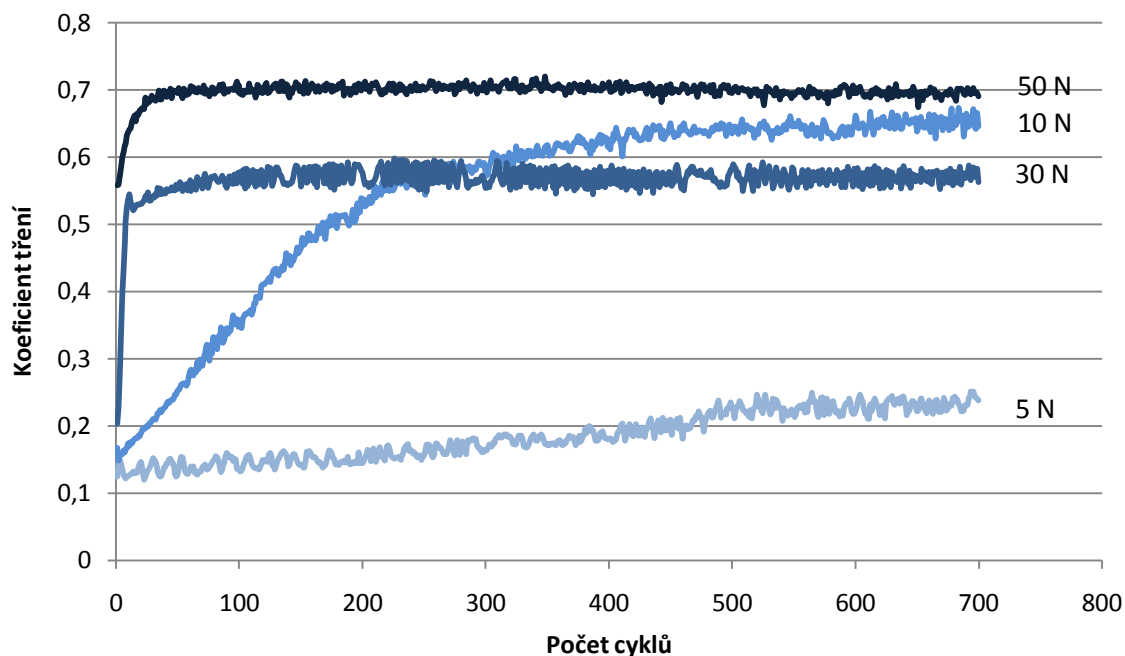
Obr. č. 50: Průřez tribologické stopy (měření č. 4)
(obrázek obsahuje graf znázorňující průřez této stopy)

5.5.3 Porovnání tribologických vlastností

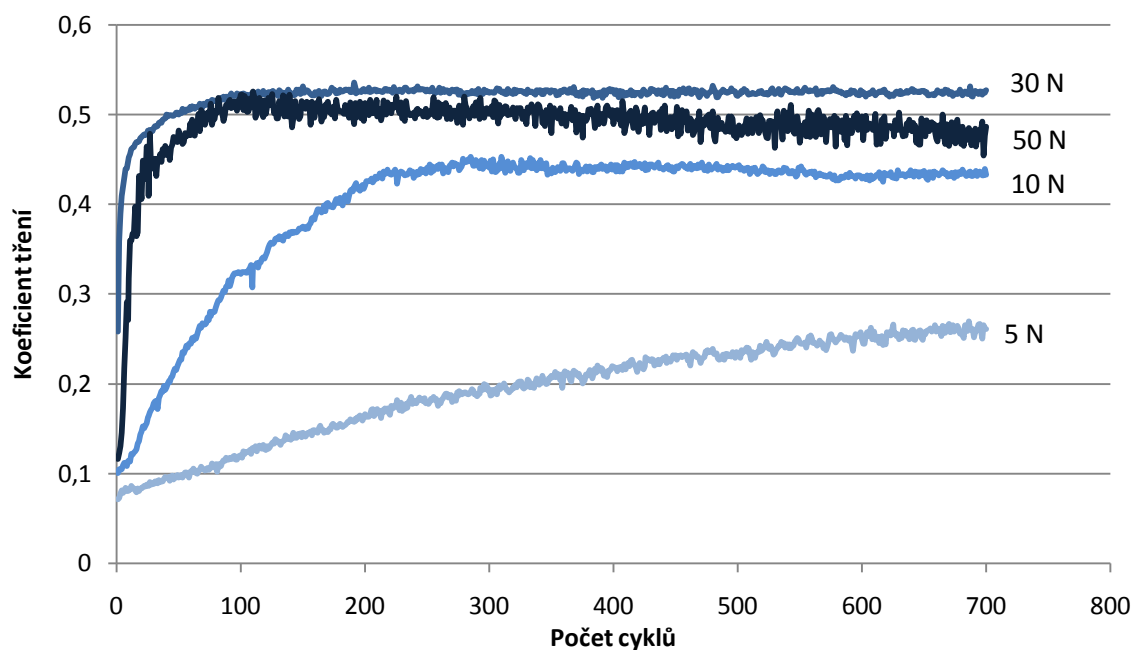
5.5.3.1 Koeficient tření

1. Závislost koeficientu tření na zatížení

Graf č. 10: Závislost koeficientu tření na počet cyklů pro jednotlivá zatížení
(testování bez vody)



Graf č. 11: Závislost koeficientu tření na počet cyklů pro jednotlivá zatížení
(testování s vodou)



Koeficient tření je při nižších zatíženích menší (viz graf 10, graf 11), jak při měření bez vody, tak s vodou. Při zátěži 5 N ještě nedochází k ustálení, toto měření nemá zlom ustálení ani při měření bez vody ani při testování ve vodě. Při zátěži 10 N nenastává úplné ustálení koeficientu tření. U měření bez vody při zatížení 10 N koeficient tření za bodem zlomu dále roste. U zátěže 30 a 50 N hodnoty koeficientu tření rychle dosahují ustálené hodnoty.

Ustálené hodnoty jsou shrnuty v tabulce č. 11. Podle tabulky č. 11 i sklonu grafů reziduí při regresi je zřejmé, že pohyb ve vodě vede k rychlejšímu ustálení koeficientu tření (viz příloha 4).

Tab. č. 11: Interval cyklů do ustálení koeficientu tření a interval cyklů v ustáleném stavu

Zatížení [N]	Prostředí	Interval cyklů do ustálení koeficientu tření	Interval cyklů v ustáleném stavu koeficientu tření
5	Bez vody	1-500	500-700
10	Bez vody	1-500	500-700
5	S vodou	1-500	500-700
10	S vodou	1-300	300-700
30	Bez vody	1-50	50-700
50	Bez vody	1-50	50-700
30	S vodou	1-100	100-700
50	S vodou	1-80	80-700

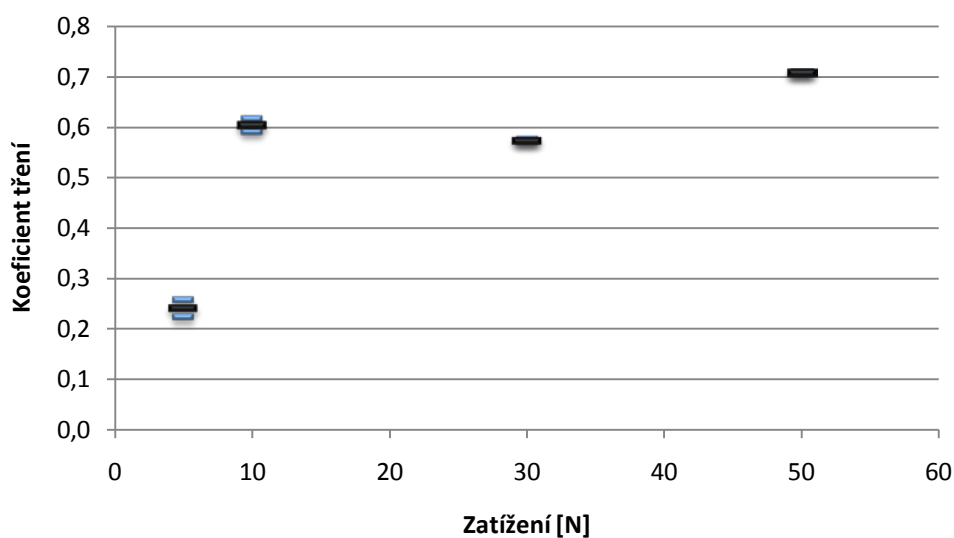
2. Porovnání naměřených, ustálených hodnot koeficientu tření s literaturou

a) Měření bez vody:

Tab. č. 12: Koeficient tření a jeho horní a dolní hranice (měření bez vody)

Zatížení [N]	Koeficient tření	Hranice koeficientu tření ($\alpha=5\%$)	
		Dolní hranice	Horní hranice
5	0,2419	0,2249	0,2589
10	0,6030	0,5908	0,6151
30	0,5730	0,5708	0,5752
50	0,7068	0,7057	0,7080

Graf č. 12: Závislost koeficientu tření a jeho horní a dolní hranice na zatížení
(měření bez vody)

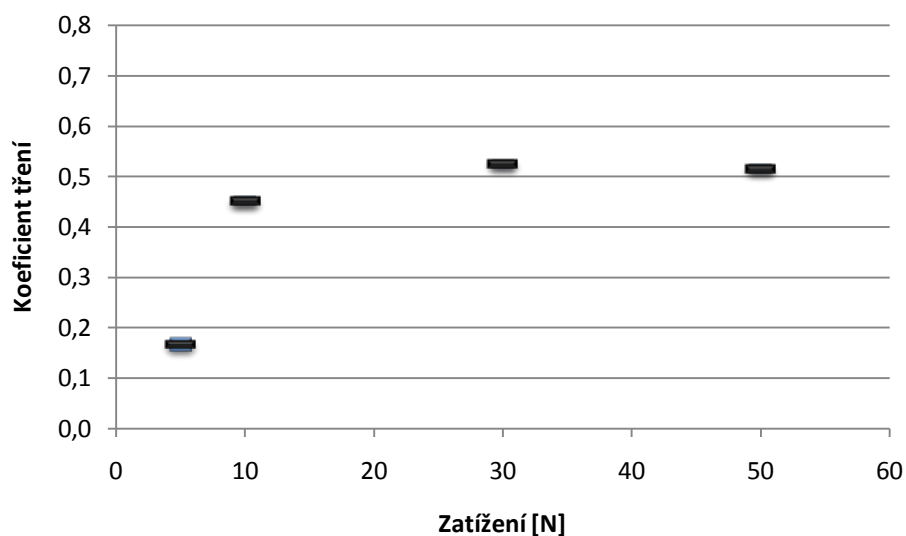


b) Měření s vodou

Tab. č. 13: Koeficient tření a jeho horní a dolní hranice (měření s vodou)

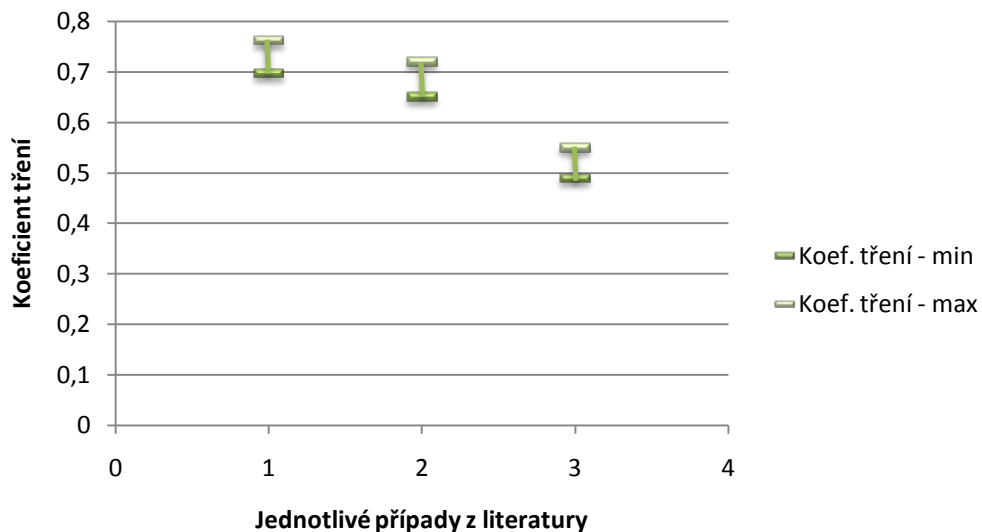
Zatížení [N]	Koeficient tření	Hranice koeficientu tření ($\alpha=5\%$)	
		Dolní hranice	Horní hranice
5	0,1684	0,1618	0,1750
10	0,4527	0,4511	0,4543
30	0,5258	0,5253	0,5263
50	0,5166	0,5149	0,5183

Graf č. 13: Závislost koeficientu tření a jeho horní a dolní hranice na zatížení
(měření s vodou)



c) Měření z literatury:

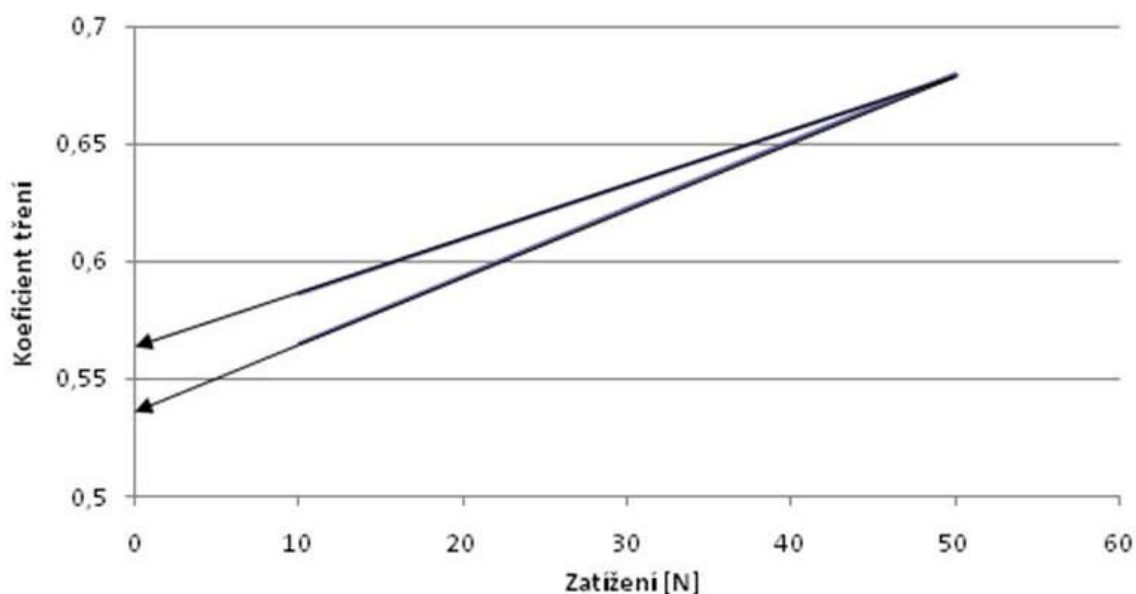
Graf č. 14: Koeficienty tření dle literatury (1- Liu CH. et al., 2008, 2- Zum Gahr K.-H. et al., 1999, Novak S. et al., 2001)



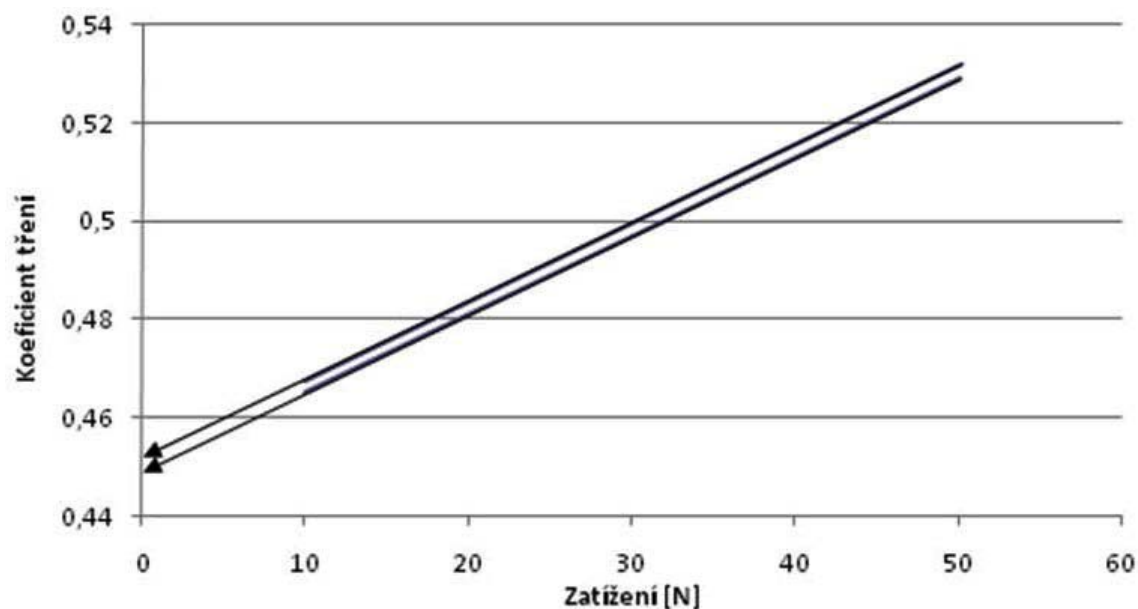
Výsledky měření souhlasí s výše uvedenou literaturou.

3. Odhad koeficientu tření při zatížení blížícím se k nule:

Graf č. 15: Závislost koeficientu tření po ustálení a na zatížení (bez vody)



Graf č. 16: Závislost koeficientu tření po ustálení a na zatížení (s vodou)



V grafu č. 15 a grafu č. 16 je patrné, že koeficient tření se zvyšujícím se zatížením v obou prostředích roste. Z grafu č. 15 se dá odhadnout, že koeficient tření bez vody při extrapolaci zatížení blížícím se nule je v rozmezí od 5,3 do 5,7.

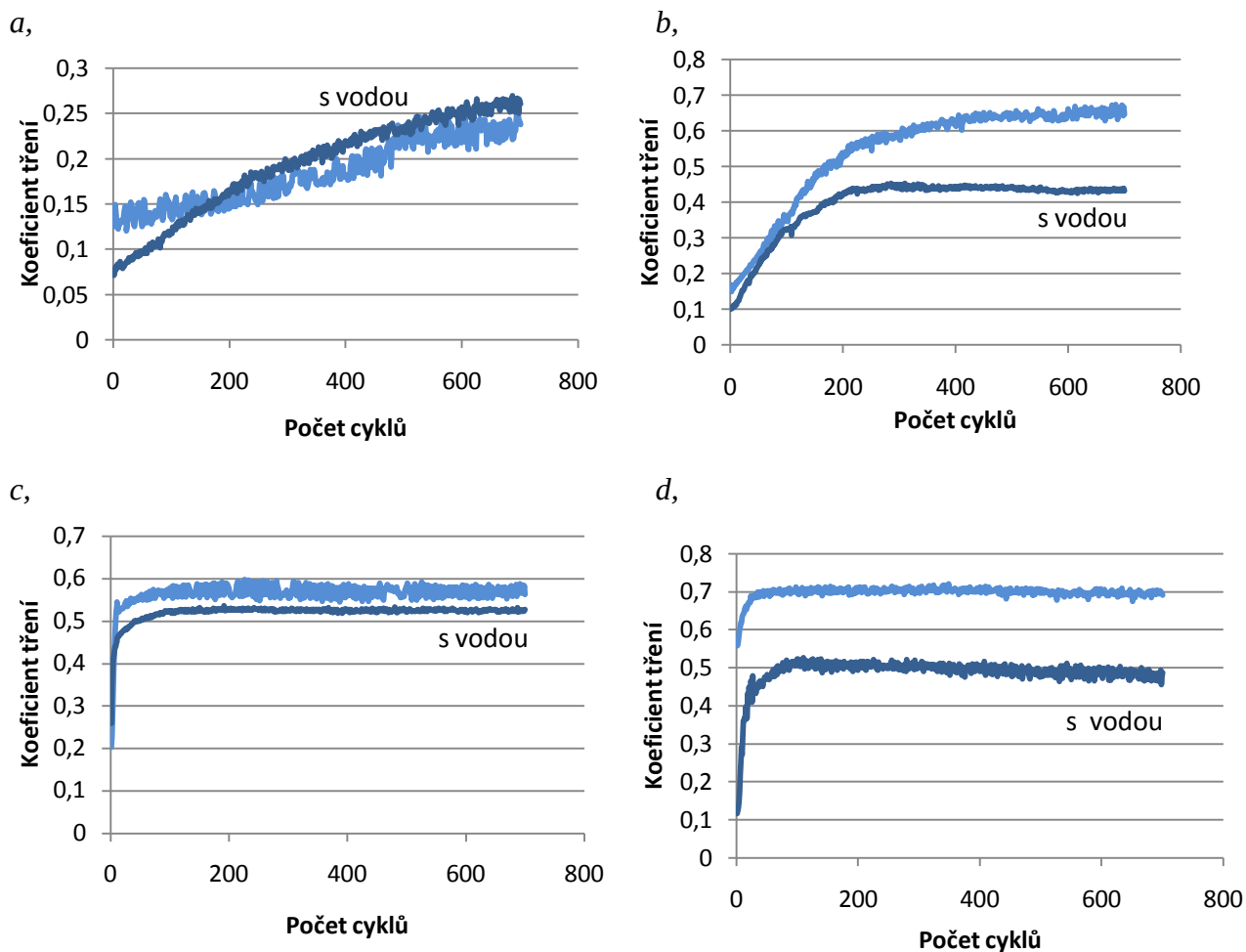
Graf č. 16 ukazuje, že dolní odhad koeficientu tření s vodou je 4,5 a jeho horní odhad je 4,55.

4. Závislost koeficientu tření na prostředí

Graf č. 17: Závislost koeficientu tření μ na prostředí: --- měření bez vody

--- měření s vodou

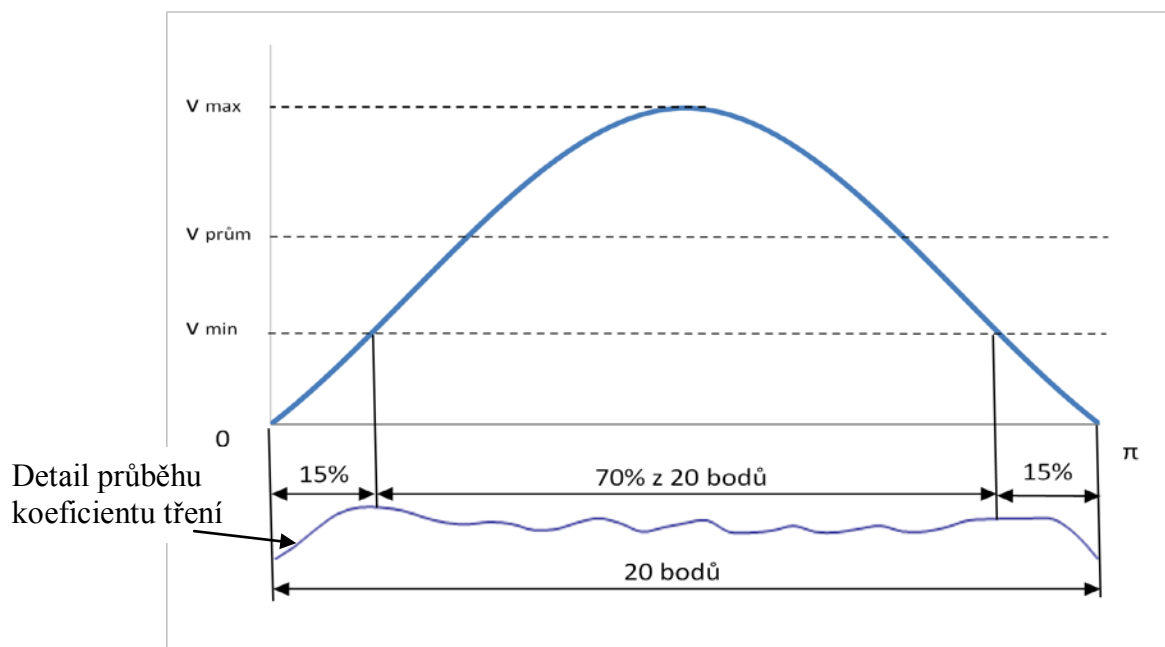
(a - zatížení 5N, b - zatížení 10N, c - zatížení 30N, d - zatížení 50N)



Doba ustálení koeficientu tření (viz tab.č. 11) ve vodě a bez vody se příliš neliší, přesto je doba ustálení ve vodě kratší, než bez vody. Ve vodě je koeficient tření nižší.

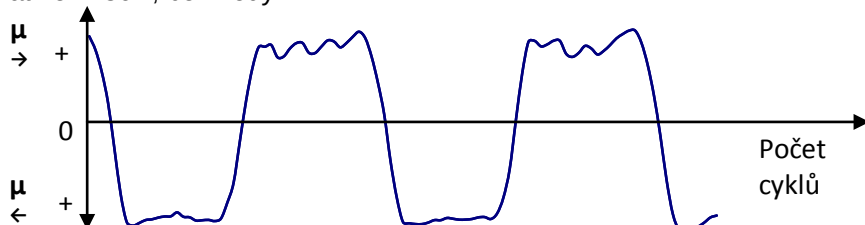
5. Závislost koeficientu tření na rychlosti pohybu

Graf č. 18: Zobrazení maximální, minimální a průměrné rychlosti posuvu u zkoušky Pin on disk s vratným pohybem během poloviny cyklu s konkrétní ukázkou detailu průběhu koeficientu tření

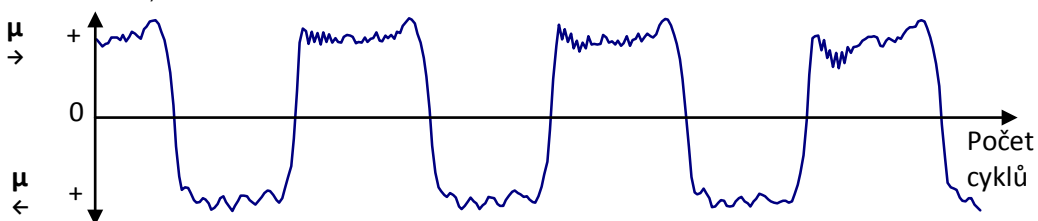


Graf č. 19: Příklady detailů průběhu závislosti koeficientu tření na počtu cyklů

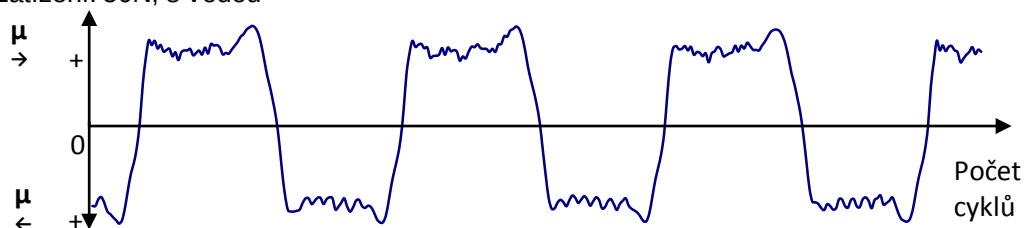
Zatížení: 30N, bez vody



Zatížení: 30N, s vodou



Zatížení: 50N, s vodou



Podle sklonu grafů reziduí při regresi (viz příloha č. 4) je zřejmé, že pohyb ve vodě je stabilnější.

Shrnutí (koeficient tření):

- a) Koeficient tření je při nižších zatíženích menší. To platí jak pro koeficient tření bez vody tak s vodou.
- b) Při zátěži 5 N ještě nedochází k ustálení, toto měření nemá zlom ustálení ani při měření bez vody ani při testování ve vodě. Při zátěži 10 N nenastává úplné ustálení koeficientu tření. U měření bez vody při zatížení 10 N koeficient tření za bodem zlomu dále roste. U zátěže 30 a 50 N hodnoty koeficientu tření rychle dosahují ustálené hodnoty. Ustálené hodnoty jsou shrnuty v tabulce č. 11.
- c) pohyb ve vodě vede k rychlejšímu ustálení koeficientu tření, než bez vody.
- d) Koeficient tření bez vody při extrapolaci zatížení blížícím se nule je v rozmezí od 5,3 do 5,7 na hladině významnosti 5%.
- e) Koeficient tření s vodou při extrapolaci zatížení blížícím se nule je v rozmezí je od 4,5 do 4,55 na hladině významnosti 5%.
- f) Koeficient tření ve vodě je nižší, než koeficient tření bez vody. Doba ustálení koeficientu ve vodě a bez vody se příliš neliší, přesto je doba ustálení ve vodě kratší, než bez vody
- g) Podle intervalových odhadů je zřejmé, že pohyb ve vodě je stabilnější.

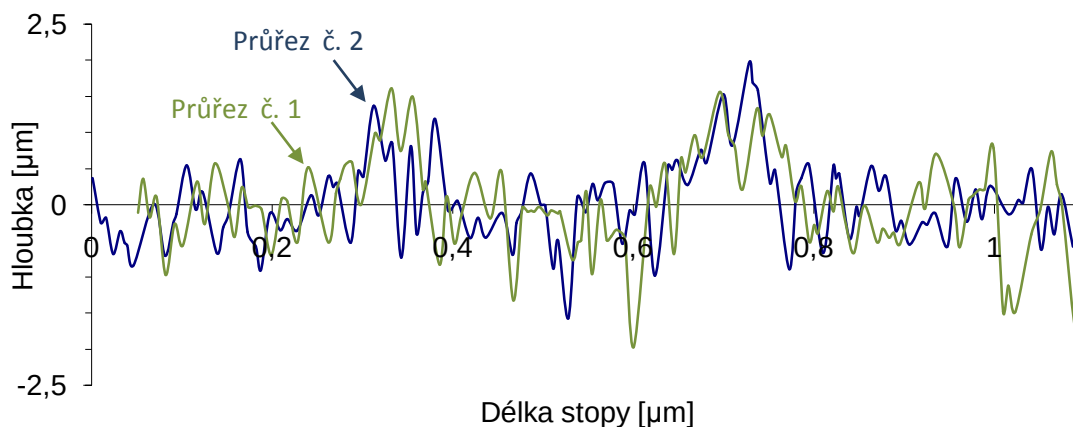
5.5.3.2 Opotřebení

Opotřebení lze určovat dle literatury různými způsoby. V tomto případě se jedná o opotřebení velice malé, a proto byla stopa měřena při zatížení 30 N a 50 N. Jako nejvhodnější metoda pro takovéto opotřebení bylo měření profilometrem. Pro vyhodnocení byly použity vždy 2 průřezy tribologickou stopou.

1. Závislost na rychlosti pohybu

a, Analýza závislosti na rychlosti pohybu z průřezů probroušenou stopou na různých místech:

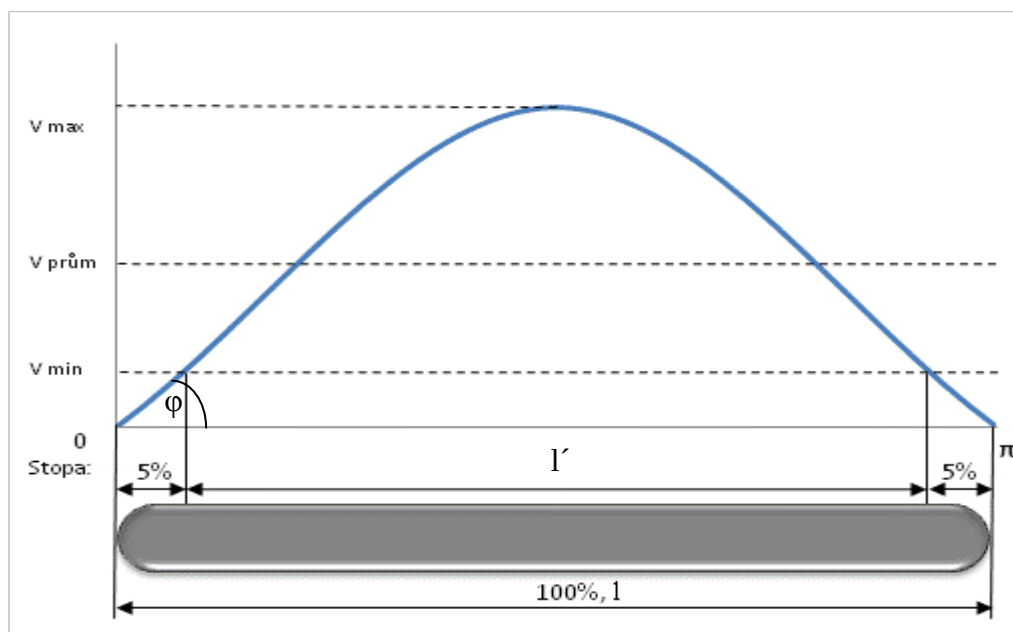
Graf č. 20: Průřezy tribologickou stopou na různých místech (zatížení: 30 N, s vodou)



Z grafu č. 20 je patrné, že průřezy tribologickou stopou na různých místech stopy se příliš neliší, tudíž míra otěru nezávisí na místě měření.

b, Analýza závislosti na rychlosti pohybu ze zobrazení rychlosti posuvu u zkoušky Pin on disk s vratným pohybem

Graf č. 21: Zobrazení maximální, minimální a průměrné rychlosti posuvu u zkoušky Pin on Disk s vratným pohybem během poloviny cyklu



Z výpočtů podle rovnic [10], [11]

$$l' \times v_{prum} = \int_0^{\pi} v_{max} \times \sin \varphi \quad [10]$$

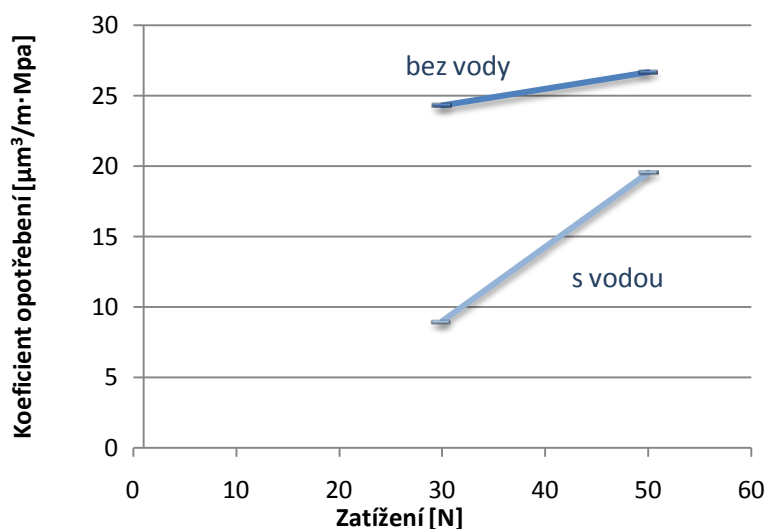
$$v_{min} = v_{max} \times \sin \varphi \quad [11]$$

vyplývá, že koeficient tření v rozmezí $v_{min} = 6,53 \text{ mm/s}$ a $v_{max} = 14,4 \text{ mm/s}$ je téměř nezávislý na rychlosti pohybu.

Z těchto hodnot je vidět zanedbatelná závislost koeficientu tření na rychlosti, což potvrzuje i zobrazení průřezů tribologickou stopou v grafu č. 20.

2. Závislost opotřebení na prostředí

Graf č. 22: Závislost velikosti opotřebení na zatížení

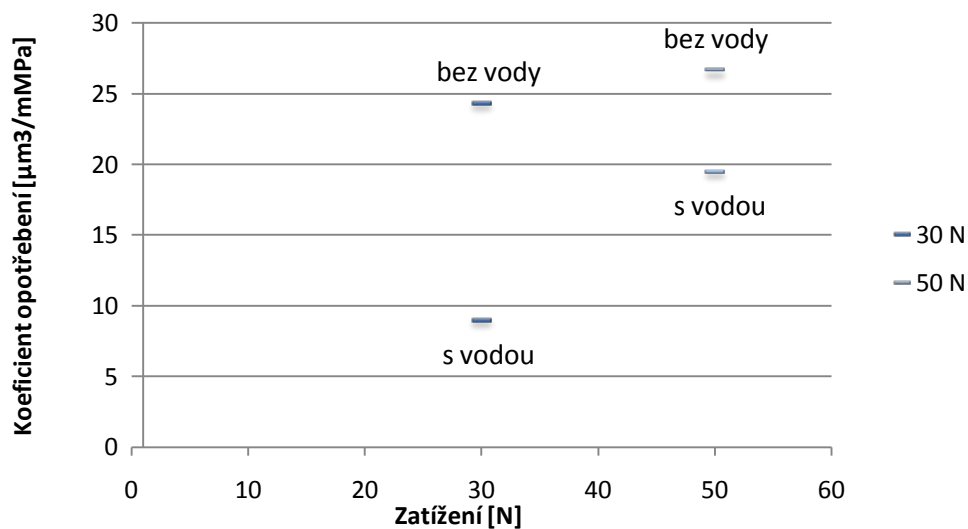


Z grafu č. 22 je patrné, že koeficient opotřebení se zvyšujícím se zatížením roste jak bez přítomnosti vody, tak s vodou. Koeficient opotřebení ve vodě je nižší, než opotřebení bez vody, ačkoli opotřebení ve vodě roste intenzivněji.

3. Závislost opotřebení na zatížení

a) Závislost velikosti opotřebení na zatížení

Graf č. 23: Závislost velikosti opotřebení na zatížení

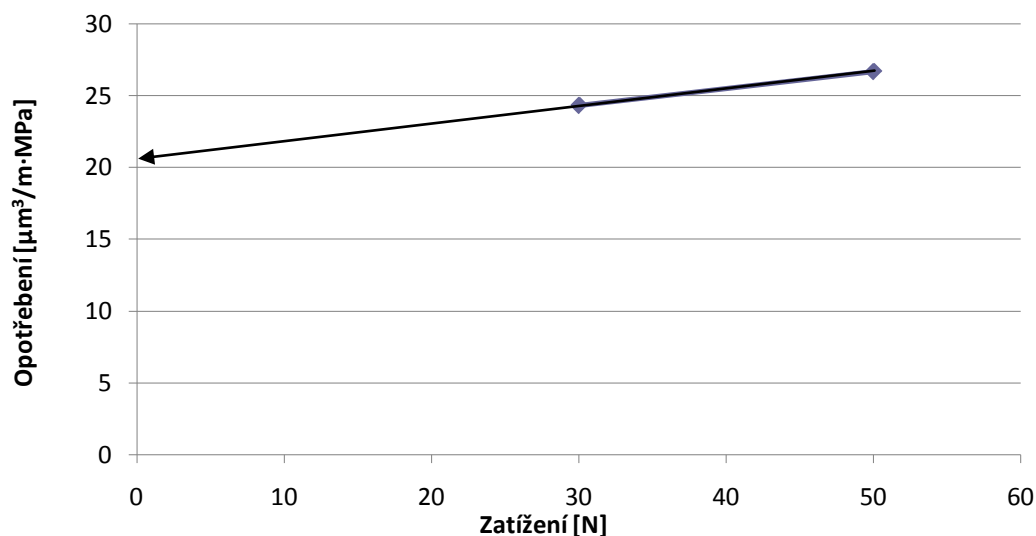


Na grafu č. 23 je vidět, že koeficient opotřebení se zvyšujícím se zatížením roste jak bez vody, tak s vodou.

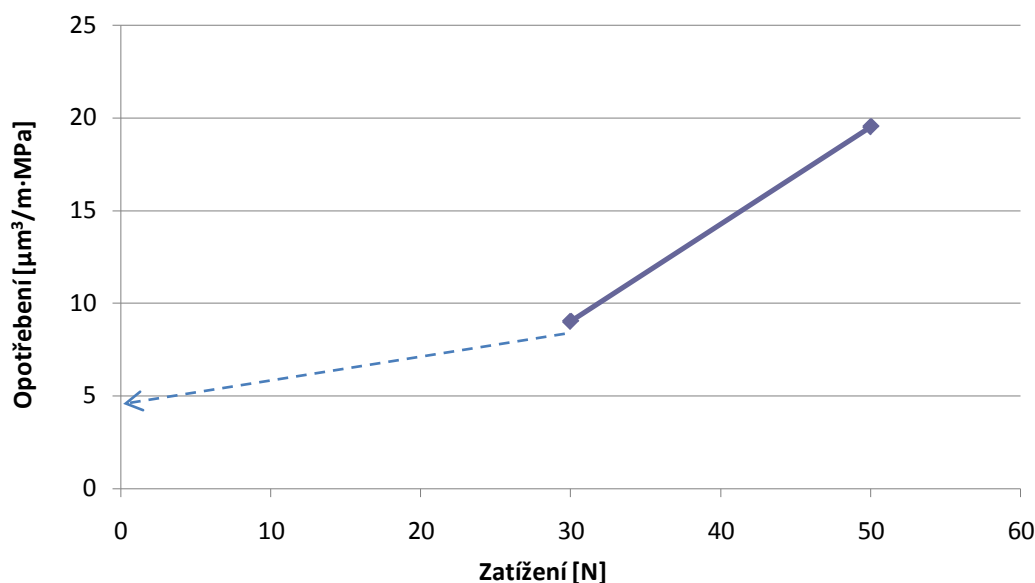
b) Opotřebený objem za celou dobu životnosti

Tlak mezi destičkami je ve skutečnosti 3,1 MPa, což je zatížení blíží se nule.

Graf č. 24: Závislost velikosti opotřebení na zatížení (bez vody)



Graf č. 25: Závislost velikosti opotřebení na zatížení (s vodou)



Při nízkých zatížení dochází ve vodě ke čtvrtinovému opotřebení, než bez vody. Z grafu č. 24 se dá odhadnout, že opotřebení bez vody pro extrapolaci zatížení blízcím se nule je přibližně $21 \mu\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{MPa}$. Ke zjištění opotřebení s vodou z grafu č. 25 je nutný teoretický odhad extrapolací pomocí tendence křivky v grafu č. 24. Tím vychází horní odhad opotřebení $5,25 \mu\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{MPa}$. To předpokládá podobné chování opotřebení jako při měření bez vody. Jinak je možnost, že se opotřebení rapidně zvyšuje.

Ze vzorce:

$$h = \frac{p_d \cdot K_{oho} \cdot n_z \cdot l}{S_d}$$

kde h je hloubka opotřebování destičky

p_d je reálný přítlak destiček

K_{oho} je horní odhad opotřebení s vodou při zatížení blízcím se nule

n_z je počet cyklů životnosti

l je délka posuvu

je možné dopočítat hloubku probroušení korundové destičky při reálném zatížení.

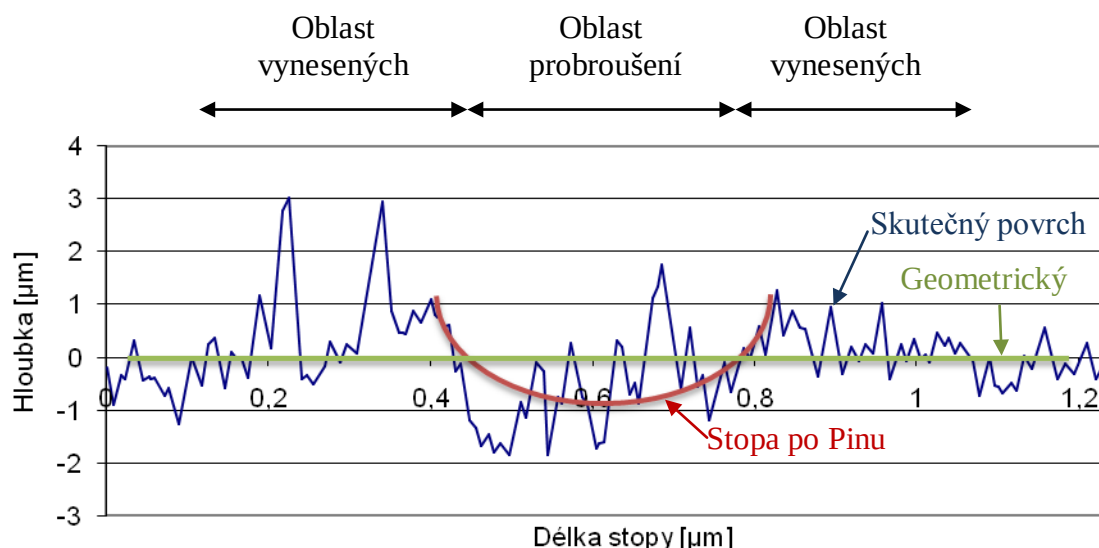
Hloubka probroušení se blíží nule, z čehož vyplývá, že opotřebení je za předepsanou dobu životnosti zanedbatelné.

Shrnutí (opotřebení):

- a) Průřezy tribologickou stopou na různých místech stopy se příliš neliší, tudíž míra otěru nezávisí na místě měření (tedy ani na rychlosti pohybu Pinu).
- b) Koeficient opotřebení v rozmezí $v_{\min} = 6,53 \text{ mm/s}$ a $v_{\max} = 14,4 \text{ mm/s}$ je téměř nezávislý na rychlosti pohybu, což potvrzuje i zobrazení průřezů tribologickou stopou v grafu č. 20.
- c) Koeficient opotřebení se zvyšujícím se zatížením roste jak bez přítomnosti vody, tak s vodou.
- d) Koeficient opotřebení ve vodě je nižší, než opotřebení bez vody, ačkoli opotřebení ve vodě roste intenzivněji. Při nízkých zatíženích dochází ve vodě ke čtvrtinovému opotřebení, než bez vody.
- e) Opotřebení bez vody pro extrapolaci zatížení blížícím se nule je přibližně $21 \mu\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{MPa}$.
- f) Ke zjištění opotřebení s vodou z grafu č. 25 byl použit odhad extrapolací pomocí tendence křivky v grafu č. 24. To předpokládá podobné chování opotřebení při nižších zatíženích jako při měření bez vody. Tím vychází horní odhad opotřebení $5,25 \mu\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{MPa}$.
- g) Opotřebení je za předepsanou dobu životnosti (500 000 cyklů) zanedbatelné.
- h) Hloubka probroušení korundové destičky se blíží nule, z čehož vyplývá, že opotřebení je za předepsanou dobu životnosti zanedbatelné.

5.5.3.3 Analýza vynesných částic

Graf č. 26: Zobrazení oblastí vynesných částic a probroušení vzorku na průřezu tribologickou stopou (měření bez vody se zatížením 30N)



1. Analýza probíhajících dějů při opotřebení

a) Porovnání objemu vynesných částic

Při vytváření tribologické stopy bez vody dochází k ulpívání částic na okraji tribologické stopy, což je poté možno analyzovat. Pro zjištění objemu vynesných částic byla provedena analýza u měření vzorku bez vody, při zatížení 50N (viz graf 26).

a, Objem vynesných částic po stranách tribologické stopy:

Objem vynesných částic po stranách tribologické stopy vychází po vynásobení obsahu vynesných částic z průřezu tribologickou stopou a délkou stopy $31\,550\,\mu\text{m}^3$.

b, Objem vynesných částic v čele tribologické stopy:



Obr. č. 51: Zobrazení oblastí nanesení vynesných částic v čele tribologické stopy

Minimální objem vnesených částic byl počítán nahrazením oblastí nanesení vnesených částic (viz obr. 51) rotačními kužely (výšky rotačních kuželů byly určeny dle obrázku č. 43). Po tomto nahrazení vychází minimální objem vnesených částic v čele $7\,022\,610\ \mu\text{m}^3$. Maximální objem vnesených částic byl počítán nahrazením oblastí nanesení vnesených částic (viz obr. 51) polokoulemi.

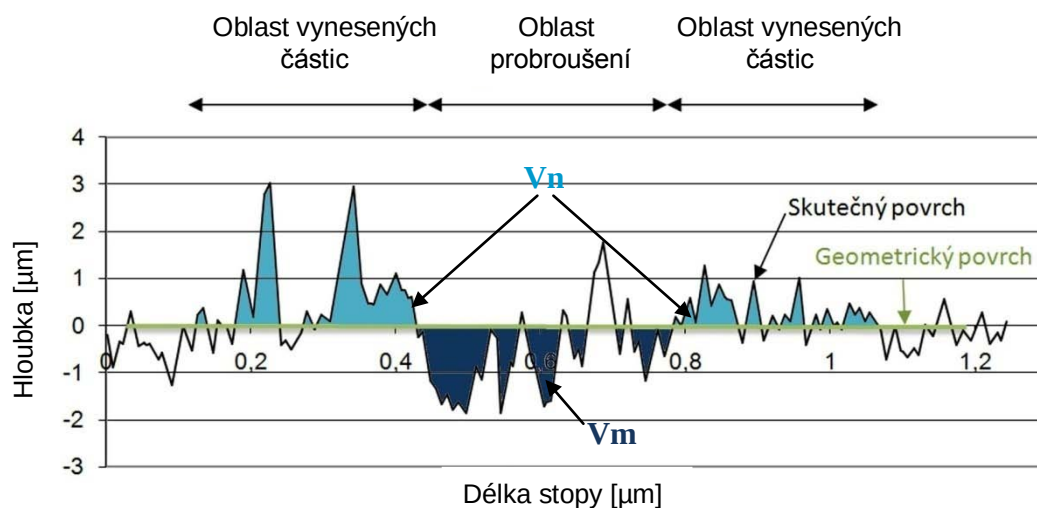
Maximální objem vnesených částic v čele tribologické stopy vychází $81\,759\,320\ \mu\text{m}^3$. Objem vnesených částic na okrajích stopy je řádově menší, než objem vnesených částic v čele tribologické stopy.

Je tedy vidět, že ačkoli částice na okraji vypadají, jakoby uvnitř tělesa nastával plastický tok, není tomu tak. Dochází k tomu, že vytržené částice se lepí na Pin a jsou vynášeny v čele tribologické stopy.

b) Pórovitost

U všech měření jsou, jak na konci, tak po stranách, stopy vnesené částice materiálu (viz obr. 39, 42, 45, 48). K vynášení částic materiálu na okraje nedochází podle našich předpokladů díky plastické deformaci, ale díky vynášení částic na okraje. Vnesené částice ulpívají na okrajích s relativně velkou pórovitostí. Pro zjištění objemu pórů a procentuálním zastoupení pórů v naneseném valu částic byla provedena analýza u měření vzorku bez vody, při zatížení 30N (viz graf 27).

Graf č. 27: Zobrazení oblastí vnesených částic, ze které je pak dopočítán objem vnesených částic V_m a oblastí nanesených částic ze které je pak počítán objem nanesených částic V_n na průřezu tribologickou stopou (měření bez vody se zatížením 30N)



Odhad objemu pórů byl určen jako rozdíl objemu valu vynesných částic V_m bez objemu částic nanesených V_n na okraje stopy.

Objem vynesných částic V_m , je spočítán dle vzorce:

$$V_m = \left(\frac{p_o}{2} \times 10^3 \right) \cdot l_c \quad [mm^3/m] \quad [12]$$

kde p_o je vynesná plocha opotřebování za 1 cyklus v příčném průřezu stopy $[mm^2]$ a l_c je délka stopy za jeden cyklus $[m]$.

Objem nanesených částic na okraje stopy V_n , je spočítán dle vzorce:

$$V_n = \left(\frac{p_v}{2} \times 10^3 \right) \cdot l_c \quad [mm^3/m] \quad [13]$$

kde p_v je nanesená plocha opotřebování za 1 cyklus v příčném průřezu stopy $[mm^2]$ a l_c je délka stopy za jeden cyklus $[m]$.

Objem pórů ve valu částic nanesených na okraji stopy byl odhadnut na $9 \cdot 10^{-7} mm^3/m$. To je minimálně 23 % objemu naneseného valu. Pórovitost tedy je minimálně 23%.

c) Odhad objemu vynesných částic s vodou

Při testování s vodou se téměř nenanáší vynesné částice na okraje tribologické stopy, jelikož reakcí jemných vynášených částic korundu s vodou se tvoří hydroxid hlinitý. To souhlasí s literaturou (Gee M. G. et al., 1995). Díky tomu nebyl objem vynesných částic u měření s vodou dále analyzován.

Shrnutí (analýza vynesných částic):

- U všech měření bez vody jsou jak na okraji, tak po stranách stopy vynesné částice materiálu (viz obr. 39 a obr. 42). K vynášení částic materiálu na okraje nedochází díky plastické deformaci, ale díky vynášení částic na okraje.
- Objem vynesných částic na okrajích stopy je řádově menší, než objem vynesných částic v čele tribologické stopy. Je tedy vidět, že ačkoli částice na okraji vypadají, jakoby uvnitř tělesa nastával plastický tok, není tomu tak. Dochází k tomu, že vytržené částice se lepí na Pin a jsou vynášeny v čele tribologické stopy.
- Z tohoto předpokladu bylo určeno, že ve valu je obsaženo 23 % pórů.
- Při testování s vodou se téměř nenanáší vynesné částice na okraje tribologické stopy, jelikož reakcí jemných vynášených částic korundu s vodou se tvoří hydroxid hlinitý.
- Přesnější kvantitativní vyhodnocení vynesných částic nelze provést. Částice jsou k vzorku přilísované, přitlačené. Ačkoli částice na povrchu ulpívají, dají se lehce

setřít, což komplikuje analýzu probíhajících procesů. To potvrzuje naši teorii, že se nejedná o plastický tok, ale o vynášení částic.

- f) Navrhuji proto v budoucnosti analyzovat vzorek při vyšším zatížení a hlouběji prozkoumat probíhající procesy. K tomu bude potřeba věnovat velkou pozornost ulpívání vynesných částic a jejich eventuálnímu odpadnutí.

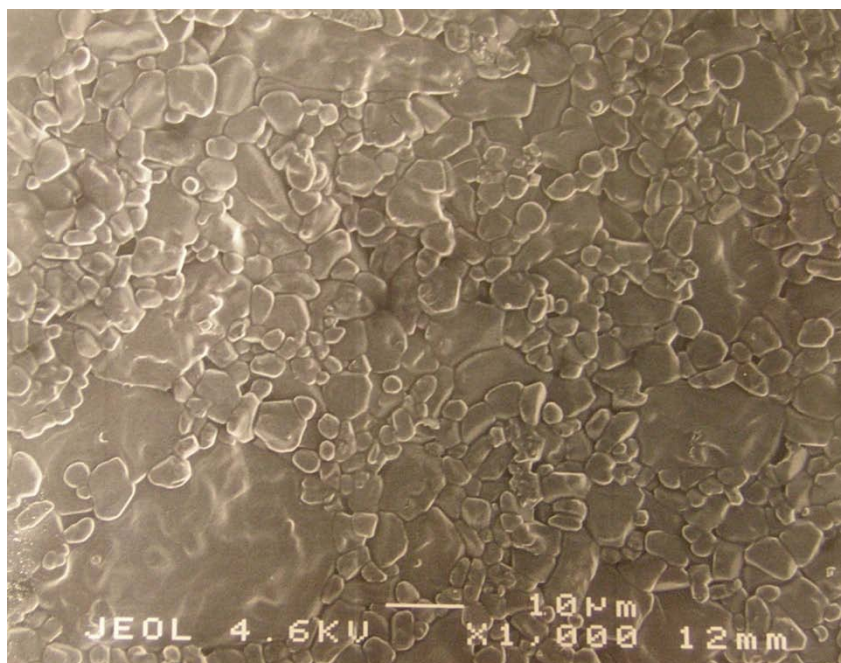
6. Vliv kvality povrchu na tribologické vlastnosti

6.1 Mikrostruktura materiálu

Mikrostruktura materiálu byla zkoumána pomocí skenovacího elektronového mikroskopu od výrobce Jeol a optickém mikroskopu 3D InfiniteFocus ALICONA na katedře Laboratoire de microanalyse des surfaces univerzity E N S M M v Besançonu

a) Skenovací elektronový mikroskop

Pro měření na skenovacím elektronovém mikroskopu byl vzorek napařen uhlíkem.



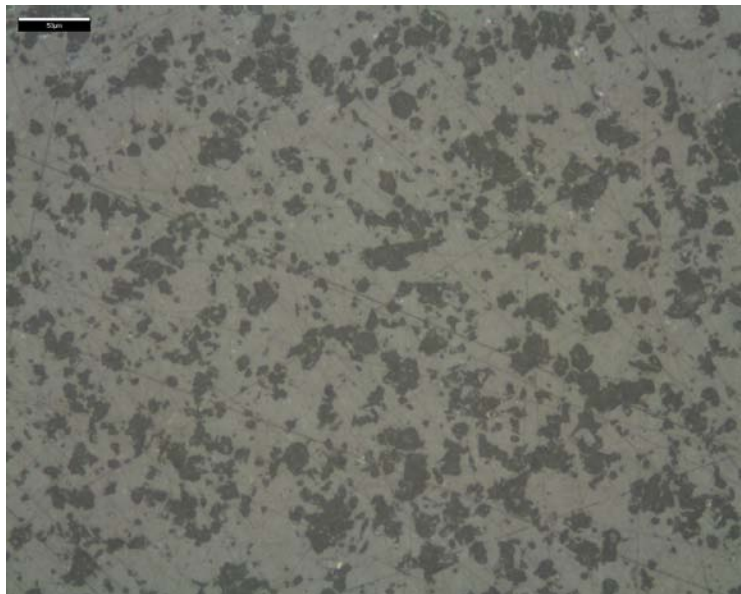
Obr. č. 52: Obrázek neopracované části vzorku (SEM)

Na obrázku č. 52 jsou patrné rozdílné velikosti zrn až do velikosti 5µm.

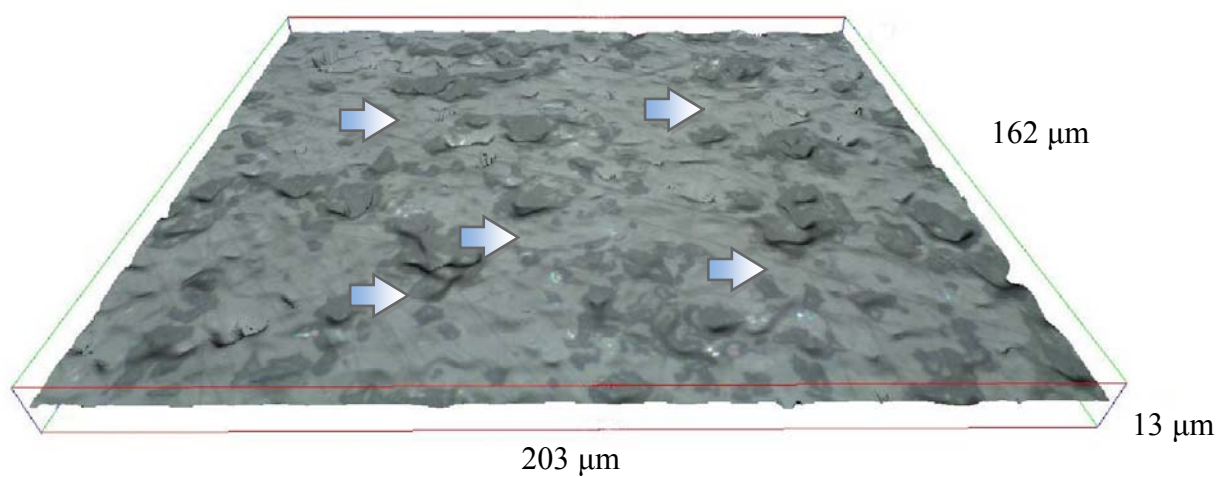
Podle literatury je maximální požadovaná velikost zrn slinuté oxidové keramiky $d_{\max}$ rovna

4 - 5 μm (Hanykýř V. 2000). Přípustný obsah zrn maximální velikosti je 4 hmotnostní procenta. Tomuto kritériu zkoumaný vzorek neodpovídá.

b) Optický mikroskop



Obr. č. 53: Obrázek opracované (broušené) části vzorku (optický mikroskop)



Obr. č. 54: Obrázek broušené části vzorku (optický mikroskop - 3D zobrazení)

Na obrázku z optického mikroskopu (obr. č. 53 a č. 54) je vidět pórovitost materiálu. Šipky na obr. č. 54 označují póry kolem 5 μm .

Z obrázků elektronové mikroskopie je patrné dobré slinutí materiálu, ale i určitý podíl zrn větších, než 4 mikrometry, které způsobují horší vlastnosti zkoumaného materiálu. S přítomnou porózitou se jeho materiálové vlastnosti ještě zhoršují.

Závěr

Zdokonalení experimentální metody

- a) Byla dopracována a rozšířena metodika vyhodnocení koeficientu tření z experimentu Pin on disk s vratným pohybem (vliv rychlosti zatěžování).
- b) Byla vypracována metodika k hodnocení otěru z pokusu experimentu Pin on disk s vratným pohybem.

Závěrečné shrnutí tribologické analýzy

1. Koeficient tření

- a) Statický koeficient tření je při všech těchto experimentech menší, než dynamický.
- b) Koeficient tření je při nižších zatíženích menší. To platí jak pro koeficient tření bez vody tak s vodou.
- c) Z počátku koeficient tření s rostoucím počtem cyklů roste až na ustálenou hodnotu.
- d) K ustálení koeficientu tření dochází při hodnotách zatížení 30 N a 50 N velmi rychle. Při zátěži 5 N ještě nedochází k ustálení, toto měření nemá zlom ustálení ani při měření bez vody, ani při testování ve vodě. Při zátěži 10 N nenastává úplné ustálení koeficientu tření. U měření bez vody při zatížení 10 N koeficient tření za bodem zlomu dále roste. Ustálené hodnoty jsou shrnuty v tabulce č. 11.
- e) Pohyb ve vodě vede k rychlejšímu ustálení koeficientu tření, než pohyb bez vody.
- f) Koeficient tření bez vody při extrapolaci zatížení blížícím se nule je v rozmezí od 5,3 do 5,7 na hladině významnosti 5%.
- g) Koeficient tření s vodou při extrapolaci zatížení blížícím se nule je v rozmezí je od 4,5 do 4,55 na hladině významnosti 5%.
- h) Koeficient tření ve vodě je nižší, než koeficient tření bez vody. Doba ustálení koeficientu ve vodě a bez vody se příliš neliší, přesto je doba ustálení ve vodě kratší, než bez vody.
- i) Podle intervalových odhadů je zřejmé, že pohyb ve vodě je stabilnější.

2. Opotřebení

- a) Průřezy tribologickou stopou na různých místech stopy se příliš neliší, tudíž míra otěru nezávisí na místě měření (tedy ani na rychlosti pohybu pinu).
- b) Koeficient opotřebení v rozmezí $v_{\min} = 6,53 \text{ mm/s}$ a $v_{\max} = 14,4 \text{ mm/s}$ je téměř nezávislý na rychlosti pohybu, což potvrzuje i zobrazení průřezů tribologickou stopou.
- c) Koeficient opotřebení se zvyšujícím se zatížením roste jak bez přítomnosti vody, tak s vodou.
- d) Koeficient opotřebení ve vodě je nižší, než opotřebení bez vody, ačkoli opotřebení ve vodě roste intenzivněji. Při nízkých zatíženích dochází ve vodě ke čtvrtinovému opotřebení, než bez vody.
- e) Opotřebení bez vody pro extrapolaci zatížení blízkým se nule je přibližně $21 \mu\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{MPa}$ (přepočteno z Hertzových tlaků).
- f) Ke zjištění opotřebení s vodou z grafu č. 25 byl použit odhad extrapolací pomocí tendence křivky v grafu č. 24. To předpokládá podobné chování opotřebení při nižších zatíženích jako při měření bez vody. Tím vychází horní odhad opotřebení $5,25 \mu\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{MPa}$.
- g) Přestože při pokusu o změření „Houževnatosti“ bylo zjištěno odlupování částecek z povrchu, toto odlupování nenastalo ani při měření bez vody ani s vodou.

3. Analýza vynesných částic

- a) U všech měření bez vody jsou jak na okraji, tak po stranách stopy vynesné částice materiálu. K vynášení částic materiálu na okraje nedochází díky plastické deformaci, ale díky vynášení částic materiálu na okraje.
- b) Objem vynesných částic na okrajích stopy je řádově menší, než objem vynesných částic v čele tribologické stopy. Je tedy vidět, že ačkoli částice na okraji vypadají, jakoby uvnitř tělesa nastával plastický tok, ale není tomu tak. Dochází k tomu, že vytržené částice se lepí na pin a jsou vynášeny v čele tribologické stopy.
- c) Z tohoto předpokladu bylo určeno, že ve valu je obsaženo kolem 23 % porů.
- d) Při testování s vodou se téměř nenanáší vynesné částice na okraje tribologické stopy, jelikož reakcí jemných vynášených částic korundu s vodou se tvoří hydroxid hlinitý.

- e) Přesnější kvantitativní vyhodnocení vnesených částic nelze provést. Částice jsou k vzorku přilísované, přitlačené. Ačkoli částice na povrchu ulpívají, dají se lehce setřít, což komplikuje analýzu probíhajících procesů. To potvrzuje teorii, že se nejedná o plastický tok, ale o vynášení částic.
- f) Navrhuji proto v budoucnosti analyzovat vzorek při vyšším zatížení a hlouběji prozkoumat probíhající procesy. K tomu bude potřeba věnovat velkou pozornost ulpívání vnesených částic a jejich eventuelnímu odpadnutí.

Závěry pro praxi

- a) Opotřebení je za předepsanou dobu životnosti (500 000 cyklů) zanedbatelné.
- b) Hloubka probroušení za tuto dobu životnosti se blíží nule.
- c) Dá se předpokládat, že po celou dobu životnosti bude koeficient tření ve vodě okolo hodnoty 0,46.
- d) Jelikož jsou keramické destičky přitlačovány v termostatickém ventilu silou 1000 N, je třeba k vzájemnému posuvu destiček ve vodě síla nejméně 460 N.

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Seznam obrázků

- Obr. č. 1: Struktura α -Al₂O₃
- Obr. č. 2: Rozdělení oxidové keramiky
- Obr. č. 3: Systém α -Al₂O₃ – SiO₂
- Obr. č. 4: Vazby v tribologickém systému
- Obr. č. 5: Ukázky relativního pohybu těles
- Obr. č. 6: Model kluzného (smykového) tření
- Obr. č. 7: Model valivého tření
- Obr. č. 8: Rozdělení tření podle média ve styčné ploše
- Obr. č. 9: Stribeckův diagram
- Obr. č. 10: Zobrazení režimů opotřebení korundových destiček při různých zatíženích
- Obr. č. 11: Ukázka využití profilogramu
- Obr. č. 12: Základní principiální uspořádání tribologických zkoušek
- Obr. č. 13: Systém pohybu Pin on disk
- Obr. č. 14: Styk kuličky s rovinou
- Obr. č. 15: Systém pohybu Pin on disk s vratným pohybem
- Obr. č. 16: Závislost součinitele tření na kluzné dráze
- Obr. č. 17: Naměřená závislost součinitele tření na kluzné dráze
- Obr. č. 18: Vliv drsnosti na koeficient tření
- Obr. č. 19: Dynamický součinitel tření jako funkce úhlové rychlosti smyku
- Obr. č. 20 : Umístění testovaných vzorků RO 2325, RO 2334 a RO 2327 v kartuši vodovodní baterie
- Obr. č. 21: Ukázka měření vtisku a trhliny
- Obr. č. 22: Trhliny v Al₂O₃ způsobené indentorem
- Obr. č. 23: Měřicí zařízení Surfcom 1500 SD
- Obr. č. 24: a) Místa na vzorku, kde byla prováděna měření a směr posuvu indentoru
b) Detail směru posuvu indentoru
- Obr. č. 25: 3D zobrazení povrchu vzorku (měření č.1)
- Obr. č. 26: 3D zobrazení povrchu vzorku (měření č.2)
- Obr. č. 27: Sít'ové 3D zobrazení povrchu vzorku – vrcholů (měření č.2)
- Obr. č. 28: 3D zobrazení povrchu vzorku (měření č.3)
- Obr. č. 29: Sít'ové 3D zobrazení povrchu vzorku – vrcholů (měření č.3)
- Obr. č. 30: 3D zobrazení povrchu vzorku (měření č.4)
- Obr. č. 31: Sít'ové 3D zobrazení povrchu vzorku – vrcholů (měření č.4)
- Obr. č. 32: 3D zobrazení povrchu vzorku (měření č. 5)

- Obr. č. 33: Síťové 3D zobrazení povrchu vzorku - vrcholů (měření č.5)
Obr. č. 34: Síťové 3D zobrazení povrchu vzorku – pórů (měření č.5)
Obr. č. 35: 3D zobrazení povrchu vzorku (měření č.6)
Obr. č. 36: Síťové 3D zobrazení povrchu vzorku – vrcholů (měření č.6)
Obr. č. 37: Síťové 3D zobrazení povrchu vzorku – pórů (měření č.6)
Obr. č. 38: Kinematické schéma zařízení
Obr. č. 39: Stopa po tribologické zkoušce (měření č.1)
Obr. č. 40: 3D zobrazení tribologické stopy (měření č.1)
Obr. č. 41: Příčný průřez tribologické stopy (měření č.1)
Obr. č. 42: Stopa po tribologické zkoušce (měření č.2)
Obr. č. 43: 3D zobrazení tribologické stopy(měření č.2)
Obr. č. 44: Příčný průřez tribologické stopy (měření č.2)
Obr. č. 45: Stopa po tribologické zkoušce (měření č.3)
Obr. č. 46: 3D zobrazení tribologické stopy(měření č.3)
Obr. č. 47: Průřez tribologické stopy (měření č.3)
Obr. č. 48: Stopa po tribologické zkoušce (měření č.4)
Obr. č. 49: 3D zobrazení tribologické stopy (měření č.4)
Obr. č. 50: Průřez tribologické stopy (měření č. 4)
Obr. č. 51: Zobrazení oblastí nanesení vynesných částic v čele tribologické stopy
Obr. č. 52: Obrázek neopracované části vzorku (SEM)
Obr. č. 53: Obrázek opracované (broušené) části vzorku (optický mikroskop)
Obr. č. 54: Obrázek opracované (broušené) části vzorku (optický mikroskop - 3D zobrazení)

Seznam grafů

- Graf č. 1: Změna míry opotřebení s normálovým zatížením působící rychlostí
Graf č. 2: Vliv drsnosti kontaktního povrchu u korundových destiček při měření bez vody a s vodou
Graf č. 3 : Difraktogram zkoumaného materiálu po zpracování v programu Origin.
Graf č. 4: Závislost mikrotvrdosti na zatížení
Graf č. 5: Zobrazení výsledků z programu Lab View 7
Graf č. 6: Průběh koeficientu tření v závislosti na počtu cyklů (měření č.1)
Graf č. 7: Průběh koeficientu tření v závislosti na počtu cyklů (měření č.2)
Graf č. 8: Průběh koeficientu tření v závislosti na počtu cyklů (měření č. 3)
Graf č. 9: Průběh koeficientu tření v závislosti na čase (měření č. 4)
Graf č. 10: Závislost koeficientu tření na počet cyklů pro jednotlivá zatížení (testování bez vody)
Graf č. 11: Závislost koeficientu tření na počet cyklů pro jednotlivá zatížení

(testování s vodou)

Graf č. 12: Závislost koeficientu tření a jeho horní a dolní hranice na zatížení
(měření bez vody)

Graf č. 13: Závislost koeficientu tření a jeho horní a dolní hranice na zatížení
(měření s vodou)

Graf č. 14: Koeficienty tření dle literatury

Graf č. 15: Závislost koeficientu tření po ustálení a na zatížení (bez vody)

Graf č. 16: Závislost koeficientu tření po ustálení a na zatížení (s vodou)

Graf č. 17: Závislost koeficientu tření a na prostředí

Graf č. 18: Zobrazení maximální, minimální a průměrné rychlosti posuvu u zkoušky
Pin on disk s vratným pohybem během poloviny cyklu s konkrétní
ukázkou detailu průběhu koeficientu tření

Graf č. 19: Příklady detailů průběhu závislosti koeficientu tření na počtu cyklů

Graf č. 20: Průřezy tribologickou stopou na různých místech (zatížení: 30 N, s vodou)

Graf č. 21: Zobrazení maximální, minimální a průměrné rychlosti posuvu u zkoušky
Pin on disk s vratným pohybem během poloviny cyklu

Graf č. 22: Závislost velikosti opotřebení na zatížení

Graf č. 23: Závislost velikosti opotřebení na zatížení

Graf č. 24: Závislost velikosti opotřebení na zatížení (bez vody)

Graf č. 25: Závislost velikosti opotřebení na zatížení (s vodou)

Graf č. 26: Zobrazení oblastí vynesných částic a probroušení vzorku na průřezu
tribologickou stopou (měření bez vody se zatížením 30N)

Graf č. 27: Zobrazení oblastí vynesných částic, ze které je pak dopočítán objem
vynesných částic V_m a oblasti nanesených částic ze které je pak
počítán objem nanesených částic V_n na průřezu tribologickou stopou

Seznam tabulek

Tab. č. 1: Vlastnosti korundové keramiky podle obsahu korundu

Tab. č. 2: Závislost koeficientu tření na rychlosti rotace a normálovém zatížení

Tab. č. 3: Porovnání difrakčních úhlů α -Al₂O₃ z JCPDS a u zkoumaného materiálu

Tab. č. 4: Naměřené a dopočítané hodnoty pro křemík

Tab. č. 5: Výsledná houževnatost K_c

Tab. č. 6: Přehled naměřených hodnot mikrotvrdosti

Tab. č. 7: Přehled vypočítaných průměrných hodnot mikrotvrdosti

Tab. č. 8: Podmínky měření

Tab. č. 9: Naměřené hodnoty drsností

Tab. č. 10: Průměry a směrodatné odchylky drsností

Literatura:

- KOLLER A.: *Základy technologie jemné keramiky*, TU v Liberci, Liberec 1970
- HANYKÝŘ V., HAVRDA J., TRÁVNÍČEK Z.: *Speciální technologie keramiky I., II.*, VŠCHT Praha v Čs redakci VN MON, Praha 1989
- TAKADOUM J.: *Matériaux et surfaces en tribologie*, Hermès – Lavoisier, 2007
- RATH J., POSPÍŠIL Z. a kol.: *Jemná keramika : Metodika měření zkoušek*, SNTL, Praha 1988
- DROBÍLEK F., VYKLIČKÝ Z., POKORNÝ A.: *Laboratorní cvičení technologická a metalografická*, SNTL, Praha 1967
- POKLUDA J., KROUPA F., OBDRŽÁLEK L.: *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek (kovy, keramika, plasty)*, PC-DIR, Brno 1995
- ZÁDRAPA K.: *Technologie keramiky, Pórovitá hrubá a jemná keramika*, SNTL, Praha 1975
- OLIVA V., OLEXA J.: *Úvod do teorie tření, opotřebení a kontaktního porušování*, ČVUT, Praha 1978
- SOMIYA S.: *Advanced technical ceramics*, Academic Pr , St. Louis 1989
- J. F. SHACKELFORD, R. H. DOREMUS: *Ceramic and Glass Materials : Structure, Properties, Processing*, Springer Science+Business Media, LLC, New York, 2008
- MARTIN J. W.: *Concise encyclopedia of the properties of materials surfaces and interfaces*, Elsevier's science&Technology, Oxford, 2008
- DOSTÁL F.: *Drsnost obrobených ploch*, SNTL, Praha, 1962
- BUMBÁLEK B., ODVODY V., OŠŤÁDAL B.: *Drsnost povrchu*, SNTL, Praha, 1989
- BEVER M. B.: *Encyclopedia of Materials Science and Engineering*, Pergamon Press, Oxford, 2007, 5552s
- BUSHAN B., GUPTA B.K.: *Handbook of tribology : Materials, Coatings and Surface Treatments*, McGraw-Hill, Inc., USA, 1991
- Korund, Elektroodbyt, n.p., Praha, 2s.
- ŠŤÁVA P., PAVLOK B. : *Mazací technika*, Vysoká škola báňská, Ostrava, 2006
- ŠTĚPINA V., VESELÝ V. : *Maziva v tribologii*, Veda, Bratislava, 1985, 408s.

- WACHTMAN J. B. ,CANNON W. R. ,MATTHEWSON M. J. *Mechanical properties of ceramics*, John Wiley & sons, Inc., Hoboken, 2009
- VELES P. : *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*, SNTL, Praha, 1985
- MENČÍK J.: *Pevnost a lom skla a keramiky*, SNTL, Praha, 1990, 392s.
- WANNER J.: *Sbírka vyřešených úloh z technické mechaniky 1.díl*, Československý Kompas, Praha, 1948
- ČERNÝ V., HOVORKA O., VINTNER F. : *Slinutý korund v technice*, SNTL, Praha, 1964, 212s.
- HANYKÝŘ V., HAVRDA J. : *Speciální technologie keramiky I.*, VŠCHT, Praha, 1991
- HANYKÝŘ V., KURTZENDORFER J.: *Technologie keramiky*, VEGA, Praha, 2000
- RILEY F. L.: *Structural Ceramics : Fundamentals and Studies*, Cambridge university press, Cambridge, 2009
- BUCKLEY D. H.: *Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication*, Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, 1981
- BÍBOVÁ M.: *Porovnání keramických granulátů pro technologii lisování keramických destiček vodovodních baterií*, TU v Liberci, Liberec 2005
- KŘÍŽ R.a kolektiv: *Tabulky materiálů a předvýrobků pro strojírenství 3.část*, Montanex a.s., Ostrava, 2001
- BLAŠKOVIČ P., BALLA J.,DZIMKO M.: *Tribológia*, Alfa, Bratislava, 360s.
- BEČKA J.: *Tribologie*, ČVUT, Praha, 1997, 212s.
- VIŽINTIN J., KALIN M., DOHDA K., JAHANMIR S.: *Tribology of mechanical systems : A guide to present and future technologies*, ASME press, New York, 2004
- VOCAL M., DUFEK V.: *Tření a opotřebení strojních součástí*, SNTL, Praha, 1976, 376s.
- MATOUŠEK J.: *Anorganické nekovové materiály*, VŠCHT, Praha, 1992
- ZENG J., KIM T. J. An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting, *Wear* 193 (1996), 22 June 1995, 207-217
- HSU S.M., SHEEN M.C. Ceramic wear maps, *Wear* 200, 1996, 154-175
- POSER K., GAHR K.-H.Z., SCHNEIDER J. Development of Al₂O₃ based ceramics for dry friction systems, *Wear* 259, 2005, 529-538

- BARGE M., RECH J., HAMDI H., BERGHEAU J. M. Experimental study of abrasive process, *Wear* 264 (2008), 27 February 2007, 382–388
- KLECKA M., SUBHASH G. Grain size dependence of scratch-induced damage in alumina ceramics, *Wear* 265 (2008), 19 February 2008, 612–619
- NOVAK S., KALIN M., KOSMAČ T. Chemical aspects of wear of alumina ceramics, *Wear* 250, 2001, 318–321
- DESA O., BAHADUR S. Material removal and subsurface damage studies in dry and lubricated single-point scratch tests on alumina and silicon nitride, *Wear*, 1999, 225–229
- GAHR K.-H Z. Modeling and microstructural modification of alumina ceramic for improved tribological properties, *Wear* 200, 1996, 215–224
- JAIN R. K., JAIN V. K. DIXIT P. M. Modeling of material removal and surface roughness in abrasive flow machining process *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39 (1999), 15 March 1999, 1903–1923
- SIVAKUMAR R., JONES M. I., HIRAO K., KANEMATSU W. Scratch behavior of SiAlON ceramics, *Journal of the European Ceramic Society* 26 (2006), 21 January 2005, 351–359
- GAHR K.-H Z., SCHNEIDER J. Surface modification of ceramics for improved tribological properties, *Ceramics International* 26, 2000, 363–370
- RAINFORTH W.M. The sliding wear of ceramics, *Ceramics International* 22, 1996, 365–372
- XU H. H. K., JAHANMIR S. Transitions in the mechanism of material removal in abrasive wear of alumina, *Wear* 192 (1996), 11 July 1995, 228–232
- LI J. L., XIONG D. S. Tribological properties of nickel-based self-lubricating composite at elevated temperature and counterface material selection, *Wear* 265 (2008), 7 November 2007, 533–539
- LIU CH., ZHANG J., SUNB J., ZHANG X. Tribological properties of pressureless sintered alumina matrix ceramic materials improved by diopside, *Journal of the European Ceramic Society* 28 (2008), 27 August 2007, 199–204
- AUDRY M.-CH., RAMOS S., CHARLAIX E. Adhesion between highly rough alumina surfaces: An atomic force microscope study, *Journal of Colloid and Interface Science* 331 (2009), 2009, 371–378
- REIMANIS I.S. A review of issues in the fracture of interfacial ceramics and ceramic composites, *Materials Science and Engineering A237* (1997), 1997, 159–167
- PEILLON F. C., THEVENOT F. Microstructural designing of silicon nitride related to toughness, *Journal of the European Ceramic Society* 22, 4 December 2001, 271–278

DULIAS U., FANGB L., GAHR K.-H. Z. Effect of surface roughness of self-mated alumina on friction and wear in isooctane-lubricated reciprocating sliding contact, *Wear* 252 (2002), 11 December 2001, 351–358

SEDLÁČEK M., PODGORNIK B., VIŽITIN J. Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear, *Wear* 266 (2009), 2009, 482–487

CIULLI E., FERREIRA L.A., PUGLIESE G. Rough contacts between actual engineering surfaces: Part I. Simple models for roughness description, *Wear* 264 (2008), 22 October 2007, 1105–1115

CIULLI E., FERREIRA L.A., PUGLIESE G. Rough contacts between actual engineering surfaces: Part II. Contact mechanics, *Wear* 264 (2008), 25 October 2007, 1116–1128

GAHR K.-H. Z., SCHNEIDER J. Surface modification of ceramics for improved tribological properties, *Ceramics International* 26 (2000), 29 July 1999, 363–370

WONG H.-CH., UMEHARA N., KATO K. The effect of surface roughness on friction of ceramics sliding in water, *Wear* 218 (1998), 3 April 1998, 237–243

NAGARAJAN V. S., JAHANMIR S. The relationship between microstructure and wear of mica-containing glass-ceramics, *Wear* 200 (1996), 1996, 176–185

GEE M. G., GEE A. D. A cost effective test system for micro-tribology experiments, *Wear* 263 (2007), 21. 3. 2007, 1484–1491

POPOV V.L. A theory of the transition from static to kinetic friction in boundary lubrication layers, *Solid State Communications* 115 (2000), 18 April 2000, 369–373

HEGADEKATTE V., KURZENHAUZER S., HUBER N., KRAFT O. A predictive modeling scheme for wear in tribometers, *Tribology International* 41, November 2008, 1020–1031

CZICHOZ H., KAFFKE D., SANTNER E., WOYDT M. Advances in tribology: the materials point of view, *Wear* 190, 1995, 155–161

POLYCARPOU A.A., SOOM A. Application of a two-dimensional model of continuous sliding friction to stick-slip, *Wear* 181–183 (1995), 29 September 1994, 32–41

ENOMOTO Y. Ceramic tribology in Japan, *Tribology International* 28, 1995, 1–6

KALIN M., VIŽINTIN J. Comparison of different theoretical models for flash temperature calculation under fretting conditions, *Tribology International* 34, 2001 831–839

YU M. M.-H., BUSHAN B. Contact analysis of three-dimensional rough surfaces under frictionless and frictional contact, *Wear* 200, 1996, 265–280

- CHOI D. et al. Dependence of adhesion and friction on porosity in porous anodic alumina films, *Scripta Materialia* 58, 11 January 2008, 870–873
- HSIEH CH., PAN Y.-C. Dynamic behavior and modelling of the pre-sliding static friction, *Wear* 242, 2000, 1–17
- SANTNER E., KAFFKE D., MEINE K., POLACZYK CH., SPALTMANN D. Effects of friction on topography and vice versa, *Wear* 261, 2006, 101–106
- XU CH., XING A., HUANG CH. Fabrication and performance of an advanced ceramic tool material, *Wear* 249, 2001, 503–508
- JAHANMIR S. Friction and Wear of Ceramics, *Tribology International* 28 No. 6, 1995, 421–422
- MYALSKI J., SLEZIONA J. Glassy carbon particles as component to modification of tribological properties, *Journal of Materials Processing Technology* 175, 2006, 291–298
- GEE M. G., JENNETT N.M. High resolution characterisation of tribochemical films on alumina, *Wear* 193, 7 February 1995, 133–145
- NOVAK S., KALIN M., KOSMAČ T. Chemical aspects of wear of alumina ceramics, *Wear* 250, 2001, 318–321
- ZBIGNIEW S. R., CZECHOWSKI J. Manufacture and properties of Al_2O_3 – TiN particulate composites, *Journal of the European Ceramic Society*, 1998, 373–380
- GAHR K.-H. Z., BLATTNER R., HWANG D.-H., POHLMANN K. Micro- and macro-tribological properties of SiC ceramics in sliding contact, *Wear* 250, 2001, 299–310
- CHU K., SHEN Y.G. Mechanical and tribological properties of nanostructured TiN/TiBN multilayer films, *Wear* 265 (2008), 14 January 2008, 516–524
- ESPOSITO L., TUCCI A. Microstructural dependence of friction and wear behaviours in low purity alumina ceramics, *Wear* 205, 8 August 1996, 88–96
- GAHR K.-H. Z., Modeling and microstructural modification of alumina ceramic for improved tribological properties, *Wear* 200, 1996, 215–224
- BUSHAN B. Nanoscale tribophysics and tribomechanics, *Wear* 225–229, 1999, 465–492
- BARCEINAS-SÁNCHEZ J. D. O., RAINFORTH W. M. On the role of plastic deformation during the mild wear of alumina, *Acta materialia* 46, No. 18, 22 August 1998, 6475–6483

BLAU P.J., MCLAUGHLIN J.C. Effects of water films and sliding speed on the frictional behavior of truck disc brake materials, *Tribology International* 36, 2003, 709–715

XU CH. Preparation and performance of an advanced multiphase composite ceramic material, *Journal of the European Ceramic Society* 25, 2005, 605–611

RAINFORTH W. M. The Sliding Wear of Ceramics, *Ceramics International* 22, 1996, 365–372

MURATORE C., CLARKE D. R., JONES J.G., VOEVODIN A. A. Smart tribological coatings with wear sensing capability, *Wear*, 4 February 2008

ZHOU Y.S., OHASHI M., IKEUCHI K. Start up and steady state friction of alumina against alumina, *Wear* 210, 19 February 1997, 112–119

GAHR K.-H. Z., SCHNEIDER J. Surface modification of ceramics for improved tribological properties, *Ceramics International* 26, 2000, 363–370

MEINE K., SCHNEIDER T., SPALTMANN D., SANTNER E. The influence of roughness on friction Part I: The influence of a single step, *Wear* 253, 23 May 2002, 725–732

MEINE K., SCHNEIDER T., SPALTMANN D., SANTNER E. The influence of roughness on friction Part II. The influence of multiple steps, *Wear* 253, 23 May 2002, 733–738

BLAU P. J. The significance and use of the friction coefficient, *Tribology International* 34 (2001), 2001, 585–591

HWANG D.-H., GAHR K.-H. Z. Transition from static to kinetic friction of unlubricated or oil lubricated steel/steel, steel/ceramic and ceramic/ceramic pairs, *Wear* 255, 2003, 365–375

ZHU Z., MURATOV V., FISCHER T. E. Tribochemical polishing of silicon carbide in oxidant solution, *Wear* 225–229, 1999, 848–856

TAKADOUM J. Tribological behaviour of alumina sliding on several kinds of materials, *Wear* 170, 1993, 285–290

JIANXIN D. et al. Tribological behaviors of hot-pressed Al₂O₃/TiC ceramic composites with the additions of CaF₂ solid lubricants, *Journal of the European Ceramic Society* 26, 2006, 1317–1323

KAFFKE D., SKOPP A., LENKE I. Tribological characterization of coatings by oscillating sliding testing, *Surface and Coatings Technology* 74–75, 1995, 877–883

KŘÍŽ A. Tribologická analýza Pin-on disc, *Metal*, 2004

TABOR D. Tribology - the last 25 years: A personal view, *Tribology International* 28 No. 1, 1995, 7-10

ČECH B. A KOL. *Vysokoteplotní materiály*, SNTL, Praha 1966 (268)

KALIN M., NOVAK S., VIŽITIN J. Wear and friction behavior of alumina ceramics in aqueous solutions with different pH, *Wear* 254, 2003, 1141–1146

BANCHET V., FRIDRICI V., ABRY J. C., KAPSA PH. Wear and friction characterization of materials for hip prosthesis, *Wear* 263, 23 May 2007, 1066–1071

WANG Y.S., HE C., HOCKEY B.J., LANCEY P.I., HSU S.M. Wear transitions in monolithic alumina and zirconia-alumina composites, *Wear* 181-183, 1995, 156-164

SUNDMAN B., JANSSON B., ANDERSSON J. O. CALPHAD: Comput. Coupling Phase Diagrams Thermochem., 9 [2] 153-190, 1985

MURNAGHAN F.D. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 30 [9] 244-247, 1944

SUNDMAN B., JANSSON B. High Temp. Sci., 26 263-273, 1990

SMART R.M., GLASSER F.P. Mater. Sci., 11 [8] 1459-1464, 1976

<http://www.digital-surf.com/en/guideparam2d.htm> (8.2.09)

<http://tzs.kmm.zcu.cz/keramika3.pdf> (12.11.2008)

<http://www.technickakeramika.cz/prez/Technicka%20keramika.pdf> (19.5.2007)

<http://www.matnet.sav.sk/data/files/822.pdf> (2.3.2009)

http://tribolab.mas.bg.ac.rs/english/images/equipment/T-62_sketch.jpg (12.4.2009)

<http://www.vscht.cz> (13.5.2009)

http://www.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-8-C.pdf (15.5.2008)

Materiály firmy Carl Zeiss spol. s.r.o.: *Parametry (drsnosti) povrchu*

Příloha 1

Naměřené hodnoty

0	0,7059		1	0,7067		2	0,7054
0,05	0,7059		1,05	0,7064		2,05	0,7054
0,1	0,7055		1,1	0,7067		2,1	0,7056
0,15	0,7057		1,15	0,7064		2,15	0,7049
0,2	0,7054		1,2	0,7061		2,2	0,7045
0,25	0,7057		1,25	0,7057		2,25	0,7043
0,3	0,7054		1,3	0,7057		2,3	0,7049
0,35	0,7059		1,35	0,7054		2,35	0,7053
0,4	0,706		1,4	0,7056		2,4	0,7057
0,45	0,706		1,45	0,7054		2,45	0,7054
0,5	0,7057		1,5	0,7056		2,5	0,7051
0,55	0,7057		1,55	0,7057		2,55	0,7053
0,6	0,7055		1,6	0,7061		2,6	0,7053
0,65	0,7056		1,65	0,7054		2,65	0,7056
0,7	0,7057		1,7	0,7045		2,7	0,7049
0,75	0,7058		1,75	0,7041		2,75	0,7048
0,8	0,7074		1,8	0,7052		2,8	0,7048
0,85	0,7077		1,85	0,7059		2,85	0,7044
0,9	0,7083		1,9	0,7061		2,9	0,7044
0,95	0,7067		1,95	0,7055		2,95	0,7039

Příloha 2**Kladné a záporné hodnoty po symetrizaci (zatížení 50 N, ve vodě)**

Kladné hodnoty	
Cyklus	Koeficient tření
1	0,130201163
2	0,130851435
3	0,139779353
4	0,147075367
5	0,161723687
6	0,17967727
7	0,201588423
8	0,221863059
9	0,235095264
10	0,260164312
11	0,27394356
12	0,285296818
13	0,300002383
14	0,308628999
15	0,318639827
16	0,327366444
17	0,33260885
18	0,348329879
19	0,355377223
20	0,358866998
21	0,366045921
22	0,375566949
23	0,383314293
24	0,386819532
25	0,393208982
26	0,398477053
27	0,398019135
28	0,405439838
29	0,407181919
30	0,406286832

Záporné hodnoty	
Cyklus	Koeficient tření
1	0,116197745
2	0,122349041
3	0,130747113
4	0,145403731
5	0,172907717
6	0,21776466
7	0,250695287
8	0,291042029
9	0,270883183
10	0,317408872
11	0,359308571
12	0,359644787
13	0,36713396
14	0,367528395
15	0,397170199
16	0,364454109
17	0,36857486
18	0,431464358
19	0,420200899
20	0,405648292
21	0,44846378
22	0,438190445
23	0,428322049
24	0,464595757
25	0,456879992
26	0,409580016
27	0,478732997
28	0,439559337
29	0,442248835
30	0,443233395

Příloha 3**Ukázka regrese (zatížení 50 N s vodou)**

□

VÝSLEDEK

<i>Regresní statistika</i>	
	0,72812
Násobné R	8
Hodnota spolehlivosti R	0,53017
	0,52938
Nastavená hodnota spolehlivosti R	5
	0,00856
Chyba stř. hodnoty	3
Pozorování	601

ANOVA

	<i>Rozdíl</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Významnost F</i>
Regrese	1	0,04956	0,04956	675,928	2,4918E-100
Rezidua	599	0,04392	7,33E-05		
Celkem	600	0,09349	3		

	<i>Koeficienty</i>	<i>Chyba stř. hodnoty</i>	<i>t Stat</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>Dolní 95%</i>	<i>Horní 95%</i>
Hranice	0,516591	0,000878	588,477	0	0,514867142	0,518315
Soubor X 1	-5,2E-05	2,01E-06	-25,9986	2,5E-100	-5,62993E-05	-4,8E-05

REZIDUA

<i>Pozorování</i>	<i>Očekávaná Y</i>	<i>Rezidua</i>	<i>Normovaná rezidua</i>
		0,01064	
1	0,511357	2	1,243766
		0,01061	
2	0,511304	1	1,240158
3	0,511252	-0,00596	-0,69674
		0,00921	
4	0,5112	8	1,077355
		0,00519	
5	0,511147	3	0,606907
6	0,511095	-0,00799	-0,93328
7	0,511043	-0,00712	-0,83231

Příloha 4

Grafy s rezidui

