



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

TESTOVÁNÍ KLUZNÝCH POVLAKŮ PRO VESMÍRNÉ APLIKACE

TESTING OF SLIDING COATINGS FOR SPACE APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Velička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Jan Velička**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. David Košťál, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Testování kluzných povlaků pro vesmírné aplikace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Komponenty mechanismů používaných na satelitech či při vědeckých misích musí splňovat náročné požadavky na nízké tření a dlouhou trvanlivost. Téměř ve všech případech je nezbytné před misí otestovat všechny navržené komponenty a řešení v relevantních podmínkách. Na ústavu konstruování je k dispozici vakuový tribometr, který podmínky dokáže zajistit a testování tak umožnit.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Návrh a realizace testování konkrétních maziv a povrchů ve vakuovém prostředí.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše používaných typů maziv a materiálů komponent mechanismů,
- návrh průběhu experimentu a podmínek,
- realizace testování,
- vyhodnocení dat a volba nejlepších parametrů kluzných vrstev pro konkrétní aplikaci.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

ZARETSKY, E. V. Liquid lubrication in space. Tribology International [online]. 1990, 75-93.

JONES, W. R. a M. J. JANSEN. Tribology for space applications. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2008, 222(8), 997-1004. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1243/13506501JET305.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá kluznými povlaky pro použití ve vesmírných aplikacích. V experimentální části byl zkoumán počet cyklů do opotřebení pro povlak na bázi disulfidu molybdenu. Tento povlak byl nanesený na substrátu z beryliové mědi CuBe. Povlak byl testován za účelem jeho možného použití u závitů šroubů. U všech vzorků proběhlo měření koeficientu tření na tribometru v prostředí atmosféry. Vzorky byly během měření zatíženy normálovou silou 35 N. Počet cyklů do opotřebení byl porovnán u vzorků, lišících se dobou nanášení povlaku. Ukázalo se, že pro nižší dobu nanášení je počet cyklů podobný. Poté začal počet cyklů do opotřebení růst s dobou nanášení povlaku. Ze získaných poznatků lze říct, že zvýšení doby nanášení povlaku prodlužuje jeho životnost. Takovýto povlak je vhodný pro ochranu šroubů před jejich zadřením.

KLÍČOVÁ SLOVA

vesmírná tribologie, opotřebení povlaku, disulfid molybdenu, zadření závitu

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with sliding coatings for use in space applications. In the experimental part, the number of cycles to wear for a molybdenum disulfide based coating was investigated. This coating was deposited on a beryllium copper CuBe substrate. The coating was tested for its possible application to bolt threads. The coefficient of friction of all samples was measured on a tribometer in an atmospheric environment. The specimens were loaded with a normal force of 35 N during the measurement. The number of cycles to wear was compared for specimens differing in coating time. The number of cycles was found to be similar for lower coating times. Then the number of cycles to wear started to increase with the coating time. From the findings, it can be said that increasing the coating time increases the coating life. Such a coating is suitable for the protection of bolts against galling.

KEYWORDS

space tribology, coating wear, molybdenum disulfide, bolt seizure

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VELIČKA, Jan. *Testování kluzných povlaků pro vesmírné aplikace* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157400>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Košťál.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat za rady a veškerý čas při vypracování této práce svému vedoucímu Ing. Davidu Košťálovi, Ph.D. Dále bych také rád poděkoval Ing. Josefu Frýzovi, Ph.D. za pomoc při seznámení s fungováním tribometru a Bc. Davidu Homolovi za poskytnutí vzorků k měření.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Košťála, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1	Vesmírná tribologie	15
2.2	Používaná maziva na kapalné bázi	16
2.2.1	Perfluoropolyethery	16
2.2.2	Uhlovodíky	17
2.2.3	Ostatní skupiny kapalných maziv	18
2.3	Používaná maziva na pevné bázi	18
2.3.1	Měkké kovy	19
2.3.2	Polymery	20
2.3.3	Lamelární pevné látky	21
2.3.4	DLC povlaky	23
2.4	Způsoby nanášení povlaků	24
2.5	Materiály komponent	27
2.5.1	Hliníkové slitiny	28
2.5.2	Titanové slitiny	29
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	30
4	MATERIÁL A METODY	31
4.1	Experimentální zařízení a software	31
4.2	Použité materiály a podmínky nanášení povlaků	32
4.3	Fyzikální podmínky experimentu	33
4.4	Postup měření	34
4.5	Způsob vyhodnocování výsledků	35
5	VÝSLEDKY	37
5.1	Koeficient tření	37
5.2	Počet cyklů do opotřebení	42
5.3	Porovnání tlaku při experimentu s tlakem u šroubu	43
6	DISKUZE	45
7	ZÁVĚR	47

8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	48
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	53
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	54
11	SEZNAM TABULEK	55

1 ÚVOD

V dobách ranného vesmírného programu byla délka misí řádově v rámci minut. Postupem času se však zvýšil nárok na délku misí a dnes tak požadovaná životnost vesmírných sond většinou překračuje desítky let. Na začátku vesmírného věku jako první selhávala elektronika, baterie a počítače. Mazané mechanismy nepatřily mezi hlavní problémy. V 80. a 90. letech se však tyto komponenty zlepšili natolik, že hlavním důvodem ke snížení spolehlivosti a výkonu vesmírných sond se staly nevyhovující tribologické systémy. S požadavkem na prodlužování životnosti sondy jako celku přichází také požadavek na prodlužování životnosti jednotlivých komponent, které musí být správně mazány, aby nedocházelo k jejich selhání.

Byť tribologické systémy tvoří jen malou část nákladů při vysílání sond do vesmíru, i jednobodové selhání způsobené špatným nebo nedostatečným mazáním komponenty může způsobit zničení celého stroje. Nákladné mise jsou tak neúspěšné. Z těchto důvodů má tribologie ve vesmírné technologii důležitou roli.

Jedním z problémů, který nastává u strojů pro vesmírné aplikace je zadření šroubů při jejich utahování. Tento problém nenastává nutně jen u strojů určených do kosmu, ale je typický pro titanové šrouby, které se v těchto strojích kvůli své nižší hmotnosti používají. Kvůli zadření se může při utahování i kontrole jevit šroub jako dotažený na stanovený moment, ve skutečnosti však takto dotažený není a ve šroubu není požadované předpětí. Kvůli tohoto adhezního opotřebení můžou být části stroje špatně přišroubovány, což je problém například u přetlakovaných komor, a dojde k celkové poruše. Celá finančně nákladná mise selhává. Je nezbytné na titanové šrouby nanést vhodný povlak s nízkým třením, který vydrží několik cyklů bez opotřebení.

Tato bakalářská práce se zabývá specifiky mazání komponent pro použití v kosmickém prostoru. Dále materiály, které lze použít jako kapalná a pevná maziva a jejich způsobem nanášení na substrát. Cílem této práce je otestovat opotřebení vícero povlaků, které byly nanášeny po různou dobu, a určit, jaká doba je nejvhodnější. Zároveň ukázat, jak se koeficient tření těchto povlaků s počtem cyklů mění. Vzorky budou testovány v prostředí atmosféry, protože tribometr s vakuovým prostředím není v době psaní této bakalářské práce dostupný. Očekávaným výsledkem je, že pro vyšší dobu nanášení bude počet cyklů do opotřebení vyšší, ovšem od jistého bodu by se tento trend měl zastavit nebo dokonce otočit.

Téma strojů a mechanismů používaných ve vesmíru je zajímavé z důvodu odlišnosti podmínek a přístupů od těch nám známých z běžného života. Zároveň se jedná o téma, které posouvá lidstvo vpřed. Je běžné, že materiály a poznatky dříve vyzkoumané pro kosmické odvětví jsou dnes používané v pozemských podmínkách. Obor tribologie je důležitou součástí mnoha oborů nejen pro zvyšování životnosti součástí, ale také pro snižování

energetické spotřeby a to se dnes ukazuje jako velmi důležité téma. Zvolené téma bakalářské práce dává tato dvě odvětví do souvislosti, což je důvod, proč jsem si jej zvolil. Ať už se výsledek výzkumu ukáže pro zmíněnou aplikaci vhodný nebo nikoliv, je dobré se touto problematikou zabývat, a i dílčí výsledky mohou být pro budoucí práce přínosné.

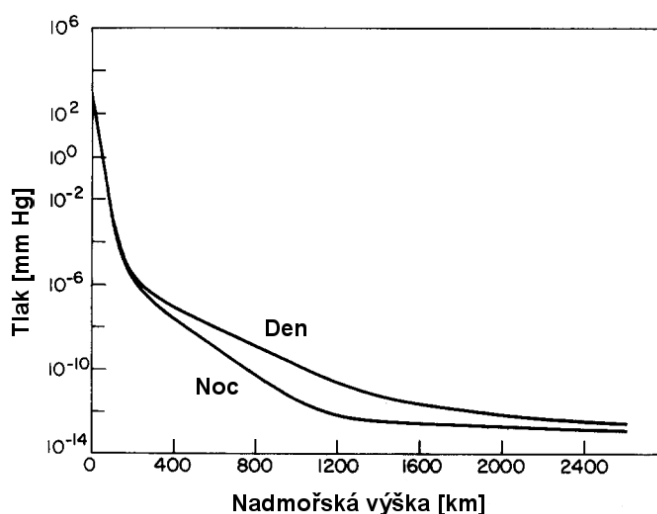
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Vesmírná tribologie

Tribologie je termín používaný pro vědu o tření, opotřebení a mazání v pohyblivých kontaktech. Hlavní cíle tribologie jsou snížení tření a opotřebení. Důvodem je mimo jiné úspora energie, požadavky pro přesnější a plynulejší pohyby a snížení údržby. Zatímco třením a opotřebením se vědci zabývali již několik staletí, termín tribologie byl formálně použit až v roce 1966 britským strojním inženýrem Peterem Jostem. Ten ve své zprávě došel k závěru, že při plném využití vylepšených postupů mazání lze dosáhnout obrovských úspor. Dnes se tribologie objevuje v mnoha strojních odvětvích, od obrábění materiálů přes výrobu energie až po automobilní, letecký a kosmický průmysl. [1]

Vesmírné technologie hrají důležitou roli v budoucnosti lidstva a správné mazání komponent je nezbytné pro spolehlivost a dlouhou životnost kosmických systémů [2]. Potřeba věnovat se tribologii v kosmickém průmyslu výrazně vzrostla během 80. a 90. let minulého století, kdy došlo ke značnému zlepšení životnosti pomocných komponent jako jsou baterie, počítače a další elektronika. Spolehlivost zařízení vysílaných do vesmíru přestaly omezovat tyto komponenty, místo nich ji začaly omezovat tribologické systémy [3].

Problémy s mazáním v kosmickém prostoru vznikají v důsledku náročných podmínek prostředí. Ty zahrnují velmi nízký okolní tlak, široký rozsah provozních teplot, radiační prostředí, přítomnost radioaktivních a korozivních plynů. Absolutní tlak v okolí se výrazně mění s rostoucí nadmořskou výškou. Závislost absolutního tlaku na nadmořské výšce zobrazuje obr. 2-1. Výhodou provozu ve vesmíru může být v některých případech nulová gravitace. [4] [5]



Obr. 2-1 Absolutní tlak jako funkce nadmořské výšky (převzato z [4])

2.2 Používaná maziva na kapalně bázi

Pro aplikace ve vesmíru se používají maziva jak na pevné bázi, tak na kapalně bázi. Obě možnosti mají své výhody i nevýhody [3]. Požadované vlastnosti se tedy pro oba typy liší. Důležitými vlastnostmi kapalných maziv jsou volatilita a povrchové napětí. Tyto dvě vlastnosti přímo souvisí se ztrátou maziva.

Volatilita

Ke ztrátám maziva v systému dochází jeho odpařováním. Za konstantní teploty a plochy je ztráta maziva přímo úměrná tlaku par. Maziva PFPE i MAC vykazují v tomto ohledu vynikající vlastnosti. Je důležité vzít v úvahu nejen těkavost základní kapaliny, ale také přísad. [3] [6]

Povrchové napětí

Dalším způsobem, jak dochází ke ztrátám maziva je tečení. K tečení jsou náchylné kapaliny PFPE, které mají velmi nízké povrchové napětí. Při delším kontaktu maziva PFPE rozpouštějí bariérové filmy, čímž se tyto filmy stávají neúčinnými. Maziva MAC mají povrchové napětí vyšší, lépe se zadružují a mají menší tendenci k tečení. [3]

Ve vesmírných aplikacích se používalo a používá více různých typů kapalných maziv. Patří mezi ně minerální oleje, silikony, estery, perfluoropolyethery a uhlovodíky. Většina dnešních kosmických systémů používá maziva ze skupin PFPE nebo uhlovodíků. [6]

2.2.1 Perfluoropolyethery

Perfluoropolyethery (PFPE) se jako tekutá maziva pro vesmírné aplikace používají již přes 50 let. Tyto látky se vyrábí polymerizací perfluorových monomerů [7]. Komerčně jsou dostupné pod několika obchodními názvy, například FomblinTM Z, FomblinTM Y, BraycoTM 815Z, KrytoxTM nebo DemnumTM [3]. V posledních letech bylo vyvinuto několik aditiv pro PFPE, včetně takových přísad snižujících opotřebení i korozi [6].

Typickou vlastností PFPE tekutých maziv je vysoká hustota. Ta bývá i dvojnásobná ve srovnání s mazivy bez PFPE, což je výhodou pro elastohydrodynamické mazání [6]. Maziva z perfluoropolyetherů mají také nižší rychlost odpařování, dochází u nich k minimálnímu zeslabení infračerveného záření. Používají se v provozu při teplotách nižších než 200 K [4]. Některé fyzikální vlastnosti čtyř komerčních maziv PFPE jsou uvedeny v tab. 2-1.

Tab. 2-1 Fyzikální vlastnosti vybraných PFPE kapalných maziv

Mazivo	Průměrná molární hmotnost	Viskozita při 200 °C	Index viskozity	Bod tuhnutí [°C]	Tlak par [Pa]	
					20 °C	100 °C
Fomblin™ Z-25	9500	255	355	-66	$3,9 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
Krytox™ 143AB	3700	230	113	-40	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
Krytox™ 143AC	6250	800	134	-35	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Demnum™ S-200	8400	500	210	-53	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$

2.2.2 Uhlovodíky

Existují dvě základní skupiny syntetických uhlovodíkových maziv, polyalfaolefiny (PAO) a mnohonásobně alkylované cyklopentany (MAC). [6]

Polyalfaolefiny jsou syntetické uhlovodíky. Mají poměrně krátkou molekulární délku a nízkou hustotu bočních větví [8]. Vyrábějí se oligomerizací lineárních alfaolefinů se šesti nebo více atomy uhlíku [6]. Mají větší konzistenci v molekulární struktuře a větší distribuci molekulové hmotnosti. To je důvodem, proč mají konzistentní mazací vlastnosti. Dále se vyznačují vyššími viskozitními indexy a tlaky par. Původně byly vyvinuty jako výkonné základní oleje pro automobilové a průmyslové aplikace [8].

Mnohonásobně alkylované cyklopentany se syntetizují reakcí cyklopentadienu s různými alkoholy v přítomnosti silné báze. Konečným produktem je směs di-, tri-, tetra- nebo pentaalkylovaných cyklopentanů [6]. MAC se vyznačují nízkou těkavostí a nízkým opotřebením ve vakuu. V těchto vlastnostech vysoce přesahují vlastnosti minerálních olejů. Jejich výkonnost bývá zvýšená zahrnutím ještě méně těkavých přísad [9]. Tepelnými, termooxidačními a radiolytickými procesy může být vyvolána chemická degradace mnohonásobně alkylovaných cyklopentanových maziv. Rozštěpením vznikají volné radikály, které dále reagují a tvoří produkty s jinou molekulovou hmotností než původní MAC, což ovlivňuje mazací výkon [10].

2.2.3 Ostatní skupiny kapalných maziv

Mezi další kapalná maziva patří minerální oleje, silikony a estery. Minerální oleje jsou maziva skládající se ze směsi přirozeně se vyskytujících uhlovodíků, která jsou rafinované kvůli odstranění nečistot. Silikony se používali na počátku vesmírného programu, vyznačují se jako špatné lubrikanty pro systémy ocel na ocel, mají nízkou relativní životnost a snadno degradují na abrazivní polymerizovaný produkt. Estery jsou dostupné v širokém rozmezí viskozit a jsou dobrými mazivy, přesto se pro používání ve vesmíru neuchytili. [6]

2.3 Používaná maziva na pevné bázi

V mnoha technických aplikacích, které zahrnují zejména vysoké nebo nízké provozní teploty, provoz ve vakuu nebo nízkém tlaku, korozivní prostředí nebo přísné limity hmotnosti není mazání pomocí kapalných maziv proveditelné. Místo maziv založených na kapalné bázi se v těchto aplikacích používají pevná maziva [11]. Maziva založená na pevné bázi se na materiál komponenty nanáší jako tenký film. Tloušťka nanesené vrstvy se pohybuje v řádu mikrometrů, ale může být i tenčí [6]. Způsoby nanášení povlaků jsou rozebrány v kapitole 2.4.

Charakteristika tuhých maziv [5] [12]:

- nízká pevnost ve smyku
- mechanická pevnost
- termodynamická stabilita v celém rozsahu pracovních teplot
- odolnost proti oxidaci a korozi
- řízené vyčerpávání během tribologických operací

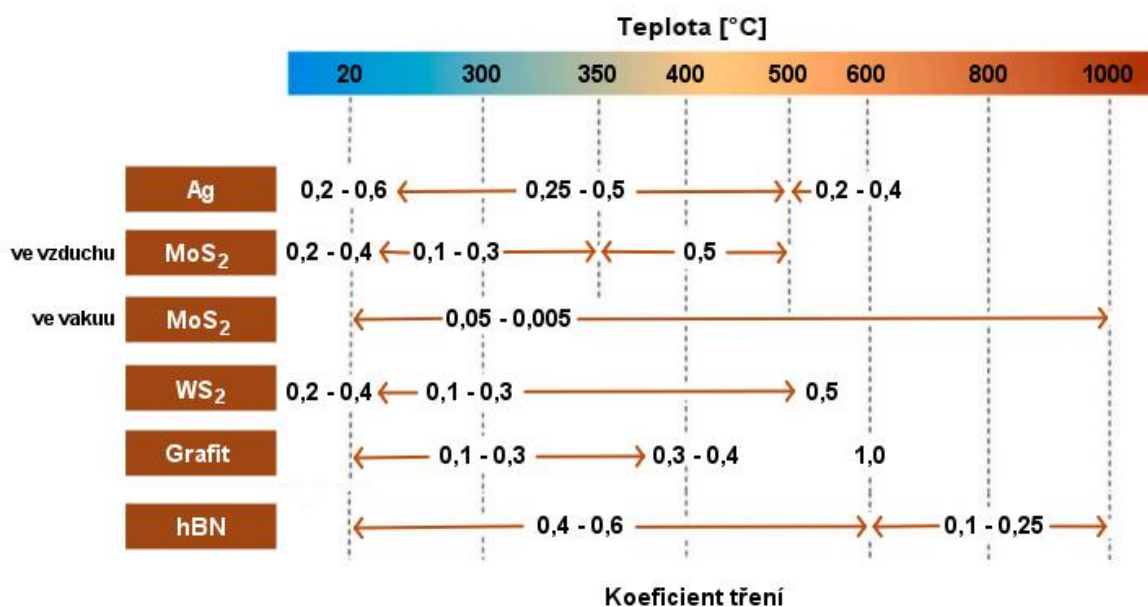
Mezi hlavní výhody pevných maziv oproti kapalným mazivům patří lepší mazivost, dobrá tepelná a chemická stabilita a zlepšená rozměrová stabilita pro dosažení povrchové úpravy s vysokou přesností. Naopak nevýhodou může být neschopnost odvádět teplo nebo neposkytování tlumících účinků během provozu. [12]

Nedostatky pevných maziv [13]:

- přilnavost
- špatný odvod tepla
- tribologická reaktivita, vliv teploty a prostředí
- konečná životnost, obtížné doplňování
- nemají tlumící účinky během provozu

Technologie povrchových povlaků jsou založeny na dvou základních přístupech. Prvním je aplikace měkkého povlaku na tvrdý substrát (soft-on-hard), který je založen na nízké pevnosti ve smyku měkkých materiálů. Povrchy se tak můžou mezi sebou snadněji pohybovat. Druhý princip využívá tvrdého povlaku na měkkém substrátu (hard-on-soft). Tento přístup má za cíl snížit skutečnou oblast kontaktu. [11]

V této kapitole jsou představeny základní informace o čtyřech nejpoužívanějších kategoriích pevných maziv: měkké kovy, polymery, lamelární pevné látky a DLC povlaky. Obr. 2-2 ukazuje porovnání koeficientů tření vybraných pevných maziv za vyšších teplot.



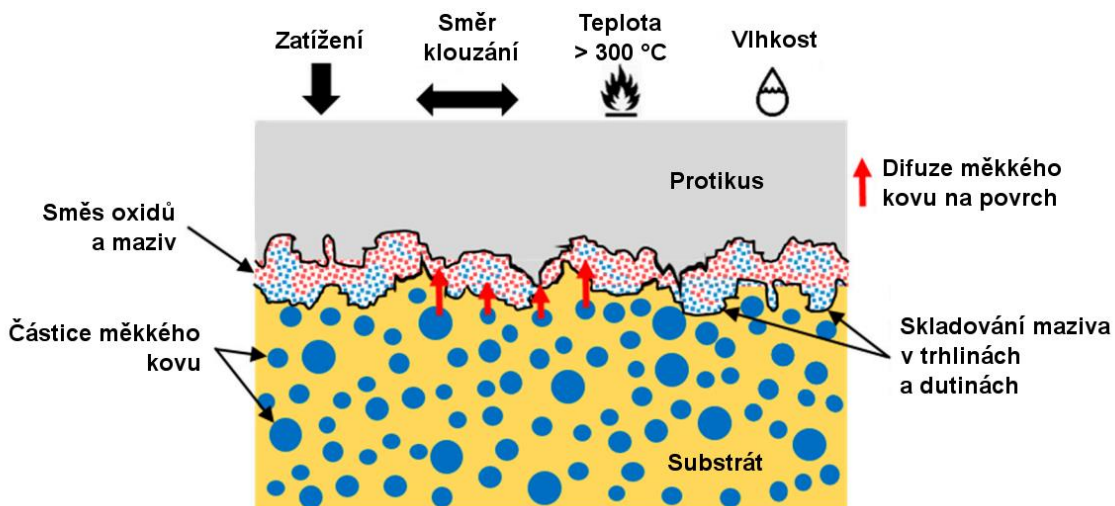
Obr. 2-2 Koefficient tření v závislosti na teplotě u vybraných pevných maziv (upraveno podle [14])

2.3.1 Měkké kovy

Použití povlaků měkkých kovů jako tuhých maziv v některých aplikacích je využíváno již od první poloviny minulého století [15]. Mezi nejčastější kovy používající se jako pevná maziva patří zlato, stříbro, platina, indium, cín a olovo [11].

Hlavní fyzikální charakteristika, které stojí za vhodností měkkých kovů jako pevných maziv je jejich relativně nízká pevnost ve smyku. Pevnost ve smyku se snižuje i při vysokých teplotách, kde ostatní tuhá maziva selhávají [16]. Naopak však při vyšších teplotách může docházet k vytlačování a poruchám povrchu, čímž se mazání stává neefektivní. Další výhodou je skutečnost, že se měkké kovy vyznačují více skluzovými rovinami a jsou tedy schopny účinně hojit mikrostrukturální defekty prostřednictvím tepla. Největší nevýhodou měkkých kovů jako pevných maziv je omezení související s přilnavostí k povrchu [11] [12].

Mazání, které v tuhých mazivech na bázi měkkého kovu probíhá prostřednictvím difúzního mechanismu znázorňuje schéma na obr. 2-3 [12].



Obr. 2-3 Difuzní mechanismus mazání pevných látek na bázi měkkých kovů (převzato z [12])

Stříbro

Stříbro jako mazivo je odolné proti oxidaci a používá se při vysokých teplotách místo jiných měkkých kovů. Vysoká teplotní vodivost stříbra způsobuje rychlou disipaci tepla během vysokoteplotních operací, což vede k rychlému vyčerpávání tuhého maziva. Následkem je větší opotřebení. Pro zpomalení vyčerpávání stříbra se k němu v povlacích na bázi niklu přidává MoS_2 . [16]

Bismut

Bismut má podobné fyzikální vlastnosti jako olovo nebo titan, má nízkou tvrdost a nízký bod tání. To vede k snadnému rozptýlení v kontaktech při teplotě, která je dostatečně vysoká pro jeho tavení. Důvod zvýšeného zájmu o bismut jako maziva místo olova je kvůli toxicitě olova. Bismut je považován za ekologicky čisté tuhé mazivo. [12]

2.3.2 Polymery

Jako technické materiály jsou polymery výhodné pro mnoho aplikací. Jejich výhodou jsou nízké výrobní náklady, nízká hmotnost a snadná výroba. Mezi polymerní materiály používané pro pevné mazání patří PEEK, polymid (používaný pro vysokoteplotní aplikace), polyethylen a PTFE, který je díky svému třecímu výkonu nejpoužívanější. [11]

Polytetrafluorethylen (PTFE) je dobrým materiálem sloužícím jako pevné mazivo, protože vykazuje nízký součinitel tření při pohyblivém kontaktu s kovovými povrchy. Jeho použitelnost však snižuje vysoké opotřebení [17]. Pro zvýšení odolnosti proti opotřebení se do PTFE matrice maziva přidávají částice tvrdého plniva, jako například skleněná vlákna, keramika, uhlíková vlákna a další. Lze také přidávat plniva, která zároveň působí jako další tuhá maziva, například grafit, uhlíkové nanotrubičky nebo disulfid wolframu [18]. Podle provedených studií PTFE vykazuje nižší koeficient tření za vyšších teplot. S klesající teplotou pak koeficient tření stoupá [19]. PTFE lze mimo jiné také použít jako plnivo v polymerních materiálech, které mají dobré mechanické vlastnosti, ale špatné tribologické vlastnosti [18].

Nízké tření PTFE je spojeno s jeho strukturou. Ta se skládá z jednotlivých makromolekul $(CF_2-CF_2)_n$. Mezi makromolekulami je nízká pevnost ve smyku, což má za následek, že řetězce po sobě snadno kloužou a tím snižují tření. Tento mechanismus je příčinou toho, že koeficient tření závisí na rychlosti relativního pohybu. Bylo prokázáno, že koeficient se s rostoucí rychlostí zvětšuje. [11]

2.3.3 Lamelární pevné látky

Lamelární pevné látky jsou látky s lamelární strukturou. To znamená, že atomy podél rovin jsou spojeny silnou kovalentní vazbou, zatímco roviny mezi sebou jsou spojeny jen slabými Van der Waalsovými vazbami. Takle skutečnost umožňuje snadný stříh těchto bazálních rovin. [5]

Mezi nejznámější materiály této kategorie patří grafit, grafit, hexagonální nitrid boru hBN, disulfid wolframu WS_2 a zejména pak molybden sulfidu MoS_2 . [12]

Grafit, grafit

Grafit je vrstvená pevná látka a alotrop uhlíku s hexagonálně uspořádanou mřížkou [12]. Jako mazivo potřebuje relativně vlhké prostředí, aby mohl fungovat účinně. Ve vakuu nebo nízkých tlacích funguje špatně, což má za následek vysoké tření a s tím související opotřebení. Toto mazivo tedy není vhodné pro použití v kosmických aplikacích [11].

Grafit je alotrop uhlíku s dvojrozměrnou voštinovou strukturou. Díky výjimečným tepelným, elektrickým a mechanickým vlastnostem je široce používán v mechanickém i elektronickém průmyslu. Jeho tenký rozměr je také důvodem pro používání v mikro a nano mechanických systémech. Studie však ukazují, že při teplotách vyšších přibližně 600 °C dochází v důsledku jeho oxidace k nestabilnímu tření a intenzivnějšímu opotřebení. [12]

Disulfid molybdenu MoS₂

Disulfid molybdenu MoS₂ je sloučenina patřící do skupiny vrstvených dvourozměrných dichalkogenidů přechodných kovů. Přirozeně se vyskytuje v zemské kůře jako minerál molybdenit [20]. Po zušlechtní a úpravě je komerčně nabízený ve formě jemných částic, suspenzí, filmů nebo inkluzí v kompozitech. Tento disulfid je jedním ze světově nepoužívanějších tuhých maziv [12].

MoS₂ byl použit v mazaných součástech mnoha vesmírných přístrojů, jako je například vesmírný dalekohled Jamese Webba, Hubbleův teleskop nebo vesmírná astrometrická observatoř Evropské kosmické agentury Gaia. Zatímco v HST byl MoS₂ použit ve formě leštěných povlaků v JWST byly povlaky naprašovány, protože se tato forma povlakování ukázala jako vhodnější. [14]

Oproti výše zmíněnému grafitu je pro filmy MoS₂ typické, že vykazují ve vakuu extrémně nízké tření, a tedy i nízké opotřebení [3]. To je důvodem, proč je dlouhodobě preferovanou volbou pro kosmické aplikace [5]. Jeho funkce maziva se však značně zhoršuje v přítomnosti okolních plynů, jako je H₂O nebo O₂ [11]. S těmito plyny je velice reaktivní a dochází k tvorbě oxidu molybdenového MoO₃. Ten je při teplotách nižších než 500 °C silně abrazivní, což je značnou nevýhodou při skladování kosmické lodi před nasazením. Je nutné chránit povrch před vlhkostí, která zhoršuje vlastnosti mazaných součástí pro jejich použití ve vesmíru. Předpověď životnosti může být v takovém případě nepřesná, to může vést k fatálním následkům. Tyto vlastnosti lze eliminovat použitím dopantů, jako například Ti, Cr, Ni, Au, PTFE a další [5].

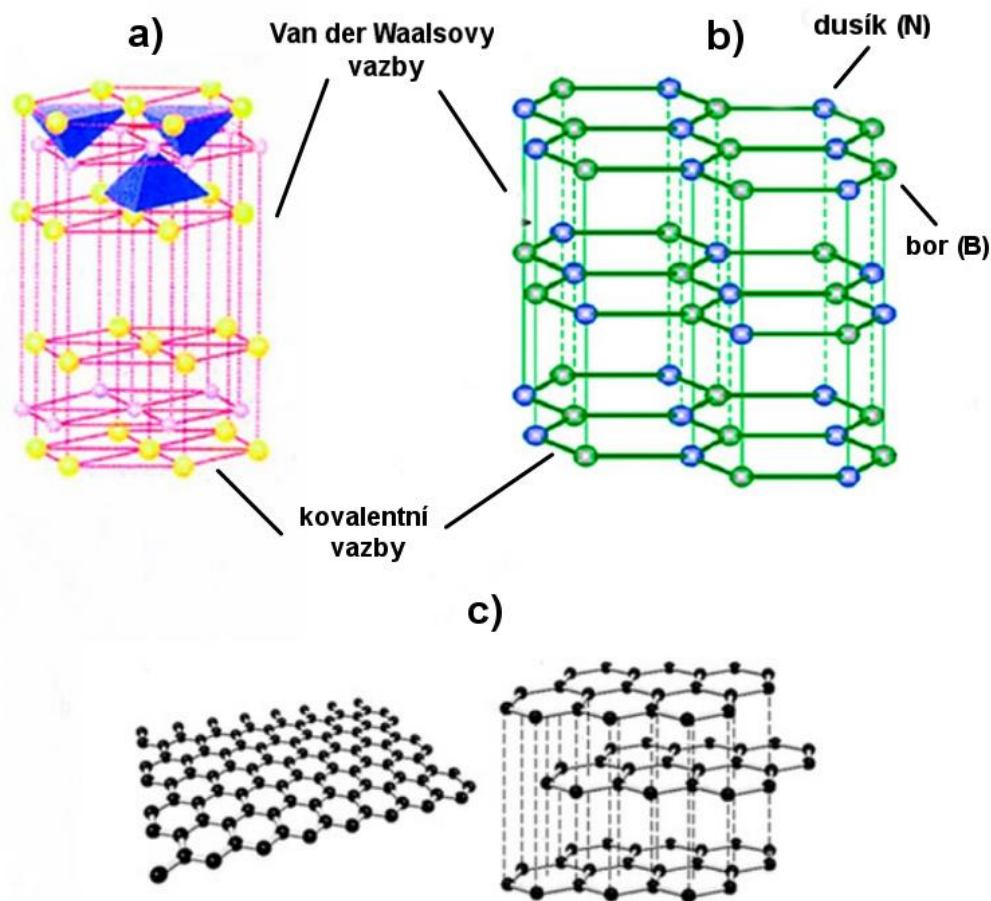
Disulfid wolframu WS₂

Další pevnou látkou spadajícími do této skupiny je disulfid wolframu WS₂. Podle zatím získaných zkušeností se nezdá, že by WS₂ překonal vlastnosti MoS₂. Jedinou výjimkou je lepší výkon disulfidu wolframu při vysokých teplotách. [14]

Šestihranný nitrid bóru hBN

Šestihranný nitrid bóru hBN má vynikající tepelnou vodivost, mechanickou pevnost a tepelnou stabilitu až do 1000 °C. Dále je odolný proti korozi a chemicky neaktivní. Povlak hBN při vyšších teplotách významně snižuje oxidaci kovových povrchů. Byť jeho vrstvená struktura je podobná MoS₂, hBN se nepoužívá jako tuhé mazivo pro vesmírné aplikace, a to sice kvůli jeho nesmáčivosti a konsolidaci. [14]

Na Obr. 2-4 jsou znázorněny krystalové struktury MoS₂, grafitu, grafenu a hBN, které ukazují slabé Van der Waalsovy vazby přítomné v mezilamelárních vrstvách.



Obr. 2-4 Krystalové struktury a) MoS₂ nebo WS₂, b) hBN, c) grafenu a grafitu (upraveno podle [12])

2.3.4 DLC povlaky

DLC, z anglického překladu uhlík podobný diamantu, je třída amorfního uhlíkového materiálu vykazujícího některé typické vlastnosti diamantu. Nanáší se jako povlak na jiné materiály, pro jejichž použití jsou určité vlastnosti diamantu vhodné [21]. DLC povlaky jsou zkoumány pro vesmírné aplikace, protože se v nich díky obrovské rozmanitosti skrývá potenciál [6].

Tyto povlaky vykazují široký rozsah koeficientů tření ve vakuu v závislosti na různých metodách nanášení a v závislosti na použitých legurách. Například filmy obsahující vysoké procento vodíku (větší než 40 %) se projevují velmi nízkým třením a opotřebením. Současné DLC povlaky mají větší opotřebením ve vakuu než MoS₂, avšak jejich budoucí aplikace jsou slibné zejména pro vytvoření pasivační vrstvy na ocelových površích [6] [21]. Čistý DLC má pro použití ve vesmíru omezení, kterým je krátká životnost, špatná odolnost proti záření a slabá struktura při vysokých teplotách [22].

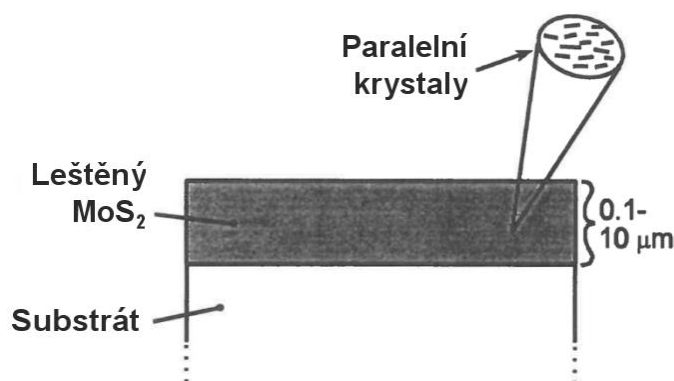
2.4 Způsoby nanášení povlaků

V této kapitole budou rozebrány způsoby nanášení povlaků tuhých maziv, především pak nanášení povlaku MoS_2 jako nejpoužívanějšího lubrikantu pro vesmírné aplikace. Existují tři primární způsoby nanášení povlaků: leštění (burnishing), lepení nástřikem (spray bonding) a fyzikální depozice z plynné fáze (PVD). [14]

Před aplikací nátěru musí být substrát vhodně připraven, především kvůli zvýšení přilnavosti nátěru. Nezbytná je čistota povrchu. Počáteční čištění většinou zahrnuje ošetření organickými rozpouštědly nebo žíravými čistícími prostředky. Lepené povrchy vyžadují zdrsnění povrchu a pokovení nebo pasivaci povrchu. Určitá drsnost povrchu je vhodná i pro leštěné povrchy. [23]

Leštění (burnishing)

Touto metodou se vyrábějí nespojené mazací povlaky z prášků MoS_2 , WS_2 nebo PTFE. Princip této techniky spočívá v natírání prášku lubrikantu na povrch komponenty pomocí hadříku nebo štětce. Lze také prášek smíchat s těkavým rozpouštědlem a povrch součásti stříkat, natírat nebo namáčet. Rozpouštědlo se po aplikaci odpaří a zůstane čistý prášek [23]. Leštěním dochází ke zhutnění filmu a k zvětšení povrchové plochy substrátu. V případě MoS_2 nebo WS_2 se krystaly v povlaku orientují ve směru klouzání (obr. 2-5), což má za následek zlepšení schopnosti stříhu a snížení koeficientu tření [14]. Životnost těchto povlaků je relativně nízká, příčinou je špatná přilnavost a různá tloušťka filmu [24]. To omezuje jejich použití pouze na nekritické a nenáročné aplikace [23].



Obr. 2-5 Schématický průřez substrátu s leštěným povlakem MoS_2 (převzato z [23])

Špatná přilnavost těchto povlaků a jejich odchylky v tloušťce, které se běžně pohybují od 0,1 do 10 μm , jsou následkem spojení prášku s povrchem substrátu relativně slabými Van der Waalsovými vazbami. Tloušťka filmu závisí na několika parametrech jako je doba a metoda leštění, drsnost povrchu substrátu nebo okolní relativní vlhkost během procesu nanášení. [23]

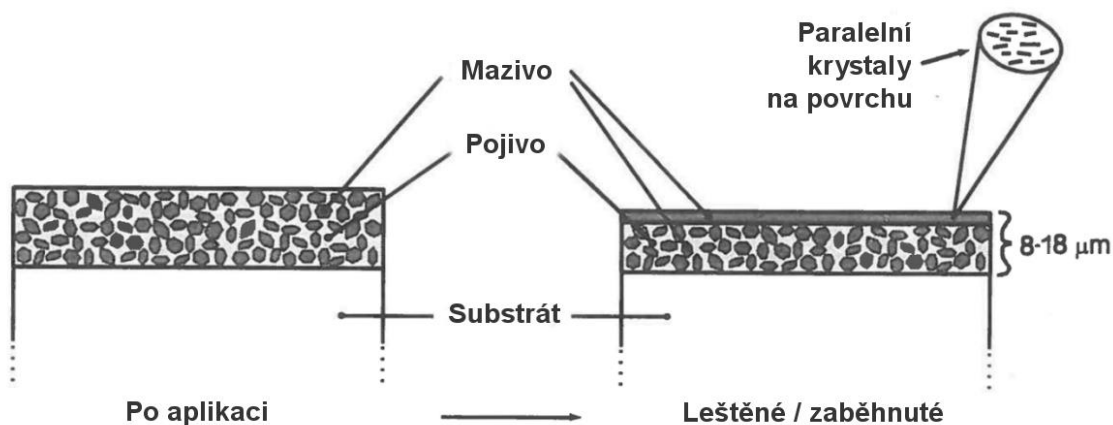
Existuje metoda nanášení nárazem vzduchu, která zlepšuje adhezi. Prášek MoS_2 nebo WS_2 je na povrch nastříkán pomocí vysokotlakého vzduchu. Vlivem vysoce natlakovaných částic maziva dochází k mechanické deformaci substrátu. Takto vzniklé filmy jsou tenké, snadno aplikovatelné na různé povrchy a vykazují nízký koeficient tření. [14]

Lepení nástřikem (spray bonding)

Lepené povlaky se většinou skládají ze dvou složek, maziva a pojiva. V pojivovém materiálu je rozptýleno mazivo ve formě prášku. Pojivo zajišťuje přilnavost maziva k povrchu součásti a díky vyšší tvrdosti a pevnosti také řízené opotřebení maziva. Pro nižší teploty se dnes jako pojivové materiály používají termoplastické a termosetové pryskyřice. Pro nízké až středně vysoké teploty se používají fosfáty a silikáty. Pro vysoké teploty se používá keramika. [23]

Jako optimální poměr maziva k pojivu v případě MoS_2 vázaného v pryskyřici se uvádí 2:1. Jsou-li povlaky MoS_2 nasáklé vzduchem, lze použít i menší množství pojiva, až v poměru 20:1. V tomto případě je však velmi důležitá předúprava povrchu, protože může snáze docházet k odlupování povlaku. Předúprava zahrnuje čištění a optimální zdrsňení povrchu. [14]

Při aplikování povlaku na komponentu jsou částice maziva rozprostřeny rovnoměrně v celé hmotě pojiva. Po vyleštění nebo záběhu se částice maziva přeskupí na povrch povlaku. V případě MoS_2 dojde stejně jako u leštění k zarovnání krystalů v relativním směru pohybu třecích vrstev [23]. Obr. 2-6 schematicky ukazuje, jak se rozložení maziva v pojivu po záběhu změní.

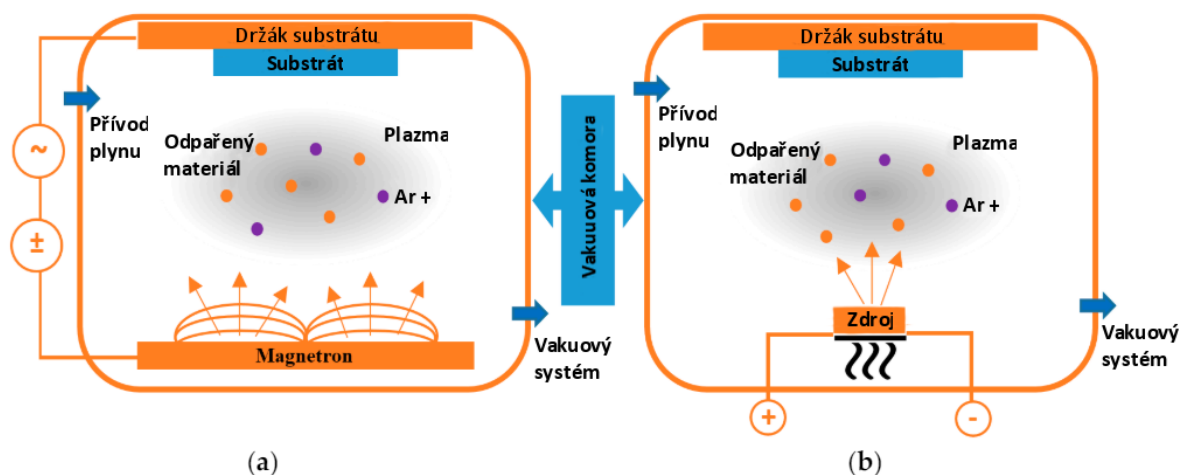


Obr. 2-6 Schématický průřez substrátu s lepeným povlakem MoS_2 po aplikaci maziva a po leštění/zaběhnutí (převzato z [23])

PVD

PVD (fyzikální depozice z plynné fáze) je široce používaná technologie pro nanášení tenkých vrstev. Částice jsou extrahovány z pevného materiálu při velmi nízkém tlaku a jsou nanášeny na substrát. Povlak na substrátu roste atom po atomu [25]. Ve srovnání s leštěnými a lepenými povlaky, naprašované povlaky vykazují zlepšenou adhezi, vyšší hustotu a výrazně vyšší čistotu [14]. Filmy mají vrstvy o tloušťce tenké jako atomové vrstvy. Proces atomové depozice může být proveden ve vakuu, plynném, plazmovém nebo elektrolytickém prostředí. Výhodou nanášení ve vakuové komoře je snížení kontaminace plynem na velmi nízkou úroveň [25].

Základními metodami PVD jsou napařování a naprašování (obr. 2-7). Proces napařování se obvykle používá pro silnější filmy, kde požadavky na povrch z hlediska morfologie jsou nižší. Tato technika se vyznačuje vyšší rychlostí nanášení ve srovnání s naprašováním. Naopak proces naprašování je používán pro aplikace, kde drsnost povrchu, velikost zrna a celková morfologická kvalita povrchu hraje důležitou roli. [25]

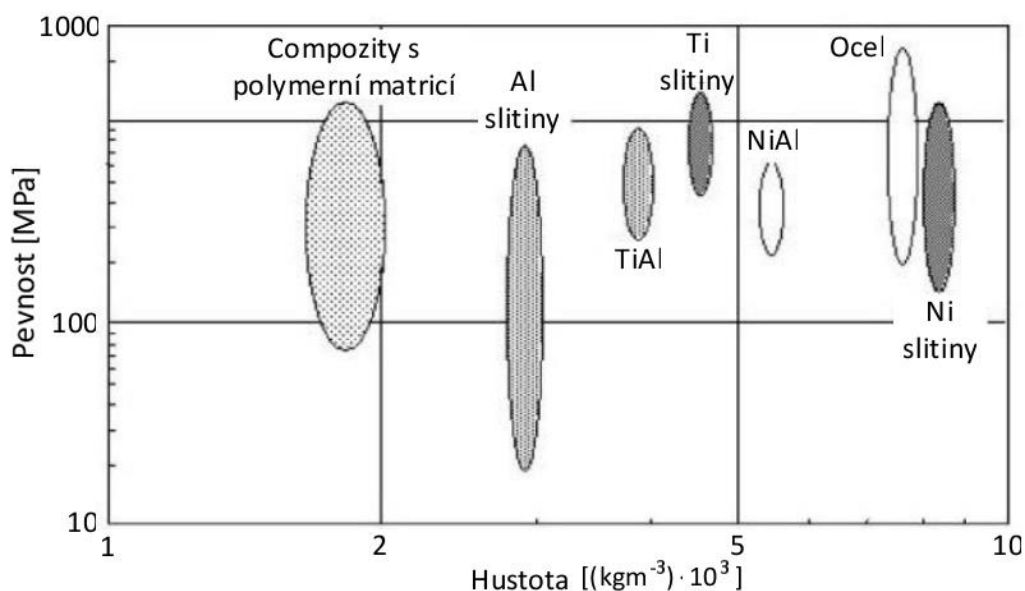


Obr. 2-7 Schématické znázornění PVD metody a) napařování b) napařování (převzato z [25])

Naprašované povrchy se vyznačují malou tloušťkou. Jejich tloušťka se běžně pohybuje od 0,5 do 1 μm . Ve své čisté formě jsou naprašované povlaky lehce náchylné k oxidaci ve vlhké atmosféře. Oxidace MoS_2 je mnohonásobně vyšší na plochách okrajů krystalů MoS_2 , které jsou chemicky reaktivnější, než na relativně nereaktivních plochách bazálních rovin [26]. Zpočátku se naprašování provádělo s použitím pouze MoS_2 bez dalších látek v procesu povlakování. Pokroky v této technice vedli ke kombinování MoS_2 s kovy [23]. Tyto smíšené povlaky vykazují lepší odolnost vůči oxidaci, protože kovy snižují porozitu povlaků a „utěšují“ reaktivní okraje krystalů MoS_2 [26]. Společná depozice zlepšila vlastnosti povlaků, čímž se zvýšila i jejich celková účinnost a vhodnost pro kosmické aplikace [14].

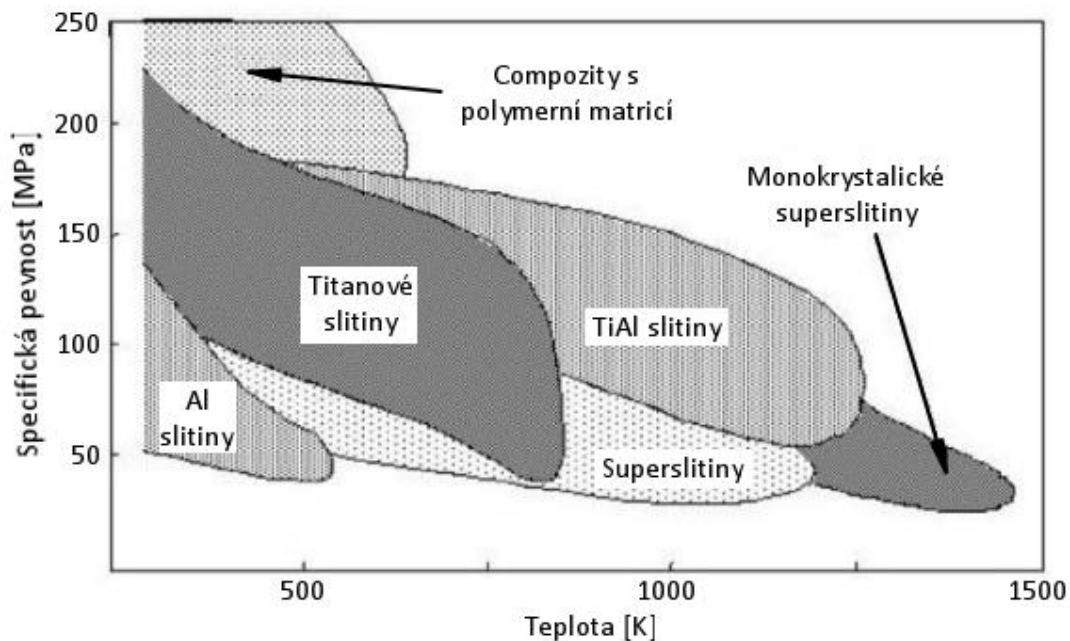
2.5 Materiály komponent

Komponenty používané pro vesmírné aplikace mají své specifické požadavky z hlediska materiálu. Klíčovým je snížit jejich hmotnost a zvýšit teplotní odolnost. Snížení hmotnosti se nejúčinněji dosahuje snížením hustoty použitého materiálu. Dochází zde navíc k efektu sněhové koule, kdy snížení hmotnosti jednoho dílu umožňuje snížit hmotnost ostatních dílů (například použití menšího motoru). Hmotnost celého stroje pak přímo ovlivňuje množství spáleného paliva a tím i ekonomické náklady. Vztah mezi pevností a hustotou materiálu je důležitým kritériem při jeho volbě. Obr. 2-8 ukazuje tento vztah pro používané konstrukční materiály. Lze z něj vidět důvod, proč mezi nepoužívanější klasické materiály v kosmonautice patří hliníkové a titanové slitiny. Ještě vyšší pevnost při nižší hustotě nabízejí kompozity s polymerní matricí. Ty ve specifických aplikacích zčásti nahradili klasické kovové materiály. [27]



Obr. 2-8 Graf pevnosti a hustoty konstrukčních materiálů (převzato z [27])

Teplotní podmínky ve vesmíru jsou extrémní, během oběhu kolem Země jsou materiály a konstrukce umělého vesmírného tělesa vystaveny teplotám, které se pohybují přibližně od $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Opakované teplotní kolísání způsobuje tepelné namáhání materiálů. Rozdíly v tepelné roztažnosti pak způsobují praskání, nedostatečnou přilnavost, a dokonce i odlupování povrchových vrstev [28]. Porovnání specifické pevnosti a teploty konstrukčních materiálů ukazuje obr. 2-9. Lze vidět, že titanové slitiny mají lepší tepelnou odolnost než hliníkové slitiny [27].



Obr. 2-9 Graf specifické pevnosti a teploty pro konstrukční materiály (převzato z [27])

Na oběžné dráze Země může dojít k poškození materiálu v důsledku srážek s mikrometeoroidy (malé přírodní objekty) a orbitálním odpadem. Na nízké oběžné dráze je materiál také vystaven toku atomárního kyslíku disociovaného zářením. Tento atomární kyslík způsobuje erozi kovových i polymerních materiálů [28]. V dalším textu se zaměřím na hliníkové a titanové slitiny.

2.5.1 Hliníkové slitiny

Velkou výhodou hliníku pro použití ve vesmírných i jiných aplikacích je jeho nízká hustota a s tím související nízká hmotnost. Hliník je jeden z nejnázevyrobitelných vysoce výkonných materiálů, díky čemuž jsou komponenty z něj na výrobu a údržbu levnější než jiné podobně výkonné materiály [29]. Vyznačuje se dobrou teplotní a elektrickou vodivostí a také korozní odolností. Naopak nevýhodou je nízká pevnost. Vyšší pevnost se dosahuje kombinováním hliníku s jinými materiály do slitin [30]. Mezi typické prvky, které se v hliníkových slitinách vyskytují patří měď, hořčík nebo křemík. Tyto prvky mají za následek zvýšení tvrdosti, a především meze kluzu slitiny po tepelném zpracování [29].

2.5.2 Titanové slitiny

Titan stejně jako hliník patří do skupiny lehkých kovů. Výhodou slitin titanu je jejich nízká hustota, vysoká měrná pevnost, odolnost proti korozi a vynikající vlastnosti při vysokých teplotách jako například vyšší odolnost proti tečení a dobrou mikrostrukturální stabilitu [31]. Nevýhodou titanových slitin je jejich vyšší cena, která je spojená s náročnou redukcí rudy na kov. V poslední době se však díky aditivní výrobě, kdy jsou součásti přímo 3D tištěny z předem legovaných prášků, snížil odpad. To je pro titanové slitiny výhodou. [27] [32]

Existují tři základní typy slitin titanu, které se podle jejich fázové stability označují jako α , β a $\alpha + \beta$. Nečistoty v titanových slitinách nepříznivě ovlivňují jejich plasticitu. Je nežádoucí, když se s nimi spojuje vodík, uhlík, kyslík nebo dusík [31]. Nejdůležitějším legujícím prvkem, který se u titanových slitin používá je hliník. Vyznačuje se vysokou rozpustností v titanu, s tím související zpevňovací schopností a pouze poloviční hustotou v porovnání s titanem, což podstatně snižuje specifickou hmotnost. Nejpoužívanější titanovou strukturou je Ti-6Al-4V [27].

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Zkoumání současného stavu poznání ukázalo, že k dlouhé životnosti povlaku snižujícího tření je potřeba správná kombinace materiálu substrátu, materiálu povlaku a způsobu nanesení povlaku na substrát. Dále záleží na podmínkách, ve kterých je povlak provozován. Zvláště pak na teplotě, tlaku či vlhkosti. Všechny tyto podmínky ovlivňují konečnou volbu maziva. Velmi častým pevným mazivem používaným pro vesmírné aplikace jsou povlaky založené na bázi disulfidu molybdenu MoS_2 , které mají pro podmínky nízkých okolních tlaků a rozdílných teplot nejlepší vlastnosti. Tyto povlaky se na substrát nanášejí v tenkých vrstvách, jejichž tloušťka je v řádu jednotek mikrometrů. Ukázalo se, že u povlaků MoS_2 je vhodné jejich nanášení naprašováním. U kritických aplikací je nutné nanesené povlaky před jejich použitím otestovat v relevantních podmínkách.

Jedním z typických problémů, nejen ve vesmíru, je náchylnost závitů šroubů k oděru, což se projevuje jejich zadřením. Při dotahování i kontrole se zdá, že je šroub dotažený na požadovaný moment a je v něm tedy vyvolána dostatečná osová síla. To však v případě jeho zadření neplatí a součástky k sobě nejsou správně přišroubovány. V tomto případě může například z nádob unikat plyn nebo kapalina a není zajištěna správná funkce stroje. U strojů vysílaných do kosmu je tento problém obzvláště závažný, protože na špatné dotažení se přijde až v provozu, kdy stroj již není možné opravit.

Tato práce je zaměřena na otestování povlaku právě na bázi disulfidu molybdenu naneseného na beryliovou měď. Nejedná se o materiál typicky používaný u šroubů, ale jedná se o kombinaci, kterou je potřeba otestovat v rámci širší skupiny kombinací materiálů. Beryliová měď CuBe je v kosmu často používána u pružin. Cílem práce je určit počet cyklů, které nanesený povlak zvládne, než dojde k jeho opotřebení. Testována bude potřebná doba nanášení povlaku na vzorek. Povlak na šroubu potřebuje vydržet jen několik cyklů, aby byl správně během montáže dotažený. Je nezbytné, aby byl navrhnut průběh a podmínky experimentu, co nejbližší možné realitě.

Nástřík povlaku na vzorky provedl Bc. David Homola v rámci jeho diplomové práce. Vzorky se liší dobou, jakou na ně byl povlak nanášen, a tedy i tloušťkou tohoto povlaku.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Experimentální zařízení a software

Ke zjištění počtu cyklů, po kterých nanosený povlak přestává být z tribologického hlediska účinný byl použit multifunkční tribometr Bruker UMT TriboLab (obr. 4-1). Jedná se o univerzální tribometr od amerického výrobce Bruker, který byl na trh uveden v roce 2000. Od té doby se stal nejrozšířenějším tribometrem na světě. Jeho výhodou je široká škála rychlostí, točivých momentů, zátěžných sil i možnost měnit teplotu prostředí. Díky vyměnitelným pohonům lze převést rotační pohyb motoru na lineární pohyb vzorku. Přístroj lze také mimo testování maziv, tenkých filmů a nátěrů použít pro testování tribokoroze nebo například zkoušku ohybu namáháním. [33] [34]



Obr. 4-1 Tribometr Bruker UMT TriboLab

Software použitý pro spouštění skriptu určujícího postup tribometru byl Tribolab UMT. Tento software zároveň sloužil pro nastavení vzájemné polohy pinu a vzorku. V průběhu testu na něm lze sledovat hodnoty normálové a vertikální síly, hodnotu součinitele tření nebo vzájemnou polohu. Uložený soubor s daty z měření pak lze snadno otevřít v softwaru UMT Test Viewer nebo jej exportovat na jiný formát, který podporují další softwary sloužící k vyhodnocení dat. V tomto případě byly data vyhodnoceny pomocí softwaru MS Excel firmy Microsoft.

4.2 Použité materiály a podmínky nanášení povlaků

Vzorky jsou destičky z beryliové mědi CuBe o rozměru 46 x 15 x 3 mm. Na jejich část byl stříkáním nanesen tenký povlak maziva na bázi disulfidu molybdenu MoS₂. Základní podmínky, které byly použity u všech vzorků jsou uvedeny v tab. 4-1. Rozdíl v jednotlivých vzorcích je dán dobou nanášení maziva. Tab. 4-2 ukazuje tuto dobu pro jednotlivé vzorky a jejich označení vyskytující se v dalším textu. Pro lepší přehlednost značí číslo v označení typu vzorku dobu nanášení povlaku.

Tab. 4-1 Základní podmínky nanášení povlaků

tlak [Pa]	3 · 10 ⁵
vzdálenost [mm]	200
teplota [°C]	19
ředění	4:1

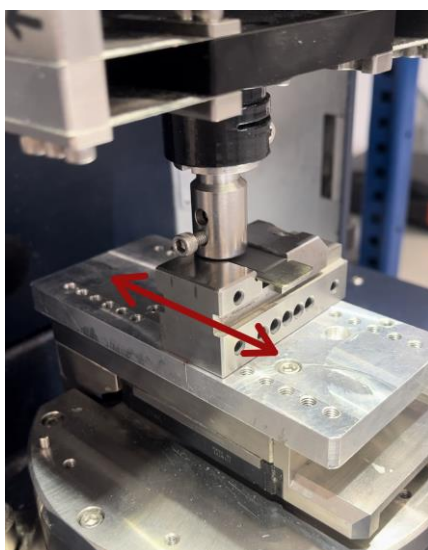
Tab. 4-2 Doba nanášení povlaků na vzorky a jejich označení

označení typu vzorku	X9		X12		X18		X24		X30	
označení vzorku	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
doba nanášení [s]	9	9	12	12	18	18	24	24	30	30

Měření bylo uskutečněno s pinem o průměru 3 mm. Jelikož experimenty nebyly dlouhé a opotřebení pinu bylo minimální, byl z důvodu omezení vlivu rozdílu v uložení pinu a jeho přesné geometrické poloze vůči vzorku pro všechna měření použit jeden pin. Chyba, která by mohla v důsledku toho nastat byla eliminována střídáním vzorků ve smyslu D1 – D10 – D2 – D9 atd.

4.3 Fyzikální podmínky experimentu

Podmínky pro experiment byly zvoleny na základě předchozích podobných experimentů s jinými materiály, tak aby experimenty byly mezi sebou porovnatelné. V tomto experimentu se jednalo o konfiguraci „pin-on-plate“, kdy pin držel pevnou polohu, zatímco se vzorek vůči němu cyklicky pohyboval po lineární trajektorii (obr. 4-2). Dráha pohybu v jednom směru byla dlouhá 10 mm. Během jednoho cyklu tedy vzorek urazil vzdálenost 20 mm. Nastavená frekvence byla 5 Hz, vzorek se pohyboval průměrnou rychlostí 100 mm s^{-1} . Vzorek byl v normálovém směru zatížen silou 35 N. Tyto fyzikální podmínky experimentu jsou shrnuty v tab. 4-3.



Obr. 4-2 Směr pohybu vzorku vůči pinu

Tab. 4-3 Podmínky experimentu

Zatěžovací síla	Frekvence	Dráha cyklu	Průměrná rychlost
[N]	[Hz]	[mm]	[mm/s]
35	5	20	100

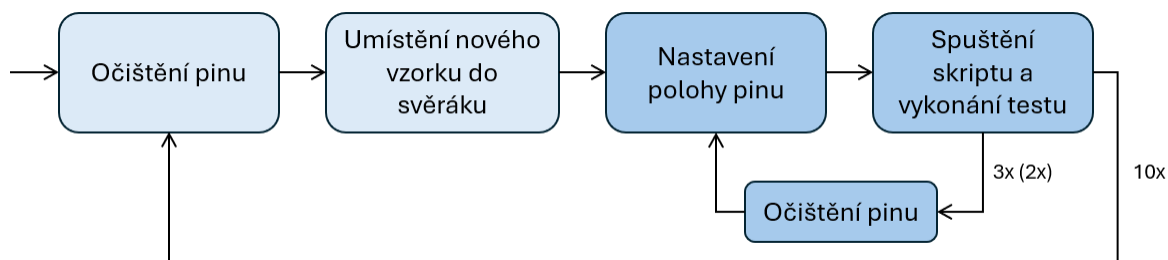
4.4 Postup měření

Celkem bylo testováno 10 vzorků, přičemž jeden stejný způsob nanášení povlaku byl použit vždy u 2 vzorků. Na každém vzorku s výjimkou vzorku D1 a D10 bylo měření provedeno 3krát. Na vzorku D1 a D10 bylo měření provedeno 2krát (tab. 4-4).

Tab. 4-4 Počet měření na jednotlivých vzorcích

označení typu vzorku	X9		X12		X18		X24		X30	
označení vzorku	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
počet měření pro typ	5		6		6		6		5	
počet měření na vzorku	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2

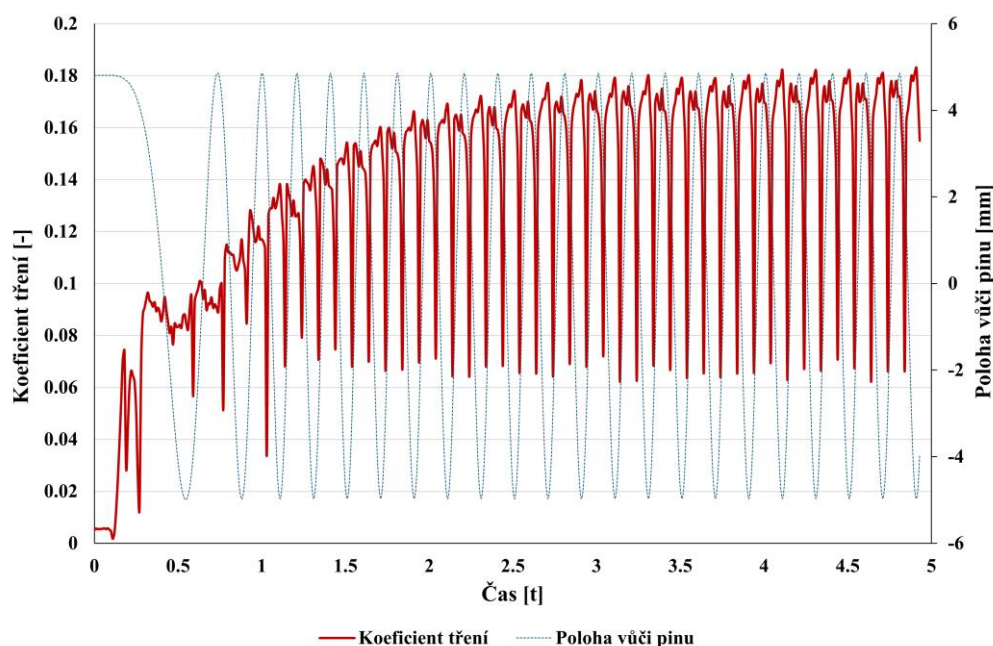
Prvně byl do svěráku umístěného na spodní pohybné desce vložen a upevněn vzorek. Následně došlo k manuálnímu nastavení polohy pinu vůči vzorku tak, aby dráha pohybu pinu byla v rozmezí naneseného povlaku a zároveň tak, aby se na povlakovanou část vlezly 3 takovéto dráhy. V tuto chvíli byl spuštěn přednastavený skript, který v prvním kroku přitlačil pin požadovanou normálovou silou 35 N. V druhém kroku se pin začal cyklicky pohybovat po žádané dráze. Po ustálení koeficientu tření na vyšší hodnotě byl skript ukončen. Tento postup byl vykonán 3krát (2krát) na jednom vzorku, poté byl vzorek vyměněn a postup byl opakován. Před každým měřením byl pin očištěn roztokem acetonu, aby se z něho odstranily zbytky maziva. Schéma znázorňující postup měření je zobrazeno na obr. 4-3.



Obr. 4-3 Schéma postupu měření

4.5 Způsob vyhodnocování výsledků

Během měření vzorek vůči pinu konal vratný pohyb. Při tomto pohybu musela jeho rychlost vždy klesnout na nulovou hodnotu a následně znova začal vykonávat pohyb. Tyto změny směru mají za následek prudkou změnu ve snímané vertikální síle a také z ní přepočítaného koeficientu tření. Obr. 4-4 ukazuje naměřený koeficient tření a polohu vzorku vůči pinu v čase u vzorku D9. Tento průběh je typický pro všechna měření.

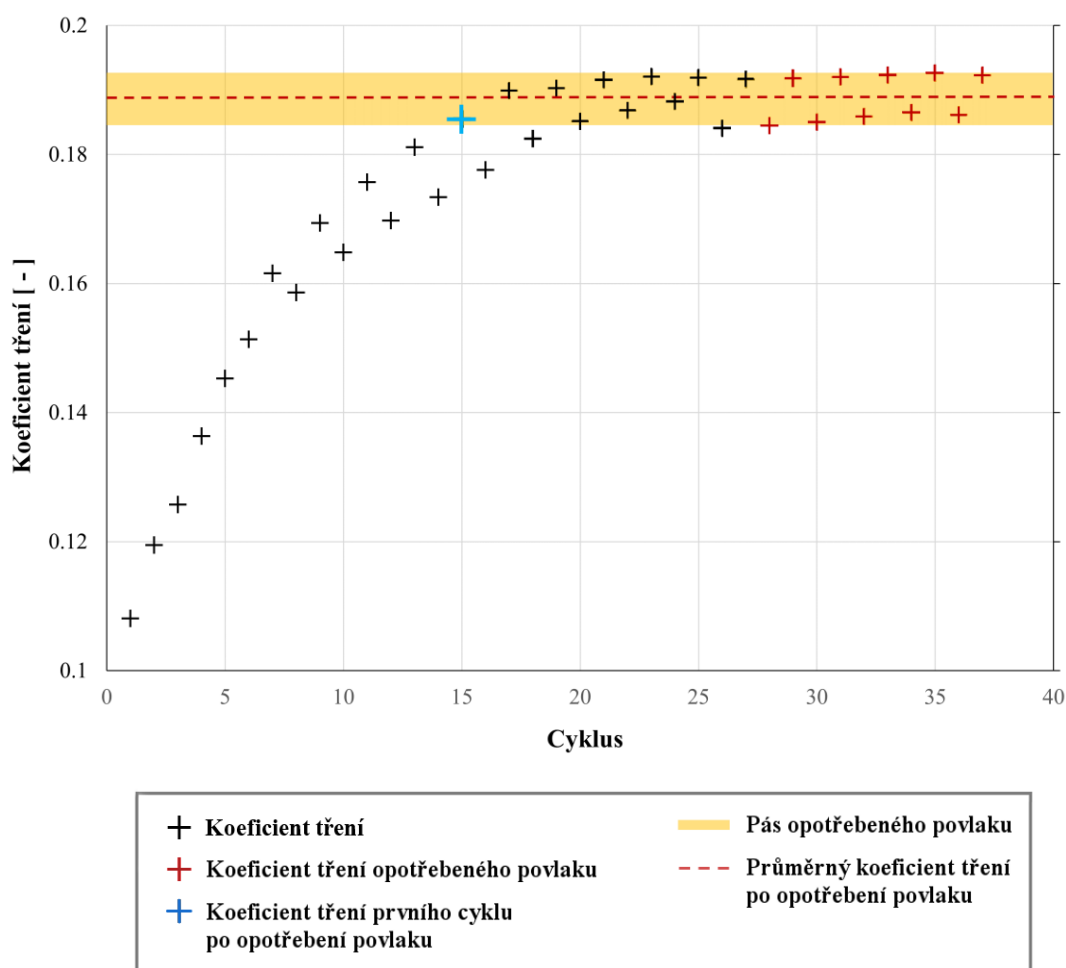


Obr. 4-4 Naměřená data u vzorku D9

Při vyhodnocování výsledků nebyly hodnoty v okolí zvratu pohybu uvažovány a je počítáno pouze s hodnotami tření při konstantním průjezdu pinu po vzorku. Pro každý průjezd jsou zpracována data koeficientu tření všech měření pro daný typ vzorku. Z těchto dat je vypočítán průměr a směrodatná odchylka. Průměr ukazuje, jak se koeficient tření pro každý průjezd mění. Směrodatná odchylka vyjadřuje, jak moc jsou jednotlivé hodnoty rozdílné oproti jejich střední hodnotě. V grafech je vyznačena linie, ke které data po několika průjezdech konvergují. Tato linie označuje hodnotu koeficientu tření, na která se měření po opotřebení mazacího filmu ustálí. Hodnota je vypočítána jako průměr hodnot koeficientu tření několika cyklů za ustálením.

Metoda použitá pro vyhodnocení počtu cyklů do opotřebení je popsána pomocí obr. 4-5. Na tomto grafu jsou červeně znázorněny hodnoty koeficientu tření, které se nacházejí daleko za opotřebením povlaku. U všech typů je bráno posledních 10 hodnot. Tyto červeně vyznačené hodnoty určují šíři a polohu žlutého pásu. Ten pro daný typ vzorku vyznačuje stav, kdy je v kontaktu kov pinu a kov materiálu vzorku, povlak je zcela opotřebovaný. První bod zleva, který do tohoto pásu spadá (na obr. 4-5 je vyznačen modře) je brán jako bod ve kterém povlak již opotřebovaný, protože koeficient tření už dále neroste, což značí, že v kontaktu je už pouze pin z nepovlakovaným materiálem vzorku.

Lze tedy říct, že cyklus, ve kterém je již povlak opotřebovaný je takový, kdy se koeficient tření přiblíží k průměrné hodnotě ustálených hodnot na vzdálenost bližší, než je vzdálenost nejbližší ustálené hodnoty od této průměrné hodnoty. Tato metoda byla použita, protože koeficient tření, na kterých se hodnoty ustálí je u všech typů vzorků různý.



Obr. 4-5 Znáznornění metody pro určení počtu cyklů do opotřebení povlaku

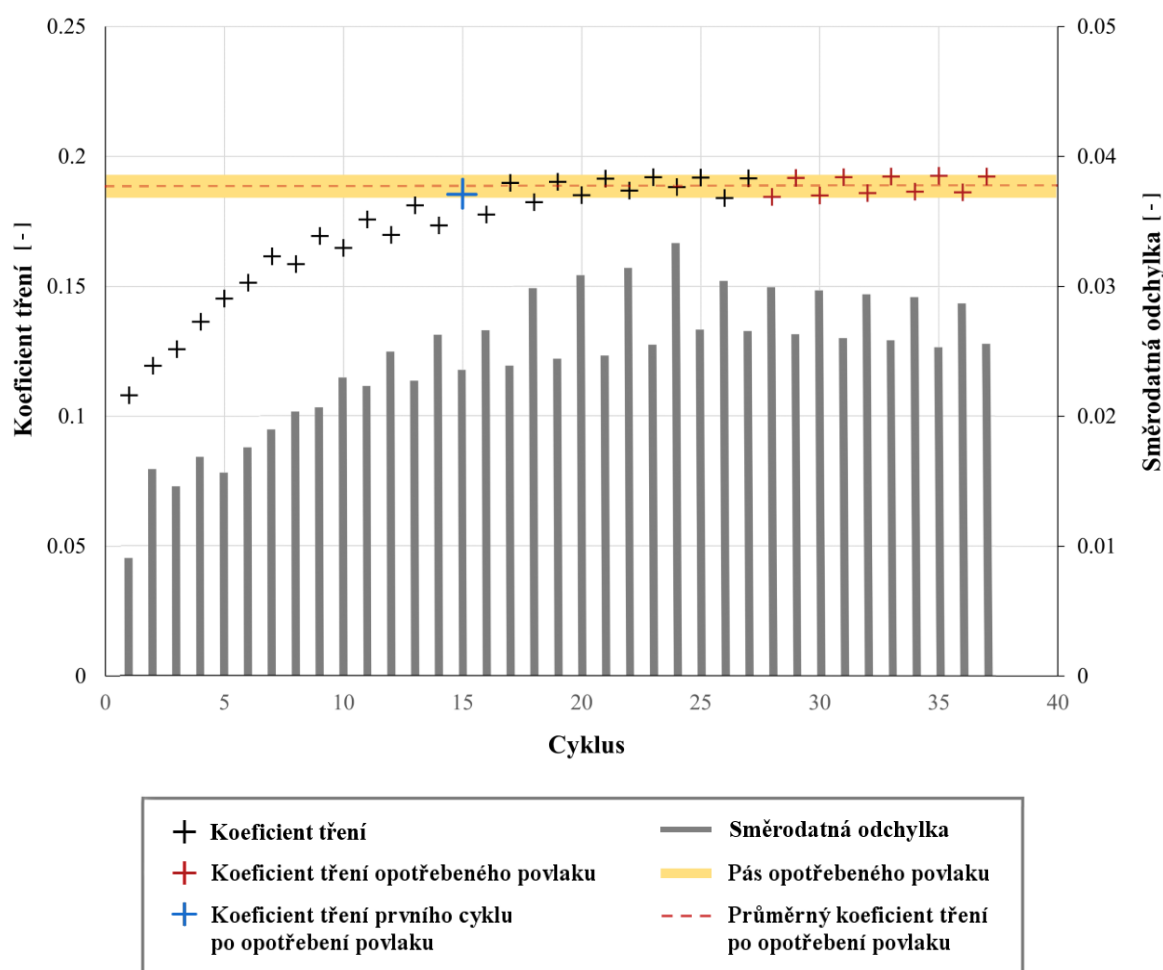
5 VÝSLEDKY

V této části budou prezentovány zpracované výsledky z naměřených dat. V první části jsou grafy závislosti koeficientu tření na pořadí průjezdu pinu po vzorku, tedy na cyklu. Z důvodu přehlednosti je pro každý typ vzorku graf zvlášť. V těchto grafech je navíc znázorněna směrodatná odchylka. Ve druhé části je prezentován graf porovnávající počet cyklů do opotřebení pro jednotlivé vzorky.

5.1 Koeficient tření

Typ X9 (doba nanášení 9 s)

Obr. 5-1 znázorňuje graf závislosti koeficientu tření u naneseného povlaku na počtu cyklů. Koeficient tření je zde průměrným koeficientem tření ze vzorků D1 a D2 na kterých bylo provedeno vícero měření. Na tyto vzorky byl povlak nanášen po dobu 9 s.

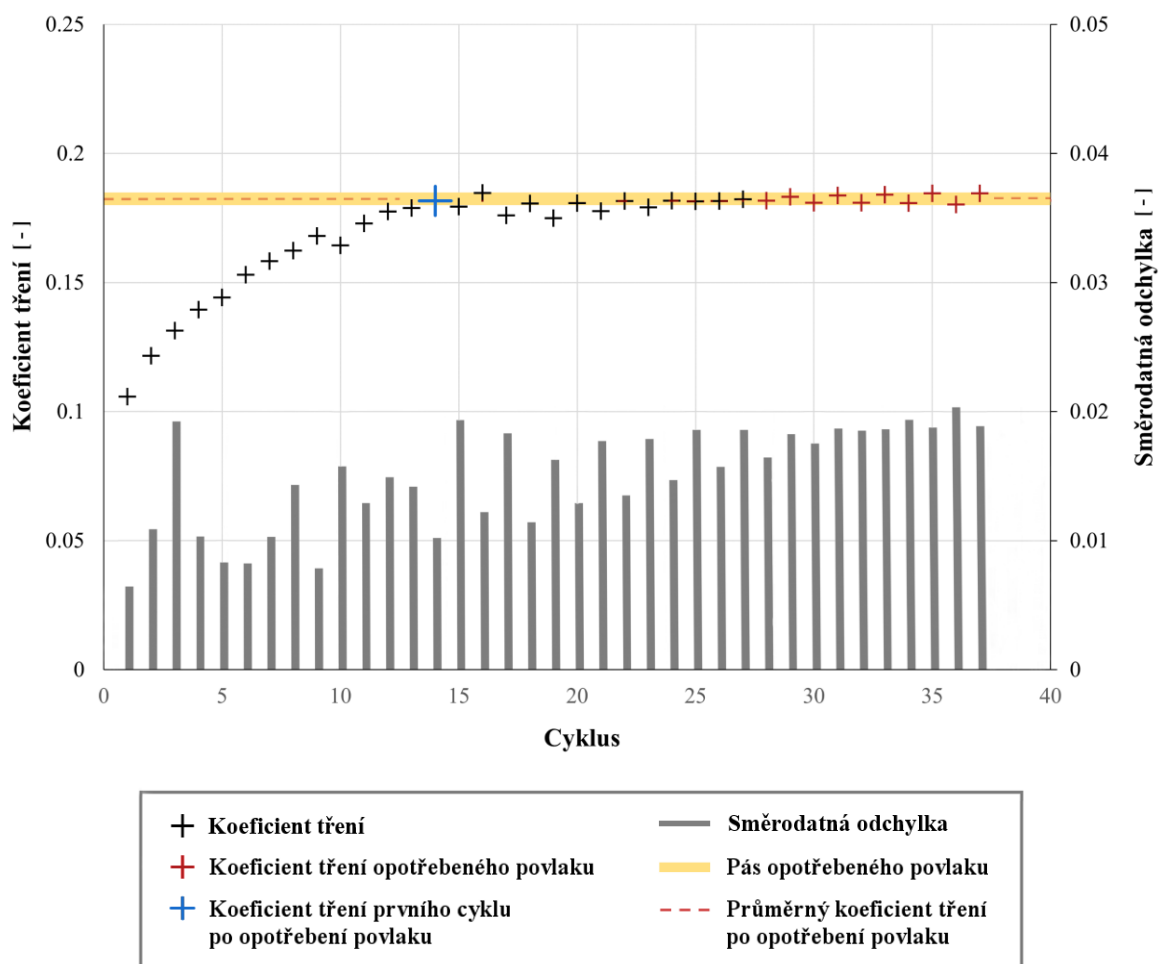


Obr. 5-1 Průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatná odchylka pro typ vzorku X9

Koeficient tření s počtem cyklů roste, až se po určitém počtu začne stabilizovat na hodnotě kolem které osciluje. V tento moment je už nanesený povlak opotřebovaný. Graf obsahuje také směrodatnou odchylku vypočítanou z naměřené sady dat pro tento typ vzorku. Je zde znázorněna pro každý cyklus. Lze si všimnout, že hodnoty směrodatné odchylky i koeficientu tření se pro sudé a liché cykly skokově liší. Tato skutečnost je výraznější u vyššího počtu cyklů, přičemž je nejzřetelnější v opotřebovaném stavu povlaku. Dochází k tomu u všech typů vzorků.

Typ X12 (doba nanášení 12 s)

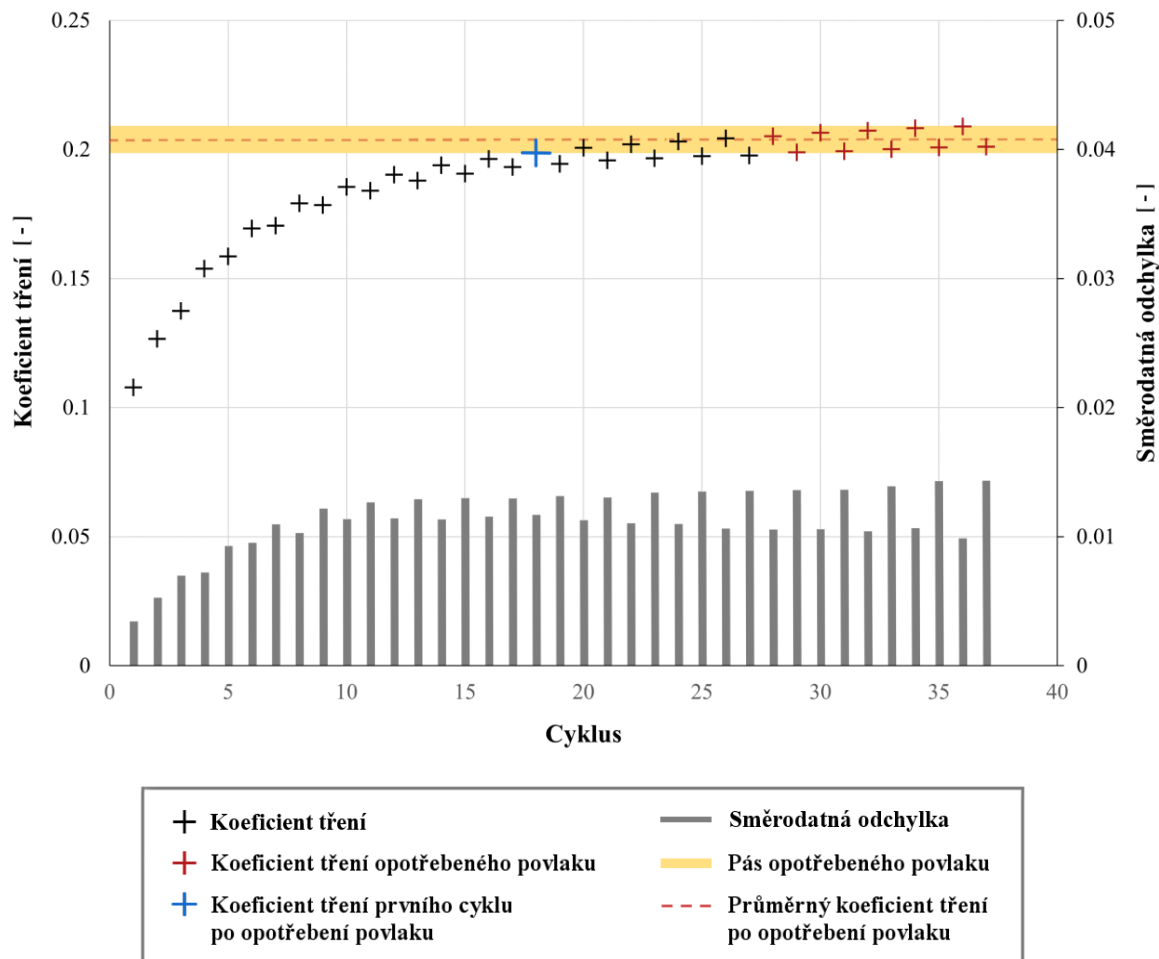
Na obr. 5-2 je vidět průběh hodnot koeficientu tření pro typ vzorku X12, na který byl povlak nanášen po dobu 12 s. Tento typ jsou vzorky D3 a D4. Koeficient tření začíná stejně jako u předchozího typu na nízké hodnotě a s počtem cyklů roste až se ustálí na vyšší hodnotě koeficientu tření, kde se stabilizuje.



Obr. 5-2 Průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatná odchylka pro typ vzorku X12

Typ X18 (doba nanášení 18 s)

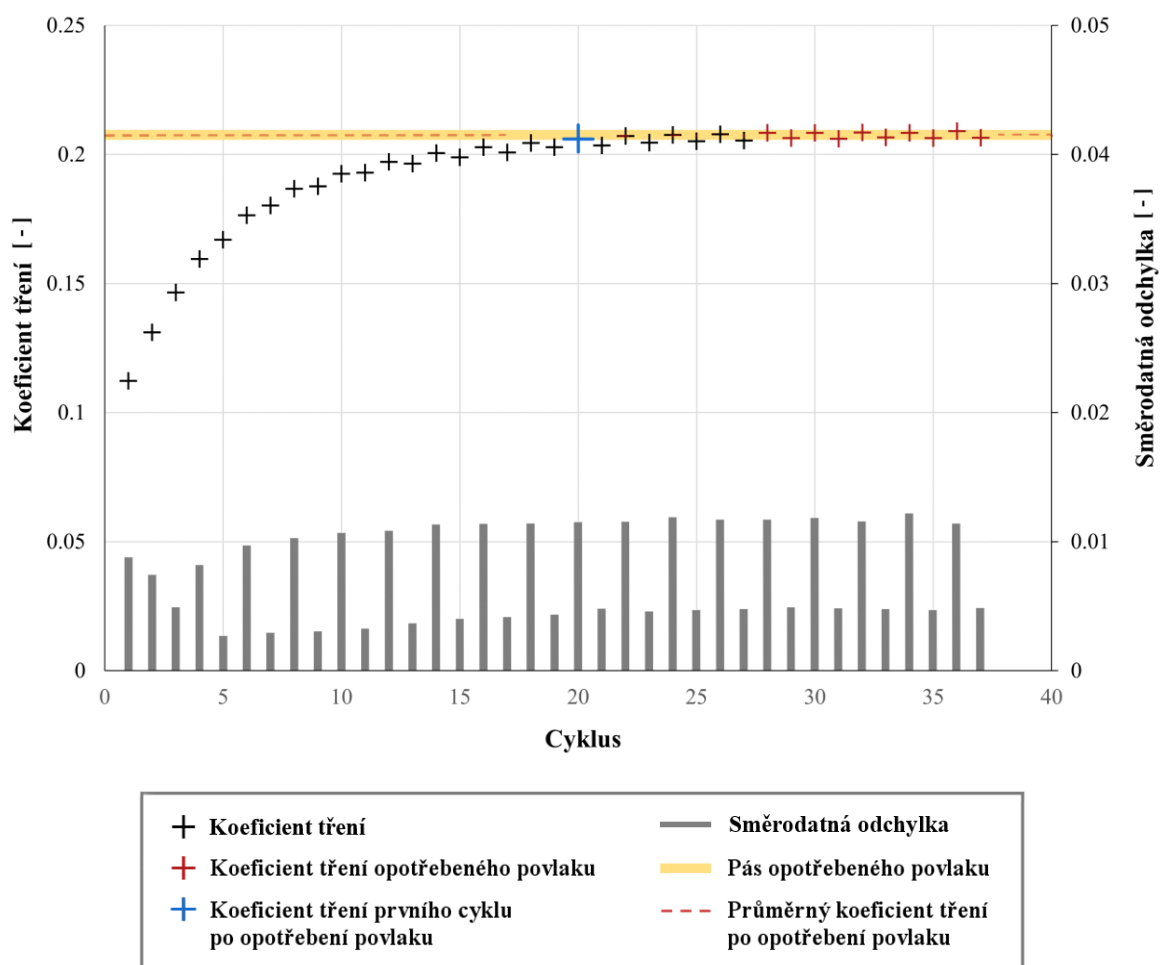
U typu X18 (obr. 5-3) byl povlak nanášen po dobu 18 s, jedná se o vzorky D5 a D6. Koeficient tření roste pozvolněji a ustálené hodnoty, znamenající opotřebení povlaku, dosáhne po větším počtu cyklů. Hodnota koeficientu tření po opotřebení, která je znázorněna červenou čárkovanou čarou, je vyšší než u předchozích dvou typů.



Obr. 5-3 Průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatná odchylka pro typ vzorku X18

Typ X24 (doba nanášení 24 s)

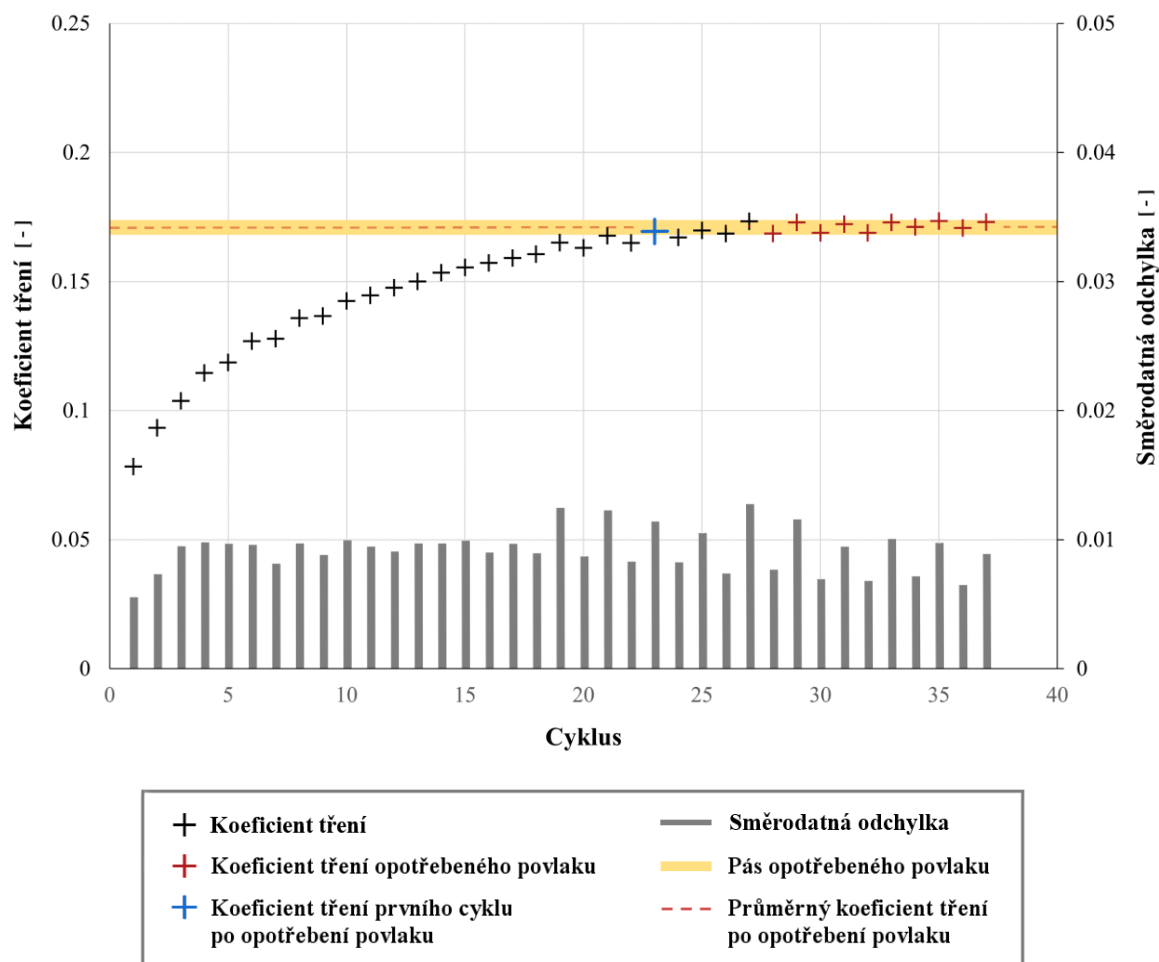
Typ X24 (obr. 5-4) je u dvou vzorků D7 a D8. Povlak na ně byl nanášen po dobu 24 s. Stejně jako u předchozího typu X3 je zde hodnota koeficientu tření po opotřebení povlaku vyšší. Rozdíl u směrodatné odchylky pro liché a sudé cykly je zde nejvýraznější.



Obr. 5-4 Průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatná odchylka pro typ vzorku X24

Typ X30 (doba nanášení 30 s)

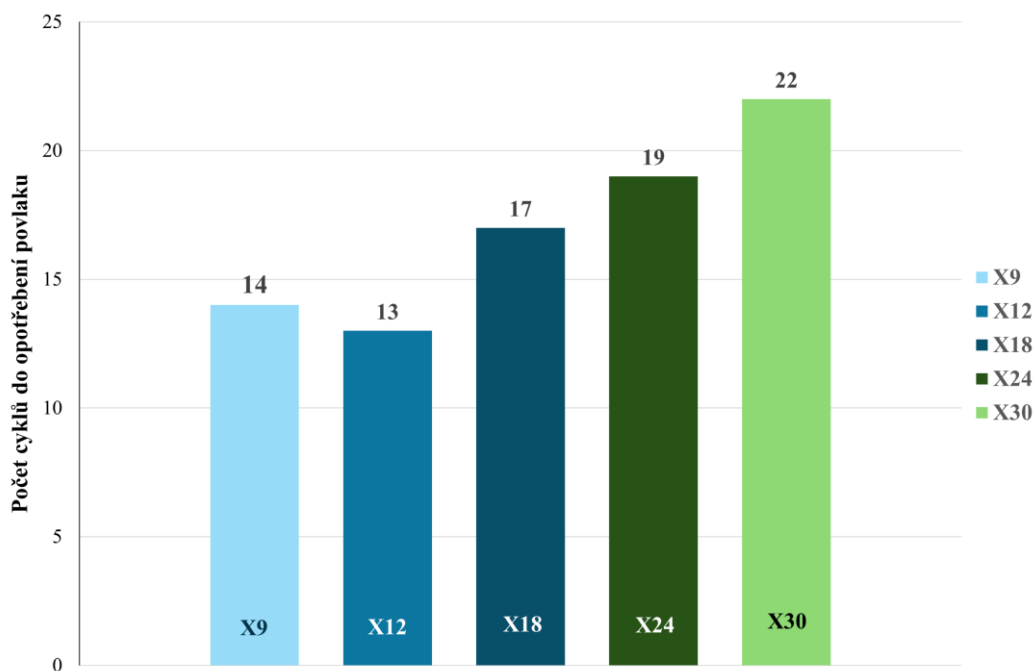
Na obr. 5-5 lze vidět, že koeficient tření u typu vzorku X30 dosahuje ustálené hodnoty při nejvyšším počtu cyklů. Tento typ je u vzorků D9 a D10 a znamená, že doba nanášení povlaku byla 30 s. U tohoto typu je ustálená hodnota koeficientu tření srovnatelná spíše s prvními typy vzorků X9 a X12.



Obr. 5-5 Průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatná odchylka pro typ vzorku X30

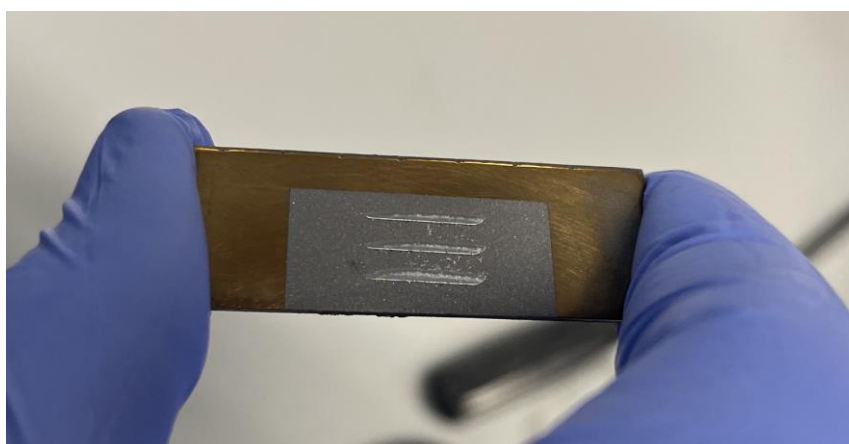
5.2 Počet cyklů do opotřebení

Obr. 5-6 ukazuje pro jednotlivé typy vzorků počet cyklů po kterých došlo k ustálení koeficientu tření. V tento moment již povlak neplní funkci maziva. Postup stanovení počtu cyklů je uvedený v kap. 4.5. Lze vidět, že vzorky s delší dobou nanášení maziva mají delší životnost povlaku.



Obr. 5-6 Porovnání počtu cyklů do opotřebení povlaku pro jednotlivé typy vzorků

Vzorek s opotřebovaným povlakem je vidět na obr. 5-7. Lze zde vidět všechny tři dráhy po kterým měření probíhalo. V místech těchto drah již není povlak a je vidět čistý kovový materiál vzorku.



Obr. 5-7 Vzorek D6 po vykonání testu

5.3 Porovnání tlaku při experimentu s tlakem u šroubu

Pro porovnání tlaku, který byl vyvolaný zatěžovací silou v experimentu s tlakem, který může u závitu titanového šroubu nastat je uvažovaný titanový šroub s metrickým závitem M8. Jeho důležité vlastnosti a rozměry jsou uvedeny v tab. 5-1 [35] [36] [37].

Tab. 5-1 Vlastnosti a rozměry šroubu a matice M8 z titanu

Pevnost v tahu	Vnější průměr šroubu	Střední průměr závitu šroubu	Průměr jádra šroubu	Vnitřní průměr matice	Stoupání závitu	Výška matice
R_m [MPa]	d [mm]	d_2 [mm]	d_3 [mm]	D_1 [mm]	P [mm]	h [mm]
434,00	8,00	7,35	6,89	6,91	1,25	6,50

Tlak v experimentu

Tlak, který byl mezi pinem a vzorkem při experimentu stanovením z Hertzovy teorie byl:

$$p_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{\pi \cdot a^2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{35,00 \text{ N}}{\pi \cdot (0,50 \text{ mm})^2} = 267,38 \text{ MPa} \quad (1)$$

kde p_e je tlak při experimentu udávaný v MPa, F je zatěžovací síla použitá při experimentu v N a a je polovina kontaktní oblasti (v mm), kde docházelo ke kontaktu pinu se vzorkem. Ta byla určena ze vzorku po vykonání testu. Pin nebyl se vzorkem v kontaktu celý, ale v šíři 1 mm.

Tlak v závitu u šroubu

Maximální osová síla, která může být při utahování šroubu vyvolána by byla dána vztahem:

$$\begin{aligned} F_o &= R_m \cdot A_s = \frac{R_m \cdot \pi}{16} \cdot (d_2 + d_3)^2 = \\ &= \frac{434,00 \text{ MPa} \cdot \pi}{16} \cdot (7,35 \text{ mm} + 6,89 \text{ mm})^2 = 17\,279,84 \text{ N} \end{aligned} \quad (2)$$

kde F_o je maximální možná osová síla udávána v N, R_m je mez pevnosti v tahu pro titanový šroub v MPa, d_2 je střední průměr závitu šroubu a d_3 je průměr jádra šroubu. Oba průměry jsou udávány v mm.

Pro titanovou matici M8 by byl počet závitů, které jsou v kontaktu se závitem šroubu dán vztahem:

$$z = \frac{h}{P} = \frac{6,50 \text{ mm}}{1,25 \text{ mm}} = 5,20 \quad (3)$$

kde z je počet závitů matice, h je výška matice v mm a P je stoupání závitu.

Plochu závitu, která by byla v kontaktu lze spočítat jako:

$$S_p = \pi \cdot d_2 \cdot \frac{d - D_1}{2} \cdot z = \pi \cdot 7,35 \text{ mm} \cdot \frac{8 \text{ mm} - 6,91 \text{ mm}}{2} \cdot 5,20 = 65,44 \text{ mm}^2 \quad (4)$$

kde S_p je plocha závitu v kontaktu udávána v mm^2 , d_2 je průměr jádra šroubu, d je vnější průměr šroubu, D_1 je vnitřní průměr matice a z je počet závitů v kontaktu. Všechny průměry jsou udávány v mm.

Tlak, který by byl v závitu šroubu pak určuje vztah:

$$p_{\xi} = \frac{F_0}{S_p} = \frac{17\,279,84 \text{ N}}{65,44 \text{ mm}^2} = 264,06 \text{ MPa} \quad (5)$$

kde p_{ξ} je tlak na závit šroubu v MPa, F_0 je maximální možná osová síla v N a S_p je plocha závitu, který je v kontaktu udávaný v mm^2 .

6 DISKUZE

Všechna provedená měření měla za cíl zjistit počet cyklů po kterých se nanesený povlak snižující koeficient tření opotřebí. Tento počet byl zjišťován z údajů o koeficientu tření v závislosti na počtu cyklů, který se získal přepočtem ze závislosti tohoto koeficientu na čase. Výsledky jednotlivých měření byly rozděleny do typů podle doby nanášení povlaku na testovaný vzorek. Tyto výsledky byly dále statisticky zpracovány a jsou pro každý typ znázorněny na grafech v předchozí kapitole.

Pro všechna měření lze říct, že jejich závislost koeficientu tření na počtu cyklů se chovala podobně. Pro první cyklus je koeficient tření nízký a hned druhým cyklem začíná růst. Povlak se začíná opotřebovávat, avšak stále snižuje koeficient tření. V momentě, kdy se všechen materiál maziva opotřeboval a z kontaktu pinu a vzorku zmizel, zůstal v kontaktu pouze materiál pinu s materiálem substrátu vzorku, koeficient tření se ustálil a po dlouhou dobu se pohyboval kolem konstantní hodnoty.

Zatímco průběh hodnot koeficientu tření je u všech měření podobný, samotné hodnoty se i u stejných typů vzorků mění. Tuto skutečnost zobrazuje směrodatná odchylka, které je ve všech grafech ukázána. Lze říct, že u typů vzorků X12, X18, X24 a X30 jsou její hodnoty relativně nízké a podobné. Vyjímkou je typ X9, kde je směrodatná odchylka v porovnání s ostatními typy vyšší. Při zkoumání dat jednotlivých měření lze zjistit, že se hodnotami liší měření u vzorku D1 oproti hodnotám u vzorku D2, a to sice víc, než je tomu u ostatních typů. Nelze vysvětlit důvod této anomálie, avšak pro zkoumání počtu cyklů do opotřebení je samotná hodnota koeficientu tření vedlejší a důležitější je průběh závislosti. Určením počtu cyklů do opotřebení u jednotlivých vzorků D1 a D2 zjistíme, že se číslo shoduje s hodnotou pro celý typ X9 tvořený těmito vzorky. Proto je tento detail s vyšší hodnotou směrodatné odchylky pro výsledek počtu cyklu do opotřebení nepodstatný.

Hodnoty koeficientu tření pro sudý a lichý cyklus se u všech typů v mírných skocích liší. Vzorek koná vůči pinu vratný pohyb a pohybuje se tedy vůči němu střídavě ve dvou směrech, což odpovídá ve výsledcích sudému a lichému počtu cyklů. Stejně jak se liší koeficient tření, tak se liší hodnota směrodatné odchylky. Z toho lze říct, že v jednom směru pohybu naměřené hodnoty koeficientu tření více kolísají a jsou vyšší. Při zprůměrování hodnot se to projeví mírnými skoky. Důvod nejspíš spočívá v detailu uložení pinu, a tedy jeho přesné poloze vůči vzorku. Kontakt je v jednom směru mírně odlišný než ve směru druhém. Tato skutečnost ale opět výsledky počtu cyklů do opotřebení nijak neovlivňuje.

Podíváme-li se na jednotlivé grafy závislosti koeficientu tření na opotřebení, vidíme, že pro typy X9 a X12 se hodnota koeficientu po prvotním stoupání rychle ustálí. U dalších typů vypadá začátek průběhu podobně, avšak počet cyklů do opotřebení je vyšší. Hodnoty se k čáře znázorňující průměrný koeficient tření po opotřebení povlaku blíží pomaleji, než je tomu u prvních dvou typů. Typ X30 má již od začátku průběh pozvolnější.

Hodnoty počtu cyklů do opotřebení získané ze statistických dat odpovídají pohledu na grafy. První dva typy mají tento počet velmi podobný. S každým dalším typem, a tedy s delší dobou nanášení povlaku, se počet cyklů do opotřebení povlaku zvyšuje. Podle předpokladu se na výsledcích ukázalo, že povlak nanášený po delší dobu působí po větší počet cyklů. Předpoklad, že se tento trend zastaví, nebo dokonce otočí se nepotvrdil. Pro zamítnutí tohoto předpokladu by však bylo potřeba provést měření pro další vzorky, na které by byl povlak nanášen delší dobu. Vzhledem k dosažení dostatečného počtu cyklů do opotřebení i u vzorků s kratší dobou nanášení povlaku nebylo toto měření nutné.

V celém textu jsou vzorky rozděleny podle doby nanášení povlaku. Toto rozdělení je do jisté míry shodné s rozdělením podle tloušťky nanesené vrstvy. Měření tloušťky vrstvy, která se pohybuje v jednotkách mikrometru je však náročné. Rozdělení podle doby nanášení povlaku je výhodné nejen z tohoto důvodu, ale také kvůli technologii výroby vzorků i povlakovaných součástek.

Při experimentu byl tlak vyvolaný zatěžovací silou podobný tomu, jaký by u titanového šroubu mohl na jeho závitech nastat, při utažení na hranici meze pevnosti. Takto vysoký tlak by se u šroubu mohl vyskytovat až těsně před úplným dotažením. Během celého dotahování by byl tlak nižší. Zároveň osová síla, se kterou je počítáno, je hraniční a takové síly se v realitě nejspíš dosahovat nebude. Podmínky experimentu by však i takovýto případ pokryly. Lze tedy říct, že pro aplikaci dotažení šroubu bez jeho zadření je dostačující už doba nanášení povlaku 9 s. Beryliová měď, která byla testována není typickým materiálem pro šrouby. Tato kombinace povlaku, materiálu substrátu a způsobu nanášení by ale mohla najít aplikaci i v jiných případech, kde neprobíhá mnoho cyklů a tření je potřeba snížit jen pro pár vzájemných pohybů během životnosti součástky.

Tato práce by šla rozšířit o měření vzorků s delší dobou nanášení povlaku, čímž by se zjistilo, jestli se počet cyklů do opotřebení bude stále zvyšovat či nikoliv. V rámci zjištění, zda-li je povlak schopen snižovat koeficient tření v rámci několika cyklů a vydržel by tedy dotažení šroubu bez jeho zadření by tato měření byla nadbytečná. Zajímavým rozšířením by bylo i porovnání těchto výsledků z prostředí atmosféry s výsledky z vakua. V době psaní této bakalářské práce však nebyla tato možnost k dispozici.

7 ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na kluzné povlaky pro vesmírné aplikace. Cílem bylo určit a porovnat mezi sebou počet cyklů, po kterém dojde k opotřebení povlaku snižujícího koeficient tření. Jednalo se o povlak na bázi disulfidu molybdenu, který byl nanášen na substrát z beryliové mědi CuBe. Bylo zkoumáno celkem pět typů vzorků, které se mezi sebou lišili dobou, po kterou na ně byl povlak nanášen. Jeden typ nanášení povlaku byl použit vždy u dvou vzorků, na kterých byla provedena dvě až tři měření.

Na vzorcích byl měřen koeficient tření v delším časovém úseku pomocí tribometru v prostředí atmosféry. Byla zvolena metoda „pin-on-plate“, kdy se vzorek vůči pinu pohyboval cyklickým pohybem po přímkové trajektorii. Data z jednotlivých měření byla statisticky zpracována a pro jednotlivé typy vzorků byly vytvořeny grafy závislosti koeficientu tření na počtu cyklů. Z dat bylo dále určeno, po jakém počtu cyklů koeficient tření dosáhne vyšší ustálené hodnoty. Tento okamžik znamenal, že je v kontaktu už jen materiál pinu a vzorku. Povlak byl již zcela opotřebovaný a tedy neúčinný.

Bylo zjištěno, že koeficient tření u vzorků začíná růst hned druhým cyklem. Růst je zprvu výraznější, poté zpomalí, až se nakonec hodnota tohoto koeficientu ustálí. Rozdíl u typů vzorků nastává převážně ve fázi zpomaleného růstu koeficientu tření. U vzorků, na které byl povlak nanášen déle je tato fáze delší a trvá vyšší počet cyklů, než koeficient dosáhne ustálené hodnoty. Pro nižší dobu nanášení povlaku mají první dva typy stejný počet cyklů do opotřebení povlaku a teprve s dalším prodlužováním doby nanášení počet cyklů do opotřebení roste.

Podmínky, které při experimentu byly nastaveny, byly adekvátní aplikaci u závitů šroubů. Zatěžovací síla 35 N, která byla při testování použita, vyvolávala tlak podobný tomu, jaký by na závitech šroubu mohl nastat v případě krajních podmínek. Tedy těsně před jeho úplným dotažením a v případě, že by byl šroub na hranici meze pevnosti. Z vyhodnocených vzorků lze tedy říct, že i povlak nanášený po dobu 9 s, by byl pro dotažení šroubu bez jeho zadření dostačující. Tyto výsledky lze použít pro porovnání s jinými kombinacemi materiálů a určit směr následujícího výzkumu. V tomto je prostor pro navazující práce.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KHONSARI, Michael M a BOOSER, E. Richard. *Applied Tribology*. 3rd edition. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated, 2017. ISBN 9781118637241. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781118700280>.
- [2] ADACHI, K a KATO, K. In situ and on-demand lubrication by tribo-coating for space applications. Online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J, Journal of engineering tribology*. 2008, roč. 222, č. 8, s. 1031-1039. ISSN 1350-6501. Dostupné z: <https://doi.org/10.1243/13506501JET417>. [cit. 2024-01-23].
- [3] JONES, W R a JANSEN, M J. Tribology for space applications. Online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J, Journal of engineering tribology*. 2008, roč. 222, č. 8, s. 997-1004. ISSN 1350-6501. Dostupné z: <https://doi.org/10.1243/13506501JET305>. [cit. 2023-11-10].
- [4] ZARETSKY, E.V. Liquid lubrication in space. Online. *Tribology international*. 1990, roč. 23, č. 2, s. 75-93. ISSN 0301-679X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(90\)90041-M](https://doi.org/10.1016/0301-679X(90)90041-M). [cit. 2023-11-10].
- [5] MUKHTAR, Sheikh Haris; WANI, M.F.; SEHGAL, Rakesh a SHARMA, M.D. Nano-mechanical and nano-tribological characterisation of self-lubricating MoS₂ nano-structured coating for space applications. Online. *Tribology international*. 2023, roč. 178, s. 108017. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108017>. [cit. 2024-01-24].
- [6] JONES, W R a JANSEN, M J. *Lubrication for Space Applications*. 1. Glenn Research Center: CRC Press, 2006. ISBN 084932095X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781420003840>.
- [7] JONES, W R. Properties of Perfluoropolyethers for Space Applications. Online. In: . Headquarters, 1994. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19940033009>. [cit. 2024-01-24].

- [8] ZOLPER, Thomas; LI, Zhong; CHEN, Changle; JUNGK, Manfred; MARKS, Tobin et al. Lubrication Properties of Polyalphaolefin and Polysiloxane Lubricants: Molecular Structure–Tribology Relationships. Online. *Tribology letters*. 2012, roč. 48, č. 3, s. 355-365. ISSN 1023-8883. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11249-012-0030-9>. [cit. 2024-02-04].
- [9] PETERANGELO, Stephen C.; GSCHWENDER, Lois; SNYDER JR, Carl E.; JONES JR, William R.; NGUYEN, Quynhgiao et al. Improved additives for multiply alkylated cyclopentane-based lubricants. Online. *Journal of synthetic lubrication*. 2008, roč. 25, č. 1, s. 31-41. ISSN 0265-6582. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/jsl.45>. [cit. 2024-02-04].
- [10] WOLFBERGER, Archim; ZEHL, Martin; HAUSBERGER, Andreas; TOCKNER, Martin; SCHLÖGL, Sandra et al. Effect of Accelerated Aging on the Chemical Signature and Performance of a Multiply-Alkylated Cyclopentane (MAC) Lubricant for Space Applications. Online. *Tribology letters*. 2021, roč. 69, č. 1. ISSN 1023-8883. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01372-z>. [cit. 2024-02-04].
- [11] ROSENKRANZ, Andreas; COSTA, Henara L.; BAYKARA, Mehmet Z. a MARTINI, Ashlie. Synergetic effects of surface texturing and solid lubricants to tailor friction and wear – A review. Online. *Tribology international*. 2021, roč. 155, s. 106792. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106792>. [cit. 2024-01-27].
- [12] KUMAR, Rahul; HUSSAINOVA, Irina; RAHMANI, Ramin a ANTONOV, Maksim. Solid Lubrication at High-Temperatures—A Review. Online. *Materials*. 2022, roč. 15, č. 5, s. 1695. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma15051695>. [cit. 2024-01-27].
- [13] DONNET, C. a ERDEMIR, Ali. Solid lubricant coatings: Recent developments and future trends. Online. *Tribology letters*. 2004, roč. 17, č. 3, s. 389-397. ISSN 1023-8883. Dostupné z: <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000044487.32514.1d>. [cit. 2024-01-28].
- [14] MUKHTAR, Sheikh Haris; GULZAR, Ahraf; SALEEM, Shahid; WANI, M.F.; SEHGAL, Rakesh et al. Advances in development of solid lubricating MoS₂ coatings for space applications: A review of modeling and experimental approaches. Online. *Tribology international*. 2024, roč. 192, s. 109194. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109194>. [cit. 2024-01-28].

- [15] BOWDEN, F.P. a TABOR, D. The lubrication by thin metallic films and the action of bearing metals. Online. *Journal of applied physics*. 1943, roč. 14, č. 3, s. 141-151. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.1714966>. [cit. 2024-01-27].
- [16] SARKAR, Moumita a MANDAL, Nilrudra. Solid lubricant materials for high temperature application: A review. Online. *Materials Today: Proceedings*. 2022, roč. 66, s. 3762-3768. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.030>. [cit. 2024-02-03].
- [17] BISWAS, S.K. a VIJAYAN, Kalyani. Friction and wear of PTFE — a review. Online. *Wear*. 1992, roč. 158, č. 1, s. 193-211. ISSN 0043-1648. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90039-B](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90039-B). [cit. 2024-01-28].
- [18] MCCOOK, N. L.; BURRIS, D. L.; BOURNE, G. R.; STEFFENS, J.; HANRAHAN, J. R. et al. Wear resistant solid lubricant coating made from PTFE and epoxy. Online. *Tribology letters*. 2005, roč. 18, č. 1, s. 119-124. ISSN 1023-8883. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11249-004-1766-7>. [cit. 2024-01-28].
- [19] BARRY, Peter R.; CHIU, Patrick Y.; PERRY, Scott S.; SAWYER, W. Gregory; SINNOTT, Susan B. et al. Effect of Temperature on the Friction and Wear of PTFE by Atomic-Level Simulation. Online. *Tribology letters*. 2015, roč. 58, č. 3, s. 1-13. ISSN 1023-8883. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0529-y>. [cit. 2024-01-28].
- [20] VAZIRISERESHK, Mohammad R.; MARTINI, Ashlie; STRUBBE, David A. a BAYKARA, Mehmet Z. Solid lubrication with MoS₂: A review. Online. *Lubricants*. 2019, roč. 7, č. 7, s. 57. ISSN 2075-4442. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/LUBRICANTS7070057>. [cit. 2024-01-28].
- [21] ROBERTSON, J. Diamond-like amorphous carbon. Online. *Materials science & engineering. R, Reports: a review journal*. 2002, roč. 37, č. 4, s. 129-281. ISSN 0927-796X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0). [cit. 2024-01-28].
- [22] SHI, Bang; WU, Yanxia; LIU, Ying; WANG, Limin; GAO, Jie et al. A review on diamond-like carbon-based films for space tribology. Online. *Materials Science and Technology*. 2022, roč. 38, č. 15, s. 1151-1167. ISSN 0267-0836. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2074124>. [cit. 2024-02-03].

- [23] LINCE, Jeffrey R. Effective application of solid lubricants in spacecraft mechanisms. Online. *Lubricants*. 2020, roč. 8, č. 7, s. 74. ISSN 2075-4442. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/LUBRICANTS8070074>. [cit. 2024-02-02].
- [24] MOSHKOVICH, A.; PERFILYEV, V.; YUTUJYAN, K. a RAPOPORT, L. Friction and wear of solid lubricant films deposited by different types of burnishing. Online. *Wear*. 2007, roč. 263, č. 7, s. 1324-1327. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.11.042>. [cit. 2024-02-03].
- [25] BAPTISTA, Andresa; SILVA, Francisco; PORTEIRO, Jacobo; MÍGUEZ, José a PINTO, Gustavo. Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. Online. *Coatings (Basel)*. 2018, roč. 8, č. 11. ISSN 2079-6412. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/COATINGS8110402>. [cit. 2024-02-04].
- [26] LINCE, Jeffrey R.; LOEWENTHAL, Stuart H. a CLARK, Charles S. Tribological and chemical effects of long term humid air exposure on sputter-deposited nanocomposite MoS₂ coatings. Online. *Wear*. 2019, roč. 432-433, s. 202935. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202935>. [cit. 2024-02-04].
- [27] , PETERS, M. a C. LEYENS. Aerospace and Space Materials. Online. *Materials Science and Engineering*. Dostupné z: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-36-05-03.pdf>. [cit. 2024-04-06].
- [28] GHIDINI, Tommaso. Materials for space exploration and settlement. Online. *Nature materials*. 2018, roč. 17, č. 10, s. 846-850. ISSN 1476-1122. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0184-4>. [cit. 2024-04-06].
- [29] EL-HAMEED, A. M. a ABDEL-AZIZ, Y. A. Aluminium Alloys in Space Applications: A Short Report. Online. *Akademia Baru*. 2020. Dostupné z: <https://www.akademiabaru.com/submit/index.php/araset/article/download/1956/2350/15291>. [cit. 2024-05-16].
- [30] WASSMER, William. *The Materials Used in Artificial Satellites and Space Structures*. Online. AZO Materials. 2015. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12034>. [cit. 2024-05-16].
- [31] *Titanium Alloys: Recent Progress in Design, Processing, Characterization, and Applications*. IntechOpen, 2023. ISBN 1803563710. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.100680>.

- [32] ANIL KUMAR, V.; GUPTA, R. K.; PRASAD, M. J. N. V. a NARAYANA MURTY, S. V. S. Recent advances in processing of titanium alloys and titanium aluminides for space applications: A review. Online. *Journal of materials research*. 2021, roč. 36, č. 3, s. 689-716. ISSN 0884-2914. Dostupné z: <https://doi.org/10.1557/s43578-021-00104-w>. [cit. 2024-04-06].
- [33] *Bruker.com*. Online. Dostupné z: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/test-and-measurement/tribometers-and-mechanical-testers/umt-tribolab.html>. [cit. 2024-05-13].
- [34] *Blue Scientific*. Online. Dostupné z: <https://blue-scientific.com/bruker-umt-tribolab/>. [cit. 2024-05-13].
- [35] *Geometrie závitů*. Online. Mikon-tools. Dostupné z: <https://www.mikon-tools.cz/geometrie-zavitu/>. [cit. 2024-05-23].
- [36] *Titanium Bolts*. Online. Lightning Bolt and Supply. Dostupné z: <https://lightningboltandsupply.com/titanium-2/bolts.html>. [cit. 2024-05-23].
- [37] *Matice M8 Titan*. Online. Killich. Dostupné z: https://eshop.killich.cz/eshop/matice-m8-titan-3-7035-presna-sestihranna-din-934_14010008.html. [cit. 2024-05-23].

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

3D	třídimenzionální
DLC	diamond-like carbon (diamant podobný uhlíku)
HST	Hubble Space Telescope (Hubbleův vesmírný dalekohled)
JWST	James Webb Space Telescope (Vesmírný dalekohled Jamese Webba)
MAC	mnohonásobně alkylované cyklopentany
MS	MicroSoft
PAO	polyalfaolefin
PEEK	polyetheretherketon
PFPE	perfluoropolyether
PTFE	polytetrafluoretylen
PVD	Physical Vapour Deposition (fyzikální depozice z plynné fáze)
a	polovina kontaktní oblasti při experimentu [m]
A_s	výpočtový průřez šroubu [m ²]
D_1	vnitřní průměr závitu matice [m]
d_2	střední průměr závitu šroubu [m]
d_3	průměr jádra šroubu [m]
F	zatěžovací síla při experimentu [N]
F_o	maximální osová síla u šroubu [N]
h	výška matice [m]
P	stoupání závitu [m]
p_e	tlak v kontaktu při experimentu [Pa]
p_s	tlak na závitu šroubu [Pa]
R_m	mez pevnosti titanu [Pa]
S_p	plocha závitu v kontaktu [m ²]
z	počet závitů matice [-]

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Absolutní tlak jako funkce nadmořské výšky	15
Obr. 2-2	Koeficient tření v závislosti na teplotě u vybraných pevných maziv	19
Obr. 2-3	Difuzní mechanismus mazání pevných látek na bázi měkkých kovů.....	20
Obr. 2-4	Krystalové struktury a) MoS ₂ nebo WS ₂ , b) hBN, c) grafenu a grafitu.....	23
Obr. 2-5	Schématický průřez substrátu s leštěným povlakem MoS ₂	24
Obr. 2-6	Schématický průřez substrátu s lepeným povlakem MoS ₂ po aplikaci maziva a po leštění/zaběhnutí.....	25
Obr. 2-7	Schématické znázornění PVD metody a) napařování b) napařování	26
Obr. 2-8	Graf pevnosti a hustoty konstrukčních materiálů	27
Obr. 2-9	Graf specifické pevnosti a teploty pro konstrukční materiály	28
Obr. 4-1	Tribometr Bruker UMT TriboLab	31
Obr. 4-2	Směr pohybu vzorku vůči pinu.....	33
Obr. 4-3	Schéma postupu měření.....	34
Obr. 4-4	Naměřená data u vzorku D9.....	35
Obr. 4-5	Znázornění metody pro určení počtu cyklů do opotřebení povlaku.....	36
Obr. 5-1	Průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatná odchylka pro typ vzorku X9	37
Obr. 5-2	Průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatná odchylka pro typ vzorku X12	38
Obr. 5-3	Průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatná odchylka pro typ vzorku X18	39
Obr. 5-4	Průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatná odchylka pro typ vzorku X24	40
Obr. 5-5	Průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatná odchylka pro typ vzorku X30	41
Obr. 5-6	Porovnání počtu cyklů do opotřebení povlaku pro jednotlivé typy vzorků.....	42
Obr. 5-7	Vzorek D6 po vykonání testu.....	42

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1	Fyzikální vlastnosti vybraných PFPE kapalných maziv	17
Tab. 4-1	Základní podmínky nanášení povlaků	32
Tab. 4-2	Doba nanášení povlaků na vzorky a jejich označení	32
Tab. 4-3	Podmínky experimentu	33
Tab. 4-4	Počet měření na jednotlivých vzorcích	34
Tab. 5-1	Vlastnosti a rozměry šroubu a matice M8 z titanu	43