



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní**

**Ústav strojírenské technologie**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2019

Mikoláš Rendl

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rendl** Jméno: **Mikoláš** Osobní číslo: **424791**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Tribologie pro letecké aplikace**

Název diplomové práce anglicky:

**Tribology for Aircraft Applications**

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor sledované problematiky tribologie
2. Parametry tribologického testu
3. Vliv prostředí na tribologické vlastnosti
4. Vyhodnocení a diskuze

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Petr Drašnar, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


**Ing. Jiří Kuchař, ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2019**

  
Ing. Petr Drašnar, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

14.5.2019  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## **Anotační list**

<b>Jméno autora:</b>	Mikoláš
<b>Příjmení autora:</b>	Rendl
<b>Název práce česky:</b>	Tribologie pro letecké aplikace
<b>Název práce anglicky:</b>	Tribology for Aircraft Applications
<b>Rozsah práce:</b>	počet stran: 80
	počet obrázků: 52
	počet tabulek: 11
	počet příloh: 1
<b>Akademický rok:</b>	2018/2019
<b>Jazyk práce:</b>	Český
<b>Ústav:</b>	Ústav strojírenské technologie
<b>Studijní program:</b>	Výrobní a materiálové inženýrství
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Petr Drašnar, Ph.D.

**Klíčová slova:** Tribologie, Pin-on-Disk, DLC, tření, opotřebení, koeficient tření

**Keywords:** Tribology, Pin-on-Disc, DLC, friction, wear, coefficient of friction

## **Abstrakt:**

Tato diplomová práce se zabývá vědním oborem zvaným tribologie. Popisuje tribologii jako celek, dále druhy tření a opotřebení. Část práce je věnována vlivu prostředí a tribologii za zvýšených teplot, stejně tak jako tribologii pro letecké aplikace. Dále je práce zaměřena na parametry tribologického testu a jejich vliv při vyhodnocování tribologických vlastností materiálu. Experimentální část se zabývá porovnáním tribologických vlastností jako je koeficient tření či vyhodnocení opotřebení na základě snímku z profilometru pro sledované povrchy. Analýzy Pin-on-Disk byly provedeny jak při pokojové teplotě, tak při zvýšené teplotě. Výše zmíněným tribologickým analýzám byly podrobeny tenké vrstvy povlaků typu DLC, které jsou dopovány různým množstvím % Nb.

## **Abstract:**

This thesis deals with the scientific field of tribology. It describes tribology as a complex concept along with types of friction and wear. Part of the work is devoted to the influence of environment and tribology at elevated temperatures as well as to tribology for aircraft applications. Furthermore, the work is focused on the parameters of tribological test and their influence in the evaluation of tribological properties of material. The experiment deals with the comparison of tribological properties as a coefficient of friction or evaluation of wear based on profilometer images of several surfaces. Pin-on-Disk analyses were performed at both room and elevated temperatures. The samples are coated with different DLC surfaces containing certain amount of % Nb.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

*Dne*.....

.....

*Podpis*

## **Poděkování:**

Děkuji Ing. Petru Drašnarovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a za podporu při laboratorní práci, stejně tak jako za veškeré připomínky a inspirativní podněty, které práci obohatily. Dále děkuji panu Ing. Ladislavu Cvrčkovi, Ph.D. za poskytnutí vzorků a věcných připomínek a rad, které jsem od něho během tvorby diplomové práce obdržel. Dále děkuji Ing. Jiřímu Kuchaři za pomoc při laboratorních měřeních.

Tato práce vznikla za podpory projektu Centrum pokročilých leteckých technologií reg. Č.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_019/0000826 financovaného z ESIF, OP VVV, Fakulty strojní, ČVUT v Praze.

# Obsah

ÚVOD .....	9
I. TEORETICKÁ ČÁST .....	10
1 Tribologie .....	10
1.1 Definice tribologie.....	10
1.2 Historie a technický význam tribologie .....	11
1.3 Ekonomický význam tribologie .....	13
1.4 Úlohy a výhledy tribologie .....	13
2 Tření.....	16
2.1 Rozdělení tření .....	17
2.2 Smykové tření .....	18
2.3 Break - Away Force.....	19
2.4 Hertzův tlak .....	19
2.5 Stick - Slip .....	20
3 Opotřebení.....	21
3.1 Mechanismy opotřebení.....	21
4 Tribologie za zvýšených teplot.....	26
4.1 Povrchová teplota a její význam .....	26
4.2 Oxidace povrchu vystaveného vysoké teplotě.....	29
5 Tribologie pro letecké aplikace.....	31
5.1 Superslitiny v leteckém průmyslu .....	31
5.2 Povlaky v leteckém průmyslu.....	32
5.2.1 DLC Povlaky .....	34
6 Tribologický test a jeho parametry.....	36
6.1 Princip testu „Pin on Disk“ .....	36
6.2 Parametry tribologického testu a jejich vliv.....	37
II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	43
7 Použité vzorky a přístroje .....	43
7.1 Multifunkční tribometr Rtec Instruments MFT-5000 .....	43
7.2 DLC povlak.....	44
7.3 Vzorky pro tribologický test .....	45
8 Parametry testu .....	48
9 Výsledky měření.....	50
9.1 Koeficient tření při pokojové teplotě.....	50
9.2 Koeficient tření při teplotě 400 °C .....	53

9.3	Analýza stopy na disku a opotřebení kuličky při pokojové teplotě .....	56
9.4	Analýza stopy na disku a opotřebení kuličky při 400 °C.....	60
	ZÁVĚR.....	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	72
	SEZNAM TABULEK.....	74
	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	75
	PŘÍLOHY .....	76



## ÚVOD

Tření je fyzikálním jevem, s nímž se lidstvo vypořádává již od nepaměti a který lze pozorovat téměř ve všech aplikacích a situacích kolem nás. Často je tření považováno za negativní jev, který se snažíme eliminovat, ať už mazáním či vhodněji vybraným materiálem třecí dvojice. Na druhou stranu je však tření v určitých aplikacích užitečné, nebo spíše nezbytné pro správnou funkci součástí jako jsou např. brzdy, pneumatiky, brusné prvky, ale i pro naprosto běžné situace jako je kontakt podrážky s podlahou nebo pohyb tužky po papíře.

Tribologie jako technický vědní obor se zabývá třením a jeho účinky. Vzhledem ke snaze stále zlepšovat funkční vlastnosti součástí se tribologie neustále rozvíjí a má tak nepochybně své místo při navrhování strojních součástí, jejich konstrukce, použitých materiálů a povlaků. Snad v každém průmyslovém odvětví je snaha o dosažení vyšších výkonů a nižších ztrát spolu se snížením celkových nákladů a ekologického dopadu.

Letecký průmysl je jedním z nejpokročilejších a nejvyvinutějších odvětví vůbec. Z technologického hlediska je při navrhování leteckých aplikací nutno brát zřetel nejen na obrovské zátěže, výkony a životnost, ale především na bezpečnost. Pro třecí členy jsou tak v rámci životnosti a zajištění správné funkce využívány ty nejlepší materiály v kombinaci s jejich povrchovou úpravou. Jedním z takových funkčních povlaků třecích dvojic je povlak DLC. DLC povlak je v současnosti velice zkoumaná a atraktivní povrchová úprava především pro své výborné mechanické a tribologické vlastnosti. Obecně mají tyto povlaky, resp. vrstvy vysokou tvrdost, výbornou odolnost proti opotřebení a především nízký koeficient tření. Zmíněné vlastnosti tedy předurčují tyto povrchové úpravy k mnoha účelným aplikacím, čímž je činí velice zajímavé právě pro hodnocení tribologických vlastností.

# I. TEORETICKÁ ČÁST

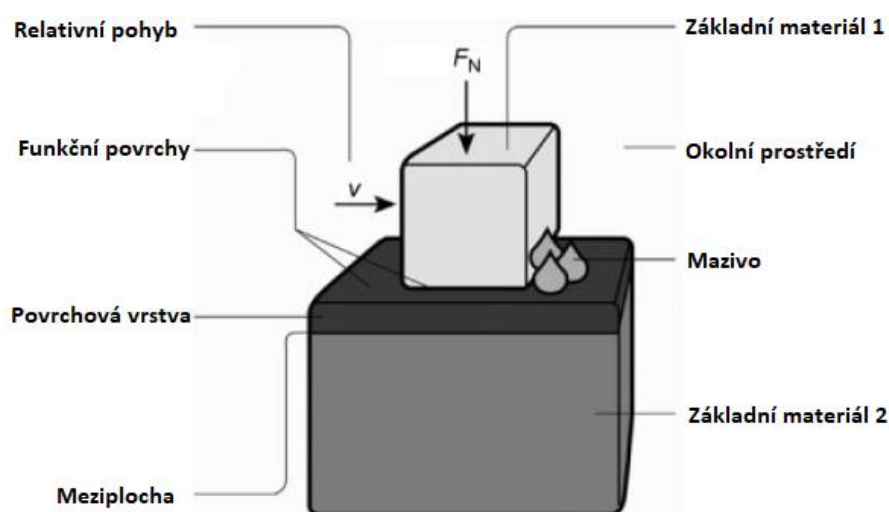
## 1 Tribologie

### 1.1 Definice tribologie

Tribologie je vědní obor, který se zabývá problematikou tření, opotřebení a mazání. Konkrétním předmětem zkoumání tribologie je chování dotýkajících se povrchů dvou součástí při jejich relativním pohybu anebo při pokusu o vzájemný pohyb. Vzájemným pohybem je myšlen pohyb kluzný, valivý, kmitavý nebo nárazový. Dále je nutno říci, že tribologie sahá do všech možných technologických odvětví, neboť tření a s ním spojené opotřebení a mazání se vyskytuje téměř v každé technické aplikaci.

Tribologická soustava je tvořena dvěma tělesy a jejich stykovými plochami, případně látkou, která se mezi nimi nachází a dále jejich blízkým okolím. Takovéto seskupení se poté nazývá tribologickým systémem. Tribologické systémy se dělí na:

- přírodní tribologické systémy (tribologické uzly např. u člověka ve formě pohybového aparátu, kloubů atd., u rostlin pak ve formě kořenů),
- umělé tribologické systémy (součásti systémů vytvořených člověkem, tedy technické systémy, vytvořené za účelem usnadnění práce člověka či zvýšení účinnosti a výkonu technického systému). [1, 3]



Obr. 1 Schéma tribologického systému [5]

## 1.2 Historie a technický význam tribologie

Tření je jedním z nejstarších pozorovaných jevů, se kterým se člověk denně dostává do styku. Lidé se odedávna snaží svoji práci ulehčit, a tak konfrontace člověka a tření sahá historicky již do pravěku, kdy člověk např. rozdělával oheň třením dvou dřev o sebe. Později bylo vynalezeno kolo a vlečení po zemi bylo nahrazeno valením, zde se však vyskytuje tření náboje kola na hřídeli, a proto byla potřeba použít různé živočišné tuky ke snížení tření atd.



*Obr. 2 Vyobrazení mazání ve starém Egyptě [16]*

S účinky tření se v historii člověk vyrovnává neustále. Za jednoho z prvních badatelů v oblasti tření je považován Leonardo da Vinci. Ten na začátku 16. století zjistil, že velikost tření nezávisí na velikosti styčné plochy, ale na kolmém zatížení. Dalším badatelem byl Francouz Guillaume Amontons, který na konci 17. století použil pro třecí a normálovou sílu poměr, který je dnes označován jako koeficient tření. Charles-Augustin de Coulomb tento princip doložil řadou experimentů, a tak vznikl Coulombův zákon:

$$\mu = \frac{F_t}{F} \quad (1)$$

Kde  $F_t$  je třecí síla působící proti směru pohybu,  $F$  je normálová síla (většinou samotná tíha tělesa) a  $\mu$  je koeficient tření. Tento zákon byl dále obohacován o různé poučky, podle kterých třecí síla nezávisí na velikosti styčné plochy těles anebo tření za klidu je větší než tření za pohybu.

Ke tření se zákonitě váže opotřebením materiálu. I s tím se člověk již odedávna snaží vypořádat. Například problém přetváření materiálu je úzce spojen s odolností proti opotřebením daného materiálu. Existují však i aplikace, kdy dochází ke tření bez výrazného opotřebením a to např. při hydrodynamickém mazání dvou funkčních povrchů, které jsou odděleny souvislou vrstvou maziva. Další princip je např. u hydrostatických ložisek, kde je hřídel obklopena médiem, a tak prakticky nepříjde do styku s povrchem ložiska. V určitých aplikacích se však naopak setkáme s opotřebením funkčních dvojic bez většího účinku tření. To se děje například v čerpadlech, vodních turbínách nebo u lodních šroubů, kdy dochází k jevu kavitace.

V praxi je však ve většině případů tření úzce spjato s opotřebením a při řešení optimalizace životnosti součásti nezbyvá než zahrnout oba dva vlivy. Se snížením tření tak většinou dochází ke snížení opotřebením, a tím ke zvýšení životnosti. K tomu se nejčastěji používá mazání strojních součástí, což je v dnešní době nezanedbatelný proces, který je nutno brát v úvahu jak konstruktérem, technologem, tak samotným uživatelem stroje.

K intenzivnímu zkoumání problematiky tření a opotřebením dochází až v 60. letech 20. století, kdy také vzniká pojem tribologie jako vědní obor zabývající se vzájemným působením dotýkajících se povrchů při jejich vzájemném pohybu. V dnešní době je tribologie na takové úrovni, že se s přehledem používá automatizace procesu tak, že je ve funkční dvojici sledováno opotřebením např. z maziva a dále jsou prováděny různé adaptace anebo indikace výměny maziva či celé součásti.

Je důležité však zmínit, že tření jako takové nelze brát jednoznačně za technicky nežádoucí jev. Stejně tak jako se ve spoustě případů snažíme tření snížit, abychom dosáhli vyšší výkonnosti či nižších ztrát, existuje celá řada aplikací, kdy je tření nezbytné

pro správnou technickou funkci – např. závitová dvojice, brzdová dvojice, interakce pneumatiky s vozovkou a mnoho dalších. [1, 2]

### **1.3 Ekonomický význam tribologie**

Z ekonomického hlediska lze obecně tribologii považovat za jeden z nejdůležitějších oborů dnešního vědecko-technického vývoje. Vzhledem k tomu, že podmínky tření a opotřebením strojů, nástrojů a celých zařízení úzce souvisejí s jejich životností, je nutno je stále zlepšovat a dbát na dodržování vhodných tribologických podmínek, a to od návrhu, přes konstrukci, výrobu, montáž až po samotnou údržbu stroje. Tření má navíc vliv na spotřebu energie a při opotřebením dochází k poškození materiálu, který je dále nutno opravit nebo vyměnit. Všechny tyto úkony tedy stojí nejen peníze, ale také čas a spotřebu lidské práce, která je s postupem času a vývojem lidstva považována stále za hodnotnější.

K největším ztrátám dochází právě při nedodržování tribologických zásad. Lze pozorovat některé příčiny selhání funkčních dvojic z tribologického hlediska, jako např.:

- nevhodná volba materiálu funkční dvojice,
- nevhodné tribotechnické konstrukční řešení,
- nevhodná metoda mazání,
- nevhodná volba maziva,
- nezohlednění vlivu okolí (znečištění, prach, teplota, atd.).

Ekonomickým cílem tribologie je tedy hlavně zabránění anebo alespoň snížení ztrát a škod způsobených vlivem tření. [1, 3]

### **1.4 Úlohy a výhledy tribologie**

V dnešní době, tak jako v každém odvětví průmyslu, je i z hlediska tribologie dáván stále větší důraz na ekonomičnost, produktivitu a ekologii technických procesů. To je dáno také tím, že se stále vyvíjejí složitější a komplexnější mechanismy, kterým

je z hlediska tribologie nutno věnovat větší pozornost. Důraz je kladen na to, aby stroje pracovaly s větší rychlostí, větším zatížením a teplotou a při vyšších tlacích. Často se např. v oblasti mazání používá elastohydrodynamické mazání, které vytvoří mezi povrchy vrstvu větší, než jsou drsnosti obou povrchů funkčních dvojic. Zároveň však stále více vstupuje do popředí použití tuhých a plyných maziv, stejně tak jako vytváření funkčních povrchových vrstev, které splňují požadavky na životnost a odolnost proti opotřebení.

Z oboru tribologie se v moderním průmyslu vyvinula celá řada dalších odvětví zkoumající podrobně využití poznatků o tření.

**Tribotechnika** je samostatná vědní disciplína, která tvoří důležitou oblast tribologie. Předmětem tribotechniky je aplikace zákonů získaných studiem tření, výzkumem materiálů, jejich zušlechťování a povrchových úprav při konstrukci, výrobě, montáži, provozu a údržbě strojů a různých zařízení. Aplikací znalostí tribotechniky tak lze dosáhnout např. snížení třecích odporů, úspory energie, využívání vhodných materiálů, technologií nebo např. zpomalení opotřebení či lepší odhad opotřebení materiálu.

**Tribofyzika** se zabývá fyzikálními vlastnostmi materiálů funkčních dvojic. Zkoumá především vlastnosti jako hustota, struktura materiálu nebo teplota vzájemně na sebe působících povrchů a tvoří tak další odvětví tribologie.

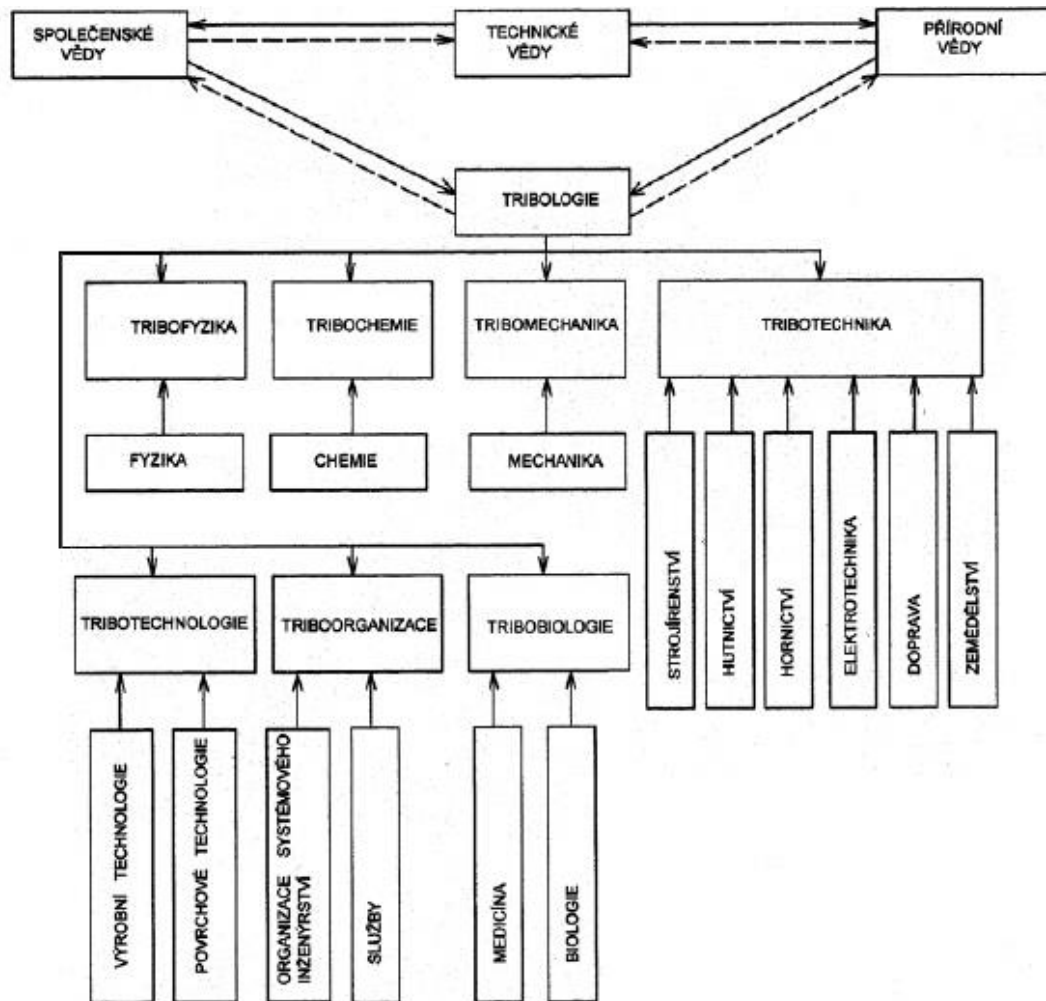
**Tribochemie** je část tribologie, která zkoumá styk povrchů funkčních dvojic, vzájemné chemické působení funkčních dvojic a chemický vliv okolního prostředí.

**Tribomechanika** zkoumá u povrchů funkčních dvojic vzájemný pohyb, deformace, zatížení silami a momenty a jejich rozložení.

**Tribobiologie** je část tribologie, která se zabývá biologickými aspekty při vzájemném působení biologických tribologických systémů (např. klouby).

**Tribodiagnostika** je dalším odvětvím tribologie, které využívá poznatků tribologie a informací např. z maziva k určení technického stavu sledované součásti.

Je tedy patrné, že tribologie je značně interdisciplinární vědou zasahující do všech odvětví včetně technicky velice vyspělého jaderného, leteckého průmyslu, kosmonautiky anebo zdravotnického průmyslu. Za posledních třicet let se do popředí dostává také nová vědecká oblast nanotribologie, která zkoumá tribologické procesy v nano měřítku a posunuje tak oblast zkoumání vlivu tření na molekulární až atomární úroveň. [1, 3, 10]

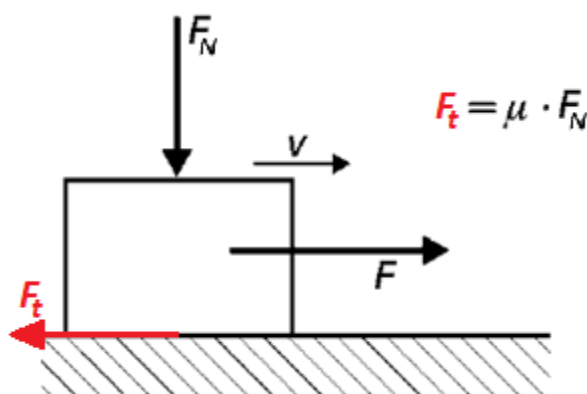


Obr. 3 Schéma rozsahu oboru tribologie [1]

## 2 Tření

Tření lze charakterizovat jako odpor materiálu proti relativnímu pohybu, který vzniká mezi dvěma tělesy v místě dotyku jejich povrchů v tangenciálním směru. Směr třecí síly působí vždy proti směru pohybu těles.

Za základní příčinu způsobující tření se považují mikronerovnosti ploch dotýkajících se materiálů a mezimolekulární adhézní síly. Koeficient smykového tření, tak jak je uvedeno ve vzorci (1), vyjadřuje poměr mezi třecí silou a kolmou normálovou silou. Koeficient smykového tření je dále závislý na druhu materiálu obou těles funkční dvojice, jakosti jejich povrchů, teplotě, rychlosti tření a na prostředí, v němž ke tření dochází. Při kontaktu povrchů funkčních dvojic však dochází též k tvorbě můstků, které se projevují ve formě chemických vazeb a mikro svarů, které je pro uskutečnění vzájemného pohybu nutno překonat. Koeficient tření lze vyjádřit také pomocí poměru energie, která je potřebná k vyrovnání třecích ztrát a celkové energie převedené do systému.



Obr. 4 Schéma sil při tření [5]

Jak již bylo naznačeno v předchozí kapitole, tření lze označit za jev, na který v praxi nahlížíme s dvěma protichůdnými požadavky. V prvním případě je snahou maximalizovat tření (brzdy, pneumatiky, svařování třením, spojky). V druhém případě se snažíme co nejvíce minimalizovat účinky tření, neboť díky nim dochází k opotřebení materiálu, snížení účinnosti, výkonu a zvýšení spotřeby energie. [5, 6]



## 2.1 Rozdělení tření

Tření lze charakterizovat dle několika kritérií. Prvním kritériem je místo působení kontaktních ploch:

- vnější tření (charakterizuje vzájemný styk dvou třecích ploch)
- vnitřní tření (vzniká při vzájemném posouvání v materiálových vrstvách téhož tělesa)

Dalším způsobem je rozdělení dle skupenství třecích ploch:

- tření tuhých těles (třecí plochy jsou v tuhém skupenství)
- tření kapalinové (tření probíhá ve vrstvách s vlastnostmi kapaliny)
- tření plynové (tření probíhá ve vrstvách materiálu, které mají vlastnosti plynu)
- tření plazmatické (stav, kdy se vrstva materiálu, ve které probíhá tření, nachází ve stavu plazmy – vysoce ionizovaného plynu)

V praxi se často vyskytují kombinace výše zmíněných stavů, kdy se v jednom třecím uzlu vyskytují zároveň dva nebo více třecích stavů. Takovýto druh tření se dále nazýváme smíšeným třením.

Dalším možným dělením tření je dle druhu pohybu třecích ploch:

- valivé tření (přesněji valivý odpor, neboť při pohybu nedochází k tření ploch, vzniká při rotačním pohybu tělesa kruhového průřezu po rovině nebo po jiném zakřiveném tělese s posuvem osy rovnoběžně s rovinou)
- smykové tření (charakterizováno bezrozměrnou veličinou - koeficientem tření - jako poměr mezi třecí tangenciální silou k zatěžující normálové síle)
- tření opásáním (tření, které vzniká při opásání tělesa kruhového průřezu - např. lano obtočené kolem pevného kúlu, čím více lano obtočíme, tím větší tření vznikne)

Pokud se jedná o tření s ohledem na působení maziva, dělíme procesy tření na:

- suché tření (dotyk obou těles je suchý a dochází k velkému opotřebení a nárůstu teploty)
- smíšené tření (smíšené tření je charakterizováno výskytem maziva vyplňující prostor mezi oběma třecími plochami, k vzájemnému dotyku dochází pouze u mikroskopických výčnělků, opotřebení je minimální)
- kapalinové tření (mokré tření je způsobeno mazivem oddělujícím oba třecí povrchy tak, že k tření prakticky nedochází, zvyšování teploty je též minimální)

[1, 2, 4, 15]

Tab. 1 Rozsahy koeficientů tření pro různé typy tření a mazání [7]

Druh tření	Režim mazání	Koeficient tření $\mu$
Smykové tření	Suché mazání	0,1 - 1
	Mezní mazání	0,1 - 0,2
	Smíšené mazání	0,01 - 0,1
	Kapalinové mazání	0,001 - 0,01
	Plynné mazání	0,0001
Valivé tření	(Mazání tukem)	0,001 - 0,005

## 2.2 Smykové tření

Na základě experimentálního zkoumání bylo zjištěno, že smykové tření je pro značný rozsah rychlostí konstantní. Jestliže uvedeme těleso do pohybu, bude za jinak konstantních podmínek tření menší, než tření u tělesa, které se nepohybuje. Podle toho rozdělujeme tření na:

- statické smykové tření (klidové)
- dynamické smykové tření (za pohybu)

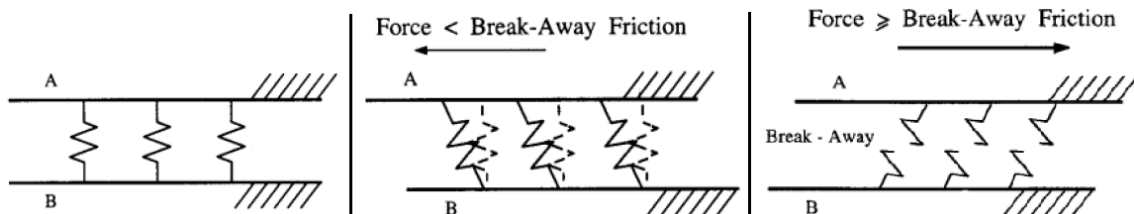
Dle následujícího rozdělení dále dělíme koeficienty tření na *statický koeficient tření* ( $\mu_0$ ) a *dynamický koeficient tření* ( $\mu$ ). Statický koeficient tření je definován jako koeficient tření odpovídající maximální síle, která je nutná k vyvolání pohybu mezi dvěma tělesy. Tato síla je větší než síla, která udržuje těleso v rovnoměrném přímočarém pohybu, proto platí:

$$\mu_0 > \mu \quad (2)$$

[7]

### 2.3 Break - Away Force

V případě, kdy se těleso nepohybuje, označujeme síly, jež na těleso působí, za síly statického tření. Ve chvíli, kdy na těleso začne působit vnější síla, dojde k deformaci mikroskopických výčnělků na povrchu tělesa a spojení mezi povrchy těles se chová jako pružina. Ve chvíli, kdy dojde k překročení velikosti působící vnější síly vůči hodnotě síly statického tření, dojde k přetržení vazby a tento jev můžeme označit za „utržení tělesa“. Síla, která je k tomu potřebná, se nazývá Break – away force. Tento jev je znázorněn na následujícím obrázku. [20]



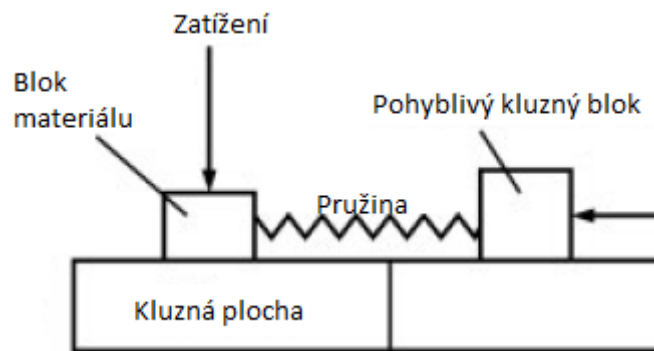
Obr. 5 Schéma Break - Away Force [20]

### 2.4 Hertzův tlak

S předchozí kapitolou souvisí jev zvaný Hertzův tlak. Během zatěžování tělíka při tribologickém testu se v počáteční fázi měření tělísko nehýbe a v místě dotyku s testovaným diskem vznikají maximální, tzv. Hertzovy tlaky. Díky tomu, že se disk ještě nepohybuje, může dojít k elastické nebo plastické deformaci disku nebo tělíka. Tato deformace vytvoří v disku důlek nebo zdeformuje kuličku. Po uvedení disku do pohybu dojde k poklesu tlaku vlivem opotřebení ploch a rozložení tlaku na větší plochu. [2]

## 2.5 Stick - Slip

Při nízkých rychlostech pohybu dvou povrchů dochází ke speciálnímu jevu, tzv. Stick - Slip, který nelze omezit na jednoduchý třecí systém jako je Coulombův model tření. Stick - Slip je typickým jevem, který se vyskytuje v systémech vyvolávajících vibrace jako např. obráběcí stroje a je ovlivněn závislostí koeficientu tření na rychlosti pohybu. Pružná síla působící mezi vzájemně se pohybujícími povrchy, klesá s rostoucí rychlostí. S tímto jevem se obvykle setkáme u obráběcích strojů s malým posuvem, které tak mohou způsobit vady obrobků. Použitím maziv se speciálními aditivami nebo speciální povrchovou úpravou je možné tyto jevy omezit anebo jim zcela předejít. Na následujícím obrázku je znázorněno modelové schéma systému s jevem Stick - Slip.



Obr. 6 Modelový systém Stick-Slip [5]

Pohyblivý kluzný blok je tlačěn konstantní rychlostí  $v$  tak, aby překonal smykové napětí mezi povrchem bloku materiálu a kluznou plochou. Třecí síla, která působí mezi těmito povrchy, je charakterizována statickým a dynamickým koeficientem tření. Blok je nejprve v klidu (stick) a pružina je lineárně stlačována dle rychlosti  $v$ , přičemž je statická třecí síla rovna tangenciální síle pružiny, která působí opačným směrem. Ve chvíli, kdy síla pružiny překoná statickou třecí sílu bloku, blok se uvede do pohybu (slip) a začne být charakterizován dynamickou třecí silou. Následně blok opět překročí rovnovážnou polohu pružiny, natáhne pružinu a poté začne zpomalovat. V pohybu zůstane do té doby, dokud se nevyrovná síla pružiny dynamické síle bloku materiálu. Jakmile se blok zastaví, je charakterizován opět statickou třecí silou. [5, 20]

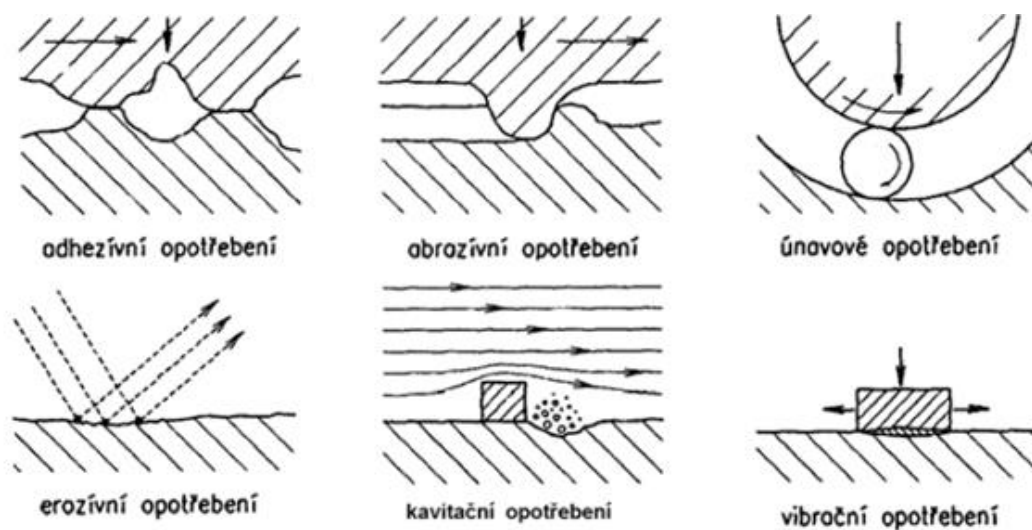
### 3 Opotřebení

Opotřebení je projevem tribologických procesů, které způsobují trvalý úbytek materiálu na povrchu součástí. K tomu dochází při vzájemném pohybu třecích ploch nebo při interakci s médiem v kapalně nebo plynné fázi. Opotřebení se projevuje uvolněním částic z povrchu jednoho nebo obou těles třecí dvojice a způsobuje změnu vlastností opotřebované součásti.

#### 3.1 Mechanismy opotřebení

Existuje několik mechanismů, které způsobují opotřebení. Mezi ty typické patří:

- adhezivní opotřebení,
- abrazivní opotřebení,
- erozivní opotřebení,
- únavové opotřebení,
- kavitace,
- vibrační opotřebení,
- koroze. [1]



Obr. 7 Základní druhy opotřebení [1]

## **Adhezivní opotřebení**

Adhezivní způsob opotřebení je způsobeno, jak už název napovídá, adhezními silami, které působí v kontaktu mezi povrchy materiálů. Vzhledem k tomu, že žádný povrch není dokonale hladký, dochází ke kontaktu mezi výčnělky nerovností povrchů. Při vzájemném dotyku výčnělků tak v první fázi vzniká elastická deformace. Ve chvíli, kdy tlakové napětí dosáhne meze kluzu, nastává plastická deformace povrchové vrstvy měkčího materiálu, která způsobí vznik mikro spojů. Mikro spoje se dalším pohybem porušují. Vlivem deformace jsou však oblasti mikro spojů zpevněny, a tak dochází často k porušování vazeb v podpovrchových vrstvách, které způsobí uvolňování a vytrhávání částic materiálu. Celý tento proces je navíc doprovázen prudkým nárůstem teploty, který podporuje difúzi a přenos měkčího materiálu na povrch tvrdšího, kde postupně tvoří tenký a nespojitý povlak zpevněného materiálu. Pokud je míra přenosu materiálu značná a dochází ke zpětnému přenosu částic, může nastat intenzivní adhézní otěr.

K omezení vzniku otěru a zamezení zadírání je nutné zajistit dostatečně silnou vrstvu maziva. Mimo mazivo je však důležitý i výběr materiálů v konkrétní funkční dvojici, jejich zpracování i jejich povrchová úprava. [1, 8]



*Obr. 8 Adhezivní opotřebení - ojníční pánev a schéma [9, 11]*

## ***Abrazivní opotřebení***

Dalším degradačním procesem je abrazivní opotřebení, které je způsobeno tvrdými, často minerálními částicemi. Uvádí se, že více jak 50 % případů opotřebení strojních součástí je způsobeno právě abrazí. Během abrazivního opotřebení dochází k oddělování a přemístování částic z povrchů součástí, kdy tvrdé částice vytvářejí rýhy na povrchu tělesa z měkčího materiálu.

Tvrdé částice se mohou nacházet ve volném nebo vázaném stavu. Částice vázané jsou součástí např. brusného pásu či kotouče a jsou pohromadě drženy pojivem. Za volné částice způsobující abrazivní opotřebení můžeme považovat nečistoty mezi špatně utěsněnými povrchy dvou funkčních dvojic ve vzájemném relativním pohybu jako např. blok motoru s písty či převodovka. V tomto případě mazivo nestačí k ochraně proti vniknutí tvrdé, cizí částice do povrchu součástí. Důležité je dbát na těsnost, použití filtrů a výměnu maziva.

Abrazivní opotřebení úzce souvisí s adhezivním opotřebením, neboť při něm mohou též vznikat tvrdé, vylámané částice, které se dále chovají abrazivně a vnikají do povrchu jednoho nebo obou součástí. Důležité je také zmínit, že k abrazivnímu opotřebení může docházet ve všech režimech tření. [1, 19]



*Obr. 9 Abrazivní opotřebení - píst spalovacího motoru a schéma [9, 11]*

## ***Erozivní opotřebení***

U erozivního opotřebení se jedná o oddělování částic a poškozování povrchu materiálu částicemi nesenými proudem kapaliny nebo plynu nejčastěji tam, kde dochází k víření proudící kapaliny. Míra opotřebení je závislá na úhlu dopadu částic, jejich velikosti, počtu, charakteru a rychlosti pohybu, který určuje energii při srážce s povrchem tělesa. Budou-li moduly pružnosti obou materiálů velké, např. při otryskávání nebo kuličkování ocelovými broky, bude na funkčním povrchu vznikat maximální napětí. V opačném případě, tedy pokud bude mít jeden z materiálů malý modul pružnosti, klesne výrazně i napětí v místě dotyku.

S erozivním opotřebením se setkáváme běžně v nejrůznějších technických aplikacích, jako je poškozování lopatek spalovacích turbín, čerpadel, vodních turbín, potrubních systémů nebo třeba zařízení na zpracování plastů. Erozivní mechanismus se však využívá i ku prospěchu věci např. při úpravě povrchu tryskáním, kuličkováním nebo řezání materiálu vodním paprskem s částicemi. [1, 12]



*Obr. 10 Erozivní opotřebení - kulový ventil uzávěru [11]*

## ***Únavové opotřebení***

Mezi jednu z nejčastějších forem opotřebení patří únavové opotřebení. Únavové opotřebení se projevuje vydrolováním materiálu z povrchů těles třecí dvojice a tvorbou důlků tzv. pitting. K tomu nejčastěji dochází při kluzném nebo valivém kontaktu třecích



ploch při opakovaném kontaktním napětí na povrchu materiálu. Toto napětí vyvolává tvorbu zárodků trhlin na povrchu nebo pod ním, které dále porušují povrchovou vrstvu.

Často se s únavovým opotřebením setkáme např. u ložisek, kde je valivé těleso, tedy kulička nebo váleček, v neustálém kontaktu s povrchem kroužku ložiska. Při opakovaném namáhání dochází k tvorbě zárodku trhliny, která se dále šíří, případně se spojí s vedlejší trhlinou a vytváří částice opotřebení. Dalším místem výskytu můžou být boky zubů u ozubených kol. Obecně dochází k únavovému opotřebení nejčastěji u vysoce cyklických namáhání. [1]



*Obr. 11 Únavové opotřebení - kroužek ložiska, zuby ozubeného kola [11]*

## 4 Tribologie za zvýšených teplot

Tribologie za zvýšených teplot hraje v současnosti velice důležitou roli při navrhování kritických komponent ve většině technicky pokročilých průmyslových odvětvích. S takovými aplikacemi se pak můžeme setkat např. v leteckém a kosmickém průmyslu, v energetickém průmyslu nebo při zpracování železa.

### 4.1 Povrchová teplota a její význam

Jak již bylo zmíněno, tření se vyskytuje vždy, když vůči sobě povrchy třecích těles konají valivý či smýkaný pohyb. Z makroskopického hlediska je však také důležité zaměřit se na přenos energie v systému funkční dvojice. Během tření se totiž mechanická energie přeměňuje na vnitřní tepelnou energii a generuje tak v tělese teplo. Mechanismy přenosu energie se mohou lišit pro různé případy tření a procesy spojené s třením včetně ohřevu se obecně nachází v místě dotyku obou těles v relativním pohybu.

Dle některých vědců se tyto procesy vyskytují díky vzájemnému působení atomů pouze v několika krajních povrchových vrstvách. Jiní naopak tvrdí, že k největší přeměně energie dochází v celé oblasti, která je ovlivněna plastickou deformací. Experimentální práce ukázaly, že k nejméně 95% přeměny energie dochází právě v prvních 5  $\mu\text{m}$  dotýkajících se povrchů, kde se většina energie přeměňuje na teplo, které dále způsobuje nárůst teploty povrchů třecích těles a tím ovlivňuje jejich vlastnosti. Proto v některých aplikacích, jako je např. brzdový kotouč, musíme dbát zvýšené opatrnosti na to, aby byla zachována dostatečná tření i za vyšších teplot.



*Obr. 12 Zátěžový test brzdového kotouče [27]*

Teplo a výsledný nárůst teploty třecích těles má mimo jiné zásadní vliv na tribologické vlastnosti třecí dvojice. S nárůstem teploty se mění nejen mechanické vlastnosti, ale také vlastnosti fyzikální. Povrchová a podpovrchová teplota způsobuje změnu struktury materiálu, oxidaci povrchu a může narůst až do takové hodnoty, kdy dojde k roztavení materiálu a selhání funkčnosti celé součásti. Nárůst teploty tak často způsobuje změny chování maziv, třecích dvojic a především opotřebení a životnost strojních součástí. Mezi nejzásadnější účinky na tribologické chování vyvolané teplem, které vzniká při tření, patří:

- U materiálů s nízkými teplotami tání často dochází k třecímu efektu. Například u kostky ledu je smykové tření malé z důvodu výskytu tenké vrstvy roztátého ledu (vody), která se tak chová jako mazivo. Tento efekt je zásadní pro většinu zimních sportů jako např. lyžování, bruslení nebo bobování. Při malých rychlostech však nedochází k dostatečnému teplotnímu nárůstu a následnému tání vrstev a koeficient tření dosahuje hodnot okolo 0,6 - 0,7. Pokud se však rychlost třecích vrstev zvýší, dojde k natavení povrchu, tvorbě „mazací“ vrstvy ve formě vody a koeficient tření se sníží pod hodnotu 0,1.

- Analogicky můžeme přistupovat k aplikacím s kovovými materiály s tím rozdílem, že pro kovové materiály jsou teploty tání mnohem vyšší, tudíž i rychlost pohybu třecích ploch musí být dostatečně vysoká. Tak jako u kostky ledu i u kovových materiálů můžeme dosáhnout vytvoření roztavené vrstvy materiálu, která funguje podobně jako mazivo, snižuje tření a zvyšuje opotřebení. O takových podmínkách můžeme mluvit u aplikací jako je hlaveň pistole nebo raketové saně, které se používají pro testování raket, katapultovacích systémů nebo třeba leteckých modelů, kde nejvyšší testovací rychlost těchto saní dosahuje až 8 Mach (9 541 km/h).

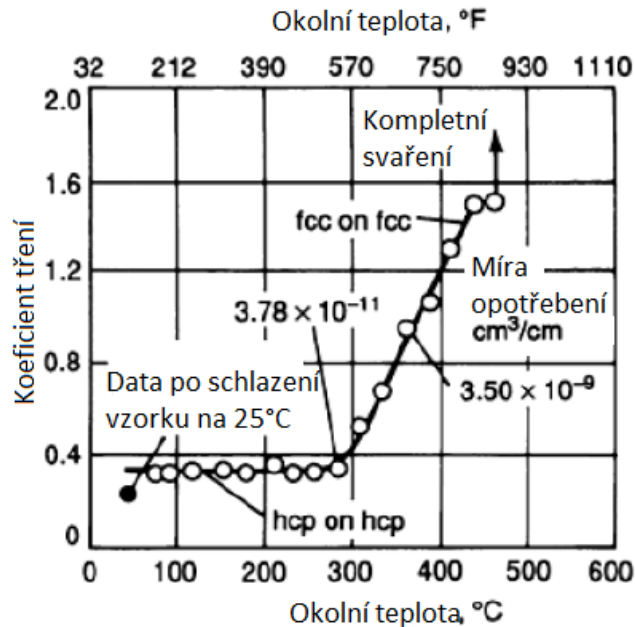


*Obr. 13 Raketové saně - Testování katapultovacího systému F-35A [14]*

U kovových součástí nedochází za normálních podmínek běžně k natavení nebo úplnému roztavení materiálu. I nižší teploty však mohou značně ovlivnit tribologické vlastnosti součástí. Jevy jako oděr či zadíráání jsou výsledkem kombinace kontaktní teploty a tlaku v místech dotyku nerovností povrchů dvou třecích těles, které dále tvoří již dříve zmíněné mikro svary.

Některé výzkumy ukazují, že se tření s teplotou výrazně nemění u kovových materiálů s kubickou prostorově centrovanou (bcc) krystalickou mřížkou. Tato struktura při tom u kovů existuje do 700 °C, u keramických materiálů nedochází ke změně struktury dokonce až do 1000 °C. Charakter tření se u kovových materiálů s teplotou mění právě při změně struktury. Např. kobalt se do teploty 417 °C vyskytuje

v hexagonální (hcp) struktuře a při překročení této teploty mění strukturu na kubickou plošně centrovanou (fcc). Na následujícím grafu je znázorněna změna koeficientu tření pro kobalt v závislosti na teplotě při změně krystalické struktury z hcp na fcc.



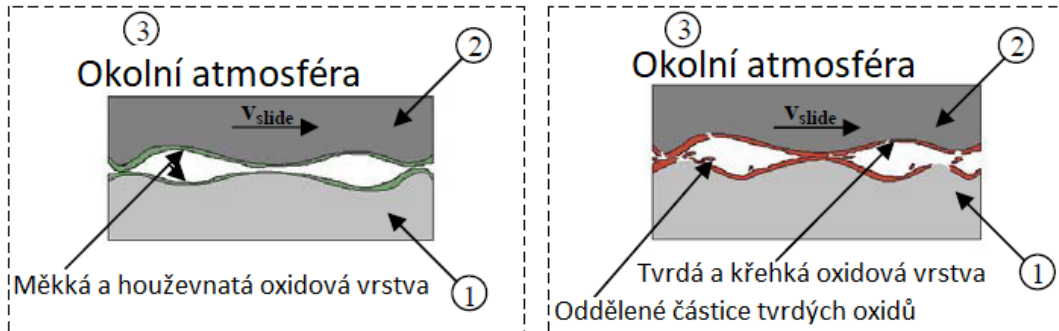
Obr. 14 Diagram závislosti koeficientu tření na teplotě pro Kobalt, rychlost smyku 1,98 m/s [17]

Pod přechodovou teplotou je u kobaltu koeficient tření  $\mu = 0,35$ , neboť ke skluzu dochází mezi základními hexagonálními strukturami. S rostoucí teplotou dochází také k nárůstu koeficientu tření, protože je struktura zpevněna kubickou plošně centrovanou mřížkou. Velikost koeficientu tření může být názorně ukázána na Lanthanu, který existuje ve třech krystalických strukturách, kde jsou koeficienty tření v pořadí  $\mu_{hcp} < \mu_{fcc} < \mu_{bcc}$ . Ne všechny hexagonální struktury však vykazují malý koeficient tření jako např. cín a měď, které se v závislosti na teplotě chovají opačně než např. zmíněný kobalt. [13, 14, 17, 27]

## 4.2 Oxidace povrchu vystaveného vysoké teplotě

Dalším problémem, který se na kovových površích vystavených vysoké teplotě vyskytuje, je oxidace. Týká se to především povrchů vystavených normálnímu prostředí nebo mazivům obsahujícím kyslík. U tribologických dvojic pracujících za zvýšených teplot (typicky nad 300 °C) nelze aplikovat klasické tekuté mazivo z důvodu jeho rozkladu a následnému selhání funkčnosti. Z tohoto důvodu je třeba užít pevných maziv, jako je

grafit, sírník molybdeničitý nebo samomazné povlaky. Lze využít i vlastností tribochemických vrstev z oxidů, formujících se při procesu tření, to ale pouze za předpokladu, že jsou vlastnosti této vrstvy prospěšné, viz následující obrázek.



Obr. 15 Rozdílné typy tribochemicky vzniklých vrstev [15]

Pokud je vrstva oxysličeného materiálu spojitá a dobře přilnavá vůči základnímu materiálu, je pro nás výhodná, neboť zabraňuje kontaktu mezi kovy a snižuje tření a opotřebení. Pokud však tato vrstva není spojitá a dostatečně přilnavá, jeví se velice škodlivou, neboť podporuje opotřebení tvrdými částicemi zoxidovaného materiálu.

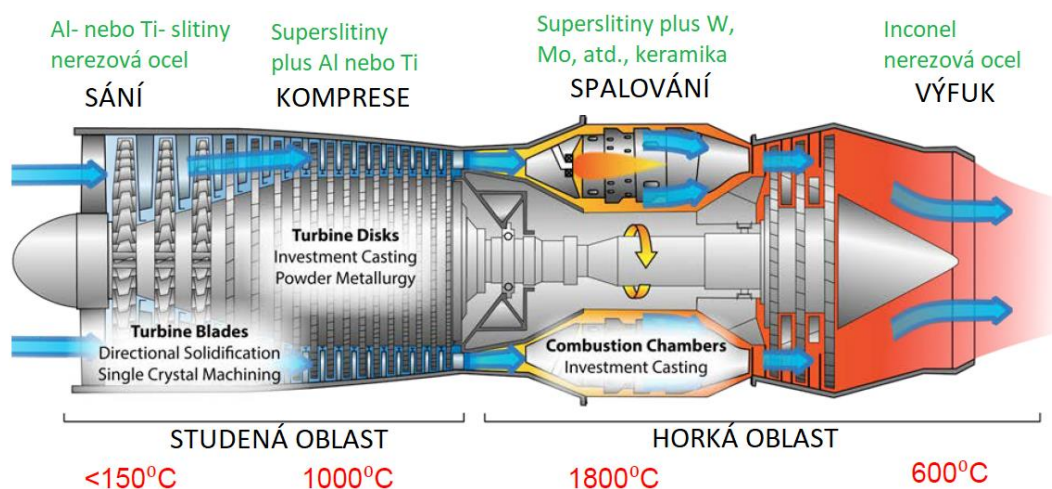
Při bližším zkoumání zoxidovaných vrstev zjistíme, že velký vliv na jejich tvorbu a tím i na samotné tribologické vlastnosti mají legující prvky. Železo a ocel s malým obsahem uhlíku budou tvořit odlišný druh oxidu podle teploty, které jsou vystaveny. Do teploty 570 °C se bude tvořit vnitřní vrstva magnetitu  $Fe_3O_4$  a vnější vrstva oxidu železitého  $Fe_2O_3$ . Tyto vrstvy vykazují dobré ochranné vlastnosti vůči další oxidaci. Pokud se teplota zvýší až nad 570 °C, začne se na rozhraní kovu a  $Fe_3O_4$  vylučovat oxid železnatý  $FeO$  a vlivem vyšší koncentrace defektů této vrstvy dojde ke zrychlení oxidace. Z tohoto důvodu jsou vysokoteplotní slitiny navrhovány tak, aby v nich docházelo k tvorbě pomalu rostoucí bariérové vrstvy tvořené oxidy. [13, 15]

## 5 Tribologie pro letecké aplikace

Letecký průmysl je v současnosti díky nejmodernějším technologiím, vysokým dosahovaným výkonům, striktně dodržovaným požadavkům na bezpečnost a životnost, ale také požadavkům na ekonomičnost a ekologii jeden z nejvíce rozvinutých průmyslů. V extrémních pracovních podmínkách jako jsou vysoké rychlosti a tlaky, vlhkost, široká oblast pracovních teplot anebo změny nadmořské výšky je nutno brát ohled na tření a opotřebení a zabývat se tak tribologií funkčních dvojic. Právě tření je tak nezanedbatelným činitelem při návrhu a výrobě leteckých komponent.

### 5.1 Superslitiny v leteckém průmyslu

V aplikacích, jako je letadlový motor, se musí vhodně volit použitý materiál vzhledem k provozním podmínkám, za nichž motor pracuje. Ty často dosahují teplot okolo 1800 °C a víc, což v kombinaci s vysokými tlaky a rychlostmi otáčející se hřídele představuje extrémně náročné prostředí, jež mimo jiné vyžaduje speciální materiály.



Obr. 16 Schéma proudového motoru - použití materiálů při konstrukci vnitřních komponent [18]

Superslitiny jsou nejčastěji slitiny na bázi Co a Ni a lze je rozdělit do dvou hlavních skupin na žárovevné a korozivzdorné. Žárovevné superslitiny vykazují extrémní vlastnosti za vysokých teplot a největší míra jejich použití je právě v letadlových motorech. Další průmyslová odvětví využívající superslitiny jsou např. chemický, petrochemický a kosmický průmysl nebo v aplikacích jako nukleární reaktor, vysokoteplotní pec, rakety atd. Mezi některé obchodní označení patří např. Inconel, Ni-Resist nebo Hastelloy. [18]

## 5.2 Povlaky v leteckém průmyslu

Tak jako je v leteckých aplikacích důležité použití správného materiálu, je důležitá i povrchová úprava tohoto materiálu. Ta by měla splňovat teplotní odolnost, mechanickou otěruvzdornost, vysokou životnost, měla by prokazovat dobré kluzné vlastnosti samozřejmě s důrazem na ekologii procesu aplikace. Mezi nejčastěji používané povlaky např. ve dříve zmíněném letadlovém motoru se řadí žáruvzdorné povlaky (TBC = Thermal Barrier Coating), těsnící povlaky (Abradable Coating) a kluzné povlaky jako je např. DLC (Diamond Like Carbon) povlak. Optimalizace povrchových vlastností však vyžaduje komplexní znalost vztahu mezi charakteristikami nanášení povrchových vrstev a samotnou finální strukturou povrchu. V rozsahu této práce tedy není možné zabývat se dopodrobna problematikou nanášení těchto povrchových vrstev.

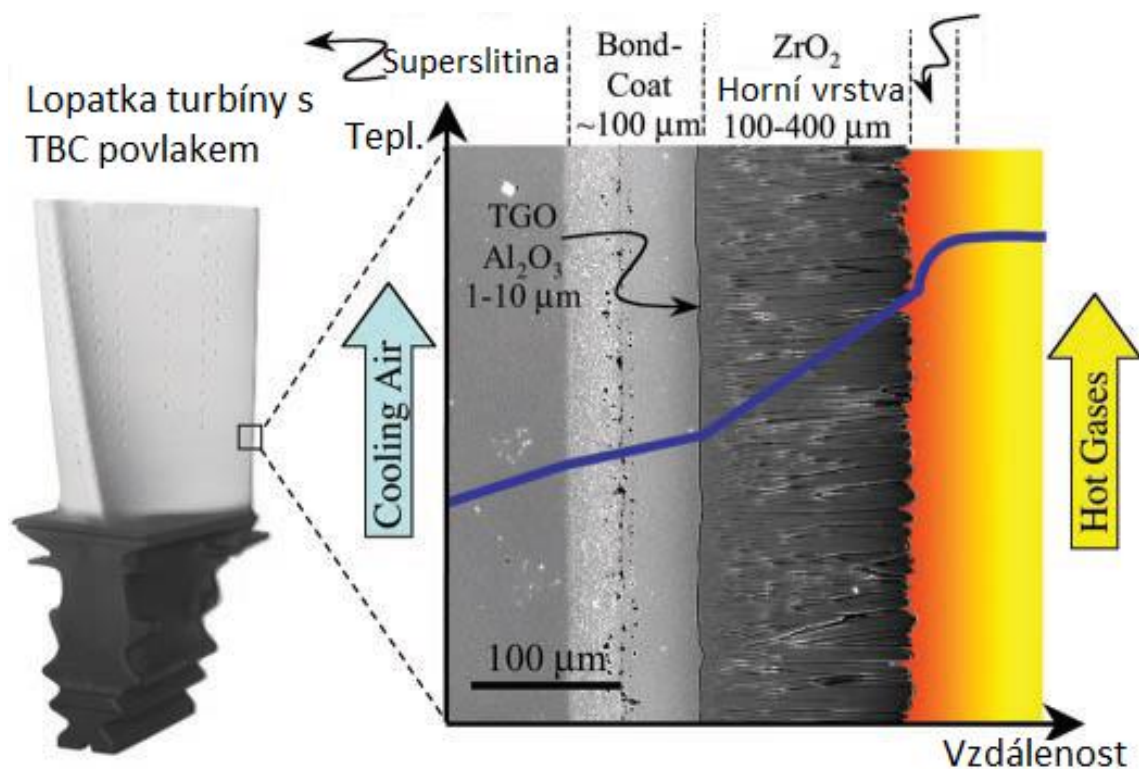
**Žáruvzdorné povlaky TBC** (Thermal Barrier Coating) jsou, jak už název napovídá, povlaky, které chrání základní materiál od extrémních teplotních podmínek. Systém žáruvzdorných povlaků spočívá v nanesení vrstvy izolačního materiálu (100 - 500  $\mu\text{m}$ ) na povrch jiného základního materiálu, který operuje za vysokých teplot. Díky tomu, že je nanesený povlak schopen odolávat mnohem vyšším teplotám než materiál základní, můžeme tak zvýšit životnost či vůbec umožnit použití některých materiálů jako superslitiny či keramické kompozity v extrémních podmínkách letadlového motoru. Právě tam se totiž v oblasti spalovací komory neustále zvyšují technické nároky na materiály a použité technologie. V praxi tak TBC povlak chrání např. lopatky, spalovací komoru a jiné části motoru a zvyšuje tak pracovní teplotu i jeho účinnost.

Struktura TBC povlaku se skládá ze tří částí, z nichž je obvykle jedna kovová a dvě keramické a liší se od sebe rozdílnými fyzikálními, tepelnými a mechanickými vlastnostmi, což z nich dělá komplexnější materiál než buď jen kovový, nebo keramický. Mezi tři vrstvy patří:

- pojivová vrstva (bond-coat, oxidicky rezistentní kovová vrstva umožňující uchycení samotného TBC)
- oxidická vrstva TGO (Thermally Grown Oxide, forma  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , které se tvoří za vysokých teplot)



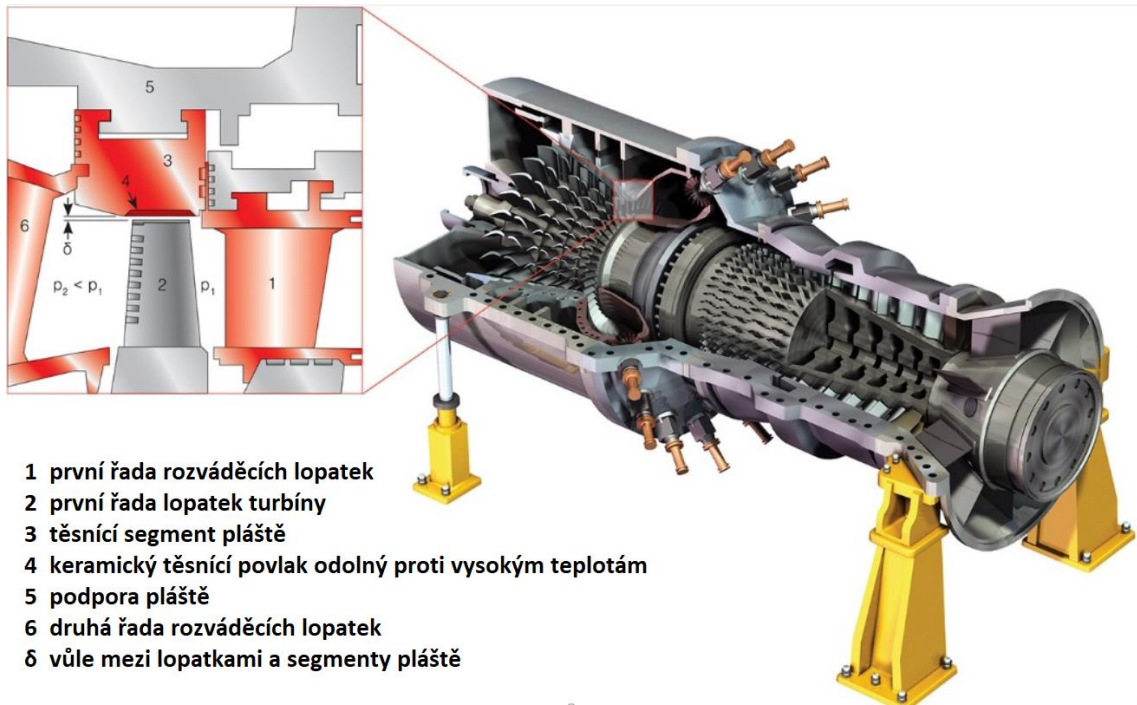
- horní vrstva TBC (nejčastěji vrstva na keramické bázi YSZ - Oxid zirkoničitý  $ZrO_2$  stabilizovaný oxidem yttrititým  $Y_2O_3$ )



Obr. 17 Průřez lopatky s žáruvzdorným povlakem [28]

V průmyslu jsou žáruvzdorné povlaky nanášeny několika způsoby, mezi něž patří plazmatický nástřik, vysokorychlostní HVOF, napařování elektronovým paprskem (EBPVD) a další. [18, 28]

**Těsnící povlaky** (Abredable Coatings) slouží ke snížení provozních vůlí mezi rotujícími částmi turbínových motorů a jejich pláštěm, čímž lze dosáhnout mimo jiné snížení spotřeby paliva a tím vyšší efektivity motoru. Používají se např. i v kompresorech, dmychadlech, turbínách a dalších rotačních zařízeních. V nízkoteplotní kompresorové části motoru se používají jako povrchová úprava kovů jako Al, Ni s grafitem. Ve vysokoteplotní spalovací části se používají pro úpravu superslitinových materiálů (CoNiCrAlY) nebo oxidových keramik jako oxid zirkoničitý  $ZrO_2$ . [18]



- 1 první řada rozváděcích lopatek
- 2 první řada lopatek turbíny
- 3 těsnící segment pláště
- 4 keramický těsnící povlak odolný proti vysokým teplotám
- 5 podpora pláště
- 6 druhá řada rozváděcích lopatek
- δ vůle mezi lopatkami a segmenty pláště

Obr. 18 Schéma proudového motoru - znázornění provozních vůlí [18]

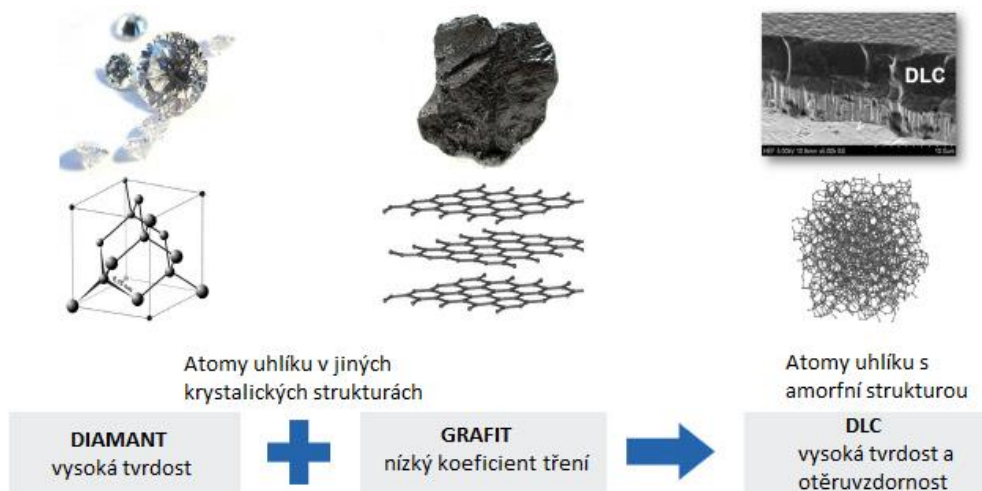
**Kluzné povlaky** jsou povlaky s velmi nízkým koeficientem tření, které se používají u součástí jako kluzná ložiska, kloubní náhrady, nástroje pro obrábění, ale i v leteckém a automobilovém průmyslu. Jejich hlavním úkolem je především zajistit výborné kluzné vlastnosti povrchu součásti a snížit opotřebení. Pro zvýšení životnosti mechanických součástí se používají díly na bázi TiN, CrN, TiAlN nebo TiBN. Dalším druhem kluzného povlaku rozšiřujícím se nejen v leteckém průmyslu je povlak DLC (Diamond Like Carbon). [18, 26]

### 5.2.1 DLC Povlaky

Jak již bylo naznačeno, DLC povlak je povlak na bázi uhlíku, který se vyznačuje vysokou tvrdostí, velice nízkým koeficientem tření a výbornou otěruvzdorností. Mezi jeho další přednosti patří chemická stálost a biokompatibilita, díky které jsou DLC povlaky v popředí zájmu také v biomedicínském průmyslu.

Zkratka DLC pochází z anglického názvu Diamond Like Carbon. Povlak tohoto typu se snaží napodobit vlastnosti diamantu, a to především vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. Jedná se o povlak s amorfní strukturou, který se skládá ze směsi grafitického ( $sp^2$ ) a diamantového ( $sp^3$ ) uhlíku a vodíku. Jejich různým poměrem

Ize ovlivňovat mechanické a chemické vlastnosti vrstvy, jako např. Youngův modul, lomovou houževnatost, tvrdost, koeficient tření anebo chemickou reaktivitu. Díky uhlíku ve formě diamantu má DLC povlak vysokou tvrdost a díky grafitickému uhlíku je samomazný.



Obr. 19 Struktura DLC vrstvy [30]

Při použití DLC povlaků lze kombinovat houževnatý základní materiál (substrát) s tvrdou a oteřuvzdornou DLC vrstvou. Jeho výhodou je navíc nízká depoziční teplota 100-200 °C, která je vhodná i pro materiály, které by za vyšších teplot změnily své mechanické vlastnosti či rozměry. Tyto povlaky v současné době procházejí značným vývojem a jsou nanášeny nejčastěji pomocí technologií PVD (depozice odpařením z pevné fáze) PACVD (chemická depozice vrstev za asistence plazmatu). V leteckých aplikacích jsou využívány např. na komponenty hydraulického a palivového systému, gyroskopické součásti a další akční členy. Obecně lze říci, že jsou DLC povlaky schopné pracovat do 500 °C v závislosti na chemickém složení. [18, 29, 30]



Obr. 20 Příklady využití DLC vrstev v leteckých aplikacích [30]

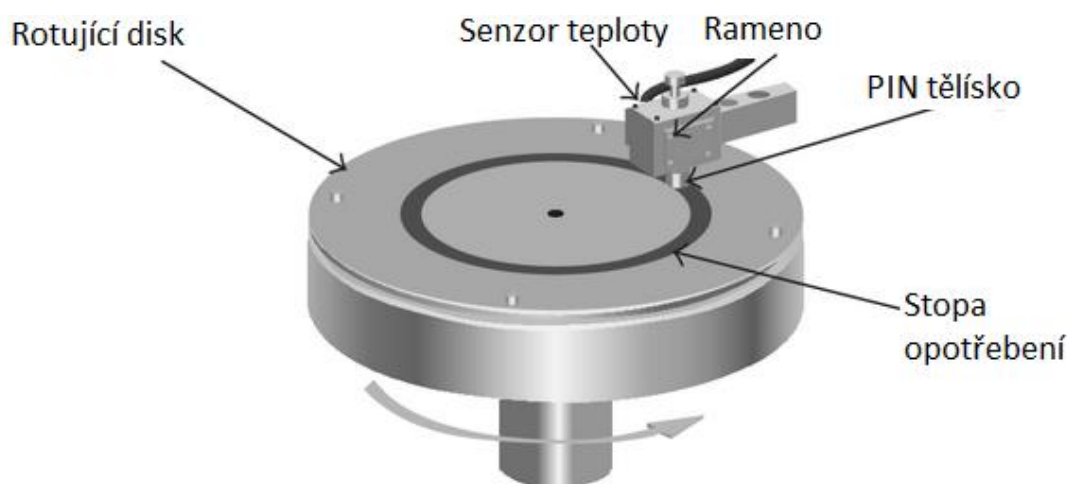
## 6 Tribologický test a jeho parametry

Porozumění a vyhodnocení tribologických vlastností na základě tribologického testu je značně obtížný proces, k němuž je zapotřebí komplexní znalost a posouzení řady parametrů a faktorů. Nelze se zaměřit pouze na samotný koeficient tření a jeho průběh. Parametrům testu je třeba věnovat velkou pozornost. Základní faktory ovlivňující tribologický test jsou popsány v kapitole 6.2.

### 6.1 Princip testu „Pin on Disk“

Metoda Pin on Disk je jedna ze základních metod zjišťování tribologických vlastností materiálů. Při této analýze je na povrch vzorku ve tvaru disku přitlačeno tělíčko „Pin“, které má buď tvar kuličky, nebo válečku a je pevně upnuto v držáku tribometru tak, aby nerotovalo. Na zvoleném průměru se „Pin“ zatíží definovanou silou a disk se začne otáčet dle zvolených otáček tak, aby vykonal stanovený počet kol a „Pin“ tak „uběhl“ definovanou dráhu. Po proběhnutí testu je analyzována vzniklá stopa, její tvar, hloubka, okolí, struktura, atd. Výsledky testu jsou závislé na mnoha parametrech. Vstupními parametry testu jsou nejčastěji:

- zatěžující normálová síla (konstantní, proměnná),
- dráha stopy,
- počet otáček za minutu (RPM),
- doba trvání testu/počet cyklů,
- teplota vzorku a okolí,
- přítomnost maziva či jiného média.



Obr. 21 Schéma metody Pin on Disk [21]

Tato metoda je vhodná pro určení závislosti koeficientu tření na čase a následně opotřebení vzorku. Pro určení statického koeficientu tření lze test nastavit tak, aby se disk po otočení o určitý úhel zastavil a otočil se o stejný úhel v opačném směru.

[21, 22]

## 6.2 Parametry tribologického testu a jejich vliv

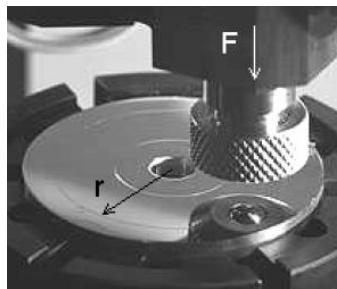
**Materiál tělíska „Pin“** je jeden z nejdůležitějších faktorů tribologické analýzy. Jedním z nejdostupnějších a zároveň nejpoužívanějších materiálů tělísek „Pin“ je ocelová kulička dle ČSN 14 109. Ocelová kulička má však nejčastěji tvrdost 60 - 66 HRC, což je značně problematické při testování tvrdších materiálů opatřených otěruvzdornou vrstvou. V takovém případě dochází v průběhu testu k otěru kuličky a ulpívání jejího opotřebeného materiálu na vzorku. Opotřebením kuličky a zvětšením stykové plochy navíc dochází k poklesu tlaku působícího na stykovou plochu, což vede ke zkreslení výsledků. Z tohoto důvodu je pro tvrdé materiály vhodné použít jiný tvar „Pin“ tělíska, jako např. váleček s malým průměrem. V takovém případě síla působí na stejné ploše a tlak je konstantní. Jinou variantou je použití kuličky z odolnějšího materiálu, jako je oxid hlinitý  $Al_2O_3$ . U korundové kuličky nebude docházet k tak značnému opotřebení a následnému ulpívání materiálu kuličky na povrchu vzorku, čímž se omezí zkreslení výsledků měření při vyhodnocování stopy a koeficientu tření. Dalším důležitým kritériem kuličky je její průměr, který nejčastěji pohybuje v rozmezí od 6 mm do 12 mm.



*Obr. 22 Tělísko „Pin“ ve formě kuličky z  $Al_2O_3$  a oceli (ČSN 14 109) [24]*

Při volbě materiálu tělíška „Pin“ však také záleží na přiblížení se k funkční dvojici v reálném procesu, který test simuluje. Mnohdy tak požadujeme použití dvojice tenká vrstva-substrát s ocelovým materiálem, což může simulovat např. obrábění ocelového obrobku, kde tvorba adhezní vrstvy v počáteční fázi záběhu je přirovnávána k tvorbě nárůstku. [22]

**Poloměr tribologické stopy** je dalším důležitým parametrem u testu „Pin on Disk“. Při určování poloměru, po kterém „Pin“ tělíško opisuje kružnici, je důležitá uběhnutá dráha. Při jednotném nastavení počtu otáček opíše kulička delší dráhu při větším poloměru. S rostoucí dráhou však roste velikost opotřebení tělíška „Pin“. Pokud však poloměr zmenšíme a budeme chtít zachovat stejnou relativní rychlost, musíme zvýšit rychlost otáčení disku. S tím je spojen nárůst teploty v bodě styku, který zásadním způsobem ovlivňuje průběh celého testu. Pakliže zvolíme velký průměr a malou rychlost otáčení, bude mít teplo dostatek času na to, aby přešlo z analyzovaného vzorku do okolní atmosféry.



*Obr. 23 Schéma analýzy „Pin on Disk“ [22]*

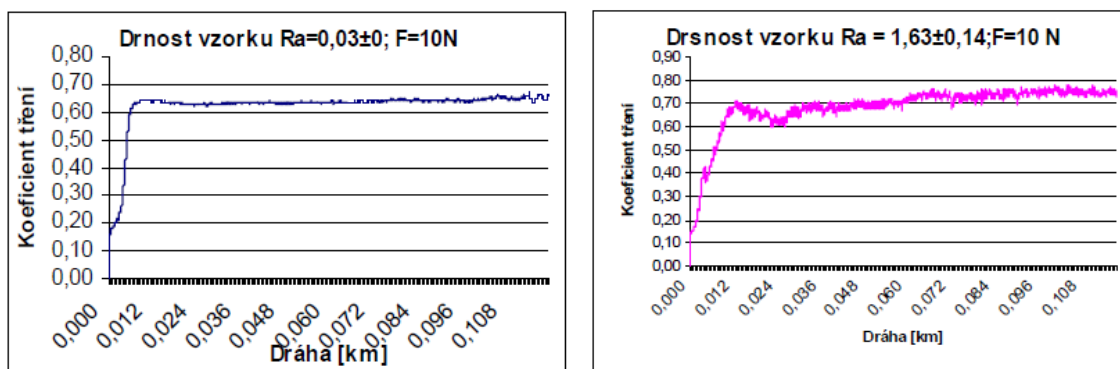
Naopak při malém poloměru a vysokých rychlostech nedojde k přechodu tepla ze vzorku do okolní atmosféry a teplota disku poroste. V lokální oblasti styku pak může teplota narůst do takových hodnot, které v kombinaci se zatěžující silou vyvolávají

plastickou deformaci podpoří vznik adhezního ulpívání materiálu na vzorku. Taková vrstva opět zkresluje výsledek tribologického testu. Z tohoto důvodu je nutné zaměřit pozornost na správné nastavení parametrů testu, které spolu úzce souvisejí. [22]

**Drsnost povrchu** má také vliv na hodnotu koeficientu tření a velikost opotřebení. V praxi často dochází porovnávání laboratorních testů provedených na vzorcích s rozdílnou drsností povrchu. Při mechanickém a tepelném namáhání zvyšují defekty na funkčních plochách třecí dvojice koncentraci napětí. Většina experimentů v laboratoři se tak provádí na vyleštěném povrchu, který však praxi neodpovídá. To způsobuje výsledky neodpovídající skutečným hodnotám. Často je však obtížné dosáhnout požadovaných přesností odpovídajících laboratorním měřením na neupraveném povrchu.

Pokud použijeme kruhový vzorek ve tvaru disku s vysokou hodnotou drsnosti, bude muset tělísko „Pin“ překonat tuto drsnost. V místě kolmém na brusné stopy bude kladen největší odpor na rameno tribometru, naopak v místě rovnoběžném s brusnými stopami bude odpor minimální. To se projeví též na průběhu koeficientu tření, kde se doba, po kterou bude kulička překonávat nerovnosti povrchu, nazývá záběhová fáze.

Dle experimentu, provedeného na Západočeské Univerzitě v Plzni roku 2004, zaměřeného na vliv drsnosti na tribologické vlastnosti, je působení drsnosti jednoznačné. Analýza proběhla pro dvě různé drsnosti povrchů  $R_a = 0,03 \pm 0$  a  $R_a = 1,63 \pm 0,14$  při následujících parametrech:  $F = 10 \text{ N}$ ,  $r = 7 \text{ mm}$ , kulička z  $Al_2O_3$ ,  $v = 10 \text{ cm/s}$ , 3000 cyklů. Disk byl vyroben z rychlořezné oceli dle ČSN 19 852.6 - 64 HRC.



Obr. 24 Vliv drsnosti povrchu na koeficient tření [22]

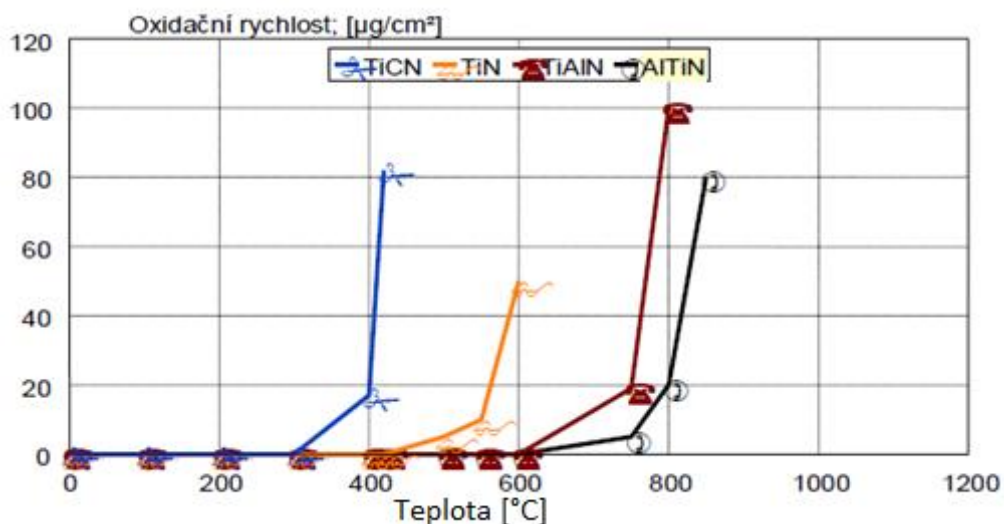
U povrchu s vyšší drsností došlo k rozptylu hodnot koeficientu tření. To je dáno kruhovou trajektorií pohybu kuličky, kde jsou rozdílné hodnoty koeficientu tření v kolmém a rovnoběžném směru pohybu vzhledem k drahám vytvořeným po broušení. Po zaběhnutí kuličky a překonání drsnosti povrchu by mělo dojít ke snížení rozptylu. K tomu však vzhledem k tvrdosti materiálu a nízkému počtu cyklů nedošlo. U vyleštěného materiálu vznikla stopa ihned, čemuž odpovídal i průběh koeficientu tření, který se díky vytvoření adhezní vrstvy pohyboval hned v začátku na vysokých hodnotách. Tento experiment dokazuje vliv drsnosti na průběh koeficientu tření a opotřebení. Je tedy důležité, zahrnout vliv drsnosti do vyhodnocení tribologických vlastností povrchů každé komplexní tribologické analýzy. [22, 23]

**Množství makročástic** v tenké vrstvě je další důležitý faktor. Při analýze tenké vrstvy na bázi titanu zjistíme, že značný význam má právě množství měkkých makročástic. Jestliže je dostatek makročástic k tomu, aby došlo k vytvoření souvislé vrstvy titanu ve stopě, dochází ke vzniku váznuocí vrstvy, díky níž roste koeficient tření. Během pokračování testu dojde k odstranění vrstvy a koeficient tření se opět sníží. Pokud je ve vrstvě naopak menší množství makročástic, dochází k nerovnoměrnému pohybu tělíska a analýza zaznamenává velký rozptyl koeficientu tření. [23]

**Zatěžující síla** má vliv na koeficient tření podle obecně známého pravidla, které říká, že „se zvyšující se zatěžující silou roste koeficient tření“. Toto tvrzení je však nutno brát s rezervou, neboť jej nelze obecně uplatnit na všechny typy materiálů a jejich povlaků. [23]

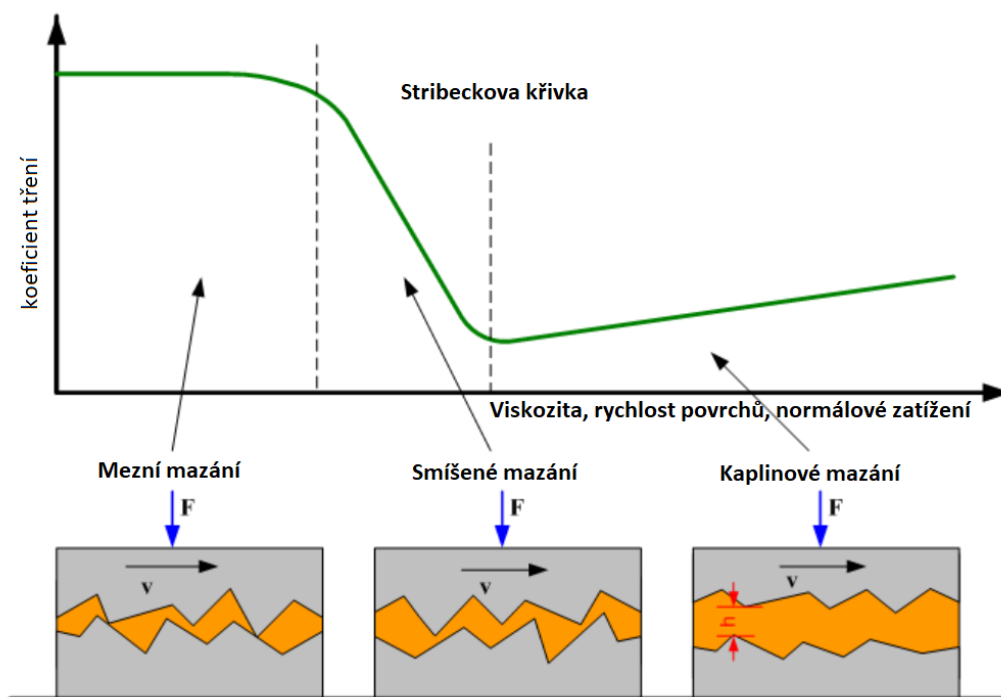
**Teplota** a její vliv byly podrobněji popsány již v předchozí kapitole. Důsledkem změny poloměru dochází k nedostatečnému odchodu tepla ze vzorku do atmosféry, čímž má stopa větší tendenci k vytvoření oxidační vrstvy. Obecně lze říci, že se vzrůstající teplotou disku roste koeficient tření a velikost adhezního opotřebení. Pro teploty nad 600 °C roste i účinek oxidačního opotřebení. V tuto chvíli však z důvodu nedostatku analýz nelze jednoznačně určit vliv vzniku oxidační vrstvy na průběh koeficientu tření a opotřebení vzorku. Na následujícím obrázku jsou oxidační rychlosti běžně používaných tenkých vrstev. [22]





Obr. 25 Teplotní odolnost běžně používaných tenkých otěruvzdorných vrstev [22]

**Mazivo** ovlivňuje tribologické vlastnosti značnou mírou. Maziva existují kapalná či pevná. Ta pevná zpravidla vydrží i za vyšších teplot. Kontakt dvou těles, mezi kterými se vyskytuje mazivo, může být charakterizován několika režimy mazání. Tyto režimy však závisí na provozních podmínkách, jako je viskozita maziva, rychlost pohybu povrchů a normálové zatížení a lze je stanovit dle Stribeckovy křivky, která je znázorněna na obrázku níže. Jde o mezní mazání, smíšené mazání a plné mazání.



Obr. 26 Stribeckova křivka [25]

V případě, že se třecí plochy vůči sobě nepohybují, koeficient tření dosahuje nejvyšší hodnoty i za přítomnosti maziva. Jakmile dojde k pohybu, koeficient tření klesá. Při velmi malých rychlostech se molekuly maziva nedostanou téměř vůbec mezi kontakty třecích ploch, a tak můžeme tření považovat za suché. S nárůstem rychlosti se mazivo postupně dostává mezi kontakty třecích ploch a začne plnit svoji funkci, což způsobuje pokles koeficientu tření. Při dalším nárůstu rychlosti dochází ke smíšenému tření, kdy se mazivo dostává mezi povrchy ve větších vrstvách a povrchy se dotýkají pouze nejvyššími výčnělky obou součástí. Při dostatečné rychlosti a správné viskozitě a zatížení dochází ke kapalinovému tření, kdy mezi povrchy nedochází k žádnému kontaktu. Během tohoto režimu mazání dochází k tření přímo v mazivu. Nejnižší koeficient tření v závislosti na režimu mazání nastává při přechodu ze smíšeného na plné mazání. Jeho další nárůst je způsoben především vzrůstajícím třením v mazivu.

[15, 25]

## II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 7 Použité vzorky a přístroje

#### 7.1 Multifunkční tribometr Rtec Instruments MFT-5000

Pro měření tribologických vlastností byl použit tribometr Rtec MFT-5000. Jedná se o multifunkční tribometr od společnosti Rtec Instruments (USA), který kombinuje několik druhů tribologických testů. Přístroj má modulární charakter, při němž je do pracovního prostoru možné nainstalovat různé moduly (Pin-on-Disk, lineární metoda) dle příslušného testu. V případě potřeby testování za přítomnosti maziva je přístroj vybaven speciálním kontejnerem, který toto měření umožňuje. Dále patří k přístroji vysokoteplotní modulové pece, které je možné vyhřát na 500 °C a 1000 °C a podrobit tak vzorky vysokoteplotním tribologickým testům. Stroj je opatřen také profilometrem, který je plně kompatibilní se softwarem přístroje a umožňuje ukládat fotografie profilu po proběhnutí testu i v jeho průběhu.

Základní charakteristiky multifunkčního tribometru Rtec MFT-5000:

- zátěžná síla - (do 200 N),
- maximální teplota při měření je 1000 °C,
- maximální rychlost rotace disku je 10000 RPM.

[31]



Obr. 27 Tribometr Rtec MFT-5000 [31]

Jako tělísko „Pin“ byly zvoleny keramické kuličky z 99,5 % oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ) o průměrech 6 mm a 12 mm od výrobce Redhill Precision. Jejich přesnost je dána normou ISO 3290 - grade 28, tvrdost < 1500 (HV10), Teplotní odolnost < 1900 °C a měrná hmotnost =  $3860 \text{ g/cm}^3$ . [24]

## 7.2 DLC povlak

Na základě rešerše progresivních povrchových úprav, které mají potenciál využití právě v letectví, byla zvolena experimentální skupina povlaků, resp. tenkých vrstev typu DLC. Jedná se konkrétně o DLC vrstvu, která byla dopována různým obsahem niobu pro porovnání tribologických vlastností a chování těchto vrstev na základě různého obsahu dopované látky. Přidáním niobu se z DLC vrstvy stane prostředí chemicky aktivní, které může během mechanického a teplotního zatížení tvořit sloučeniny jako např. karbidy, a tím ovlivňovat tribologické vlastnosti DLC vrstvy. Zároveň by se niob mohl podílet na ochraně DLC vrstvy při vyšší provozní teplotě, díky své poměrně vysoké hodnotě teploty tání, která činí 2477 °C

Testované povlaky Nb-C:H byly vytvořeny v povlakovacím zařízení Hauzer Flexicoat 850 pomocí metody nerovnovážného magnetronového naprašování. Před depozicí proběhlo odmaštění acetonem v ultrazvukové pračce a následně sušení horkým vzduchem. Dále byly vzorky umístěny do rotačního držáku v depoziční komoře povlakovacího zařízení tak, aby byla umožněna dvouosá rotace pro zajištění dokonalé homogenity tloušťky povlaku. Povrch vzorků byl čištěn v argonové plazmě po dobu 20 minut.

Na základní materiál byla magnetronovým naprašováním nejprve nanášena adhezivní mezivrstva TiNb z titanového (99,6 % Ti) a niobového (99,95 % Nb) terče v argonové atmosféře (99,999 % Ar, tok 90 sccm - kubický centimetr za sekundu). Nanášení mezivrstvy TiNb proběhlo pomocí přímého proudu s příkonem na katodě 4 kW na titanovém terči a 3 kW na niobovém terči. Předpětí na vzorcích bylo -75 V, depoziční teplota 200° C a depoziční čas 20 minut.

Dále byl na adhezivní mezivrstvu nanášen gradientní povlak pomocí metody reaktivního magnetronového naprašování pouze z niobového terče s postupným

zvýšováním toku acetylénu (99,6 %  $C_2H_2$ ). Povlaky s rozdílným množstvím Nb a C byly vytvořeny pomocí třech různých toků acetylénu (30 sccm, 50 sccm a 70 sccm). Nanesení Nb-C:H povlaků proběhlo v DC pulzním módu o frekvenci 40 kHz na katodě s příkonem na niobové katodě 5 kW. Depoziční teplota byla 200 °C a pracovní tlak 0,2 - 0,3 Pa. DC pulzní předpětí na vzorcích bylo -75 V o frekvenci 40 kHz a čas depozice Nb-C:H povlaku trval 6 hodin.

Povlak byl nanesen na vzorek tvaru disku o průměru  $d = 20$  mm a tloušťce 4 mm. Základním materiálem (substrátem) vzorku je ocel 1.2379 (19 573, X153CrVMo12-1), což je světově hojně užívaná chromová ocel vyskytující se v nejrůznějších aplikacích. Tento druh oceli má vysokou pevnost v tlaku a otěruvzdornost, výbornou odolnost proti opotřebení, dobrou houževnatost a je rozměrově stálý. Ocel je navíc sekundárně vytvrditelná, díky čemuž se hodí pro chemicko-tepelné zpracování jako nitridace, CVD nebo PVD. Tvrdost substrátu byla změřena laboratorním mikrotvrdoměrem Leco M-400-G1 a stanovena na 62 HRC. Chemické složení oceli 1.2379 je v tabulce níže.

*Tab. 2 Chemické složení substrátu - ocel 1.2379*

Chemické složení [%]	C	Mn	Cr	Mo	Si	V	Pmax	Smax
	1,4-1,6	0,2-0,6	11-13	0,7-1,0	0,1-0,6	0,7-1,0	0,03	0,03

### 7.3 Vzorky pro tribologický test

Pro porovnání tribologických vlastností byly vybrány tři výše zmíněné vzorky s Nb-C:H povlakem. Všechny Nb-C:H povlaky byly podrobeny chemické analýze na řádkovacím elektronovém mikroskopu JOEL JSM 5410 s analyzátozem EDS (elektronově disperzní spektrometr). Dle EDS analýzy je obsah % Nb v DLC vrstvě:

*Tab. 3 Procentuální obsah % Nb v DLC vrstvě dle EDS analýzy*

Nb [%]	Nb-C:H 1	Nb-C:H 2	Nb-C:H 3
	5,89	9,54	22,33

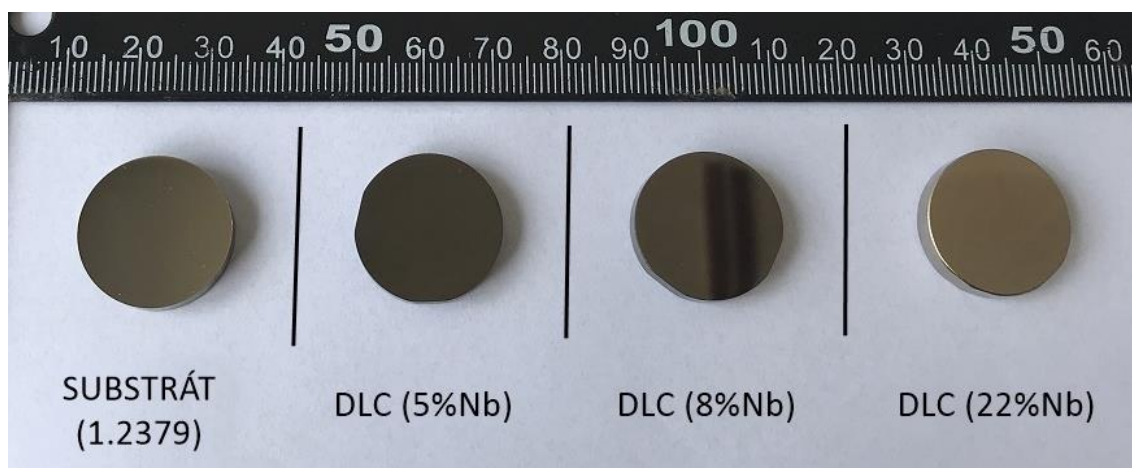
V práci bude dále použito označení vzorků, které předpokládalo procentuální obsah Nb daný nastavením povlakovacího zařízení, a to 5 % Nb, 8 % Nb a 22 % Nb.

Jednotlivé povlaky byly podrobeny testu na přístroji Calotest CSM Compact. Tento přístroj umožňuje orientační měření tloušťky povlaku na základě výbrusu ve tvaru kulového vrchlíku. Z toho je dále možné určit tloušťky DLC vrstev včetně mezivrstvy TiNb. Zjištěné tloušťky jsou v tabulce níže.

Tab. 4 Tloušťky vrstev Nb-C:H a TiNb

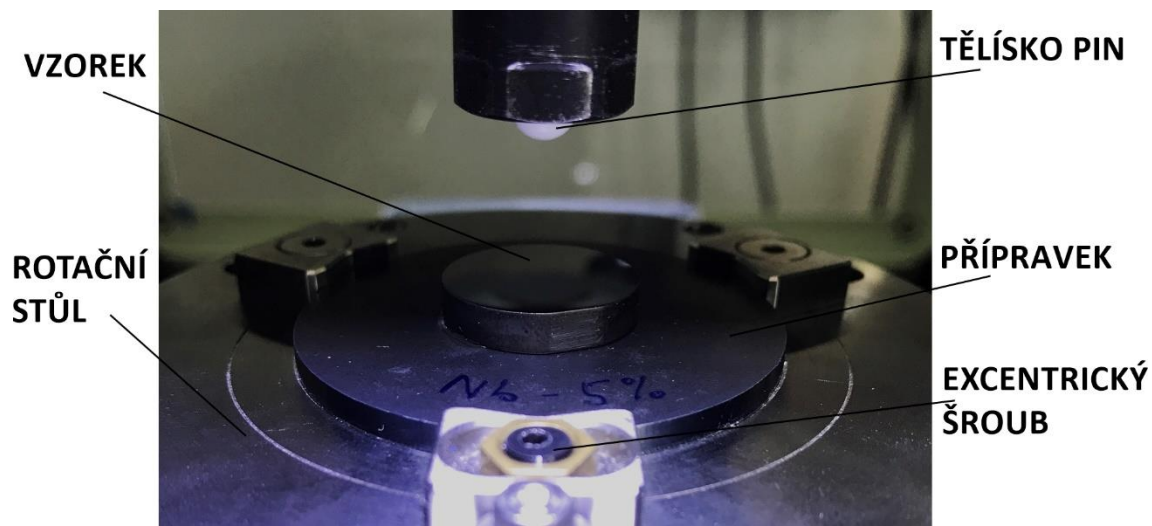
Vzorek	Tloušťka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]		
	Nb-C:H	TiNb	součet
<b>Nb-C:H (5%Nb)</b>	2,03	0,28	<b>2,31</b>
<b>Nb-C:H (8%Nb)</b>	3,81	0,28	<b>4,09</b>
<b>Nb-C:H (22%Nb)</b>	2,44	0,28	<b>2,72</b>

Jako čtvrtý, referenční vzorek, byl použit základní materiál (substrát) 1.2379 s chemickým složením popsaném v předchozí kapitole. Tento byl vakuově zakalen a dále metalograficky vyleštěn. Všechny vzorky měly stejné rozměry.



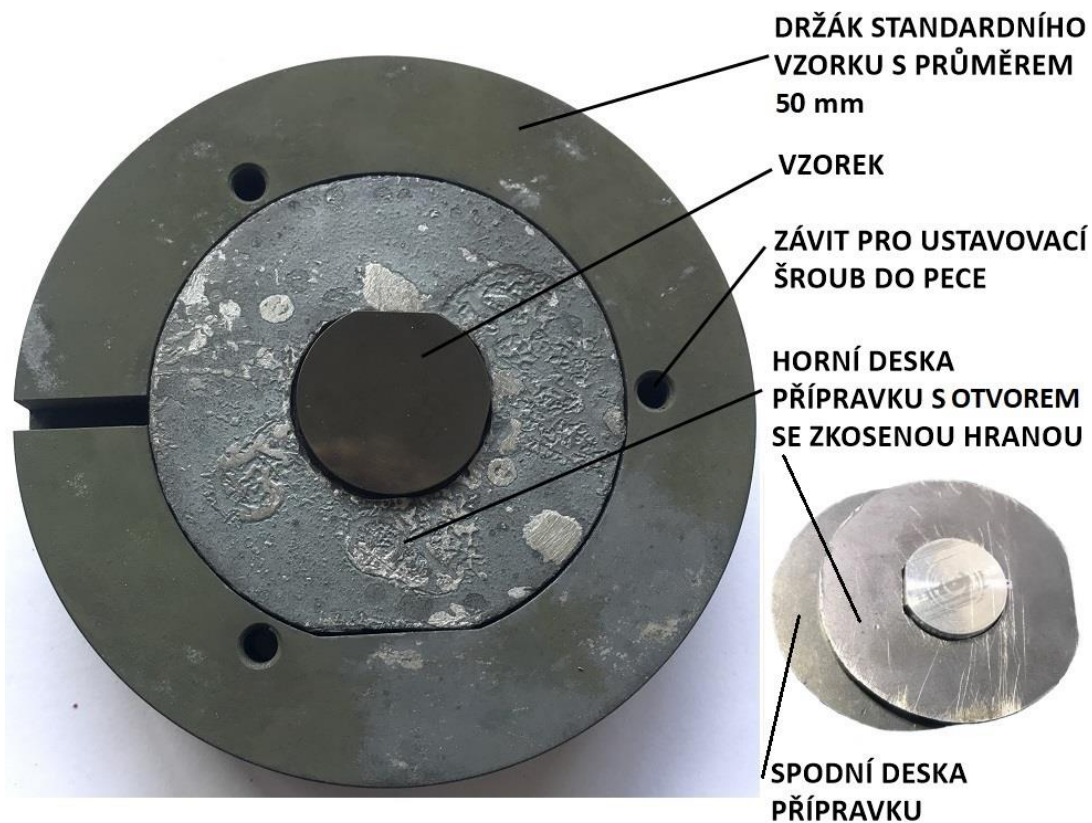
Obr. 28 Vzorky pro analýzu Pin-on-Disk

Vzhledem k tomu, že čelisti upevňovacího stolu modulu pro rotační test Pin-on-disk umožňují upnutí disku od průměru 30 mm, musel být každý vzorek vystředěn a přilepen na vyrobený přípravek ve tvaru disku o průměru 50 mm viz obrázek. Deska byla opatřena otvorem pro snadné odtrhnutí vzorku.



*Obr. 29 Přípravek pro uchycení vzorku při pokojové teplotě*

Pro rotační test při vyšší teplotě v modulu s pecí musel být vyroben speciální přípravek. Tento se skládal z dvou disků se zkosenou hranou, kde se ve spodním disku nacházel otvor pro případné snadné vyjmutí vzorku a v horním disku byl vytvořen otvor se zkosenou hranou tak, aby došlo k aretaci vzorku a zároveň bylo možné vzorek po vyjmutí z pece při určité tepelné dilataci vyndat z přípravku.



*Obr. 30 Přípravek pro uchycení vzorku v peci*

## 8 Parametry testu

Při provádění experimentu na kterémkoli tribometru je jedním z nejdůležitějších kroků nastavení parametrů testu. Parametry tribologického testu a jejich vliv byl probrán v kapitole 6.2. Vzhledem k charakteru zkoušených materiálů (a tělíska „Pin“) a jejich očekávaným tribologickým vlastnostem byly stanoveny parametry tak, aby výsledky experimentu byly vypovídající. Pokud by byla nastavená rychlost disku příliš vysoká, docházelo by k výraznému tepelnému ovlivnění dráhy na disku, stejně tak jako na kuličce a mohlo by dojít k mikro návarům prachu vzniklého při otěru materiálů, což by průběh koeficientu tření v podstatě znehodnotilo. Na druhou stranu musí být rychlost zvolena s ohledem na odpovídající dráhu a trvání testu.

Po uvážení vlivů popsaných v kapitole 6.2, předchozích zkušenostech s měřením Pin-on-disk a s přihlédnutím k vědeckým článkům zabývajícím se tribologickým měřením DLC povlaků byly stanoveny následující parametry pro analýzu Pin-on-disk při standardní pokojové teplotě:

Tab. 5 Tabulka vstupních parametrů testu Pin-on-disk při standardní pokojové teplotě

	parametr [jednotka]
normálové zatížení $F_n$	5 [N]
ujetá dráha $L$	125 [m]
poloměr stopy $r$	8 [mm]
obvodová rychlost $v$	5 [cm/s]
otáčky za minutu $RPM$	60
počet cyklů	~ 2500
čas měření $t$	41,5 [min]
Tělíska „Pin“	$Al_2O_3$ kulička o $\varnothing$ 6 mm

Pro analýzu vzorků za zvýšené teploty byly stanoveny podobné vstupní parametry tak, aby porovnání mezi jednotlivými měřeními mělo vypovídající charakter. Na základě průzkumu byla zvolena teplota 400 °C, při které by měl být DLC povlak schopen pracovat a zároveň je to mezní teplota, při které se zpravidla začínají tvořit karbidy. Referenční vzorek v tomto případě vzhledem k jeho charakteru nebyl podroben zkoušce.



Konstrukce držáku pinu pro vysokoteplotní analýzu umožňuje upnutí kuličky pouze o průměru 12 mm. Z tohoto důvodu byly pro vysokoteplotní testy použity kuličky o průměru 12 mm.

*Tab. 6 Tabulka vstupních parametrů testu Pin-on-disk při 400 °C*

	<b>parametr [jednotka]</b>
<b>normálové zatížení <math>F_n</math></b>	5 [N]
<b>ujetá dráha <math>L</math></b>	125 [m]
<b>poloměr stopy <math>r</math></b>	8 [mm]
<b>obvodová rychlost <math>v</math></b>	5 [cm/s]
<b>otáčky za minutu <math>RPM</math></b>	60
<b>počet cyklů</b>	~ 2500
<b>pracovní teplota <math>T</math></b>	400 [°C]
<b>čas měření <math>t</math></b>	41,5 [min]
<b>Tělísko „Pin“</b>	$Al_2O_3$ kulička o $\varnothing$ 12 mm

## 9 Výsledky měření

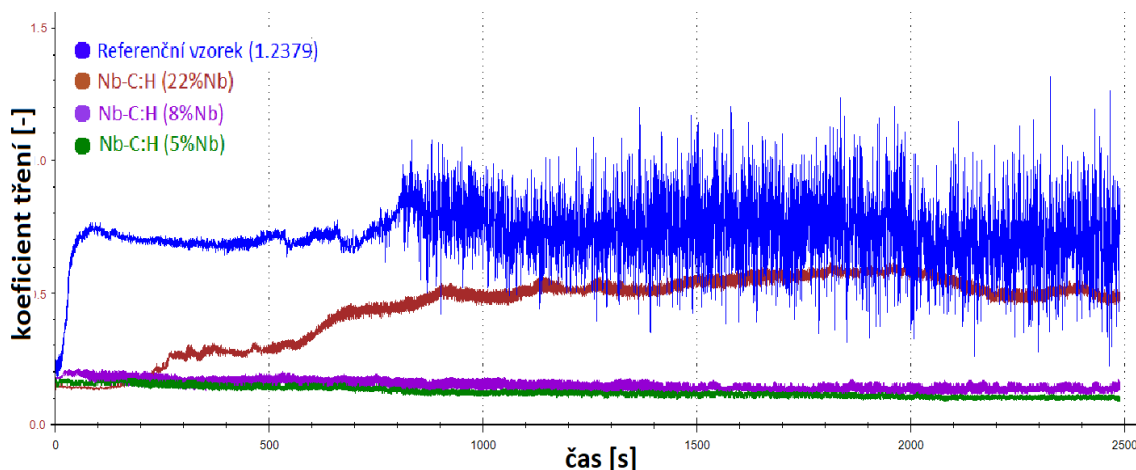
Měření probíhalo na multifunkčním tribometru Rtec MFT-5000 při pokojové teplotě a při zvýšené teplotě 400 °C. Příklad je ovládán softwarem, který zároveň vyhodnocuje naměřená data a umožňuje grafické znázornění zaznamenaných a vyhodnocených dat. Třecí síla byla zaznamenána vlastními senzory tribometru. Samotné zaznamenané hodnoty byly uloženy v .xlsx formátu. Sledovaným parametrem byl koeficient tření, který byl následně zpracován v grafech pro různé povlaky a pracovní teploty.

Tribometr disponuje integrovaným profilometrem, pomocí kterého lze testovaný vzorek nasnímat a vyhodnotit např. šířku stopy, její profil v určitém místě, atd. Každý vzorek byl profilometrem nasnímán a následně zanalyzován.

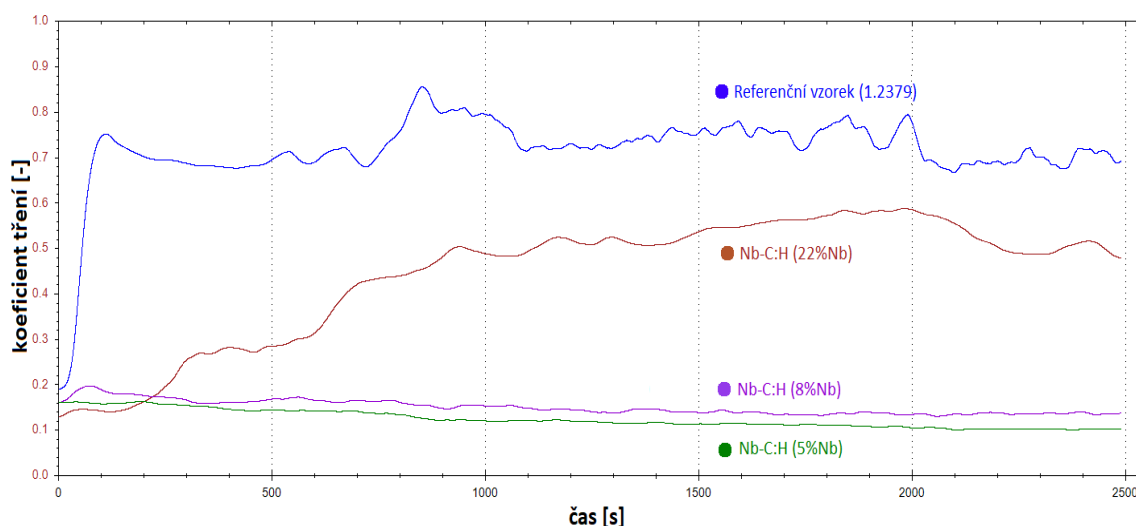
Během analýzy jednotlivých vzorků byla vždy analyzována také kulička. Fotografie otěru byly vždy bezprostředně po testu pořízeny laboratorním mikroskopem Olympus SZ61.

### 9.1 Koeficient tření při pokojové teplotě

Vzhledem k množství dostupných vzorků byl každý povrch testován dvakrát, a to zejména z důvodu zpřesnění výsledků. Během všech testů byly vstupní parametry nastaveny stejně při normálovém zatížení 5 N.



Obr. 31 Průběhy koeficientu tření při pokojové teplotě bez vyfiltrování



*Obr. 32 Průběhy koeficientu tření při pokojové teplotě*

Na prvním grafu jsou průběhy hodno koeficientu tření záměrně bez vyfiltrování, a to z toho důvodu, aby mohlo být jednoznačně konstatováno, že koeficient tření referenčního vzorku bez povlaku má značný rozptyl. Tento rozptyl je dán především výskytem mnoha otěrových částic ve stopě, které jsou patrné ze snímku z profilometru. Tyto částice pravděpodobně pocházejí hlavně z materiálu vzorku vzhledem k tomu, že se jedná o měkký z materiálů funkční dvojice korundová kulička - substrát. Pro přesnější složení by však bylo třeba udělat chemickou analýzu EDS.

Naopak všechny vzorky s DLC povlakem vykazují charakter bez velkého rozptylu hodnot koeficientu tření. Tímto se potvrdila hypotéza, že DLC povlak sám o sobě vykazuje výborné mechanické a třecí vlastnosti.

Po vyfiltrování je patrné, že nejlépe se jeví z hlediska koeficientu tření Nb-C:H povlak s 5 % Nb, který společně s Nb-C:H s 8 % Nb vykazuje téměř shodný a stabilní průběh koeficientu tření. Nb-C:H povlak s 22 % Nb taktéž nevykazuje velký rozptyl, nicméně není tak stabilní a jeho hodnota v průběhu testu roste. První 4 minuty se tak koeficient tření nacházel okolo hodnoty 0,14, a pak začal pozvolně stoupat až k hodnotě 0,5. Tento jev může být zapříčiněn tvorbou oxidické vrstvy materiálu a ulpíváním částic ve stopě, což je patrné ze snímku profilometru.

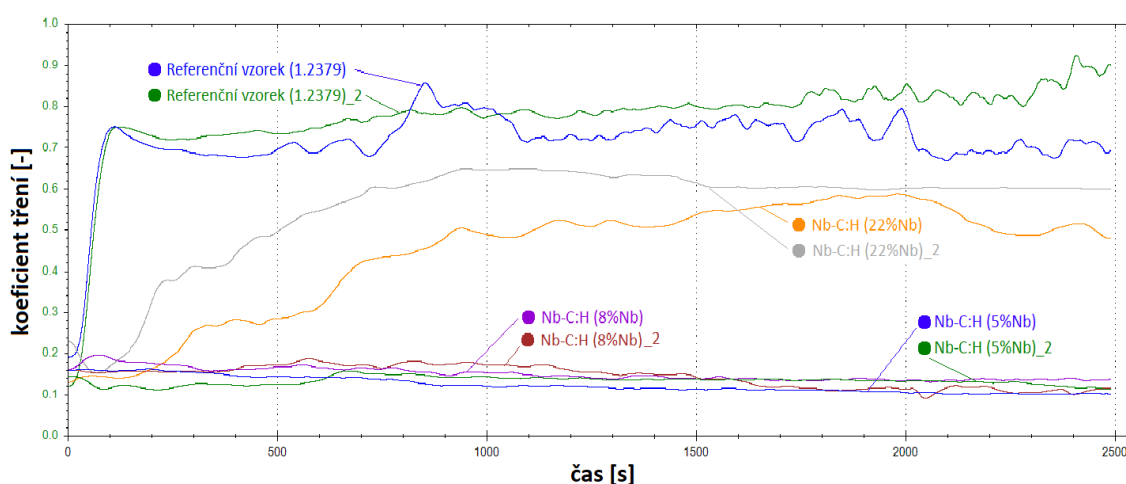
Dle provedené analýzy je nejnižší koeficient tření u povlaku Nb-C:H s 5 % Nb, který vykazuje hodnotu zhruba 6x menší než referenční vzorek. Dále je povlak s 8 % Nb, jehož

hodnota je zhruba 5x menší než u referenčního vzorku a nakonec povlak s 22 % Nb, jehož hodnota je pouze o třetinu menší ve srovnání s referenčním vzorkem materiálu 1.2379. Průměrné hodnoty koeficientu tření jsou v tabulce níže.

	minimální hodnota $\mu$ (po ustálení)	maximální hodnota $\mu$ (po ustálení)	průměrná hodnota $\mu$
<b>REF</b>	0,66	0,86	<b>0,74</b>
<b>5 % Nb</b>	0,09	0,16	<b>0,12</b>
<b>8 % Nb</b>	0,12	0,17	<b>0,14</b>
<b>22 % Nb</b>	0,48	0,59	<b>0,51</b>

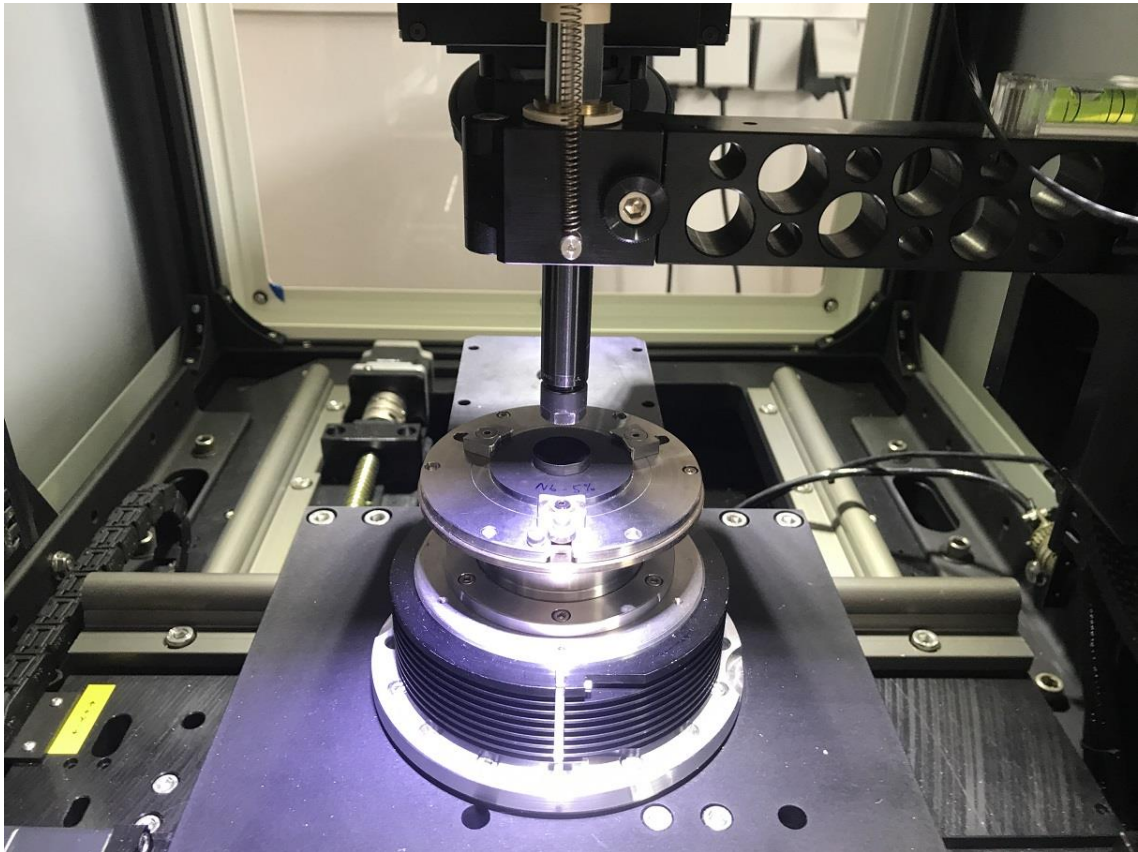
Tab. 7 Průměrné hodnoty koeficientů tření při analýze při pokojové teplotě

Dle předpokladu je koeficient tření DLC povlaku výrazně nižší než koeficient tření samotného referenčního vzorku. Nicméně je nutno podotknout, že rozdíl mezi koeficienty tření DLC povlaků nebyl očekáván v takové míře. Rostoucí a nestálý charakter u DLC povlaku dopovaného 22 % Nb se potvrdil i při druhém měření. Na následujícím grafu jsou průběhy koeficientů tření pro měření obou sad všech čtyř vzorků. Z grafu je vidět podobnost průběhů pro obě měření každého typu povlaku, což poukazuje na vysokou reprodukovatelnost výsledku.



Obr. 33 Průběhy koeficientu tření pro obě sady vzorků

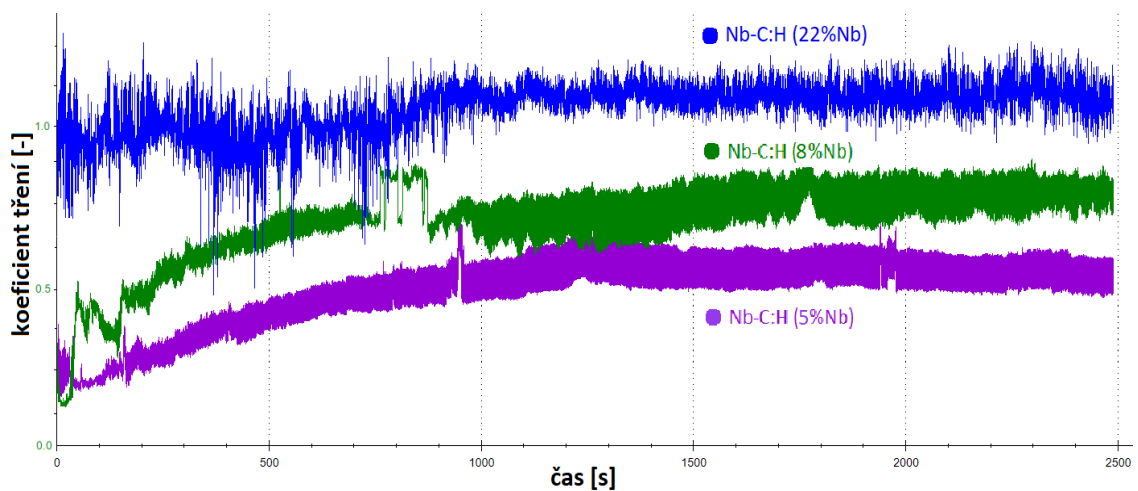
Vzhledem k charakteru a časové náročnosti analýzy nedošlo ani při jednom z testů k poškození povlaku. Znamení je však záběhová část na počátku testu u druhého měření povlaku Nb-C:H s 22 % Nb (šedá), kde došlo k výraznému poklesu koeficientu tření.



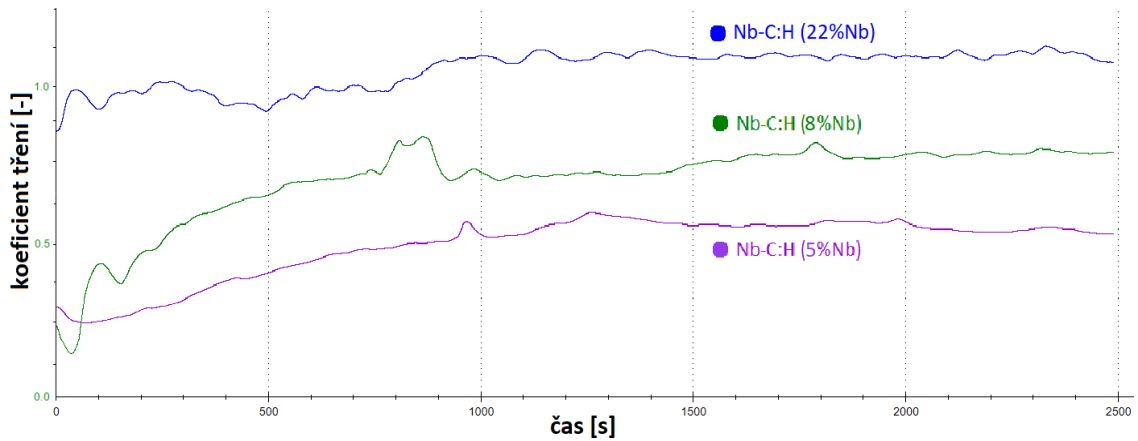
Obr. 34 Modul tribometru pro analýzu Pin-on-disk

## 9.2 Koeficient tření při teplotě 400 °C

Analýza povlaků za zvýšené teploty proběhla v modulární peci. Vstupní parametry byly nastaveny shodně s testy provedenými za pokojové teploty. Normálové zatížení bylo nastaveno shodně s předchozí analýzou a to na 5 N.

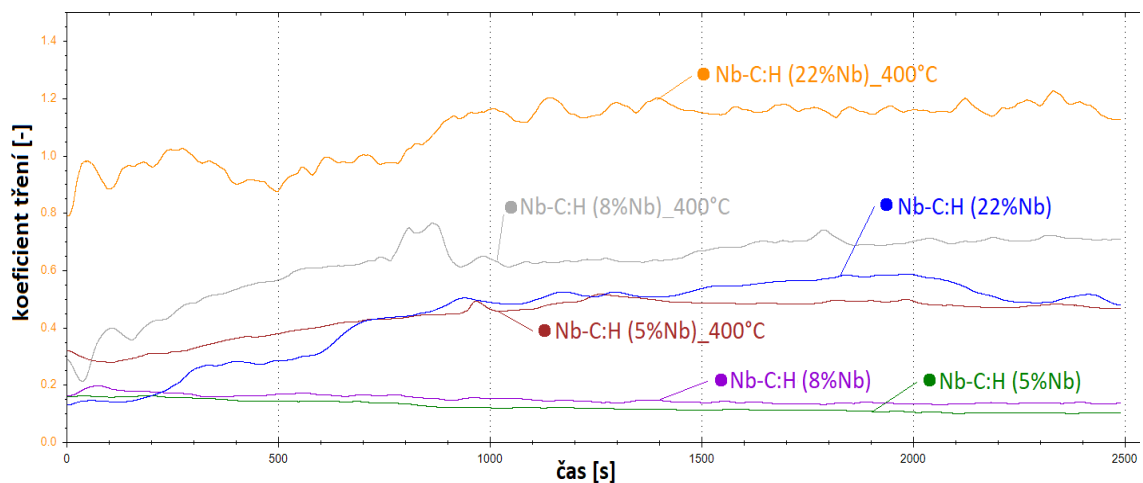


Obr. 35 Průběhy koeficientu tření při 400 °C bez vyfiltrování



Obr. 36 Průběhy koeficientu tření při 400 °C

Při teplotním zatížení vzorků povlakovaných DLC vrstvou došlo dle předpokladu ke zvýšení koeficientu tření. Povlak Nb-C:H s 22 % Nb vykazuje největší rozptyl hodnot a také největší koeficient tření. Jeho hodnota se již od začátku testu pohybuje kolem  $\mu=1$  a mírně roste s ujetou dráhou. Zbylé dva povlaky vykazují nižší koeficienty tření. Nb-C:H s 5 % Nb vykazuje nejnižší koeficient tření také s mírným nárůstem v průběhu testu. Poslední povlak Nb-C:H s 8 % Nb vykazuje charakter s největším nárůstem koeficientu tření během testu. Během žádné z analýz nedošlo k porušení povlaku DLC.



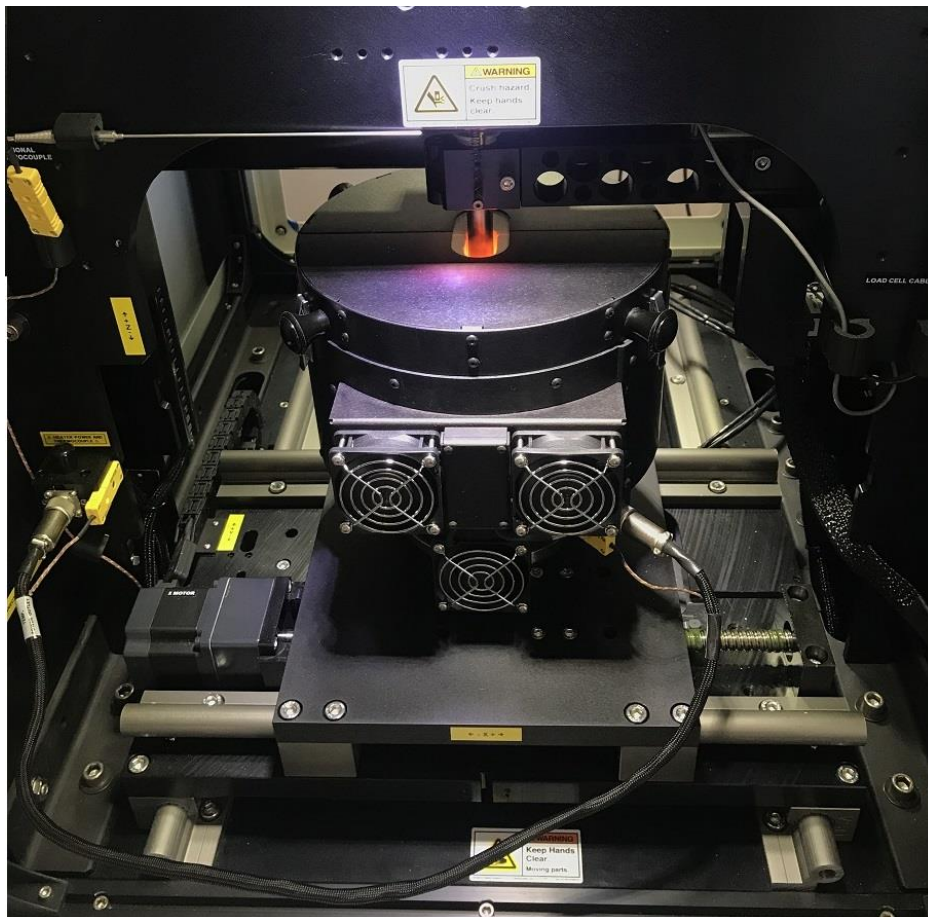
Obr. 37 Porovnání průběhů koeficientu tření při pokojové teplotě a při 400 °C

Při porovnání průběhů koeficientů tření při pokojové teplotě a teplotě 400 °C si můžeme všimnout, že pořadí procentuálního obsahu Nb ve vrstvě se vzhledem ke koeficientu tření nezměnilo. Při zatížení a ohřátí vzorku na 400 °C vykazuje povlak Nb-C:H s 5 % Nb stále nejnižší koeficient tření. Nejvyšší hodnotu má naopak koeficient

tření povlaku Nb-C:H s 22 % Nb. V tabulce je znázorněn nárůst koeficientu tření při zvýšení provozní teploty na 400 °C.

*Tab. 8 Průměrné hodnoty koeficientů tření při analýze při 400 °C*

	minimální hodnota $\mu$ (po ustálení)	maximální hodnota $\mu$ (po ustálení)	průměrná hodnota $\mu$ (pokojová teplota)	průměrná hodnota $\mu$ (400 °C)	Nárůst koeficientu tření
<b>5 % Nb</b>	0,22	0,63	<b>0,12</b>	<b>0,52</b>	<b>4,3 x</b>
<b>8 % Nb</b>	0,45	0,87	<b>0,14</b>	<b>0,75</b>	<b>5,4 x</b>
<b>22 % Nb</b>	0,85	1,19	<b>0,51</b>	<b>1,05</b>	<b>2,1 x</b>



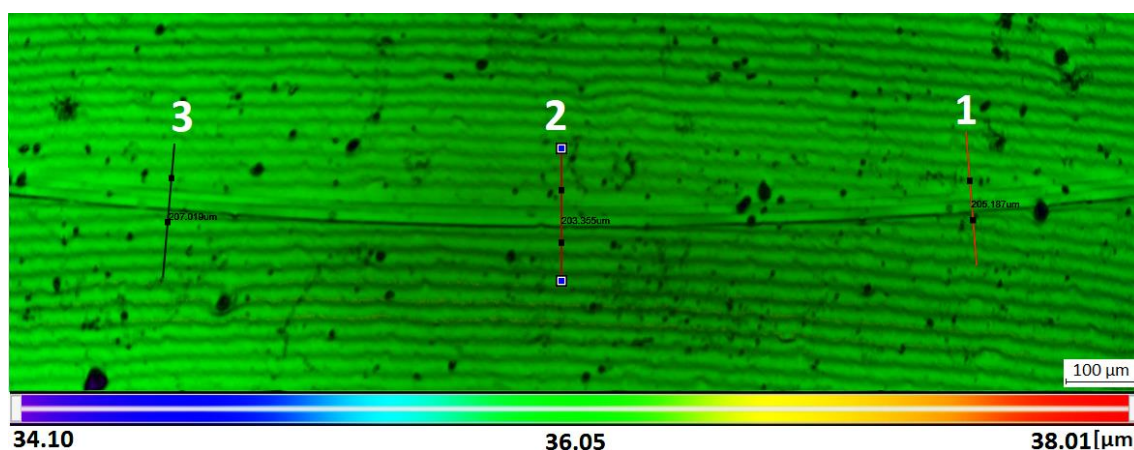
*Obr. 38 Zahřátá pec během analýzy Pin-on-disk za teploty 400 °C*

### 9.3 Analýza stopy na disku a opotřebení kuličky při pokojové teplotě

Během každé provedené zkoušky vzniklo díky tření mezi kuličkou a vzorkem určité opotřebení disku. Toto opotřebení tvoří vzhledem k rotačnímu pohybu disku kruhovou stopu. Šířka a charakter stopy se liší pro každý vzorek, neboť na vzorcích vzniklo různé opotřebení. Stopy na disku byly očištěny technickým lihem a proměřeny zabudovaným profilometrem tribometru. Po nasnímání profilu části stopy byla proměřena tloušťka dané stopy ve třech místech a vypočten průměr. Níže je tabulka šířek stop, vytvořených na jednotlivých vzorcích při zkoušce za pokojové teploty.

Tab. 9 Šířky stop na jednotlivých vrstvách při pokojové teplotě

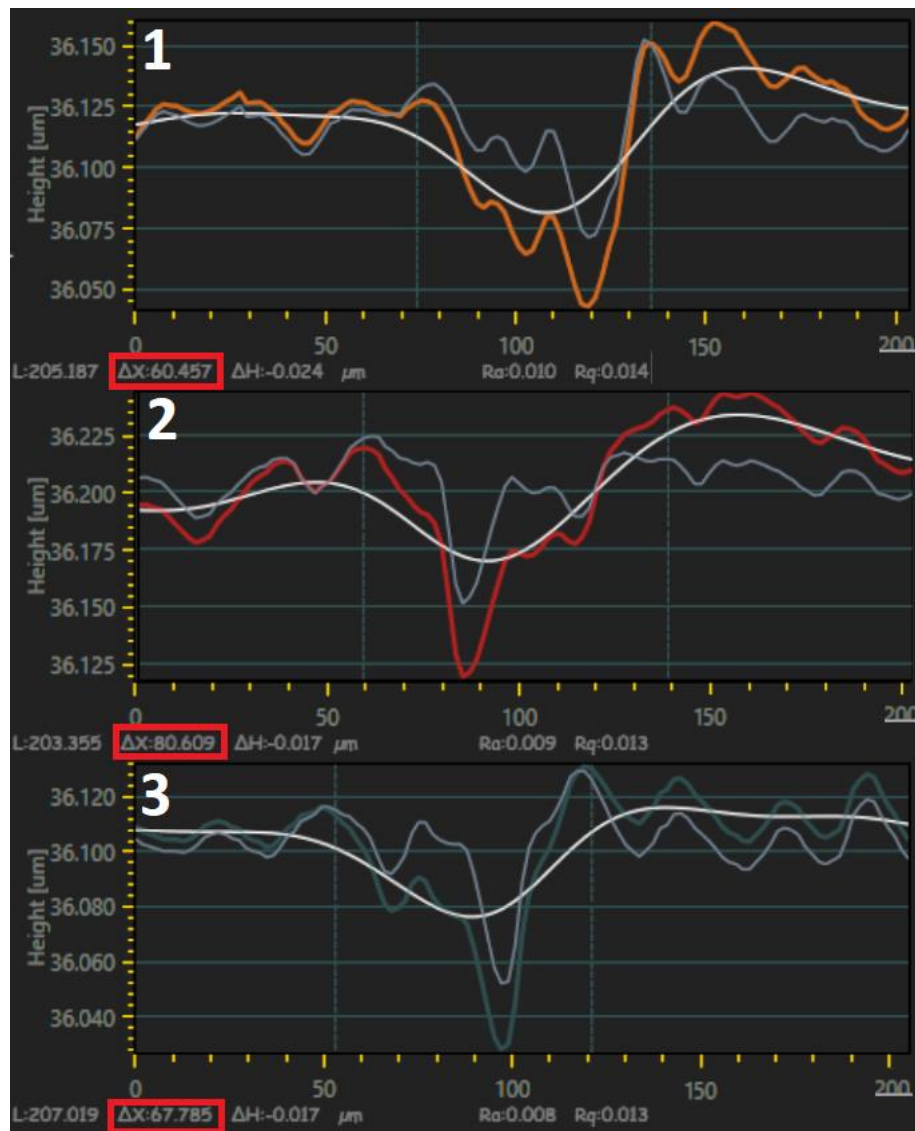
Vzorek	šířka stopy [ $\mu\text{m}$ ]			
	d1	d2	d3	průměr
REF	313,75	302,75	307,93	308,14
5 % Nb	60,46	80,61	67,79	69,62
8 % Nb	78,78	73,75	69,62	74,05
22 % Nb	29,31	38,57	40,31	36,06



Obr. 39 Snímek stopy z profilometru povlaku Nb-C:H (5 % Nb) při pokojové teplotě

Zároveň je nutno podotknout, že při snímání stop vzorků docházelo k poměrně značné interferenci světla, která měření ovlivnila. To je dáno především metalograficky vyhlazeným povrchem. Z tohoto důvodu by bylo vhodné provést více měření stejné části stopy a tato měření zprůměrovat. Dále byl programem ke každému z průřezů stopy vygenerován graf, který znázorňuje profil stopy v daném místě.

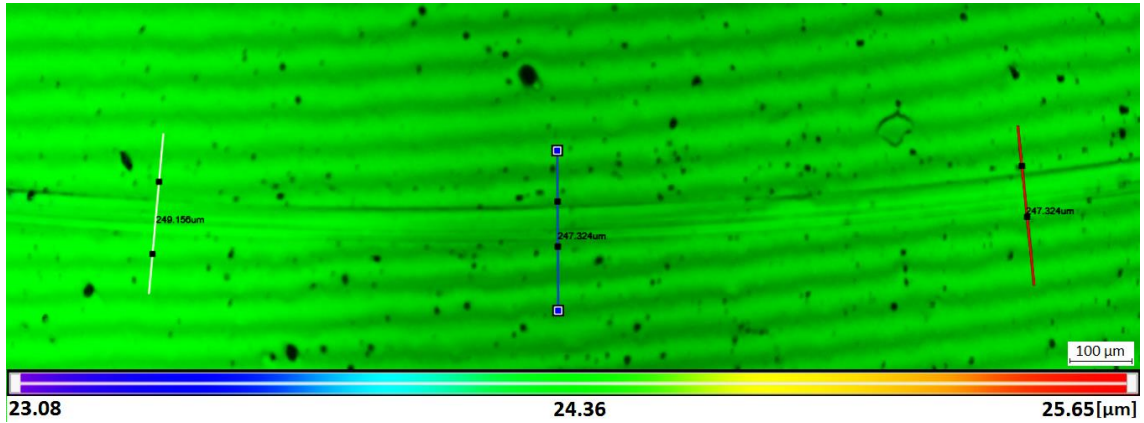




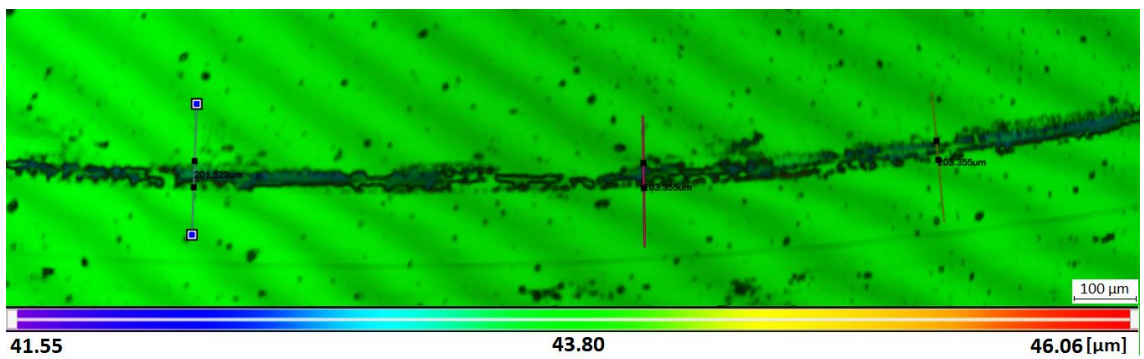
Obr. 40 Profily stop vzorku Nb-C:H (5 % Nb) při pokojové teplotě

Po vyfiltrování průřezového profilu je vidět stopa po kuličce. Ze snímků stopy i zobrazení průřezů je dále vidět, že na vnější hraně stopy se vytvořil nárůstek otřené materiálu. Na snímku je ve formě tenké černé linky kopírující stopu. Nárůstek pravděpodobně vznikl kombinací působící normálové síly kuličky a tepelného zatížení stopy díky velké rychlosti rotace disku, která činila 60 otáček za minutu. Ve stopě však v tomto případě nebyly zaznamenány žádné částice, neboť je průběh hladký. Pro podrobnější informace o tom, k čemu v průběhu testu došlo, by bylo vhodné vzorek podrobit chemické analýze EDS.

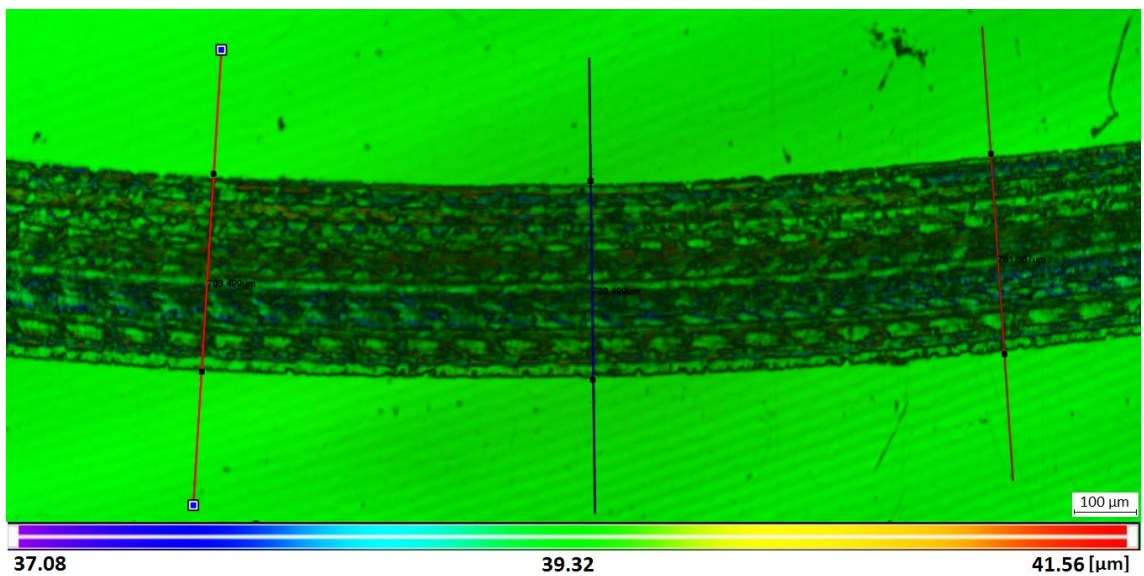
Níže jsou snímky stop z profilometru pro vzorky Nb-C:H (8 % Nb), Nb-C:H (22 % Nb) a referenční vzorek (substrát) 1.2379. Z důvodu velkého množství obrazových dat je zbytek snímků s profily stop obsažen v příloze této práce.



*Obr. 41 Snímek stopy z profilometru povlaku Nb-C:H (8 % Nb) při pokojové teplotě*



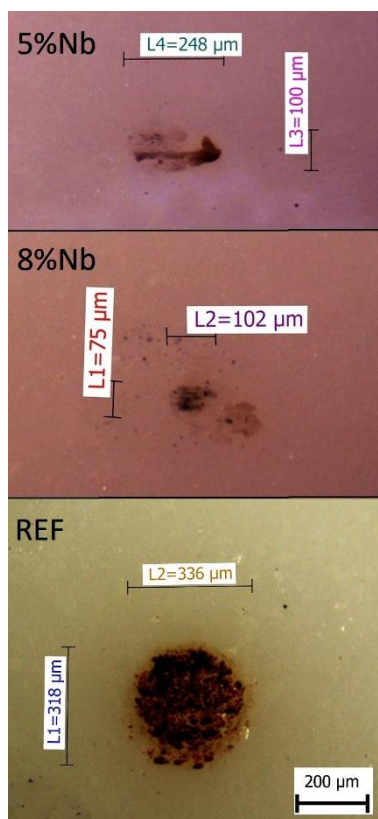
*Obr. 42 Snímek stopy z profilometru povlaku Nb-C:H (22 % Nb) při pokojové teplotě*



*Obr. 43 Snímek stopy z profilometru referenčního vzorku při pokojové teplotě*

Na snímku povlaku Nb-C:H (22 % Nb) jsou vidět nečistoty ve stopě, které mohly zapříčinit nárůst koeficientu tření, viz obr. 32 a zapříčinit tak nestálost jeho průběhu. Zajímavá je také stopa na vzorku substrátu, jejíž průřezy jsou viditelné na Obr. P 3 v příloze této práce. Dle průřezu lze říci, že se vlivem adhezního ulpívání částic stopa pokryla nečistotami vydrženými ze vzorku a zapříčinila tím rozptyl koeficientu tření.

Na laboratorním mikroskopu Olympus SZ61 byly pořízeny fotografie otěru kuličky vždy bezprostředně po testu. Fotografie kuličky pro test povlaku Nb-C:H s 22 % Nb zde není z důvodu nulového opotřebení korundové kuličky. Jak je vidět ze snímku, rozměry opotřebování kuliček odpovídají šířkám stop uvedeným v tabulce 9 s tím rozdílem, že pro povlak Nb-C:H s 22 % Nb k otěru na kuličce vůbec nedošlo. Největší otěr pak nastal na kuličce, která byla použita při testu referenčního vzorku. Otěr má v tomto případě kruhový charakter s rozměry  $L1 = 318 \mu\text{m}$  a  $L2 = 336 \mu\text{m}$ . Průměrná hodnota tohoto otěru je pak  $L = 327 \mu\text{m}$ . Průměrná hodnota šířky stopy z tabulky 9 udává hodnotu  $308 \mu\text{m}$ . Rozdíl mezi těmito hodnotami je pravděpodobně zapříčiněn nepřesným odečtením rozměru opotřebování kuličky ze snímku.



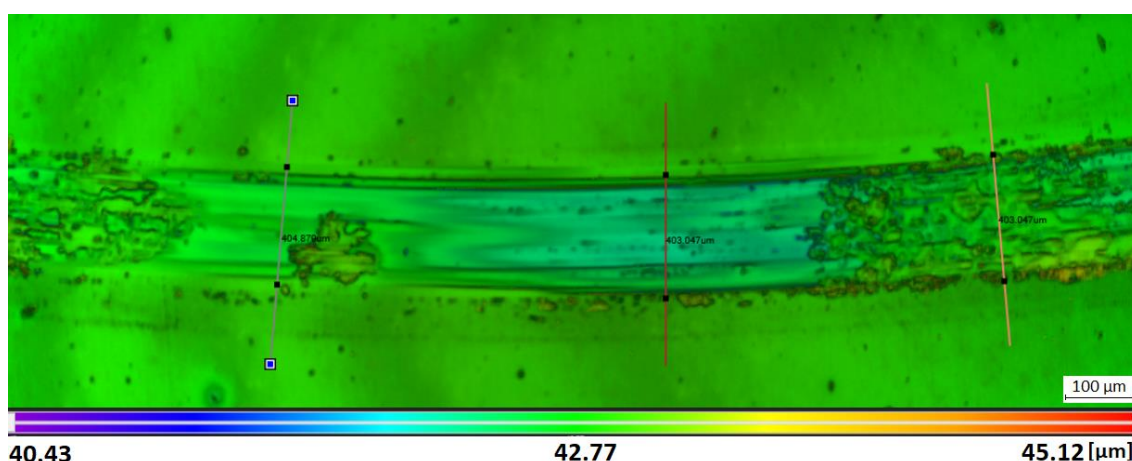
*Obr. 44 Snímek opotřebování kuliček pro Nb-C:H (5 % Nb), Nb-C:H (8 % Nb) a referenční vzorek*

## 9.4 Analýza stopy na disku a opotřebení kuličky při 400 °C

Tribologické měření při 400 °C probíhalo obdobně, jako měření při pokojové teplotě. Referenční vzorek v tomto případě testován nebyl, neboť byla pozornost zaměřena především na tribologické vlastnosti za tepla u DLC povlaků. Průměrné hodnoty šířek stop na jednotlivých DLC povlacích byly vypočteny stejně jako v předchozím případě. Hodnoty jsou v následující tabulce.

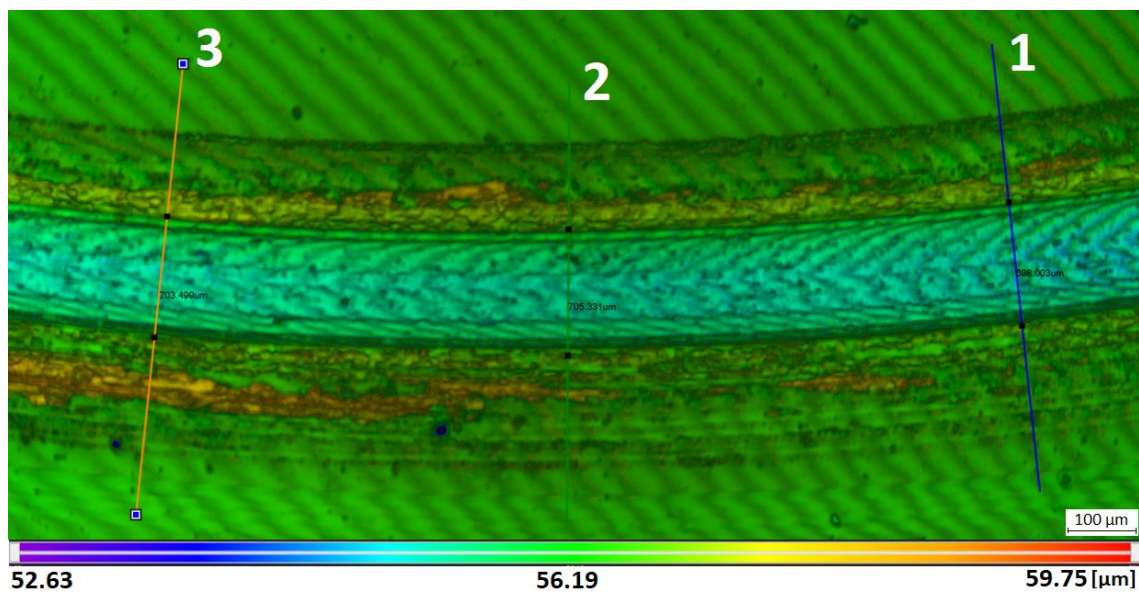
Tab. 10 Šířky stop na jednotlivých vrstvách při 400 °C

vzorek	šířka stopy [ $\mu\text{m}$ ]			průměr
	d1	d2	d3	
5 % Nb	194,20	201,52	201,52	199,08
8 % Nb	192,36	196,03	188,70	192,36
22 % Nb	236,33	256,48	252,82	248,55



Obr. 45 Snímek stopy z profilometru povlaku Nb-C:H (5 % Nb) při 400 °C

Nejmenší průměrnou šířku stopy má v tomto případě povlak s 8 % Nb. Nicméně se od šířky stopy povlaku s 5 % Nb liší pouze o cca 7  $\mu\text{m}$ , což je v rámci přesnosti odměřování šířky relativně zanedbatelná hodnota. Zajímavý je však fakt, že stopa povlaku s 5 % Nb vykazuje značnou nesourodost oproti ostatním vzorkům testovaným při 400 °C, její koeficient tření je však stále nejnižší. V průběhu testu tak mohlo dojít k tvorbě karbidů, které mají ochranný charakter vzhledem k teplotě a mechanickým účinkům. Tato hypotéza by mohla být potvrzena či vyvrácena provedením analýzy EDS či RTG. Dále jsou uvedeny snímky z profilometru stop pro vzorky Nb-C:H s 8 % Nb a Nb-C:H s 22 % Nb.

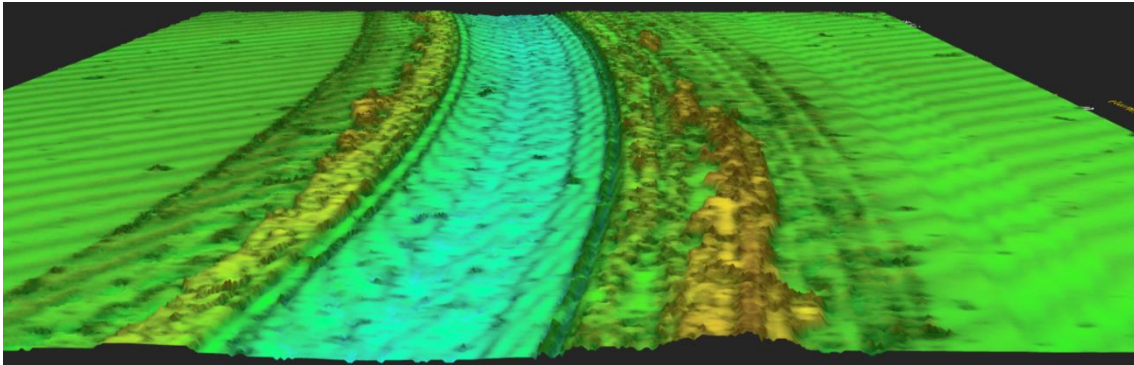


Obr. 46 Snímek stopy z profilometru povlaku Nb-C:H (8 % Nb) při 400 °C



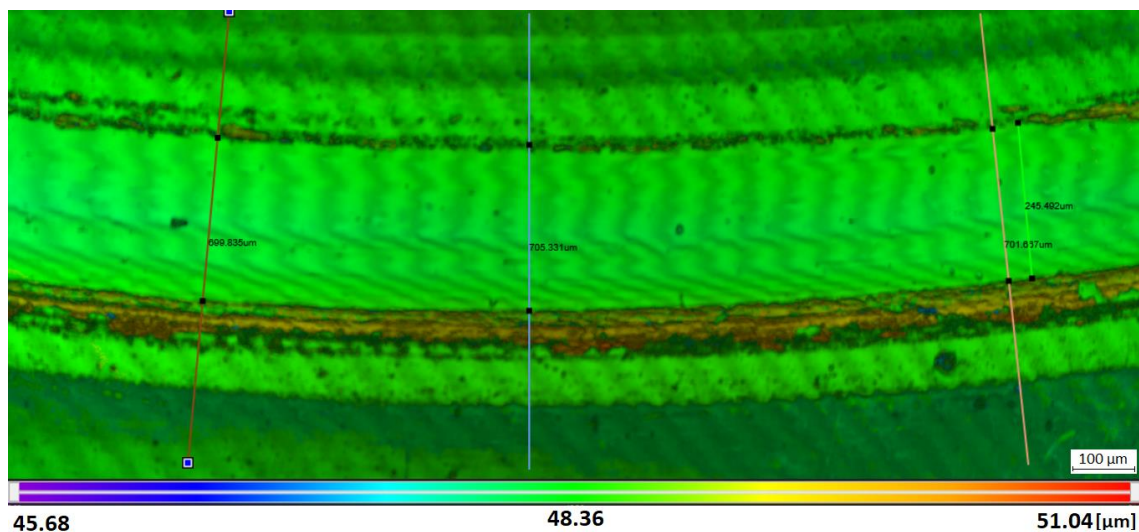
Obr. 47 Profily stop vzorku Nb-C:H (8 % Nb) při pokojové teplotě

Ze snímku stopy povlaku Nb-C:H s 8 % Nb je patrné, že kolem stopy je značné množství adhezně spojených nečistot s povlakem DLC. To však stopu nijak nenarušuje. Na vykreslených profilech stopy je vidět profil kuličky, který v tomto případě zasahuje do hloubky zhruba 1,1  $\mu\text{m}$ . To je v porovnání s celkovou tloušťkou vrstvy povlaku Nb-C:H (8 % Nb), která činí 4,09  $\mu\text{m}$ , zhruba čtvrtinová hodnota. Pro doplnění je níže uveden ilustrační 3D snímek stopy. Další 3D snímky se nacházejí v příloze této práce.



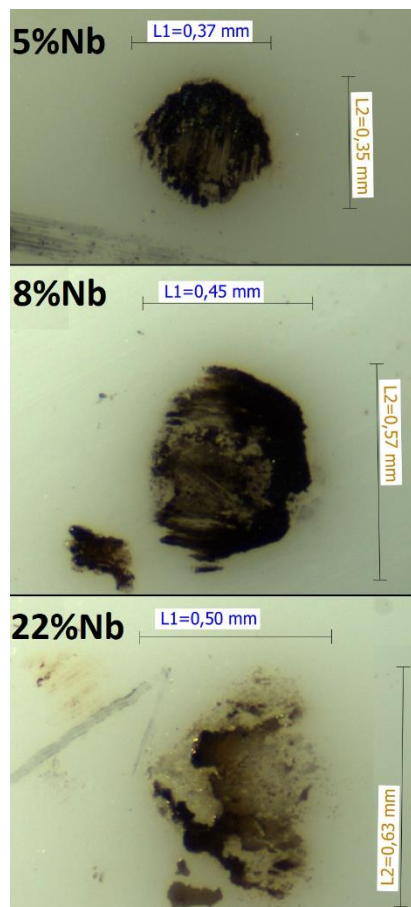
*Obr. 48 Ilustrační 3D snímek stopy na povlaku Nb-C:H (8%Nb) při 400 °C*

Stopa vzorku s 22 % Nb na základě snímku z profilometru neobsahuje větší množství nečistot, a to i navzdory rozptýlenému průběhu koeficientu tření. Na vnější hraně stopy je nicméně vidět drobný nárůstek, který místy zasahuje do samotné stopy. Hloubka opotřebení stopy dle Obr. P 6 z přílohy této práce vykazuje nejmenší hodnotu, a to zhruba 0,3  $\mu\text{m}$ , což znamená, že u tohoto vzorku došlo k nejmenšímu opotřebení DLC vrstvy.



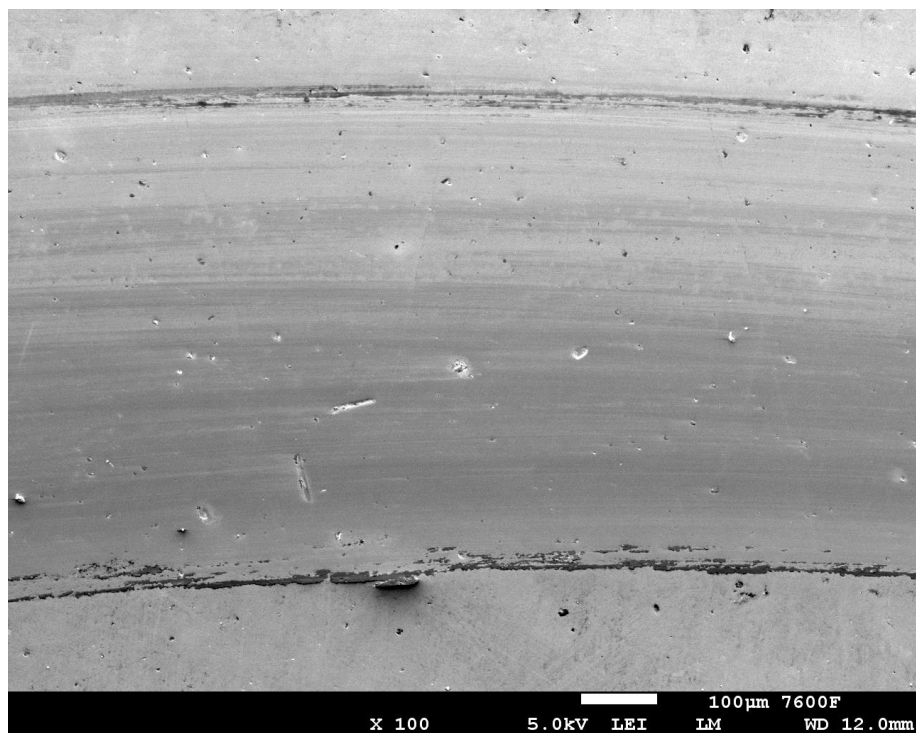
*Obr. 49 Snímek stopy z profilometru povlaku Nb-C:H (22 % Nb) při 400 °C*

Bezprostředně po testu byly opět pořízeny snímky opotřebení na tělísku pin. Opotřebení na korundové kuličce je v tomto případě výrazně větší než při tribologickém měření za pokojové teploty. Rozměry opotřebení na kuličkách se v tomto případě nicméně neshodují s šířkami jednotlivých stop. Pro povlak Nb-C:H s 5 % Nb připadá velikost otěru na kuličce v průměru  $L = 360 \mu\text{m}$ , což je zhruba o  $160 \mu\text{m}$  víc než je šířka stopy na vzorku. U povlaku Nb-C:H s 8 % Nb je rozdíl mezi otěry na disku a na kuličce dokonce  $318 \mu\text{m}$ . Pokud si však všimneme široké oblasti v okolí stopy, je zřejmé, že došlo k otěru kuličky adhezně spojeným prachem s povlakem právě v této oblasti.



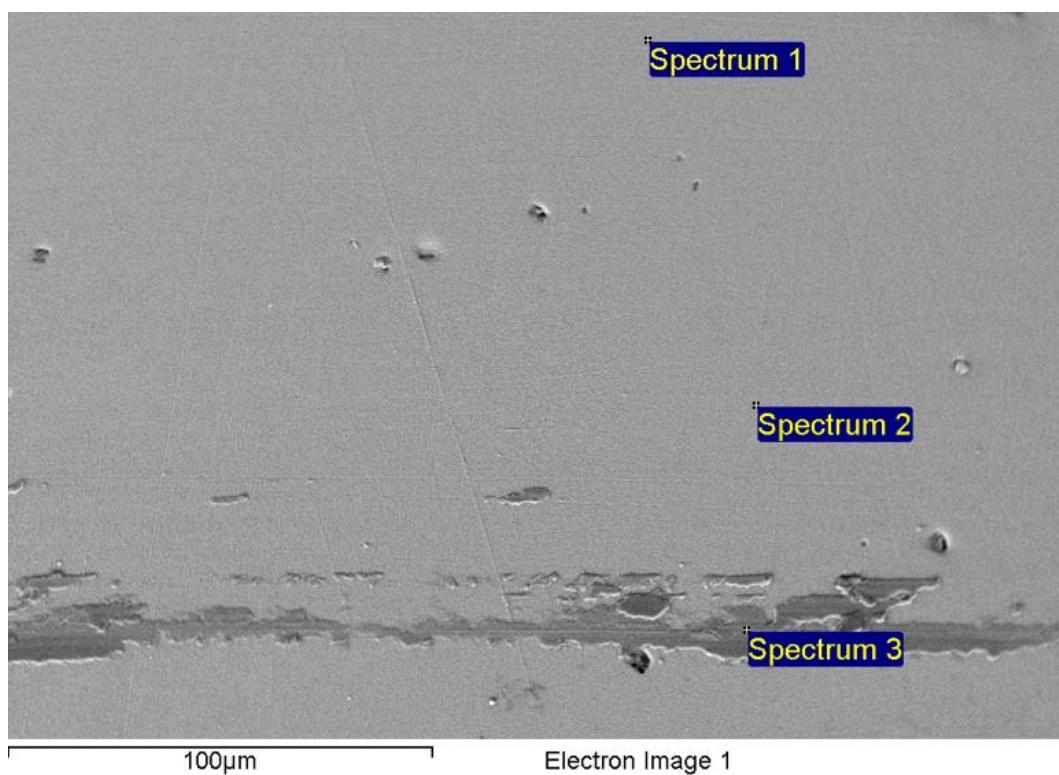
*Obr. 50 Snímek opotřebenosti kuliček pro Nb-C:H (5 % Nb), Nb-C:H (8 % Nb) a Nb-C:H (22 % Nb)*

Díky spolupráci s ústavem materiálového inženýrství na Fakultě strojní ČVUT v Praze byl vzorek Nb-C:H (22 % Nb), který byl testován metodou Pin-on-disk při  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , analyzován metodou EDS na elektronovém mikroskopu. Touto metodou lze zjistit chemické složení v libovolně zvolených bodech na povrchu vzorku a ve stopě.



*Obr. 51 Snímek stopy povlaku Nb-C:H (22 % Nb)\_400°C z elektronového mikroskopu*

Pro elektronově disperzní analýzu byl snímek přiblížen k vnitřnímu kraji stopy, kde se nachází adhezně spojené nečistoty s povrchem vzorku.



*Obr. 52 EDS analýza povlaku Nb-C:H (22 % Nb)\_400°C*



Z EDS analýzy vzorku s povlakem Nb-C:H s 22 % Nb vyšlo v jednotlivých bodech následující chemické složení:

*Tab. 11 Chemické složení v jednotlivých bodech povlaku Nb-C:H (22 % Nb)\_400°C dle EDS analýzy*

Bod	Chemický prvek [%]			
	C	Nb	O	Al
<b>Spectrum 1</b>	73,24	26,76	-	-
<b>Spectrum 2</b>	72,41	27,59	-	-
<b>Spectrum 3</b>	66,40	26,31	7,12	0,17

Nejvíce zastoupený prvek ve všech třech bodech je jednoznačně C, který sám o sobě prakticky tvoří DLC vrstvu. Druhý chemický prvek je Nb, jímž byla DLC vrstva dopována, a který zhruba odpovídá procentuálnímu obsahu Nb-C:H vrstvy před analýzou Pin-on-disk. Rozdíl 4-5% obsahu Nb mezi tímto měřením a složením DLC vrstvy dle tab. 3 může být dán tím, že předchozí hodnoty byly určeny plošnou analýzou EDS. Ze třetího bodu, který se nachází přímo v oblasti nečistoty, si je možné všimnout, že v tomto místě se nachází O a stopové množství Al, což je pravděpodobně nečistota po otření korundové kuličky. Tato metoda nicméně nedokáže rozpoznat vazby mezi jednotlivými prvky, k čemuž by bylo zapotřebí provést např. RTG strukturní analýzu.

## ZÁVĚR

Tribologie je velice rozsáhlá vědní disciplína, která zasahuje do většiny pokročilých technických odvětví a v současném průmyslovém vývoji hraje jednu z klíčových rolí při návrhu strojních součástí. Obecně je ve velmi vyvinutých průmyslech, jako je průmysl letecký a kosmický, kladen důraz především na zvyšování výkonů komponent a snižování ztrát a nákladů, které jsou často důsledkem právě tření a opotřebení. Proto jsou v posledních letech v popředí zájmu moderní funkční materiály, jako jsou povlaky DLC, které pomáhají tyto parametry snižovat. DLC povlaky již v dnešní době tvoří určitou část funkčních povlaků např. v biomedicínském, automobilovém a leteckém průmyslu a jejich další rozvoj lze očekávat. Právě komponenty jako gyroskop, hydraulický a palivový systém anebo některé součásti motoru jsou v letectví vhodnými kandidáty pro využití DLC povlaků.

Cílem této práce bylo ověřit tribologické vlastnosti pomocí metody Pin-on-disk za různých podmínek, především za pokojové a zvýšené teploty. Tato měření proběhla na vzorcích s DLC povlaky dopovanými různým množstvím niobu, které se označují Nb-C:H. K těmto povlakům byl k porovnání vlastností přidán referenční vzorek základního materiálu 1.2379. Dopováním DLC povlaku niobem se stane povlak chemicky aktivní a podporuje tak např. procesy tvorby karbidů, které mohou i v důsledku tepelného zatížení průběh koeficientu tření a velikost opotřebení do značné míry ovlivnit. Z tohoto důvodu proběhla dvě různá měření při pokojové teplotě a při zvýšené teplotě na 400 °C.

Při porovnání průběhů koeficientů tření při pokojové teplotě se ukázalo, že nejlepší a téměř shodné tribologické vlastnosti mají povlaky dopované 5 % a 8 % niobu, jejichž hodnoty vykazují 6x a 5x nižší koeficient tření než koeficient tření samotného referenčního vzorku. Povlak dopovaný 22 % niobu nevykazoval tak značné opotřebení jako předchozí dva vzorky, nicméně jeho koeficient tření byl z DLC povlaků nejméně stálý. Hodnota tohoto koeficientu byla pouze o třetinu menší než hodnota referenčního vzorku a zároveň více jak 4x vyšší než hodnota koeficientu tření povlaku dopovaného 5 % Nb. Menší opotřebení povlaku může být zapříčiněno tvorbou chemických vazeb a vrstvy adhezně spojených nečistot ve stopě. Dopování DLC vrstvy příliš velkým

množstvím tak může znamenat snížení samomazné vlastnosti DLC povlaku a zvýšení koeficientu tření. Předpokladem základního materiálu bylo, že bude vykazovat nejhorší tribologické vlastnosti, což se analýzou potvrdilo.

Při porovnání výsledků měření za zvýšené teploty 400 °C se opět ukázal povlak s 5 % niobu jako nejlepší z hlediska nejnižšího koeficientu tření. Šířka stopy pak zhruba odpovídala šířce stopy povlaku s 8 % niobu, jehož koeficient byl však o třetinu vyšší. Nejvyšší a nejméně stálý koeficient tření vykazoval opět povlak s 22 % niobu, jehož hodnota je takřka dvakrát větší než u povlaku s 5 % niobu. Hloubka stopy povlaku s 22 % niobu byla však nejmenší, což znamená nejnižší opotřebení DLC vrstvy. To je pravděpodobně dáno tvorbou mechanicky odolných nečistot, které se se stopou adhezně spojily a vrstvu chránily. Po bodové chemické analýze EDS se výskyt adhezně spojených nečistot po otěru kuličky ve stopě prokázal. Vliv rozdílného obsahu niobu v tenké DLC vrstvě byl tak jednoznačně prokázán s tím, že z hlediska nejnižšího koeficientu tření je nejlépe vyhovující povlak s 5 % niobu, kde při zvýšení provozní teploty na 400 °C vzrostl koeficient tření 4,3x.

Z výsledků experimentu je zřejmé, že existuje určité optimální množství niobu, kterým je z hlediska třecích vlastností nejlepší dopovat DLC povlak pro zlepšení těchto vlastností. Vzhledem k omezené kapacitě vzorků a rozsahu této práce však nebylo možné provést další měření, které by tuto hypotézu zpřesnilo. Pro další výzkum těchto povlaků by bylo možné porovnat např. hodnoty koeficientů tření a opotřebení během detailnějšího měření v širším rozsahu teplot např. od 25 °C do 600 °C. DLC povlaky by tak mohly získat uplatnění i v aplikacích, které jsou výrazněji tepelně zatížené a předpokládají výborné třecí a otěruvzdorné vlastnosti.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HELEBRANDT, F., ZIEGLER, J., MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost I. Tribodiagnostika*. 2000. Ostrava. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
- [2] BEČKA, J. *Tribologie*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997. 212s. ISBN 80-01-01621-8.
- [3] BLAŠKOVIČ, P., BALLA, J. a OZIMKO, M. *Tribológia*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990. 362s. ISBN 80-05-00 633-0.
- [4] STACHOWIAK, G., BATCHELOR, A. *Engineering tribology – fourth edition*. UK: Oxford, 2014, 883 s. ISBN 978-0-12-397047-3
- [5] MANG, T., BOBZIN, K., BARTELS, T. *Industrial Tribology*. Germany, WILEY-VCH, Verlag & Co. KGaA, 644 s. ISBN 978-3-527-32057-8
- [6] ARNELL R., DAVIES P., HALLING J., WHOMES T., *Tribology – Principles and Design Applications*. London: Macmillan. 1991. ISBN 978-1-4684-8976-7
- [7] DETERS, L. *Springer Handbook of Mechanical Engineering, Part B, Tribology*. 1. vyd. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009, str. 295 - 326, ISBN 978-3-540-49131-6
- [8] SUCHÁNEK, J. Adhezivní opotřebení. *TriboTechnika* [online]. Bratislava: Techpark, o.z., 02/2010. [cit. 28.04.2019]. ISSN 1338-0524. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22010/adhezivni-opotrebeni.html>
- [9] Oerlikon Balzers. *Wear & Tribology, Tribological effects under the microscope*. [Online]. [cit. 28.04.2019]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/balzers/cz/cs/portfolio/surface-technologies/wear-tribology/>
- [10] ŠTĚPINA, V., VESELÝ, V. *Maziva v tribologii*. 1.vyd. Bratislava: VEDA, 1985. 406 s., ISBN 71-059-85.

- [11] POŠTA, J., VESELÝ, P., DVOŘÁK, M. *Degradace strojních součástí*. [online]. [cit. 29.4.2019]. Dostupné z: <http://degradace.tf.czu.cz/>
- [12] SUCHÁNEK, J. Erozivní opotřebenění a volba kovových materiálů v praxi - 1. část. *TriboTechnika* [online]. Bratislava: Techpark, o.z., 03/2010. [cit. 30.04.2019]. ISSN 1338-0524. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32010/erozivni-opotrebeni-a-volba-kovovych-materialu-v-praxi-1cast.html>
- [13] KENNEDY, F. *Frictional Heating and Contact Temperatures*. Modern Tribology Handbook, Two Volume Set. USA: CRC Press. 2000. 38 s. ISBN: 9780849384035
- [14] INSINNA, V. *United Technologies faces narrow chances of ousting incumbent F-35 ejection seat maker*. Defence News. [online]. 04.2017. [cit. 04.05.2019]. Dostupné z: <https://www.defensenews.com/air/2017/04/17/united-technologies-faces-narrow-chances-of-ousting-incumbent-f-35-ejection-seat-maker/>
- [15] HARDELL, J. *High Temperature Tribology of High Strength Boron Steel and Tool Steels*. [online]. Luleå University of Technology, Sweden. 04.2007. [cit. 08.05.2019]. ISSN: 1402-1757. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991675/FULLTEXT01.pdf>
- [16] SHAFFER, SJ. *Tribology 101 - Introduction to the Basics of Tribology*. [online]. Bruker. 2013. [cit. 11.05.2019]. Dostupné z: [https://www.bruker.com/fileadmin/user\\_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/TMT/Webinars/Tribology\\_101\\_Webinar-1\\_Intro\\_and\\_Basics\\_29-Jan-2013.pdf](https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/TMT/Webinars/Tribology_101_Webinar-1_Intro_and_Basics_29-Jan-2013.pdf)
- [17] BLAU J., *ASM Handbook, Volume 18: Friction, Lubrication and Wear Technology*. ASM International. 2017. 1108 str., ISBN: 978-1-62708-141-2
- [18] LINCE J., *Coatings for Aerospace Applications*. [online]. The Aerospace Corporation. San Diego, CA. 04.2017. [cit. 18.05.2019]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/317006113\\_Coatings\\_for\\_Aerospace\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/317006113_Coatings_for_Aerospace_Applications)

- [19] SUCHÁNEK, J. Abrazivní opotřebení kovových materiálů. *TriboTechnika* [online]. Bratislava: Techpark, o.z., 12/2010. [cit. 29.04.2019]. ISSN 1338-0524. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html>
- [20] GUTIÉRREZ, J. *Tribometer Set-up and Friction Coefficient in Elastomers of Sealing Systems*. [online]. Master of Science Thesis, Politecnico di Torino. 12/2014. [cit. 20.05.2019]. Dostupné z: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/16508/CortesGutierrezJairoAlejandro2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [21] PENG, B., NIE, X., CHEN, Y. *Effects of Surface Coating Preparations and Sliding Modes on Titanium OXIDE Coated Titanium Alloy for Aerospace Applications*. [online]. International Journal of Aerospace Engineering - vol. 2014, Article ID 640364. [cit. 30.06.2019]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/ijae/2014/640364/>
- [22] KŘÍŽ, A. *Tribologická analýza Pin-on-Disc*. Metal 2004. [online]. ZČU v Plzni.[cit. 30.06.2019]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/TRIBOLOGICKA\\_ANALYZA\\_PIN-ON-DISC.pdf](https://www.opi.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf)
- [23] HÁJEK, J., KŘÍŽ, A. *Tribologická analýza "PIN-on-DISC"*. Metal 2005. [online]. ZČU v Plzni. [cit. 01.07.2019]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2005/sbornik/papers/70.pdf>
- [24] REDHILL PRECISION. *Kuličky z Oxidu Hlinitého Al2O3 99,5% Korund*. [online]. [cit. 01.07.2019]. Dostupné z: <https://www.redhill-balls.eu/cz/produkty/kulicky-z-oxidu-hliniku-al203-korund>
- [25] SubsTech. *Lubrication regimes*. [online]. [cit. 05.07.2019]. Dostupné z: [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=lubrication\\_regimes](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=lubrication_regimes)

- [26] KOUTSOMICHALLS, A., *Tribological Coatings for Aerospace Applications and the Case of WC-Co Plasma Spray Coatings*. [online]. Tribology in Industry. 2009. [cit. 19.05.2019]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/239097087>
- [27] CUNNINGHAM, T. *Energy education - braking*. [online]. 05.2018. [cit. 08.05.2019]. Dostupné z: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Braking>
- [28] PADTURE, N., GELL, M., JORDAN, E. *Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications*. [online]. Science's compass review - vol. 296. 2002. [cit. 19.05.2019]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/11416002>
- [29] JECH, V. *Vlastnosti tenkých DLC vrstev*. [online]. Praha, 2009. [cit. 13.07.2019]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/JechVladimir-307381.pdf>
- [30] HEF Durferrit USA. *DLC Coatings*. [online]. Springfield. Dostupné z: [https://www.hefusa.net/pvd\\_coating/DLC-coatings.html](https://www.hefusa.net/pvd_coating/DLC-coatings.html)
- [31] Rtec Instruments. *Tribometer MFT-5000 Overview*. [online]. USA. Dostupné z: <https://rtec-instruments.com/universal-tribometer.html>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma tribologického systému [5].....	10
Obr. 2 Vyobrazení mazání ve starém Egyptě [16] .....	11
Obr. 3 Schéma rozsahu oboru tribologie [1] .....	15
Obr. 4 Schéma sil při tření [5] .....	16
Obr. 5 Schéma Break - Away Force [20] .....	19
Obr. 6 Modelový systém Stick-Slip [5] .....	20
Obr. 7 Základní druhy opotřebení [1] .....	21
Obr. 8 Adhezivní opotřebení - ojnicí pánev a schéma [9, 11] .....	22
Obr. 9 Abrasivní opotřebení - píst spalovacího motoru a schéma [9, 11].....	23
Obr. 10 Erozivní opotřebení - kulový ventil uzávěru [11].....	24
Obr. 11 Únavové opotřebení - kroužek ložiska, zuby ozubeného kola [11].....	25
Obr. 12 Zátěžový test brzdového kotouče [27] .....	27
Obr. 13 Raketové saně - Testování katapultovacího systému F-35A [14].....	28
Obr. 14 Diagram závislosti koeficientu tření na teplotě pro Kobalt, rychlost smyku 1,98 m/s [17].....	29
Obr. 15 Rozdílné typy tribochemicky vzniklých vrstev [15].....	30
Obr. 16 Schéma proudového motoru - použití materiálů při konstrukci vnitřních komponent [18] .....	31
Obr. 17 Průřez lopatky s žáruvzdorným povlakem [28] .....	33
Obr. 18 Schéma proudového motoru - znázornění provozních vůlí [18] .....	34
Obr. 19 Struktura DLC vrstvy [30] .....	35
Obr. 20 Příklady využití DLC vrstev v leteckých aplikacích [30] .....	35
Obr. 21 Schéma metody Pin on Disk [21] .....	37
Obr. 22 Tělísko „Pin“ ve formě kuličky z <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> a oceli (ČSN 14 109) [24] .....	38
Obr. 23 Schéma analýzy „Pin on Disk“ [22] .....	38



Obr. 24 Vliv drsnosti povrchu na koeficient tření [22] .....	39
Obr. 25 Teplotní odolnost běžně používaných tenkých otěruvzdorných vrstev [22] ....	41
Obr. 26 Stribeckova křivka [25].....	41
Obr. 27 Tribometr Rtec MFT-5000 [31] .....	43
Obr. 28 Vzorky pro analýzu Pin-on-Disk .....	46
Obr. 29 Přípravek pro uchycení vzorku při pokojové teplotě.....	47
Obr. 30 Přípravek pro uchycení vzorku v peci .....	47
Obr. 31 Průběhy koeficientu tření při pokojové teplotě bez vyfiltrování .....	50
Obr. 32 Průběhy koeficientu tření při pokojové teplotě .....	51
Obr. 33 Průběhy koeficientu tření pro obě sady vzorků .....	52
Obr. 34 Modul tribometru pro analýzu Pin-on-disk .....	53
Obr. 35 Průběhy koeficientu tření při 400 °C bez vyfiltrování.....	53
Obr. 36 Průběhy koeficientu tření při 400 °C .....	54
Obr. 37 Porovnání průběhů koeficientu tření při pokojové teplotě a při 400 °C.....	54
Obr. 38 Zahřátá pec během analýzy Pin-on-disk za teploty 400 °C.....	55
Obr. 39 Snímek stopy z profilometru povlaku Nb-C:H (5 % Nb) při pokojové teplotě...	56
Obr. 40 Profily stop vzorku Nb-C:H (5 % Nb) při pokojové teplotě .....	57
Obr. 41 Snímek stopy z profilometru povlaku Nb-C:H (8 % Nb) při pokojové teplotě...	58
Obr. 42 Snímek stopy z profilometru povlaku Nb-C:H (22 % Nb) při pokojové teplotě.	58
Obr. 43 Snímek stopy z profilometru referenčního vzorku při pokojové teplotě .....	58
Obr. 44 Snímek opotřebování kuliček pro Nb-C:H (5 % Nb), Nb-C:H (8 % Nb) a referenční vzorek .....	59
Obr. 45 Snímek stopy z profilometru povlaku Nb-C:H (5 % Nb) při 400 °C.....	60
Obr. 46 Snímek stopy z profilometru povlaku Nb-C:H (8 % Nb) při 400 °C.....	61
Obr. 47 Profily stop vzorku Nb-C:H (8 % Nb) při pokojové teplotě .....	61
Obr. 48 Ilustrační 3D snímek stopy na povlaku Nb-C:H (8%Nb) při 400 °C .....	62

Obr. 49 Snímek stopy z profilometru povlaku Nb-C:H (22 % Nb) při 400 °C.....	62
Obr. 50 Snímek opotřebování kuliček pro Nb-C:H (5 % Nb), Nb-C:H (8 % Nb) a Nb-C:H (22 % Nb).....	63
Obr. 51 Snímek stopy povlaku Nb-C:H (22 % Nb)_400°C z elektronového mikroskopu	64
Obr. 52 EDS analýza povlaku Nb-C:H (22 % Nb)_400°C.....	64

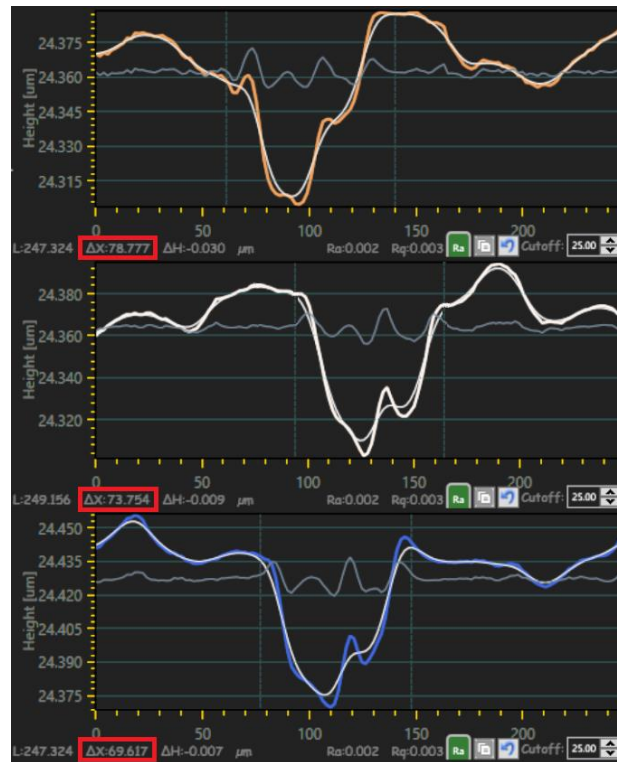
## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozsahy koeficientů tření pro různé typy tření a mazání [7].....	18
Tab. 2 Chemické složení substrátu - ocel 1.2379.....	45
Tab. 3 Procentuální obsah % Nb v DLC vrstvě dle EDS analýzy .....	45
Tab. 4 Tloušťky vrstev Nb-C:H a TiNb .....	46
Tab. 5 Tabulka vstupních parametrů testu Pin-on-disk při standardní pokojové teplotě .....	48
Tab. 6 Tabulka vstupních parametrů testu Pin-on-disk při 400 °C.....	49
Tab. 7 Průměrné hodnoty koeficientů tření při analýze při pokojové teplotě.....	52
Tab. 8 Průměrné hodnoty koeficientů tření při analýze při 400 °C.....	55
Tab. 9 Šířky stop na jednotlivých vrstvách při pokojové teplotě.....	56
Tab. 10 Šířky stop na jednotlivých vrstvách při 400 °C.....	60
Tab. 11 Chemické složení v jednotlivých bodech povlaku Nb-C:H (22 % Nb)_400°C dle EDS analýzy .....	65

## SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Bcc	.....	Body-centered cubic (kubická prostorově centrovaná mřížka)
Fcc	.....	Face-centered cubic (kubická plošně centrovaná mřížka)
Hcp	.....	Hexagonal closed packet (hexagonální krystalová mřížka)
RPM	.....	Revolutions per minute (otáčky za minutu)
DLC	.....	Diamond Like Carbon (diamantu podobný uhlík)
TBC	.....	Thermal barrier coating (žáruvzdorný povlak)
TGO	.....	Thermally grown oxide (oxidická vrstva)
EDS	.....	elektronově disperzní spektrometr
$FeO$	.....	Oxid železnatý
$Fe_2O_3$	.....	Oxid železitý
$Fe_3O_4$	.....	Oxid železnato-železitý
$Al_2O_3$	.....	Oxid hlinitý
$ZrO_2$	.....	Oxid zirkoničitý
$Y_2O_3$	.....	Oxid yttrititý
$C_2H_2$	.....	Acetylén
$\mu$	.....	Koeficient tření [-]
$\mu_0$	.....	Statický koeficient tření [-]
$F_n$	.....	Normálové zatížení [N]
$F_t$	.....	Třecí síla [N]
$F$	.....	Normálová síla [N]
$v$	.....	Obvodová rychlost [cm/s]
Sccm	.....	kubický centimetr za sekundu
Ra	.....	Drsnost povrchu [ $\mu\text{m}$ ]

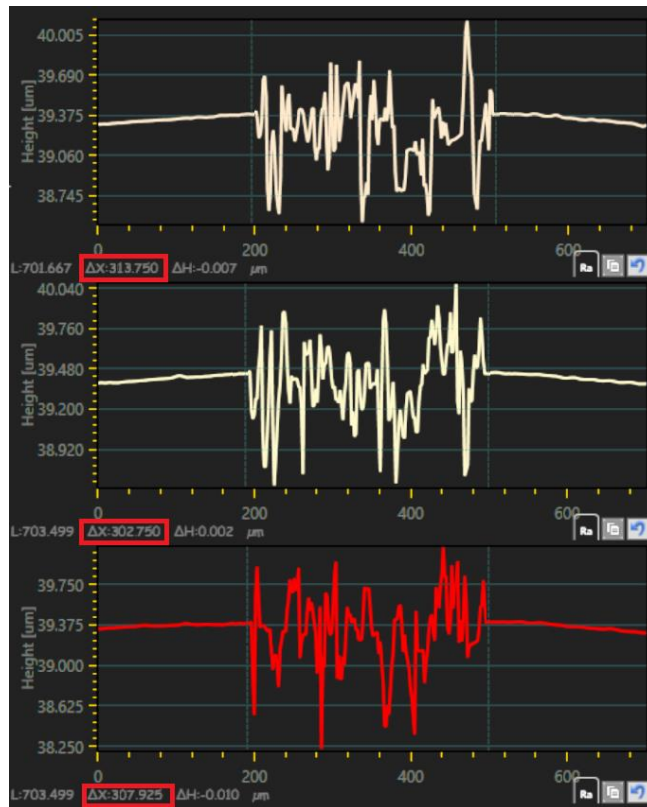
# PŘÍLOHY



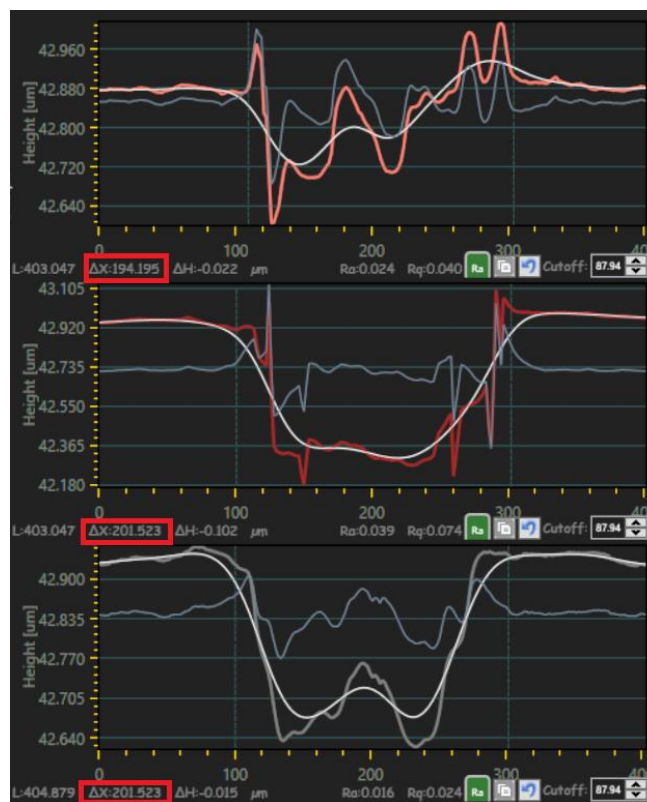
Obr. P 1 Profily stop vzorku Nb-C:H (8 % Nb) při pokojové teplotě



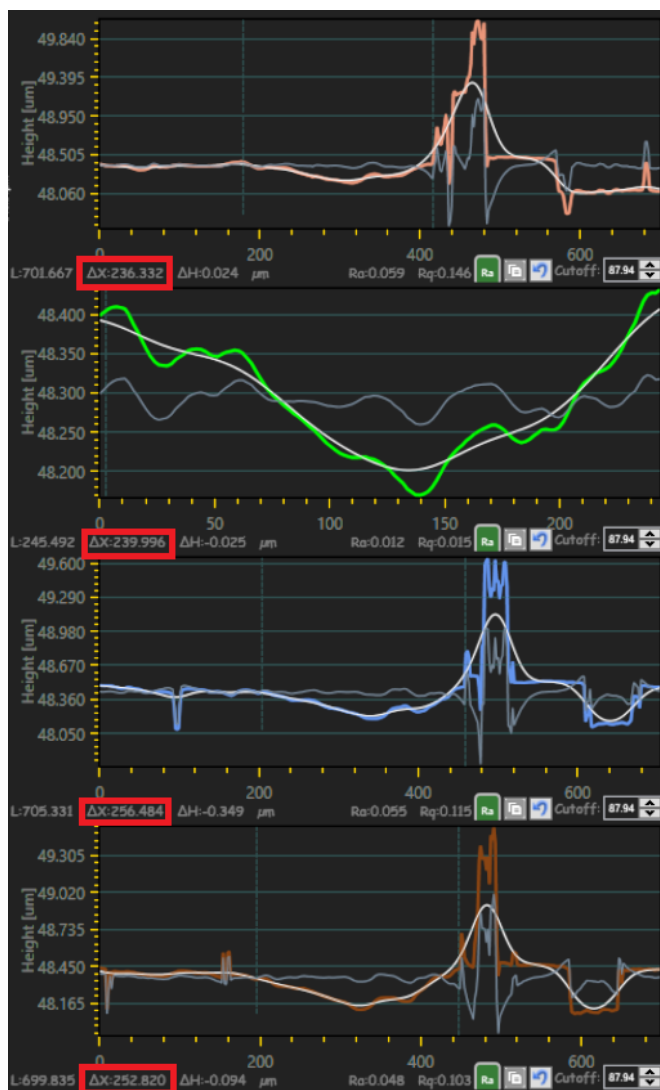
Obr. P 2 Profily stop vzorku Nb-C:H (22 % Nb) při pokojové teplotě



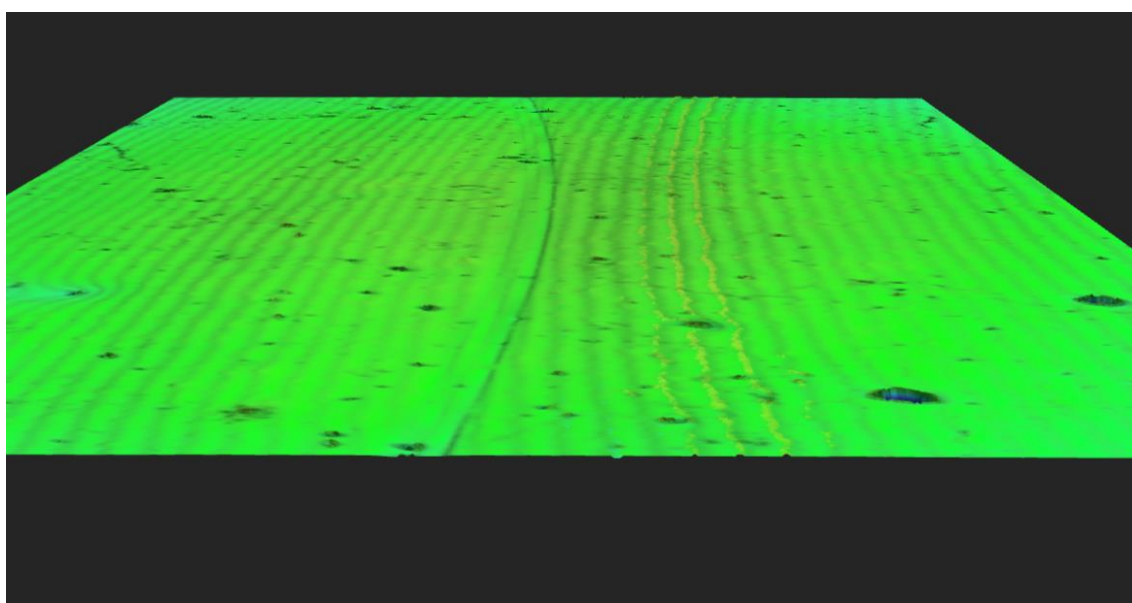
Obr. P 3 Profily stop referenčního vzorku při pokojové teplotě



Obr. P 4 Profily stop vzorku Nb-C:H (5 % Nb) při 400 °C

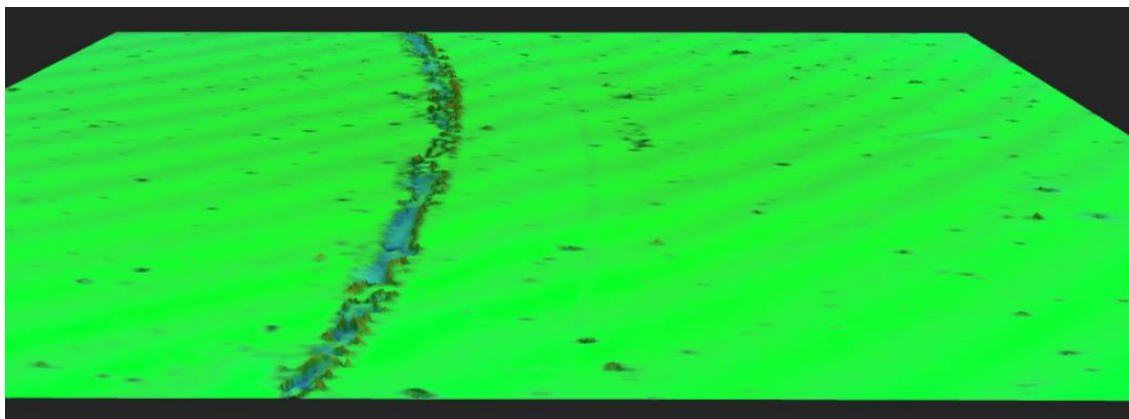


Obr. P 5 Profily stop vzorku Nb-C:H (22 % Nb) při 400 °C

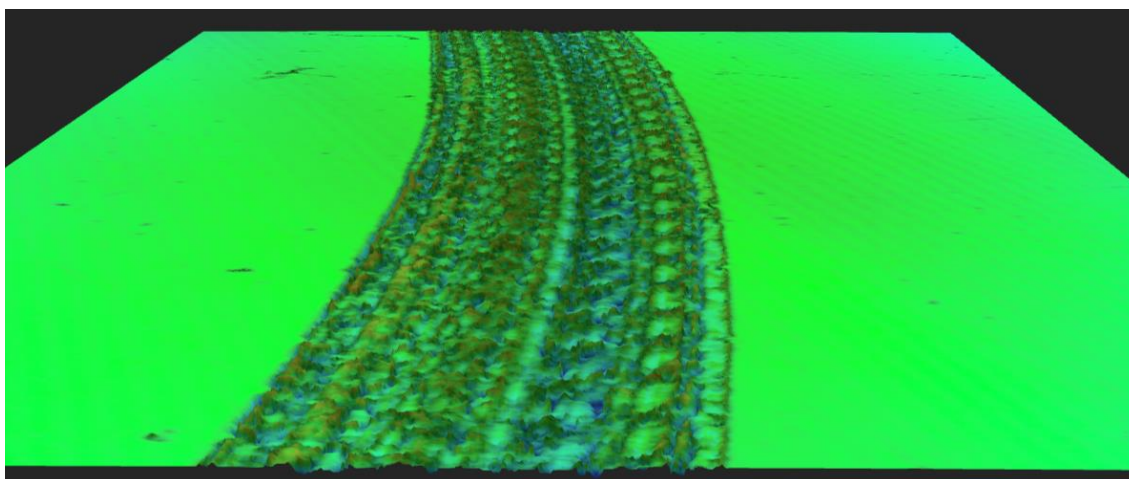


Obr. P 6 Ilustrační 3D snímek stopy na povlaku Nb-C:H (5%Nb) při pokojové teplotě

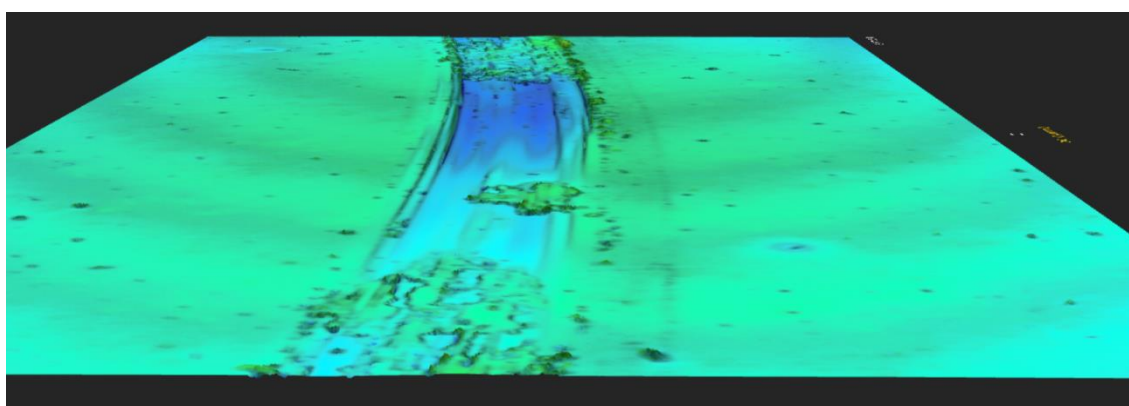
3D snímek stopy povlaku Nb-C:H s 8 % Nb bohužel není k dispozici.



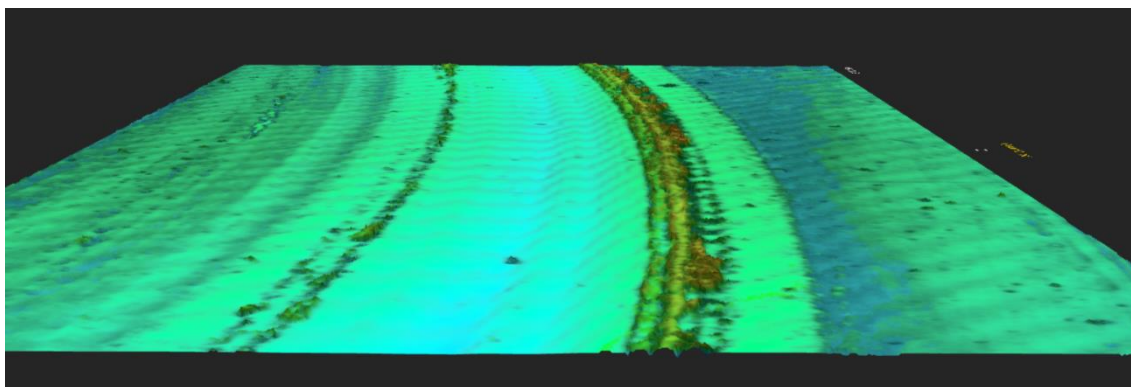
*Obr. P 7 Ilustrační 3D snímek stopy na povlaku Nb-C:H (22%Nb) při pokojové teplotě*



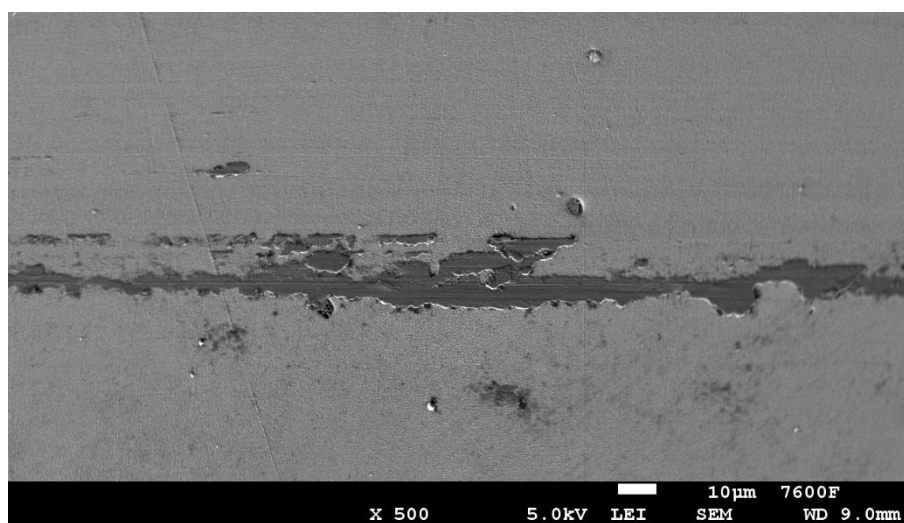
*Obr. P 8 Ilustrační 3D snímek stopy na referenčním vzorku při pokojové teplotě*



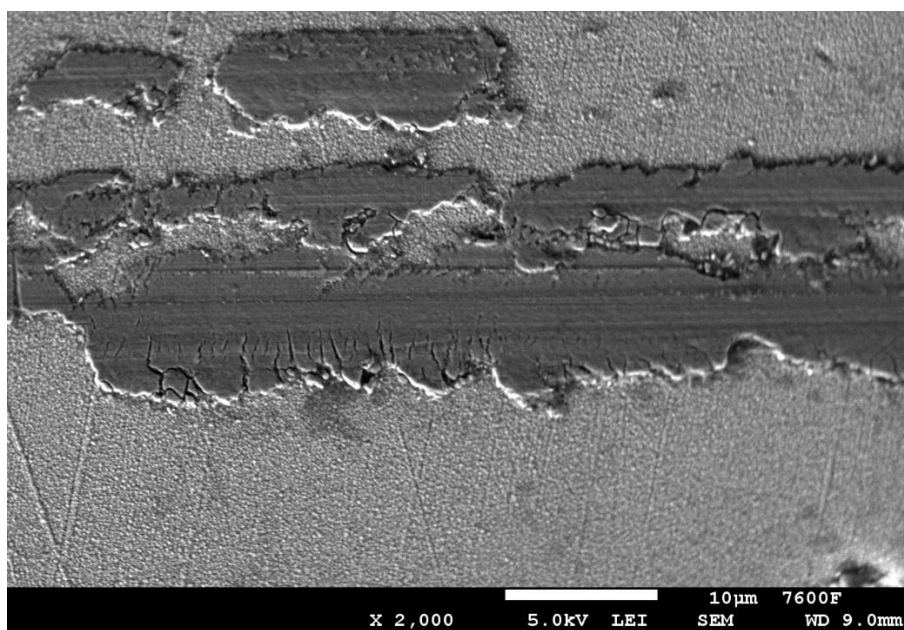
*Obr. P 9 Ilustrační 3D snímek stopy na povlaku Nb-C:H (5%Nb) při 400 °C*



*Obr. P 10 Ilustrační 3D snímek stopy na povlaku Nb-C:H (22%Nb) při 400 °C*



*Obr. P 11 Snímek stopy povlaku Nb-C:H (22 % Nb)\_400°C z elektronového mikroskopu*



*Obr. P 22 Detail nečistoty ve stopě povlaku Nb-C:H (22 % Nb)\_400°C z elektronového mikroskopu*