



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

POKROČILÉ ABRAZIVZDORNÉ POVLAKY PRO VAKUOVÉ SYSTÉMY

ADVANCED ABRASION RESISTANT COATINGS FOR VACUUM SYSTEMS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. EDUARD HÉGR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JIŘÍ ŠVEJCAR, CSc.

BRNO 2021

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na výzkum pokročilých povrchových úprav, které mají přímý vliv na zvyšování užitečných vlastností vakuových systémů (např. snížení opotřebení jednotlivých součástí vývěvy, netěčnost povrchu vůči agresivním plynům/molekulám), ale taktéž mohou sekundárně ovlivnit i jiné významné vlastnosti vývěvy (např. snížení teploty vývěvy). Studované vrstvy/povlaky jsou rozdělené do tří oblastí (i) tvrdá anodická vrstva, (ii) tvrdá anodická vrstva s PTFE povlakem a (iii) DLC povlak. Výchozím materiálem (substrátem) je slitina na bázi hliníku, která se pro tento účel využívá. V rámci předložené práce byl prokázán vliv na zvýšení materiálově-fyzikálních vlastností jako např. zvýšení tvrdosti a ořezuvzdornosti povrchu po aplikaci anodické vrstvy s PTFE povlakem. Teoretická část popisuje základní principy přípravy abrazivzdorných vrstev/povlaků a zároveň seznamuje s fyzikou vakua a základními principy se získáváním vakua, které podávají ucelený obraz o významnosti věnování se pokročilým povlakům. Experimentální část je rozdělena na zhodnocení mikrostruktury materiálu vzorků a druhá část je zaměřená experimenty potřebné k získání/proměření potřebných vlastností, které mohou být dále využity pro predikci poškozování vrstev/povlaků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pokročilé abrazivzdorné povlaky, anodická vrstva s PTFE, vakuum, tvrdost, součinitel opotřebení.

ABSTRACT

The thesis is focused on research of advanced surface resistant coatings which have a direct effect on increasing of functional properties of vacuum systems (eg reducing wear of individual pump components, surface inertia to aggressive gases/molecules). But they can also secondarily affect other important pump properties (eg reducing pump temperature). The studied layers/coatings are divided into three areas (i) hard anodic layer, (ii) hard anodic layer with PTFE coating and (iii) DLC coating. The initial material (substrate) is an aluminum-based alloy, which was used for this purpose. In presented thesis, the influence on increase of material and physical properties was demonstrated, such as the increase of hardness and abrasion resistance of the surface after the application of the anodic layer with PTFE coating. The theoretical part of thesis describes the basic principles of preparation of abrasion-resistant layers/coatings and also introduces the vacuum physics. It shows the basic principles of obtaining vacuum, which give a comprehensive picture of the importance of working with advanced coatings. The experimental part is divided into the evaluation of the microstructure of the sample material and the second part is focused on the experiments needed to obtain/measure the required properties, which can be further used to predict damage of the layers/coatings.

KEY WORDS

Advanced abrasion resistant coatings, anodic layer with PTFE, vacuum, hardness, wear coefficient.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HÉGR, E. Pokročilé abrazivzdorné povlaky pro vakuové systémy. Teze disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2021. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Jiří Švejcar, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma Pokročilé abrazivzdorné povlaky pro vakuové systémy vypracoval samostatně, a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Disertační práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího práce a děkana FSI VUT v Brně.

Datum:

.....

Eduard Hégr

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě velmi poděkoval svému školiteli prof. Ing. Jiřímu Švejcarovi, CSc., a taktéž svému školiteli specialistovi doc. Ing. Ladislavovi Čelkovi, Ph.D., bez nichž by tato práce nevznikla. Především bych jim chtěl poděkovat za to, že tu byli kdykoli jsem potřeboval, dále za jejich cenné rady a zejména za velkou trpělivost.

Dále bych rád poděkoval zaměstnancům ÚMVI FSI VUT, CEITEC VUT a UO v Brně za jejich vstřícný přístup a pomoc při řešení experimentální části disertační práce. Jmenovitě bych chtěl poděkovat Ing. Lence Klakurkové, Ph.D., Ing. Martinu Julišovi, Ph.D. a Ing. Pavlu Gejdošovi, Ph.D. za jejich velkou podporu.

Ten největší dík patří mé rodině, manželce a mým rodičům, kteří mě podporovali a byli mou největší oporou za všech situací po celou dobu nejen během doby vysokoškolského studia.

OBSAH

OBSAH.....	5
1 ÚVOD	1
2 VAKUOVÉ SYSTÉMY/VÝVĚVY	1
2.1 Vývěvy.....	2
2.1.1 Vývěvy, rozdělení vývěv	2
2.1.2 Přehled oblasti použití vývěv	2
2.1.3 Základní princip vývěvy určené pro výzkum	3
2.1.4 Základní požadavky kladené na vakuový systém/vývěvu.....	4
2.2 Slitiny hliníku a možnosti jejich povrchových úprav	6
2.3 Předúprava povrchu a základní rozdělení povlaků.....	6
2.3.1 Anorganické povlaky.....	7
2.3.1.1 Anodická oxidace	7
2.3.1.2 DLC	7
2.4 Organické povlaky.....	8
2.4.1 Teflon® (PTFE).....	8
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	9
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DISERTAČNÍ PRÁCE	9
4.1 Experimentální materiál	9
4.1.1 Výchozí materiál (substrát) a metody přípravy vzorků	9
4.1.2 Výchozí materiál s anodizovanou vrstvou.....	10
4.1.3 Výchozí materiál s DLC povlakem	10
4.1.4 Výchozí materiál s anodizovanou vrstvou a PTFE	11
4.2 Metody testování, analýzy.....	11
4.3 Výsledky experimentu a jejich diskuze.....	13
4.3.1 Dílec s anodizovanou vrstvou.....	13
4.3.1.1 Analýza mikrostruktury	13
4.3.1.2 Analýza chemického složení částic	14
4.3.1.3 Analýza tloušťky vrstvy	15
4.3.1.4 Analýza povrchu vrstvy.....	15
4.3.1.5 Měření drsnosti	16
4.3.1.6 Měření tvrdosti.....	17
4.3.1.7 Dílčí závěry.....	17
4.3.2 Experimentální vzorky s anodizovanou vrstvou a anodizovanou vrstvou s PTFE	18
4.3.2.1 Analýza mikrostruktury	18
4.3.2.2 Analýza chemického složení částic.....	20

4.3.2.3	Analýza tloušťky vrstvy a povlaku	20
4.3.2.4	Analýza povrchu vrstvy	20
4.3.2.5	Měření drsnosti	20
4.3.2.6	Měření tvrdosti.....	21
4.3.2.7	Dílčí závěry	22
4.3.3	Experimentální vzorky s DLC povlakem	23
4.3.3.1	Analýza mikrostruktury	23
4.3.3.2	Analýza chemického složení částic.....	23
4.3.3.3	Analýza tloušťky povlaku.....	25
4.3.3.4	Analýza povrchu povlaku	25
4.3.3.5	Měření drsnosti	25
4.3.3.6	Měření tvrdosti.....	26
4.3.3.7	Dílčí závěry.....	26
4.3.4	Vrypový test (SCRATCH TEST).....	27
4.3.4.1	Dílčí závěry	28
4.3.5	Tribologické chování vrstev a povlaků.....	29
4.3.5.1	„Ball-on-Disc / Ball-on-Flat“ test	29
4.3.5.2	Výsledky testu metody „Ball-on-Disc / Ball-on-Flat“	29
4.3.5.3	Dílčí závěry	30
4.3.6	Numerický model poškozování vrstev a povlaků a ekonomická rozvaha.....	31
4.3.6.1	Dílčí závěry.....	36
5	ZÁVĚR	36
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	38
7	SEZNAM AKTIVIT AUTORA	41
7.1	Seznam publikací.....	41
7.2	Projekty.....	41
8	CURRICULUM VITAE.....	42

1 ÚVOD

V posledních letech zažívá vakuum obrovský „BOOM“ a je všude kolem nás, aniž bychom si to uvědomovali. Denně je využíváno ve strojírenství, v automobilovém průmyslu (např. k uchopování skel), snižování energetických požadavků a zvyšování kvality materiálů (hutní průmysl), v technologiích výroby elektrotechnických součástek (elektrotechnický průmysl, mikroprocesory,...), při analýzách či bádání nad strukturami materiálů (vědecké odvětví) a dokonce i při pití ranního šálku kávy (potravinářský průmysl), kdy je pomletá káva vakuově balena, aby si déle uchovala svou vůni a chuť, či příprava instantní kávy tzv. vymrazováním. Taktéž i člověk sám o sobě vytváří vakuum (dýcháním), aniž si to uvědomuje. Toto je jen nepatrný výčet použití vakua, ale dostatečný na uvědomění si, že vakuum je opravdu všude kolem nás. Vakuum lze rozdělit na umělé (člověkem vytvořené) a přirozené (vesmír, lidské dýchání).

Co je vlastně vakuum? Vakuum pochází z latinského slova vacuus, nebo-li prázdný. V teoretické fyzice je definované vakuum jako stav systému s nejnižší možnou energií. Ideálním případem vakua je stav, kdy se v daném prostoru nevyskytuje žádná částice. Jedná se o část prostoru, který neobsahuje hmotu, ale maximálně může obsahovat elektrické a magnetické pole [1,2].

V praxi se používá dvou typů definice:

1. Dle německé normy DIN 28400, která vakuum charakterizuje takto: „Vakuum je stav plynu, který má menší hustotu než atmosféra na zemském povrchu“.
2. Podobnou, nikoli však stejnou definici použila americká vakuová společnost v roce 1958. Vakuum je stav plynu, jehož tlak je nižší než tlak atmosférický ($1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ Torr}$). Tato definice je nejhojněji používána ve světě vakuové techniky, neboť umožňuje podrobněji rozdělit vakuum.

Díky výše zmíněné definici lze rozdělit vakuum na:

1. Nízké vakuum (angl. Low Vacuum): $10^5 \text{ Pa} - 3,3 \cdot 10^3 \text{ Pa}$,
2. střední vakuum (angl. Medium Vacuum): $3,3 \cdot 10^3 \text{ Pa} - 10^{-1} \text{ Pa}$,
3. vysoké vakuum (angl. High Vacuum): $10^{-1} \text{ Pa} - 10^{-7} \text{ Pa}$,
4. ultra vysoké vakuum (angl. Ultra High Vacuum): $10^{-7} \text{ Pa} - 10^{-10} \text{ Pa}$,
5. extrémní vakuum (Extreme High Vacuum): $<10^{-10} \text{ Pa}$.

Současné výrobní společnosti, využívající ke své práci vakuum či aplikují vakuové systémy (vývěvy) jako součást svých přístrojů (např. v hmotnostních spektrometrech) a přicházejí postupně s požadavky na netečnost materiálu vůči agresivním plynům/molekulám, na snižování energetické spotřeby, teploty, vibrací, zvyšování životnosti, čerpacích rychlostí atd. u jimi využívaných vývěv. Tato práce se zaměřuje na některé z těchto požadavků (resp. přání zákazníků), obzvláště pak na zvyšování životnosti.

2 VAKUOVÉ SYSTÉMY/VÝVĚVY

Tato kapitola je zaměřena na uvedení do problematiky vakuových systémů, porozumění základních principů získávání vakua. V neposlední řadě kapitola seznamuje s vývěvou, zejména jejími částmi. Díky tomuto porozumění nejen z konstrukčního hlediska, ale i uvědomění si veškerých souvislostí, které jsou s vývěvou spojeny. Tzn. v jakém prostředí bude pracovat, jaké

typy plynů bude čerpat, až po další funkční požadavky/podmínky (od interních až po požadavky ze strany trhu). Díky tomuto porozumění se naskytl vědeckotechnický přístup z hlediska materiálových věd a souvisejících/navazujících vědních oborů.

2.1 Vývěvy

2.1.1 Vývěvy, rozdělení vývěv

Vývěvy mohou být rozlišeny dle způsobu, jakým dosahují vakua (snížení tlaku). Jedná se o vývěvy transportní a adsorpční. Toto základní rozdělení již vypovídá samo o sobě o způsobu práce vývěv, jakým jsou schopny dosáhnout vakua. Transportní vývěvy odčerpávají z evakuovaného prostoru molekuly plynu, které procházejí vývěvou, zatímco vývěvy adsorpční tyto molekuly zachycují uvnitř vývěvy. Další nedílnou součástí jejich funkce je to, že vývěvy transportní dokáží pracovat kontinuálně, kdežto adsorpční mohou pracovat pouze v cyklech. Transportní vývěvy dále dělíme na mechanické a hybnostní. Mechanické vývěvy dosahují snižování tlaku cyklickou změnou objemu ve vývěvě. Hybnostní vývěvy předávají molekulám čerpaného plynu rychlostní impuls ve směru čerpání plynu. Přehled typů vývěv ukazuje tabulka níže. Neobsahuje všechny typy vývěv, které se v současnosti vyrábí, ale slouží alespoň jako základní přehled.

Vývěvy / Vacuum pumps	Transportní / Gas transfer pump	Mechanické / Positive displacement pump	Pístové / Reciprocating pump	Membránová (Diaphragm pump),...	
			Rotační / Rotary displacement pump	Olejem těsněné / Oil sealed	Rotační olejová (Rotary oil sealed pump).
				Suché / Dry	Rootsova (Roots pump), Spirálová (Scroll pump),...
		Hybnostní / Kinetic pump	Vodní (Liquid ring pump), Difuzní (Diffusion pump), Molekulární / Turbomolekulární (Molecular / Turbomolecular pump), Iontová (Ion pump),...		
	Adsorpční / Entrapment pump	Kryokondenzační (Condensation freezing pump), Kryosorpční (Cryopump),...			

Tabulka 1: Rozdělení vývěv [3].

Doplňujícím rozdělením k výše uvedené tabulce (mechanického principu) je užití vývěv dle rozsahu tlaku, ve kterém jsou schopny pracovat (resp. jejich mezního tlaku, kterého mohou dosáhnout).

2.1.2 Přehled oblastí použití vývěv

Využití vývěv může být shrnuto do dvou hlavních kategorií (průmyslová, vědecká), které budou podrobněji rozděleny dle požadované úrovně vakua.

a) Průmyslové využití:

1. Hrubé vakuum (blízké atmosférickému tlaku až k 1 mbar):

- Mechanická manipulace, vakuové balení a tvarování, odplyňování, odplyňování olejů, filtrace, impregnace elektrických součástek, výroba polovodičových součástek.

2. Střední až vysoké vakuum (kolem 10^{-4} mbar):

- Vymrazování, metalurgické procesy (tavení, odlévání, pájení, sintrování,...), chemické procesy (vakuová destilace, vymrazování), výroba polovodičových součástek.

2. Vysoké vakuum (kolem 10^{-6} mbar):

- Kryogenní a elektrická izolace, žárovky, CRT televize, rentgenové zářivky, dekorativní, optické a elektrické pokovování, hmotnostní spektrometry.

a) Vědecké využití:

1. Vysoké vakuum (kolem 10^{-6} mbar):

- Elektronové mikroskopy, analytické hmotnostní spektrometry, urychlovače částic, vesmírné simulátory.

2. Ultra vysoké vakuum (kolem 10^{-9} mbar):

- Jaderné experimenty, FEM a FIM mikroskopy, skladovací prstence pro urychlovače částic, analýza povrchů, specializované vesmírné experimenty.

2.1.3 Základní princip vývěvy určené pro výzkum

Jelikož hmotnostní spektrometry využívají především spirálových suchých vývěv (důvody využití jsou uvedeny v textu níže), bylo rozhodnuto, provést výzkum na tomto typu vývěvy.

Spirálová vývěva

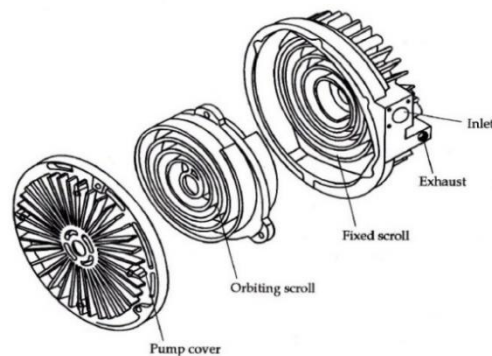
Princip spirálové vývěvy byl popsán již v roce 1905 Francouzem Leonem Creuxem, ale nikdy nebyla spuštěna sériová výroba, neboť technologie té doby neumožňovala efektivně vyrábět takto složitý tvar (viz obrázky níže). A to i přes fakt, že principiálně je vývěva velmi jednoduchá (mechanismus je složen ze dvou protikusů - statoru a rotoru). Dle tvaru mechanismu se taktéž někdy přezdívá jako „šneková“ vývěva, neboť připomíná šnečí ulitu. Sériová výroba této vývěvy začala až v 70. letech, kdy se výrazně zvýšila výroba kompresorů na hélium a ledniček, a zejména technologie obrábění umožnila vyrábět v požadované přesnosti (v desítkách mikronů). Masové rozšíření přesného obrábění taktéž snížilo finanční náročnost výroby.

Tento typ vývěvy skrývá v sobě řadu výhod, díky kterým je velmi žádaná. Výčet bude psán od nejvýznamnějších až po „méně“ významné. Jedná se o suchou vývěvu, což přináší největší benefit pro vědecké aplikace či průmysl, kde je požadována vysoká čistota v čerpaném prostoru (resp. prostor nesmí být kontaminován olejovými částicemi). Těsní na základě malých vůlí mezi žebry (ve vertikální poloze) – za chodu je vůle kolem 25 mikronů. V horizontální poloze těsnění zprostředkovává tzv. „TIP SEAL“ (těsnění), obrázek 1. Čerpací rychlost vývěvy se pohybuje v rozmezí (5 – 50) m³/h, dosažené vakuum je kolem 10^{-3} mbar, stlačování plynu probíhá kontinuálně (tj. ne v cyklech/fázích jako u olejových vývěv) a v neposlední řadě jsou to malé rozměry.

Obrázek 2 znázorňuje mechanismus a tvar ústrojí. Jedná se o zdvojený mechanismus (o stejných parametrech) tzn., že vývěva obsahuje dva pracovní prostory pro zvýšení (zdvojnásobení) rychlosti čerpání. V současné době se již tento typ nepoužívá (prodrazuje výrobu a je extrémně citlivý na technologii výroby a rozměry). Obrázek 3 zobrazuje, jak může vypadat konstrukce uplatněná v reálné praxi.



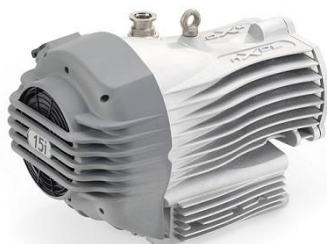
Obrázek 1: TIP SEAL.



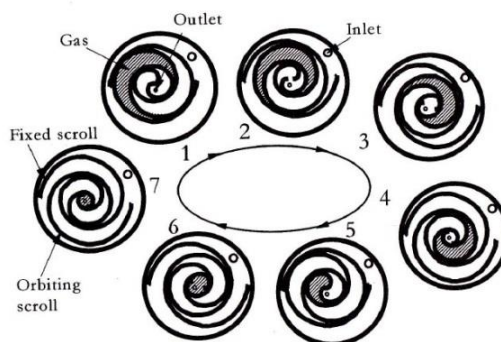
Obrázek 2: Schéma ústrojí [3].

Vysvětlivky:

Pump cover – kryt vývěvy, *orbiting scroll* – rotující spirála/rotor, *fixed scroll* – pevná spirála/stator, *exhaust* – výfuk, *inlet* – vstup.



Obrázek 3: Komerční vzhled vývěvy.



Obrázek 4: Princip funkce vývěvy [3].

Vysvětlivky:

Gas – plyn, *outlet* – odvod, *inlet* – vstup, *orbiting scroll* – rotující spirála/rotor, *fixed scroll* – pevná spirála/stator.

Obrázek 4 detailně popisuje princip funkce vývěvy. Plyn je nasán (krok 1) a postupuje (resp. je kontinuálně stlačován) z vnější strany vývěvy až do jejího středu (kroky 2 - 6). V kroku 7 je plyn stlačen na tlak vyšší než atmosférický a je vypuštěn do atmosféry.

2.1.4 Základní požadavky kladené na vakuový systém/vývěvu

Jelikož značná část trhu je zaměřena na vývoj a výrobu hmotnostních spektrometrů, je třeba, aby vývěva splňovala specifická kritéria:

1. Požadavky na vývěvu spojené s procesem a funkcí spektrometru:
 - a. Musí se jednat o suchou vývěvu. Nejvhodnější typ - spirálová vývěva.
 - i. Dlouhodobě je tento typ zákazníky vyhledáván.

b. Vývěva bude pracovat pouze v určitém (velmi úzkém rozmezí tlaku), ale kontinuálně.

i. Zákazník dodal pracovní režim (cyklus) vývěvy.

c. Minimální vibrace vývěvy, aby byla minimalizována nutnost dodatečného odstínění vývěvy vůči zařízení – vývěva je umístěna uvnitř přístroje.

2. Vývěva (technické požadavky):

a. Zvýšení servisního intervalu vývěvy (nejlépe na dvojnásobek).

b. Stejná čerpací rychlost, případně lepší (tzn. 35m³/hod či vyšší).

c. Vývěva musí být inertní vůči agresivním plynům/molekulám.

d. Udržení kompaktních rozměrů.

Na základě zákaznických požadavků, interní analýzy současného stavu vývoje spirálových vývěv a požadavku/omezení na ponechání typu konstrukce a všeobecně co nejmenších zásahů do vývěvy, byla sestavena základní rozhodovací tabulka (tabulka 2), ze které vyplývá, které směry vývoje připadají v úvahu, a které je třeba podrobit detailní analýze.

Díly	Rotor a stator (spirála)	Povlaky	Anorganické	Anodizovaná vrstva
				DLC
				Anodizovaná vrstva + DLC
				Anodizovaná vrstva + Teflon®
			Organické	Teflon®
		Anodizovaná vrstva + Teflon		
		Materiál (hliníková slitina)	Současný	
		Nový		
	Těsnění (TIP SEAL)	FTL AVALON 57 Moldflon		
Konstrukce	MPP Změna konstrukce či tvaru rotoru/statoru (nelze aplikovat).			
Jiné	Kombinace výše zmíněných.			

Tabulka 2: Rozhodovací tabulka.

Vysvětlivky:

DLC: Diamond like Carbon.

Teflon®: Obchodní značka pro PTFE.

FTL: Společnost vyrábějící současné těsnění pro standardní vývěvy (spirálové), termoplast s nízkým podílem teflonu.

AVALON 57: Termoplast s vyšším podílem teflonu.

Moldflon: Nový typ termoplastu s unikátními fyz.-mechanickými vlastnostmi a nejvyšším možným podílem teflonu.

MPP: Multi-pitch points – software pro výpočet počtu a místa uchycení těsnění.

V tabulce je zahrnuta i konstrukce, ale pouze změna umístění a počet uchycení těsnění, které bylo povoleno, aby bylo docíleno rovnoměrného opotřebení těsnění a přitlačná síla působila taktéž rovnoměrně po celém těsnění (tj. nedocházelo k netěsnostem systému).

Dále bylo upuštěno od změny samotného materiálu, neboť by byly nároky na délku testování enormně zvýšeny (v řádu měsíců až roků), což bylo nepřípustné a zároveň finančně náročné, neboť by se musely dotčené produktové řady, technologie revalidovat.

V době konečného testování vývěv nebyly dodány výrobcem Moldflonu testovací vzorky, kvůli čemuž bylo testování této varianty pozastaveno a upuštěno od ní.

Zaměření se na povrchové úpravy bylo jediným východiskem, které vzešlo z požadavku zákazníka a cíle firmy (z hlediska technického, technologického, časového a zejména finančního).

2.2 Slitiny hliníku a možnosti jejich povrchových úprav

Slitiny na bázi hliníku jsou klíčovým materiálem pro výrobu spirálových vývěv. Je to dáno nejen historickým vývojem, jakož i know-how společnosti, ale i fakty, kdy pro tento typ materiálu a vývěv jsou určeny separátní výrobní budovy, speciální výrobní, skladovací technologie až po v neposlední řadě samotné vlastnosti materiálu a jeho příznivá cena.

V našem případě se bude jednat o tvářené slitiny hliníku řady 6000 (viz tabulka 3).

Tvářené slitiny EN AW-XXXX	Slitina Al a hlavní legující prvek
1000	Al minimálně 99,0 hm.% a více
2000	slitiny AlCu
3000	slitiny AlMn
4000	slitiny AlSi
5000	slitiny AlMg
6000	slitiny AlMgSi
7000	slitiny AlZn
8000	slitiny Al s různými prvky

Tabulka 3: Označení hliníku a jeho slitin dle ČSN EN [4].

Slitiny Al – Mg – Si [4, 5] se řadí mezi slitiny vytvrditelné, charakteristické svou nižší pevností, vyšší korozní odolností a dobrou houževnatostí. Výslednou pevnost ovlivňuje množství intermetalické fáze Mg_2Si , díky které jsou tyto slitiny tepelně zpracovatelné. Koncentrace hlavních přísad Mg a Si se pohybují do 1 hm.%. V těchto slitinách jsou přípustné i další přísady na bázi Cu a Mn. Typické využití nachází tyto slitiny v oblasti chemicky odolných a středně mechanicky namáhaných konstrukcích v potravinářském nebo dopravním průmyslu.

2.3 Předúprava povrchu a základní rozdělení povlaků

Nedílnou součástí povrchové úpravy je samotná předpříprava (úprava) povrchu dílce, což významně zvyšuje přilnavost konečných povlaků. Úprava povrchu se provádí dvěma způsoby. Buď je povrch opracován mechanicky, či se používá chemická úprava. V řadě případů se tyto dva způsoby kombinují. Např. nejprve se mechanicky opracují (broušením, leštěním,...), a poté se chemicky očistí (odmaštění, moření, chemické leštění,...).

Povlaky rozdělujeme do tří skupin, dle toho, na jaké bázi jsou založeny:

1. Anorganické,
2. organické,
3. kovové.

2.3.1 Anorganické povlaky

Tyto typy povlaků chrání základní povrch bariérovým způsobem, případně změnou korozní odolnosti. Vazby a vlastnosti povlaků anorganických povlaků se odvíjí od způsobu jejich vytváření.

Pro povrchovou úpravu hliníkových slitin (v průmyslových podmínkách) lze v současnosti použít pouze dvě metody. Jedná se o anodickou oxidaci hliníku a DLC povlakování.

2.3.1.1 Anodická oxidace

Anodická oxidace je detailně popsána (princip, technologie a další) v literatuře [4], která je často nazývána českým průmyslovým odvětvím jako „Bible anodizování“.

Anodickou oxidací je míněn proces povrchové úpravy hliníku a jeho slitin, která využívá přirozenou náchylnost materiálu k oxidaci. Během anodizace dochází k tvorbě oxidu hlinitého (Al_2O_3), který může dosahovat tloušťky až 150 μm a vrstva má zvýšenou korozivzdornost, otěruvzdornost.

V podrobném zkoumání bude zacíleno na TYP III (tedy tvrdou anodizaci) [4], využívající technologii GS, neboť se jedná o nejrozšířenější metodu používanou v praxi.

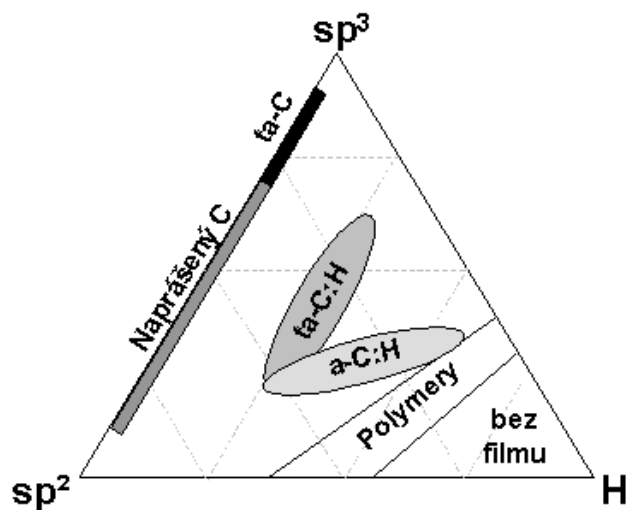
2.3.1.2 DLC

Označení DLC (z anglické zkratky „diamantu podobné vrstvy“) se v současné době používá pro pojmenování metastabilního stavu amorfního uhlíku obsahujícího významný podíl sp^3 vazeb. Tyto vrstvy obvykle vykazují velice zajímavé mechanické vlastnosti, jako velkou tvrdost, chemickou netečnost, průsvitnost a výborné tribologické vlastnosti. Proto nacházejí široké uplatnění v průmyslu jako ochranné povlaky, v automobilovém průmyslu, medicíně (povlaky na kloubní náhrady) i v mikroelektronice.

DLC povlaky se vyznačují vysokou tvrdostí (přes 70 GPa), vykazují chemickou inertnost a zejména mají velmi dobré tribologické vlastnosti (nízký součinitel tření). Tyto fyzikální vlastnosti jsou hojně využívány v oblasti úspory energií, taktéž v aplikacích, kde je potřeba co nejnižšího opotřebení. Existuje velké množství DLC povlaků, které se hodí pro různé typy aplikací a zejména jsou určeny taktéž způsobem (technologii) přípravy.

DLC povlaky jsou ze všeobecného hlediska tenké vrstvy tvořené amorfní strukturou, jejíž největší část se skládá z grafitického uhlíku, diamantového uhlíku a z vodíku v různých poměrech, v závislosti na daném procesu. Obrázek 5 znázorňuje ternární fázový diagram vrstev DLC. Níže uvedený diagram je často používán pro znázornění širokého spektra složení DLC vrstev [6]. V neposlední řadě znázorňuje hlavní skupiny DLC povlaků, které by se mohly vyskytovat, v závislosti na rozdělení dle obsahu vodíku a podle vazeb uhlíkových atomů. Bod sp^2 odpovídá grafitovému typu vazby a bod sp^3 odpovídá diamantovému typu vazby. Zjednodušeně může být řečeno, že tenká amorfní uhlíková vrstva je tvořena nanokompozitem grafitu, diamantu a uhlovodíkových polymerů. Nastavením odlišných parametrů (různých poměrů) může být dosaženo různorodých mechanických a chemických vlastností. Změnou poměrů jednotlivých složek zároveň ovlivňujeme dosažené hodnoty Youngova modulu, tvrdosti, životnosti [7], lomové houževnatosti, součinitele tření (resp. různé tribologické vlastnosti [8 –

11]), chemické inertnosti atd. DLC vrstvy/povlaky jsou získávány různými technologiemi (procesy) [12, 13]. Způsob užití technologie ovlivňuje konečné vlastnosti povlaků. V detailním zkoumání bude zaměřeno na DLC v oblasti a-C:H, pomocí fyzikální depozice (PVD – Physical Vapour Deposition [14]).



Obrázek 5: Ternární fázový diagram povlaků DLC [15].

2.4 Organické povlaky

2.4.1 Teflon® (PTFE)

Teflon® neboli PTFE (celým názvem polytetrafluorethylen) se řadí mezi tzv. termoplasty kategorie I (polyolefiny a fluoroplasty). Tyto termoplasty jsou podskupinou patřící v chemickém světě do polymerů.

Polymer je látka tvořená makromolekulami, ve kterých se opakují atomy nebo skupiny atomů (tzv. konstituční jednotky) navzájem spojených v tak velkém počtu, že existuje řada vlastností, které se znatelně nezmění přidáním nebo odstraněním jedné nebo několika konstitučních jednotek [16].

Polymery mohou být rozděleny na základě jejich mechanických vlastností do dvou skupin:

1. Plasty.
2. Elastomery.

Plasty jsou za normální teploty tvrdé materiály, které je možné za zvýšených teplot převést do plastického stavu, díky kterému je možné definovat jejich tvar. Mají-li plasty lineární nebo větvenou strukturu, lze je do plastického stavu (taveniny) převádět opakovaně. Díky tomuto jevu je nazýváme termoplasty. Sesíťované plasty jsou nazývány reaktoplasty. Reaktoplasty ovšem není možné na rozdíl od termoplastů převést do taveniny, a proto konečný tvar výrobku musí být dán před proběhnutím polymerační reakce [16]. V podrobném zkoumání bude zacíleno na tzv. termoplasty rozdělených dle monomerů [17] spadající do skupiny fluoroplastů. Zejména se jedná o PTFE (Teflon®), neboť jednoznačným přínosem PTFE jsou jeho hydrofóbní vlastnosti a výborné tribologické vlastnosti. Ve spojení s dostupností technologie a příznivou cenou je PTFE velmi slibným povlakem, obzvláště ve spojení s anodizovanou vrstvou, neboť ta mu dodává potřebnou tvrdost.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Globálním cílem disertační práce je výzkum pokročilých povrchových úprav, které mají přímý vliv na zvyšování užitných vlastností vakuových systémů (např. snížení opotřebení jednotlivých součástí vývěvy, netečnost povrchu vůči agresivním plynům/molekulám), ale taktéž mohou sekundárně ovlivnit i jiné významné vlastnosti vývěvy (např. snížení teploty vývěvy). Tyto pokročilé povrchové úpravy budou aplikovány na substrát (základní materiál) ze slitiny hliníku, z něhož jsou tyto typy vývěv vyráběny.

Výchozím materiálem k realizaci experimentů, bude použita slitina na bázi hliníku (EN AW-6082), která se pro tento typ vývěv výhradně používá. V rámci řešení disertační práce budou studovány vrstvy a povlaky po tvrdé anodizaci, teflonování a povlaky na bázi DLC. Tyto vrstvy a povlaky budou připravovány jak na speciálních vzorcích (určených pro tribologické testy), tak i reálných dílcích. Výzkum pokročilých povrchových úprav bude zaměřen na:

- Navrhnutí optimálního řešení pro zvýšení užitných vlastností vývěv a v případě podstatného zvýšení tyto výsledky využít v reálných aplikacích.
- Zohlednění požadavků a trendů průmyslové oblasti.
- Zohlednění ekonomicky přijatelných materiálů či povrchových úprav.
- Tribologické chování vrstev či povlaků za rozdílných podmínek zatěžování.
- Hodnocení mikrostruktury a poškození povlaků s využitím topografických a metalografických analýz.
- Numerický model poškození vrstev či povlaků.
- Vyhodnocení rozdílných vrstev či povlaků.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DISERTAČNÍ PRÁCE

4.1 Experimentální materiál

4.1.1 Výchozí materiál (substrát) a metody přípravy vzorků

Výchozí materiál použitý na výrobu vzorků, pro základní materiálovou analýzu (vzorky o průměru 20 mm, viz obrázek 17) a vzorky určené pro tribologické experimenty (vzorky o průměru 50 mm, viz obrázek 18), je hliníková slitina EN AW 6082 T6.

Materiál byl nakoupen u společnosti ALMS[®] [18], v podobě tyčovin o délce 1 m a rozměrech (20 a 50) mm a standardní jakosti dle výše zmíněné EN normy (odpovídající ČSN normě 42 4400 [18]). Tyto vzorky byly následně nařezány na rozbrušovacím stroji STRUERS Secotom-50 na výše zmíněné průměry a tloušťku 5 mm.

Následně byly vzorky zbroušeny pomocí stroje Tegramin 30 firmy STRUERS konvenčními technikami na drsnost R_a 200 nm a v případě tribologických vzorků byly vyvrtány díry 1x $\varnothing$ 6 mm (uprostřed) a 2x $\varnothing$ 3 mm (symetricky 5 mm od středu a zároveň umístěném na ose středu) – z důvodu uchycení na tribologické přístroje (viz text níže).

Obecné informace

Slitina EN AW-6082 T6 (chem. složení AlMgSi1) je precipitačně tvrditelná slitina, která je často využívána v produktech, u kterých je důležitá kombinace pevnosti, hmotnosti a zejména odolnosti proti korozi. Ve většině případů je materiál dodáván ve vytvrzeném stavu, což znamená, že materiál je výrobcem zpracován rozpouštěcím žíháním, kalen a tepelně vytvrzen („zcela zušlechtěn“). Ve stavu vytvrzení za tepla vykazuje tato slitina 0,2% mez kluzu, která v pořadí velikosti leží na úrovni S235 [19]. Pevnost v kombinaci s nízkou specifickou hmotností, dobrými antikorozními vlastnostmi a taktéž nízkou cenou jsou vlastnosti dobře využitelné ve strojírenství, zaměřující se na produkty založených na hliníkových slitinách.

4.1.2 Výchozí materiál s anodizovanou vrstvou

Pro přípravu experimentálních vzorků bylo využito standardních technologií uvedených v předchozí podkapitole. Pro přípravu vrstev a povlaků byly použité standardní průmyslové technologie zaměřující se na procesy anodické oxidace (zejména na tzv. tvrdý elox), anodické oxidace s následným nanášením PTFE povlaku a DLC povlakování. Důvodem volby tzv. tvrdého eloxu jsou výrazně vyšší funkční vlastnosti (především vyšší tvrdost vrstvy) než u přírodního eloxu. Využitím standardních technologií přípravy anodizované vrstvy byla zajištěna vysoká reprodukovatelnost a opakovatelnost výsledků, eliminujících vliv technologických (procesních a strojních) chyb, a zejména zohledňující požadavky na nízké náklady, které by nebylo možné dodržet v případě, že by bylo vyvinuto zcela nové chemické složení lázní a nebylo by možné dodržet všechny klíčové technologické postupy (předúprava povrchu, tvorba oxidické vrstvy, dokončovací úpravy). Pokud by došlo ke změně chemického složení lázní, bylo by taktéž potřebné revalidovat ostatní parametry mající vliv na kvalitu vrstvy (proudová hustota během anodické oxidace, způsob promíchávání lázně atd.). Všechny tyto postupy, rámcové složení lázní, použité technologie atd. jsou popsány v normách a odborné literatuře [20 – 21].

Tloušťka anodizované vrstvy je (30 ± 5) μm . Maximální tloušťka nebyla náhodně zvolena, ale je výsledkem rozměrových a funkčních požadavků na daný dílec.

Vzorky s tvrdou anodizovanou vrstvou nesly označení „A-1“ až „A-20“, které byly anodizovány v rámci jedné dávky, aby byl minimalizován (resp. eliminován) možný výskyt chyb při anodizování v rámci vícero různých dávek (např. eliminace různého stupně nasycení lázně určené k anodizování, různé hustoty elektrického proudu vlivem jiné pozice umístění vzorku a další).

4.1.3 Výchozí materiál s DLC povlakem

Příprava DLC povlaku probíhala pomocí technologie PVD a výsledný povlak spadá do skupiny a-C:H, tzn. hydrogenových povlaků. Použité povlakovací zařízení bylo typu Hauzer Fx 850 a výsledný povlak DLC COMP [22].

Tloušťka anodizované vrstvy (30 ± 2) μm . Tloušťka DLC COMP povlaku 1^3 μm . Celková tloušťka 31^3_{-2} μm . Minimální tloušťka povlaku musí být 1 μm , aby byla zachována funkčnost [23] a životnost povlaku.

Vzorky s DLC povlakem nesly označení „C-1“ až „C-20“, které byly povlakovány v rámci jedné dávky, aby byl minimalizován (resp. eliminován) možný výskyt chyb při DLC povlakování v rámci vícero různých dávek (např. eliminace různé pozice umístění vzorků, různé teploty během DLC povlakování a další).

4.1.4 Výchozí materiál s anodizovanou vrstvou a PTFE

Způsob přípravy vzorků s anodizovanou vrstvou a PTFE povlakem probíhal obdobně jako při přípravě pouze anodizované vrstvy. Významný rozdíl při přípravě těchto vzorků spočíval v tom, že neproběhlo utěšňování pórů pomocí deionizované vody (za horka), nýbrž byly vzorky v co nejkratším čase (zohledňující pouze manipulaci vzorků) přeneseny do technologické části, kde probíhá tvorba PTFE povlaku. Tímto způsobem byla zaručena nejvyšší adheze PTFE povlaku k anodizované vrstvě. Jiný způsob tvorby PTFE povlaku na anodizovanou vrstvu snižuje samotnou adhezi a tím negativně ovlivňuje výsledné parametry a zejména samotnou životnost celé kompozitní struktury [23].

Tloušťka anodizované vrstvy $30\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$, tloušťka PTFE povlaku $3^2\text{ }\mu\text{m}$. Celková tloušťka je $(33\pm 2)\text{ }\mu\text{m}$. Minimální tloušťka PTFE, která musí být splněna ($3\text{ }\mu\text{m}$), vychází ze zachování funkčních životnostních požadavků kladených na tento typ povlaku.

Vzorky s tvrdou anodizovanou vrstvou nesly označení „B-1“ až „B-20“, které byly anodizovány a teflonovány v rámci jedné dávky, aby byl minimalizován (resp. eliminován) možný výskyt chyb při anodizování a teflonování v rámci vícero různých dávek (např. eliminace různého stupně nasycení lázně určené k anodizování, různé hustoty elektrického proudu vlivem jiné pozice umístění vzorku a další).

4.2 Metody testování, analýzy

Příprava metalografických vzorků

Dělení vzorků bylo provedeno pomocí přesného metalografického dělicího zařízení STRUERS Secotom 50, MSX-250 firmy LECO a Discotom-2 firmy STRUERS.

Rozřezání dílců určených k analýze bylo provedeno pomocí dělicího zařízení MSX-250 firmy LECO.

Metalografické výbrusy byly připraveny s využitím zařízení pro přípravu metalografických preparátů Tegamin 30 konvenčními technikami – broušením za mokra a leštěním diamantovými suspenzemi firmy STRUERS. Konečné mechanicko-chemické doleštění bylo provedeno pomocí suspenze OP-Chem firmy STRUERS a očištěny v ultrazvukové myčce Lavamin od firmy STRUERS.

Analýza chemického složení

Měření chemického složení bylo provedeno na optickém emisním CCS spektrometru s vysokým rozlišením – Q4 TASMAN.

Lokální bodová (plošná) chemická mikroanalýza byla provedena pomocí energiově disperzního analyzátoru EDAX, který je příslušenstvím rastrovacího elektronového mikroskopu Philips XL30.

Světelná mikroskopie (LM)

Pozorování a dokumentace dílců a vzorků byla prováděna na 3D opto-digitálních mikroskopech s vysokým rozlišením OLYMPUS DSX510, DSX110 a DSX100 a taktéž na metalografickém světelném mikroskopu OLYMPUS GX71. Obrazová analýza byla prováděna pomocí softwaru ImageJ, tloušťky vrstev byly měřeny pomocí softwaru Stream.

Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM)

Tloušťky vrstev a hodnocení materiálu byly pozorovány a snímkovány pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) společnosti PHILIPS XL 30, TESCAN LYRA3 XMH a Vega TS5135.

Měření drsnosti

K měření drsnosti byl využit plně automatický konfokální laserový mikroskop firmy Olympus LEXT OLS4100.

Měření tvrdosti

K měření mikrotvrdosti byl využit plně automatický tvrdoměr s rozšířeným polem firmy STRUERS Duramin-100 AC3 a tvrdoměr LM 247 AT LECO.

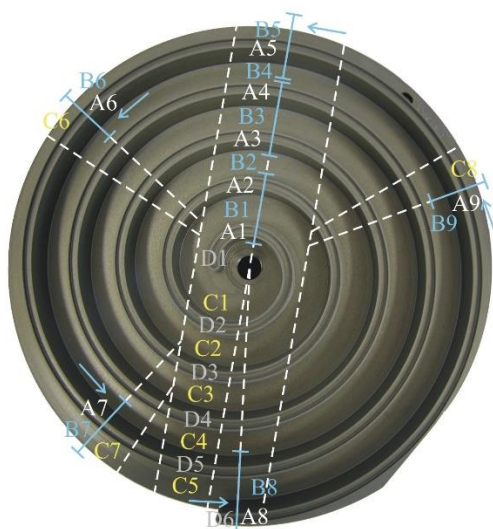
Pro měření nanotvrdosti byl použit nanotvrdoměr Hysitron TI 950 od firmy Bruker, k měření a vyhodnocení výsledků byl použit TriboScan dodáván firmou Bruker.

Měření tribologických vlastností

K měření tribologických vlastností (koeficient tření, „scratch test – vrypový test, ball on disc – test opotřebení) byl použit univerzální tribometr firmy BRUKER UMT-3.

4.3 Výsledky experimentu a jejich diskuze

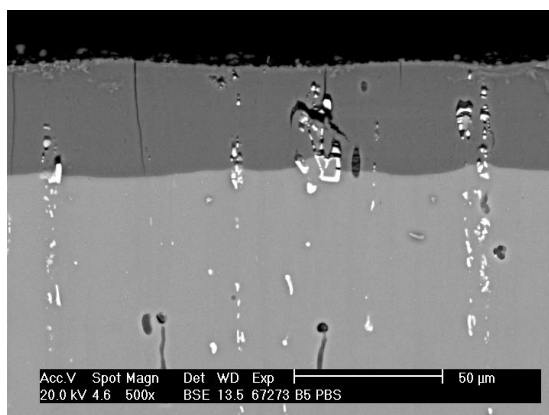
4.3.1 Dílec s anodizovanou vrstvou



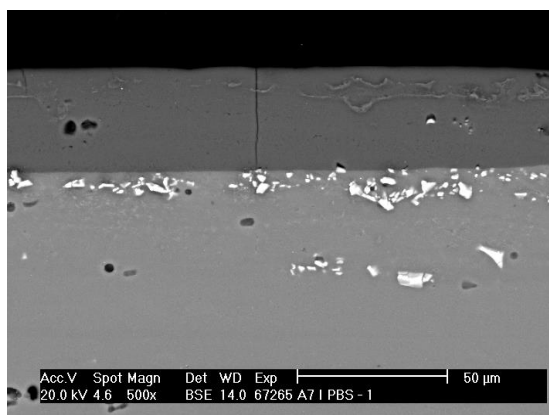
Obrázek 6: Schéma dělení dílce s anodizovanou vrstvou.

4.3.1.1 Analýza mikrostruktury

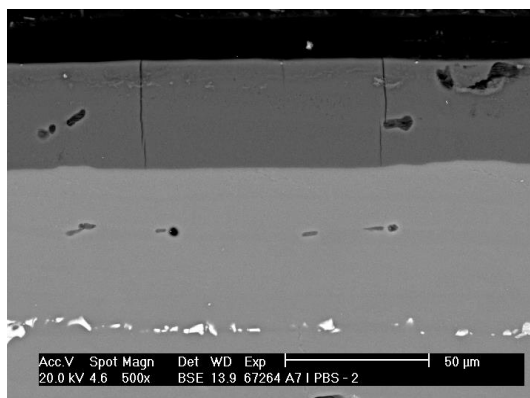
Pro podrobnější přehled o mikrostruktuře vrstvy, její vnitřní stavbě a pro stanovení její tloušťky byla anodizovaná vrstva pozorována rovněž užitím rastrovacího elektronového mikroskopu. V oblasti báze byly snímky anodizované vrstvy pořízeny vždy ze středové části dvou přiléhajících žeber. Naopak v případě žeber byla anodizovaná vrstva pozorována na třech místech: cca 5 mm od spodní hrany báze, v jejich středu a cca 5 mm od horní hrany žebra. Příklad mikrostruktury pořízené z místa B5 (oblast báze), lze pozorovat na obr. 7. Dále pak příklady mikrostruktury z místa A5 (oblast žebra), přiléhajícího k bázi B5 jsou uvedeny na obr. 8 - 10.



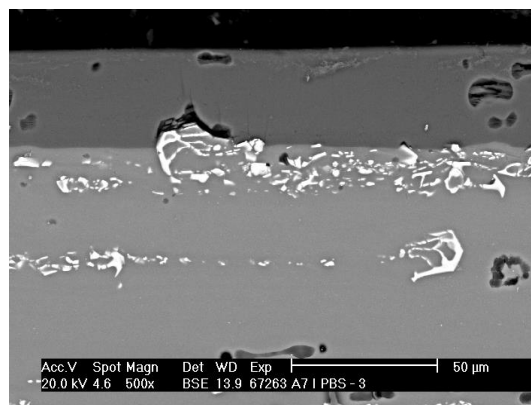
Obrázek 7: Příčný řez v oblasti B5



Obrázek 8: Příčný řez vnitřní plocha žebra.



Obrázek 9: Příčný řez střed žebra



Obrázek 10: Příčný řez vnitřní dolní hrana žebra.

Podrobnější studium mikrostruktury prokazuje u anodizované vrstvy vady:

- Neuzavřená nanoporozita po utěšňování vyskytující se v míře obvyklé zejména u povrchu anodizované vrstvy,
- uzavřená mikroporozita vrstvy daná původní porozitou substrátu,
- mikroporozita vznikající na rozhraní částic v důsledku růstu tloušťky vrstvy.
- Mikrotrhliny jak v oblasti báze, tak i žeber vedoucích od povrchu přes celou tloušťku vrstvy až do základního materiálu dílce.

4.3.1.2 Analýza chemického složení částic

Dílec pro přípravu anodizované vrstvy byl vyroben z tvářené hliníkové slitiny. Chemická analýza byla provedena pomocí energiově disperzního spektrometru EDAX. Výsledky analýzy základního materiálu a doplňkového měření vrstvy jsou uvedeny v tabulce (5).

Místo:	Mg	Al	Si	Mo	Mn	Fe
Zákl. materiál	0,6	64,0	8,9	0,0	11,3	15,2
Anod. vrstva	0,0	62,3	9,7	1,7	11,0	15,3

Tabulka 4: Analýza chemického složení částic [hm. %].

Prvek:	Měření číslo:		
	1	2	3
O	50,1	50,7	50,5
Al	43,1	42,7	42,7
Si	0,4	0,4	0,5
S	6,4	6,2	6,3

Tabulka 5: Analýza chemického složení vrstvy z oblasti B1 [hm. %].

Z analýz chemického složení je zřejmé, že základní materiál dílce i anodizovaná vrstva obsahují totožné částice intermetalik na bázi Mn, Fe a Si, které bývají v případě hliníkových

slitin označovány jako částice β -fáze. U těchto částic nebyla z přípravy vrstvy, tj. vlastní anodizace a následného utěsňování, zjištěna interakce s kyslíkem. V průběhu tvorby tedy nedochází k jejich oxidaci. Pro stanovení chemického složení vrstev byla analýza provedena z několika náhodně vybraných míst neobsahujících částice β -fáze.

Z chemické analýzy základního materiálu taktéž vyplývá, že se nejedná o tvářenou hliníkovou slitinu dle normy EN AW-6082 (slitina AlMgSi), spadající do řady 6000. Otázkou zůstává, jak mohlo k této záměně materiálu dojít? Předpokládá se, že došlo k záměně materiálu u dodavatele, nicméně experimentální část práce nebyla ovlivněna.

4.3.1.3 Analýza tloušťky vrstvy

Tloušťka vrstvy u dílce byla stanovena pomocí obrazové analýzy. Na každém z pořízených snímků bylo po ručním naprahování obrazu (vyznačení vrstvy), automaticky provedeno měření tloušťky a statistické zpracování naměřených dat z 356 měřených míst. Takto bylo pro analýzu vrstvy zpracováno 63 míst (9 míst z oblasti báze a 54 míst z oblastí žebek k této bázi přilehlých i odlehlých) na jednom kusu dílce. Statistické vyhodnocení jednotlivých částí komponent označené jako: (1) skupina A – přilehlá strana žebra vzhledem k bázi, (2) skupina A – odlehlá strana žebra vzhledem k bázi, (3) skupina B – báze a (C) průměrné hodnoty tloušťky vrstvy na dílci jako celku jsou uvedeny v tabulce 6.

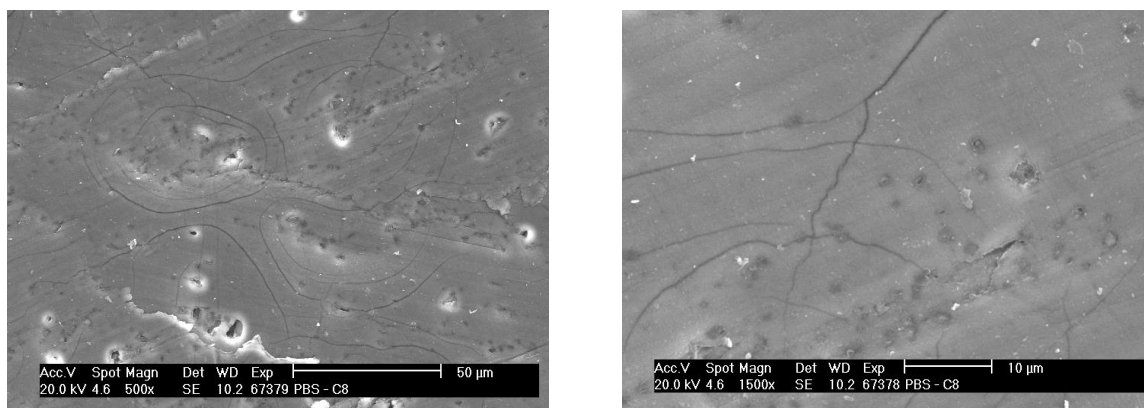
	Naměřené hodnoty v místech:				
	1	2	3	C	St. odchylka
Průměrná tloušťka	30,2	29,9	31,0	30,4	$\pm 0,6$
Minimální tloušťka	26,3	25,7	27,2	26,4	$\pm 0,8$
Maximální tloušťka	32,3	32,4	33,3	32,6	$\pm 0,6$

Tabulka 6: Tloušťky eloxačních vrstev [μm].

Z výsledné tloušťky vrstvy je zřejmé, že plně splňuje požadavky výkresové dokumentace.

4.3.1.4 Analýza povrchu vrstvy

Povrch vrstev skupiny C (báze) byl dokumentován pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. Vybrané snímky charakterizující povrch pozorovaných vrstev jsou na obr. 11.



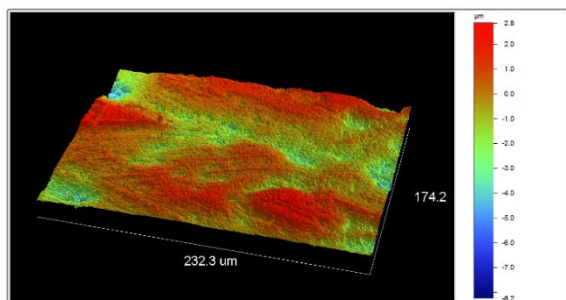
Obrázek 11: Povrch vrstev v oblasti báze C8

Povrch anodizované vrstvy dílce obsahuje tyto nerovnosti:

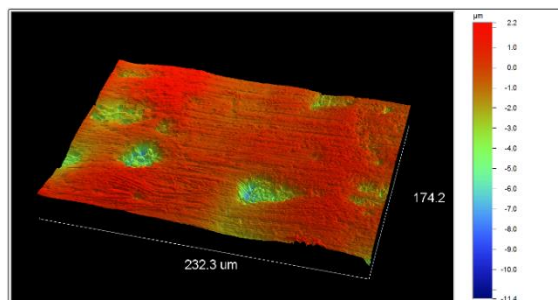
- nerovnosti plošné, ovlivněné obráběním povrchu dílce před tvorbou anodizované vrstvy, (tj. pokud vrstva roste nad povrch původního základního materiálu dílce, pak kopíruje nerovnoměrnosti takto obrobeného povrchu)
- nerovnosti důlkové, způsobené vydrolováním či odprýskáním částic β -fáze z povrchu vrstvy. Ty se na povrchu vrstvy projevují otevřenou porozitou. Na povrchu anodizované vrstvy nelze přehlédnout výskyt značného množství trhlin, které prostupují celou tloušťkou vrstvy až do základního materiálu dílce. Tyto trhliny bylo také možné pozorovat na snímcích mikrostruktury z rastrovacího elektronového mikroskopu v příčných řezech. Bez podrobnějších informací o technologii procesu přípravy vrstvy však nelze relevantně posoudit příčinu jejich vzniku.

4.3.1.5 Měření drsnosti

Drsnost povrchu byla stanovována pomocí optického profilometru. Pro zajištění vysoké přesnosti měření byl tento přístroj umístěn na aktivním antivibračním stole. Níže je uvedeno pouze několik příkladů měření a tabulka níže obsahuje pouze jednu, ale klíčovou hodnotu R_a . Parametry, které byly spolu s R_a měřeny jsou: R_{ku} , R_p , R_q , R_{sk} , R_t , R_v . Profilové křivky byly měřeny z oblastí báze (skupina C) i žeber (skupina D). Na obr. 12 a 13 jsou pak uvedeny příklady výsledné 3D rekonstrukce měřených povrchů z místa C8 (báze). Srovnání drsnosti povrchu ze stanoveného parametru R_a bylo provedeno jednak z oblasti báze C (1, 3, 5, 6, 7 a 9), jednak z částí žeber a to na jejich plochách přilehlých k bázi D (2I, 4I a 6I) i odlehlých D (2O, 4O a 6O) - viz tab. 7.



Obr. 12: 3D rekonstrukce v oblasti báze C8



Obr. 13: 3D rekonstrukce vnější plochy žebra D2

Naměřené hodnoty:			
Oblast báze		Oblast žeber	
C1	804,65	D2O	780,79
C3	1510,19	D2I	367,64
C5	673,16	D4O	1121,79
C6	789,16	D4I	816,92
C7	807,91	D6O _{bot}	873,28
C9	871,62	D6O _{top}	863,51
		D6I	899,60

Tabulka 7: Drsnost povrchu anodizované vrstvy R_a [nm].

Jak bylo diskutováno výše, drsnost povrchu anodizované vrstvy je výrazně závislá na kvalitě obrobení povrchu dílce před anodizováním. Dále má na drsnost povrchu anodizované vrstvy velmi významný vliv otevřená porozita z míst po vydrolených či odloupených částicích β -fáze. Střední hodnota drsnosti povrchu R_a se v těchto místech pohybuje v intervalu od 673 – 1510 nm.

4.3.1.6 Měření tvrdosti

Tvrdost anodizované vrstvy HV 0,05 podle Vickerse byla měřena na povrchu v pěti nahodile zvolených místech vzorků báze – skupiny C (1, 3, 5, 6, 7 a 9) s cílem zajistit objektivnost vlivu podpovrchových defektů mikrostruktury na tvrdost vrstvy. Použité zatížení 0,05 kg / 10 s bylo voleno s ohledem k vyloučení možnosti ovlivnění měřených hodnot tvrdostí substrátu.

Naměřené hodnoty tvrdosti po anodizování by se měly pohybovat v rozmezí 370 – 600 HV. U vzorků C1, C3 a C9 bylo možné pozorovat zborcení vtisku (což je stav charakteristický pro měkké a/nebo houževnaté materiály), zatímco u vzorků C5, C6 a C7 vybíhají z nezborceného vtisku mikrotrhliny (které jsou charakteristické pro velmi tvrdé a/nebo křehké materiály).

Měřicí body:	C1	C3	C5	C6	C7	C9
Naměřené hodnoty:	411	396	495	533	561	436

Tabulka 8: Tvrdost povrchu anodizované vrstvy [HV 0,05].

4.3.1.7 Dílčí závěry

- Na dílci je relativně rovnoměrná a souvislá anodizovaná vrstva.
- Vrstva je vysoce rovnoměrná v předepsaném intervalu (30 ± 5) μm na všech 63 měřených místech.
- Částice β -fáze na bázi Mn, Fe a Si jsou přítomny v anodizované vrstvě. Ty jsou vyloučeny v řádcích kolmých na vrstvu v oblasti báze a rovnoběžných s vrstvou v oblasti žeber.
- V blízkém okolí částic β -fáze dochází v důsledku růstu vrstvy ke vzniku mikrotrhlin. Další mikrotrhliny vznikají v důsledku porozity přítomné v substrátu před anodizováním.
- U dílce byl také pozorován výskyt pórů, jejichž velikost se pohybuje v jednotkách mikrometrů, a to v množství obvyklém pro tuto technologii přípravy, včetně procesu utěšňování.
- Povrch anodizované vrstvy kopíruje původní povrch dílce po obrábění.
- Drsnost povrchu vrstvy je zásadně ovlivněna:
 - Obráběním základního materiálu dílce před tvorbou anodizované vrstvy a otevřenou porozitou, ovlivněnou zejména množstvím vydrolených či odloupených částic β -fáze z povrchu anodizované vrstvy.
- V závislosti na otevřené porozitě povrchu anodizované vrstvy se střední hodnota drsnosti povrchu R_a pohybovala od 0,4 - 1,5 μm .

- Na povrchu vrstvy lze pozorovat značné množství trhlin. Jejich možný vznik však nelze podrobněji hodnotit bez detailnějších informací o výrobcem použité technologii a i přípravě obrobku.
- Jisté nesrovnalosti v oblasti technologického procesu přípravy vrstvy prokazuje i tvrdost povrchu anodizované vrstvy. Neboť je poměrně velký rozptyl tvrdosti na jednom dílci.
- Nesrovnalost je v použitém materiálu pro výrobu dílce, který neodpovídá normě kladené na dílec EN AW-6082. Nejspíše došlo k záměně materiálu ze strany výrobce.

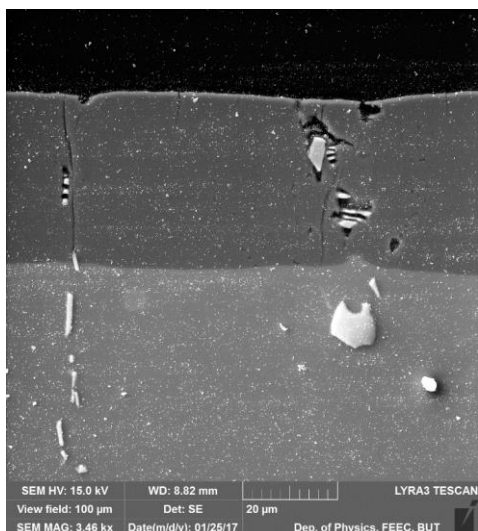
4.3.2 Experimentální vzorky s anodizovanou vrstvou a anodizovanou vrstvou s PTFE

4.3.2.1 Analýza mikrostruktury

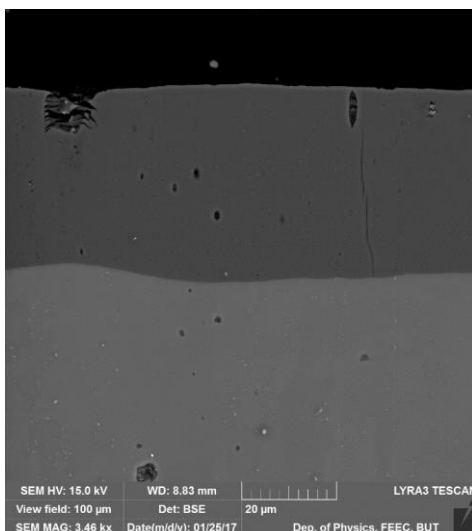
Jelikož jsou oba experimentální vzorky (s anodizovanou vrstvou a anodizovanou vrstvou s PTFE) téměř totožné (resp. technologie přípravy je téměř totožná), pojednává tato podkapitola o obou typech vzorků zároveň. Jediný rozdíl je, že u vzorku s PTFE je při procesu utěšňování použito PTFE. Tento krok byl prováděn pomocí penetrace PTFE disperzí (na separátním pracovišti). V textu níže je zmiňován zejména vzorek s anodizovanou vrstvou, ale stejné nálezy platí i pro vzorek s anodizovanou vrstvou a PTFE povlakem.

Ve struktuře slitiny je patrný výskyt značného množství částic (jak bylo pozorováno již u dílce). Tyto částice jsou vyloučeny v řádcích ve směru kolmém k připravené anodizované vrstvě. Jak tomu bylo u dílce, tak i u experimentálního vzorku nelze jednoznačně určit původní povrch vzorku před anodizováním. Téměř ve všech pozorovaných případech byl zaznamenán výskyt nečistot pocházejících ze substrátu v celé tloušťce anodizované vrstvy. U vzorku bylo rovněž při užitím zvětšení možné v anodizované vrstvě pozorovat určité množství otevřené i uzavřené porozity (obrázek 14), která nebyla uzavřena v průběhu utěšňovacího procesu. Anodizovaná vrstva připravená na vzorku je ve všech pozorovaných místech souvislá, tj. bez jakéhokoli přerušení vrstvy nespojitostmi.

Pro podrobnější přehled o mikrostruktuře vrstvy, její vnitřní stavbě a pro stanovení její tloušťky, byla anodizovaná vrstva pozorována rovněž užitím rastrovacího elektronového mikroskopu.



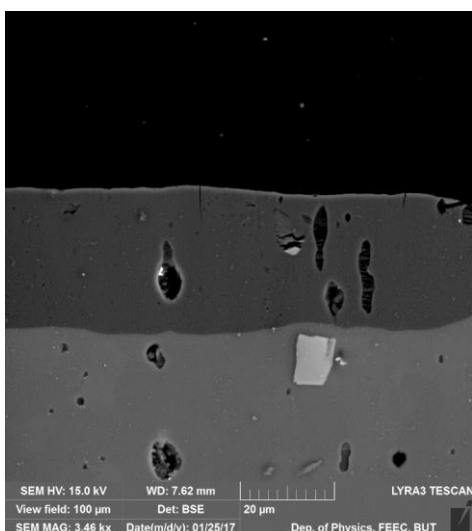
Obrázek 14: Příčný řez vzorku (anodizovaná vrstva).



Obrázek 15: Příčný řez vzorku (anodizovaná vrstva)



Obrázek 16: Příčný řez vzorku (anodizovaná vrstva s PTFE).



Obrázek 17: Příčný řez vzorku (anodizovaná vrstva s PTFE).

Podrobnější studium mikrostruktury prokazuje u anodizované vrstvy vady (obdobně jako u dílce):

- Neuzavřená nanoporozita po utěšňování vyskytující se v míře obvyklé zejména u povrchu anodizované vrstvy,
- uzavřená mikroporozita vrstvy daná původní porozitou substrátu a
- mikroporozita vznikající na rozhraní částic v důsledku růstu tloušťky vrstvy.
- Jak mikrotrhliny vedoucí přes celou tloušťku vrstvy až do substrátu, tak i mikrotrhliny vedoucí ze substrátu do vrstvy a taktéž mikrotrhliny začínající na povrchu vrstvy vedoucí do části vrstvy.

4.3.2.2 Analýza chemického složení částic

Místo:	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Další
Substrát	96,8	1,22	0,33	0,06	0,6	0,73	0,01	0,11	0,05	0,06

Tabulka 9: Analýza chemického složení částic [hm. %].

Z analýz chemického složení je zřejmé, že základní materiál dílce i anodizovaná vrstva obsahují totožné částice intermetalik na bázi Mn, Fe a Si, které bývají v případě hliníkových slitin označovány jako částice β -fáze. U těchto částic nebyla z přípravy vrstvy, tj. vlastní anodizace a následného utěšňování, zjištěna interakce s kyslíkem. V průběhu tvorby tedy nedochází k jejich oxidaci. Pro stanovení chemického složení vrstev byla analýza provedena z několika náhodně vybraných míst neobsahujících částice β -fáze.

Analýza taktéž potvrdila, že se jedná o požadovaný základní materiál (EN AW - 6082).

4.3.2.3 Analýza tloušťky vrstvy a povlaku

K analýze tloušťky vrstvy a povlaku byl použit 3D opto-digitální mikroskop s vysokým rozlišením a nanotvrdoměr Hysitron TI 950 od firmy Bruker. Tloušťky byly vyhodnoceny softwarem Stream a TriboScan.

Vzorek:	Prům. tloušťka:	St. odchylka
A (anodizovaná vrstva)	37,9	$\pm 1,1$
B (anodizovaná vrstva + PTFE)	29,7	$\pm 0,9$

Tabulka 10: Průměrná tloušťka [μm].

Z výsledného měření vyplývá, že vzorek A je mimo definované toleranční pásmo a vzorek B spadá do tolerančního pásma. Tloušťka PTFE povlaku se pohybuje okolo 1 μm .

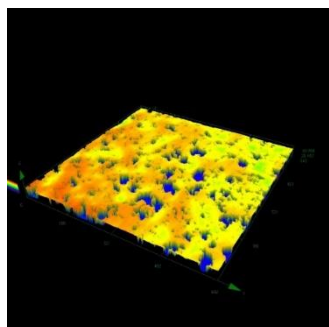
4.3.2.4 Analýza povrchu vrstvy

Povrch vzorku byl pozorován na konfokálním laserovém mikroskopu. Výsledky jsou obdobné jako při zkoumání vzorků z dílce. Tudíž povrch obsahuje následující nerovnosti:

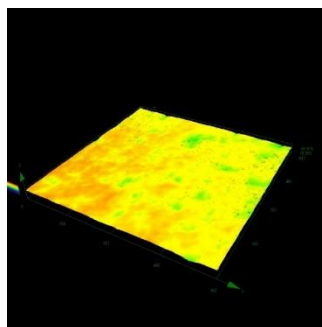
- Nerovnosti plošné, ovlivněné obráběním povrchu vzorku před tvorbou anodizované vrstvy, (tj. pokud vrstva roste nad povrch původního základního materiálu vzorku, pak kopíruje nerovnoměrnosti takto obrobeného povrchu) a
- nerovnosti důlkové, způsobené vydrolováním či odprýskáním částic β -fáze z povrchu vrstvy. Ty se na povrchu vrstvy projevují otevřenou porozitou. Na povrchu anodizované vrstvy nelze přehlédnout výskyt množství trhlin, které prostupují celou tloušťkou vrstvy až do základního materiálu dílce. Tyto trhliny bylo také možné pozorovat na snímcích mikrostruktury z rastrovacího elektronového mikroskopu v příčných řezech.

4.3.2.5 Měření drsnosti

Drsnost byla stanovena za pomoci konfokálního laserového mikroskopu ze tří nahodile vybraných bodů.



Obrázek 18: Povrch anodizované vrstvy v měřicím bodě 1.



Obrázek 19: Povrch anodizované vrstvy s PTFE v měřicím bodě 1.

Vzorek:	Průměrná hodnota drsnosti:	St. odchylka
A (anodizovaná vrstva)	1150,7	±128,5
B (anodizovaná vrstva + PTFE)	1159,0	±72,8
Substrát	208,7	±18,6

Tabulka 11: Drsnost Ra [nm].

Jak bylo diskutováno u vzorků z dílce, drsnost povrchu anodizované vrstvy je výrazně závislá na kvalitě obrobení povrchu vzorku před anodizováním. Dále má na drsnost povrchu anodizované vrstvy velmi významný vliv otevřená porozita z míst po vydrolených či odloupených částicích β -fáze. Průměrná hodnota drsnosti povrchu anodizované vrstvy Ra je 1150,7 nm a povrchu s anodizovanou vrstvou + PTFE je Ra 1159,0 nm a u substrátu je rovna hodnotě 208,7 nm.

4.3.2.6 Měření tvrdosti

Při měření tvrdosti (resp. mikrotvrdosti) se postupovalo obdobně jako při měření dílce. Tzn. tvrdost anodizované vrstvy HV 0,05 podle Vickerse byla měřena na povrchu v pěti nahodile zvolených místech vzorků s cílem zajistit objektivnost vlivu podpovrchových defektů mikrostruktury na tvrdost vrstvy. Použité zatížení 0,05 kg / 10 s bylo voleno s ohledem k vyloučení možnosti ovlivnění měřených hodnot tvrdostí substrátu.

Jako doplňkové měření k mikrotvrdosti bylo zvoleno měření nanotvrdosti. Důvod tohoto typu měření bude vysvětlen později. Nanotvrdost byla měřena dle postupu uvedeném v článku [24] a oproti měření dle Vickerse se liší pouze v užitém indentoru (zkušebním tělese). Zkouška dle Vickerse využívá diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Nanotvrdost se měří pomocí nanoindentoru, který má pyramidální tvar ("Berkowich"). Aby bylo možné porovnat naměřené hodnoty mikro a nanotvrdosti, bylo nezbytné využít přepočít uvedený níže:

$$H[MPa] = 10.58 HV \left[\frac{kgf}{mm^2} \right], \quad [25]$$

kde

H... je nanotvrdost,

HV... je tvrdost dle Vickerse.

Vzorek:	Průměrná hodnota tvrdosti [HV0,05] (naměřená):	St. odchylka [HV0,05]:	Průměrná hodnota tvrdosti [HV] (vypočítaná):	St. odchylka [HV]:
A (anodizovaná vrstva)	457,1	±0,1	510,1	±11,3
B (anodizovaná vrstva + PTFE)	528,6	±16,52	531,2	±72,86
Substrát	90,8	±2,7	142,1	±6,1

Tabulka 12: Tvrdost povrchu.

Vzorek:	Průměrná hodnota nanotvrdosti [GPa] (naměřená):	St. odchylka [GPa]:	Průměrná hodnota tvrdosti [HV] (vypočítaná):	St. odchylka [HV]:
A (anodizovaná vrstva)	5,40	±0,12	510,1	±11,3
B (anodizovaná vrstva + PTFE)	5,43	±0,48	531,2	±72,86
Substrát	1,5	±0,06	142,1	±6,1

Tabulka 13: Nanotvrdost povrchu.

4.3.2.7 Dílčí závěry

- Na vzorcích je relativně souvislá anodizovaná vrstva.
- PTFE povlak není rozeznatelný, ovšem je přítomný a jeho tloušťka je výrazně menší než požadovaných 5 μm.
 - Důvodů nerozpoznatelnosti a nedostatečné tloušťky povlaku může být několikero, ale bez podrobnější znalosti použité technologie dodavatele nelze korektně určit.
- PTFE povlak zvyšuje tvrdost povrchu, což je v souladu s dostupnou technickou dokumentací [112].
- Vrstva u vzorku A je vysoce rovnoměrná, mimo předepsaný interval (30 ± 5) μm.
- Vrstva s PTFE u vzorku B je rovnoměrná uvnitř předepsaného intervalu (30 ± 5) μm.
- Částice β-fáze na bázi Mn, Fe a Si jsou přítomny v anodizované vrstvě. Ty jsou vyloučeny v řádcích kolmých na vrstvu.
- V blízkém okolí částic β-fáze dochází v důsledku růstu vrstvy ke vzniku mikrotrhlin. Další mikrotrhliny vznikají v důsledku porozity přítomné v substrátu před anodizováním.
- U vzorků A i B byl také pozorován výskyt pórů, jejichž velikost se pohybuje v jednotkách mikrometrů, a to v množství obvyklém pro tuto technologii přípravy, včetně procesu utěšňování, u vzorku B při procesu teflonování.
- Povrch vrstev, povlaku kopíruje původní povrch vzorků po obrábění.
- Drsnost povrchu vrstev a povlaku je zásadně ovlivněna:

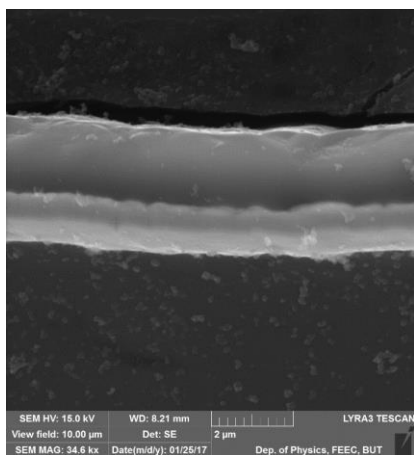
- Obráběním základního materiálu dílce před tvorbou anodizované vrstvy a otevřenou porozitou, ovlivněnou zejména množstvím vydrolených či odloupených částic β -fáze z povrchu anodizované vrstvy.
- Na povrchu vrstev a povlaku lze pozorovat množství trhlin. Jejich možný vznik však nelze podrobněji hodnotit bez detailnějších informací o výrobcem použité technologii a i přípravě obrobku.

4.3.3 Experimentální vzorky s DLC povlakem

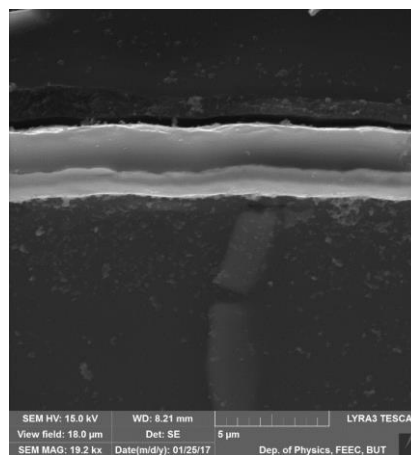
4.3.3.1 Analýza mikrostruktury

Snímky struktury materiálu experimentálního vzorku a DLC povlaku, pořízené světelným mikroskopem s cílem posoudit souvislosti a rovnoměrnosti připravené vrstvy, jsou viditelné na příčných řezech níže. Analýza byla provedena na několika náhodně zvolených místech (viz obrázky 20, 21).

Ve struktuře slitiny je patrný výskyt značného množství částic. Tyto částice jsou vyloučeny v řádcích ve směru kolmém k připravenému DLC povlaku. Jedná se o stejné nálezy v substrátu, jako u již výše analyzovaných vzorků.



Obrázek 20: Příčný řez DLC povlaku – měř. bod 1

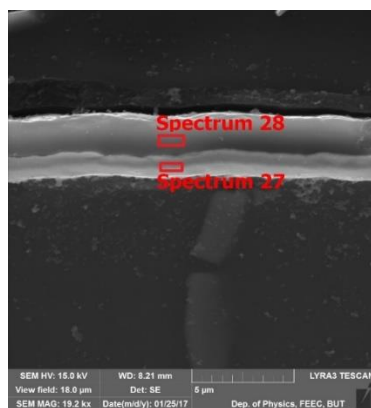


Obrázek 21: Příčný řez DLC povlaku – měř. bod 2

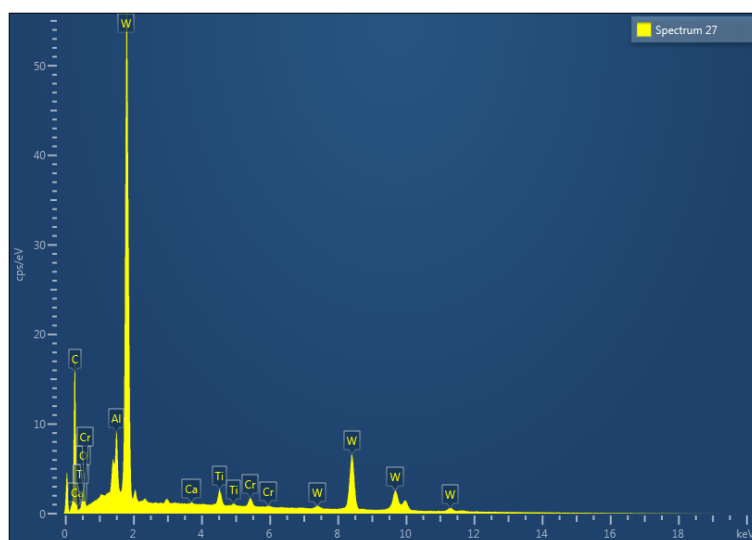
Podrobnější analýza u DLC povlaku prokázala výskyt malého množství mikrotrhlin v povlaku.

4.3.3.2 Analýza chemického složení částic

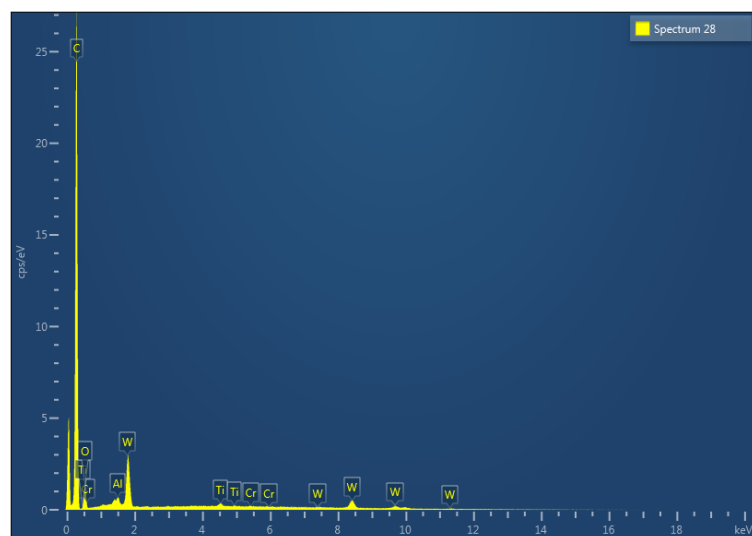
Chemická analýza byla provedena ve dvou místech, jak je znázorněno na obrázku 22.



Obrázek 22: Místa analýzy.



Obrázek 23: Graf – Spectrum 27.



Obrázek 24: Graf – Spectrum 28.

Dle výše uvedených grafů chem. složení, odpovídá struktura DLC povlaku uvedenému schématu: (i) substrát, (ii) vrstva Cr, (iii) vrstva W, (iv) DLC.

4.3.3.3 Analýza tloušťky povlaku

Tloušťka povlaku byla měřena pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu.

Vzorek:	Prům. tloušťka:	St. odchylka
C (DLC povlak)	1,5	±0,4

Tabulka 14: Průměrná tloušťka [μm].

Z výsledného měření vyplývá, že definované toleranční rozmezí lze bezproblémově dodržet. Musí být ovšem bráno v potaz, že v případě výroby dílce musí být adekvátně zvýšen konečný rozměr dílce tak, aby splňoval výsledné rozměry po aplikaci povlaku.

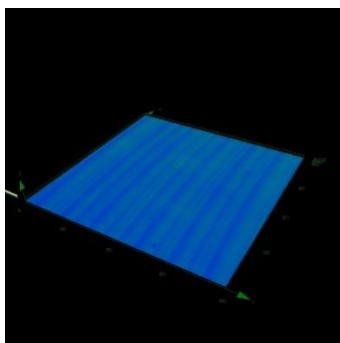
4.3.3.4 Analýza povrchu povlaku

Povrch vzorku byl pozorován na konfokálním laserovém mikroskopu a rastrovacím elektronovém mikroskopu. Výsledky jsou obdobné jako při zkoumání vzorků z dílce. Tudiž povrch obsahuje následující nerovnosti:

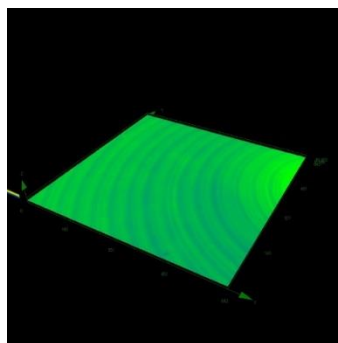
- Nerovnosti plošné, ovlivněné obráběním povrchu vzorku před tvorbou povlaku.
- Nerovnosti důlkové, způsobené vydrolováním či odprýskáním částic β -fáze z povrchu. Ty se na povrchu povlaku projevují otevřenou porozitou.

4.3.3.5 Měření drsnosti

Drsnost byla stanovena za pomoci konfokálního laserového mikroskopu na třech nahodile vybraných bodech.



Obrázek 25: Povrch DLC povlaku v měřicím bodě 1.



Obrázek 26: Povrch DLC povlaku v měřicím bodě 1.

Vzorek:	Průměrná hodnota drsnosti:	St. odchylka
C (DLC povlak)	138,3	±9,6
Substrát	208,7	±18,6

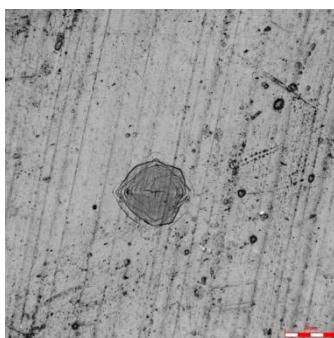
Tabulka 15: Drsnost R_a [nm].

Po aplikování povlaku dochází ke zlepšení drsnosti. Je to z důvodu užití technologie povlakování (PVD technologie). Nejprve se čistí povrch materiálu za účelem zvýšení adheze

povlaku. Poté se postupně nanášejí jednotlivé vrstvy, které zaplňují nerovnosti, a tím dochází ke sjednocování / vyhlazování povrchu (ovšem jen do určité míry).

4.3.3.6 Měření tvrdosti

Při měření tvrdosti (resp. mikrotvrdosti), v první iteraci, se postupovalo obdobně jako při měření anodizované vrstvy. Tzn. tvrdost HV 0,05 podle Vickerse byla měřena na povrchu v pěti nahodile zvolených místech vzorků s cílem zajistit objektivnost vlivu podpovrchových defektů mikrostruktury na tvrdost vrstvy. Použité zatížení 0,05 kg / 10 s bylo voleno s ohledem k vyloučení možnosti ovlivnění měřených hodnot tvrdostí substrátu. Jelikož pokaždé došlo k prolomení povlaku (obrázek 27), bylo přistoupeno v rámci druhé iterace k měření nanotvrdosti.



Obrázek 27: Ukázka prolomení povlaku.

Vzorek:	Průměrná hodnota nanotvrdosti tvrdosti [GPa] (naměřená):	St. odchylka [GPa]:	Průměrná hodnota tvrdosti [HV] (vypočítaná):	St. odchylka [HV]:
C (DLC povlak)	28,9	±6,21	2735,0	±587,2
Substrát	1,5	±0,1	142,1	±6,1

Tabulka 16: Tvrdost povrchu.

4.3.3.7 Dílčí závěry

- Na vzorcích je relativně souvislý DLC povlak.
- Tvrdost povrchu je díky DLC povlaku mnohonásobně zvýšena.
 - Nelze měřit za využití přístrojů pro měření mikrotvrdosti, neboť substrát nemá dostatečnou pevnost a tím pádem docházelo k prolomení povlaku.
- Povlak je vysoce rovnoměrný, splňující rozměrové limity.
- Povrch povlaku kopíruje původní povrch vzorků.
- Drsnost povrchu povlaku je zásadně ovlivněna:
 - Obráběním základního materiálu dílce před tvorbou DLC povlaku a
 - použitou technologií tvorby povlaku. Principy PVD technologie zlepšují drsnost (tzn. snižují drsnost), neboť v první části procesu dochází k předpřípravě povrchu (čištění) a následně dochází ke zcelování povrchu a vyrovnaní nerovností. Toto platí pouze v omezené míře.

- Uvnitř povlaku byly pozorovány mikrotrhliny, které nelze adekvátně kvalitativně určit, neboť by bylo třeba podrobněji znát použitou technologii výrobce.

4.3.4 Vrypový test (SCRATCH TEST)

Vrypový test je jedna ze základních metod k měření adheze a otěruvzdornosti vrstvy či povlaku k substrátu. Vrypovým testem budeme provádět měření tzv. rezistence pevného povrchu vůči penetraci pohybujícího se indentoru daného průměru hrotu určitou konstantní silou

Stupeň tvrdosti vrypovým testem se vypočítá dle vztahu:

$$HSp = \frac{8F_z}{\pi w^2}, \quad [25]$$

kde

F_z ...normálová síla [N],

w ...šířka stopy [μm].

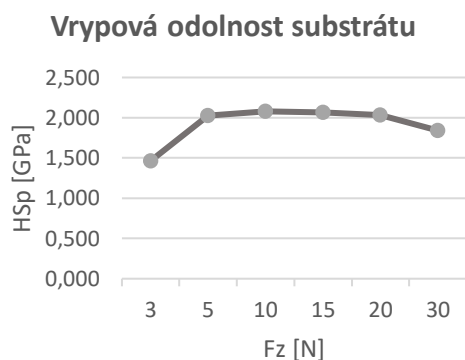
Testy byly prováděny za následujících podmínek: délka vrypu 10 mm, rychlost posuvu 1 mm/s, konstantní normálové síly. Měření šířky vrypu bylo prováděno ve třech místech (2 mm, 5 mm, 8 mm). Analýza vrypů byla prováděna na přístroji Talysurf CLI 1000 a parametry měřeny pomocí softwaru TalyMap 5.1. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce níže.

Vzorek	Substrát		A18 (Al_2O_3)		B12 (Al_2O_3 + PTFE)		C18 (DLC)	
	$\varnothing w$ [μm]:	HSp [GPa]:	$\varnothing w$ [μm]:	HSp [GPa]:	$\varnothing w$ [μm]:	HSp [GPa]:	$\varnothing w$ [μm]:	HSp [GPa]:
F [N]:								
1	-	-	-	-	-	-	60,3	0,700
3	72,2	1,464	-	-	-	-	98,0	0,795
5	79,3	2,025	128,0	0,773	89,0	1,620	126,0	0,802
7	-	-	-	-	-	-	152,0	0,722
10	110,7	2,079	122,0	1,711	119,0	1,798	233,7	0,466
15	136,0	2,065	141,0	1,921	172,3	1,286	297,0	0,433
20	158,3	2,032	192,7	1,372	193,0	1,367	431,3	0,274
30	203,7	1,842	259,7	1,133	261,0	1,121	455,3	0,368
50	-	-	361,0	0,977	377,0	0,896	-	-
70	-	-	436,7	0,935	417,3	1,023	-	-

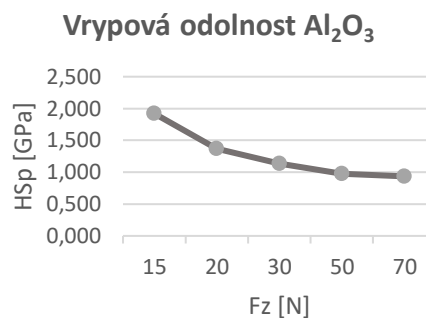
Tabulka 17: Výsledky vrypové zkoušky.

Vysvětlivky:

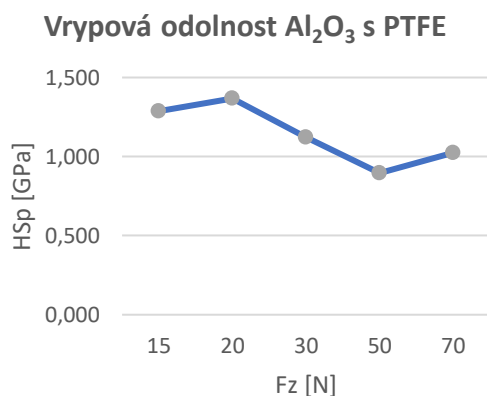
Žlutě označené hodnoty mají pouze informativní povahu, neboť vrypy nebylo možné odlišit od topografie povrchu.



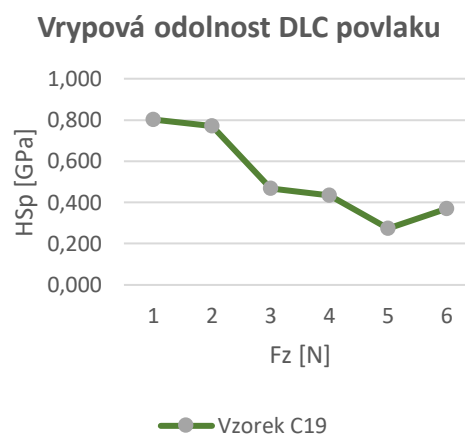
Graf 1: Vrypová odolnost substrátu.



Graf 2: Vrypová odolnost anodizované vrstvy.



Graf 3: Vrypová odolnost anodizované vrstvy a PTFE.



Graf 4: Vrypová odolnost DLC povlaku.

4.3.4.1 Dílčí závěry

- Žlutě označená měření (uvedená v tabulce) nebylo vhodné použít, neboť nebylo možné vrypy jasně a zřetelně rozeznat od topografie povrchu.
- Nejnižší vrypovou odolnost má vzorek C (DLC povlak). Jeho hodnoty HSp se pohybují dle aplikovaného zatížení v rozmezí (0,274 – 0,802) GPa. Toto by mohlo být způsobeno základním materiálem, který je měkký a při zatížení není dostatečnou oporou povlaku, na který je vyvíjena externí síla. V korespondenci s tímto tvrzením je i vlastnost DLC povlaku, který je tvrdý (naměřeno 2 735 HV), ale zároveň křehký.
- Vzorek B (anodizovaná vrstva s PTFE) vykazuje nižší vrypovou odolnost oproti vzorku A. Dle volně dostupné dokumentace (technické listy) by však měl tento povlak částečně zvyšovat tvrdost a tím i vrypovou odolnost. Důvodem proč tomu tak není, může být fakt, že i pouhá tloušťka povlaku 1 μm snižuje sílu potřebnou k proniknutí indentoru skrze povlak až na samotný substrát.

4.3.5 Tribologické chování vrstev a povlaků

4.3.5.1 „Ball-on-Disc / Ball-on-Flat“ test

Testování je prováděno na tribometru dle norem [26, 27], který simuluje proces tření a následné opotřebení testovaných povrchů. Díky této metodě lze určit vliv sledovaných parametrů na funkčnost analyzovaných povrchů. Experiment je prováděn tzv. recipročním testem. Jedná se o lineární pohyb zkoumaného vzorku.

Pro výpočet součinitele opotřebení byl použit vztah:

$$K = \frac{\sum_1^n A_{pn}}{n} \frac{1}{F_N \omega t'} \quad [28]$$

kde: K...součinitel opotřebení [$\text{mm}^{-3}\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$],
A_{pn}...obsah stopy [mm^2],
F_N...normálová síla [N],
t...délka trvání testu [min].

4.3.5.2 Výsledky testu metody „Ball-on-Disc / Ball-on-Flat“

Experiment proběhl na tribometru BRUKER UMT-3. Za níže definovaných podmínek:

- Indentor (ve tvaru kuličky) o průměru 6,3 mm z kalené oceli 100Cr6 a tvrdostí 62 HRC.
- Metoda lineárního pohybu.
- Teplota indentoru byla 21°C.
- Test byl proveden za sucha (suché tření).
- Zatížení F_N (1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 50, 70) N.
- Frekvence = 5 Hz, délka testu t = 1 min.

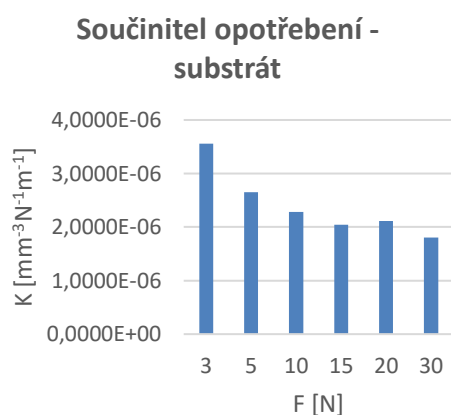
V tabulce 25 níže jsou naměřené hodnoty součinitele opotřebení a zároveň v tabulce 19 jsou naměřené součinitele tření pro jednotlivé vzorky. Grafické vyjádření je využito k nalezení spojnice trendů, které budou sloužit jako základ pro numerický model.

Vzorek	Substrát	Vzorek A18	Vzorek B12	Vzorek C18
Fz [N]	K [$\text{mm}^{-3}\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$]			
0,5	-	-	-	9,0922E-05
1	-	5,5244E-07	-	2,4205E-05
1,5	-	-	-	3,7957E-05
3	3,5587E-06	2,8530E-07	-	1,3303E-05
5	2,6512E-06	1,1799E-07	9,8888E-08	1,7162E-05
7	-	-	-	1,0870E-05
10	2,2805E-06	9,9631E-08	1,4059E-07	8,1867E-06
15	2,0426E-06	4,4893E-08	3,1312E-08	1,1297E-05
20	2,1102E-06	5,1283E-08	4,7676E-08	-
30	1,8022E-06	2,5936E-08	2,9013E-08	-
50	-	3,4943E-08	4,0666E-08	-
70	-	4,3270E-08	5,8938E-08	-

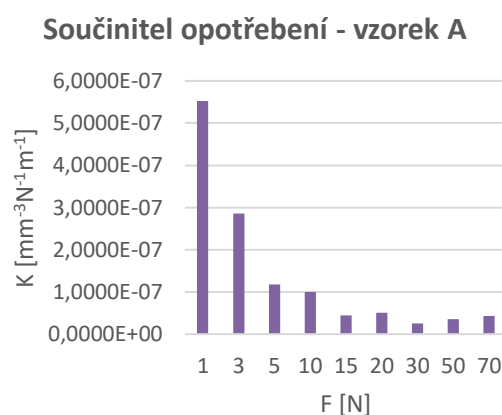
Tabulka 18: Součinitel opotřebení.

Substrát		Vzorek A18		Vzorek B12		Vzorek C18	
μ	St. odchylka:	μ	St. odchylka:	μ	St. odchylka:	μ	St. odchylka:
0,16	$\pm 0,07$	0,148	$\pm 0,063$	0,155	$\pm 0,067$	0,14	$\pm 0,068$

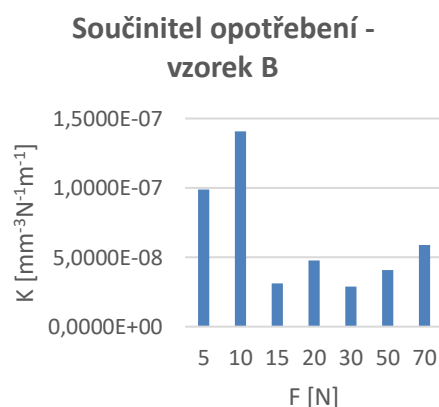
Tabulka 19: Součinitel tření μ [-].



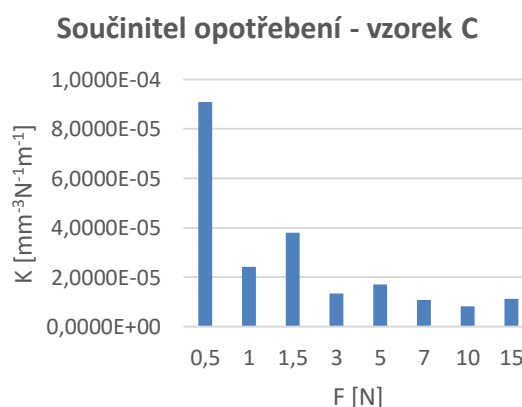
Graf 5: Součinitel opotřebení substrátu.



Graf 6: Součinitel opotřebení anodizované vrstvy.



Graf 7: Součinitel opotřebení anodizované vrstvy + PTFE.



Graf 8: Součinitel opotřebení DLC povlaku.

4.3.5.3 Dílčí závěry

Součinitel tření samotného substrátu odpovídá hodnotám tohoto materiálu. Naměřené hodnoty DLC povlaku jsou na horní hranici výrobcem deklarovaných hodnot. Zanedbatelný rozdíl ve velikosti součinitele mezi vzorky A (anodizovaná vrstva) a B (anodizovaná vrstva + PTFE) je s nejvyšší pravděpodobností způsoben nedostatečnou tloušťkou PTFE (pohybuje se kolem 1 μm). Dle informací ze strany výrobců a jejich dlouhodobého know-how je potřeba dodržet alespoň minimální tloušťku povlaku PTFE 3 μm (ze strany výrobců). Tato tloušťka

zaručuje deklarované funkční vlastnosti povlaku. Bylo by též potřebné analyzovat detailně důvody nedodržení tloušťky povlaku PTFE, který byl stanoven na 5 μm , z důvodu zajištění dlouhodobého udržení funkčnosti a udržení si požadovaných vlastností. Sekundární podporu z hlediska bezpečnosti zajišťuje anodizovaná vrstva, která má stále dostatečnou tloušťku a neohrožuje životnost a funkčnost samotné vývěvy. Vystává zde i možnost v případě dalšího pokračujícího testování zvýšit tloušťku PTFE povlaku na 10 μm a anodizovanou vrstvu nastavit na 25 μm . Toto nastavení má ovšem negativní dopad na zvýšenou přesnost tvorby vrstev a povlaků a tím pádem i zvýšené finanční nároky. Důvodem je hodnota anodizované vrstvy, která je na svém minimu a nesmí být podkročena.

Naměřené hodnoty u vzorků ze základního materiálu a vzorků s anodizovanou vrstvou:

- Mají předpokládaný průběh. S vyšším zatížením roste i míra opotřebení.
- Obdobný průběh, až na některé body měření, má i DLC povlak.

Vzorek B (anodizovaná vrstva s PTFE povlakem) a jeho součinitel opotřebení má nepravidelný průběh z hlediska různých aplikovaných sil. Toto chování je nejspíše způsobeno nedostatečnou tloušťkou povlaku. I přes tento fakt má vzorek B lepší součinitel opotřebení, což naznačuje částečné zvýšení funkčních vlastností byť jen přítomností PTFE povlaku o tloušťce 1 μm .

4.3.6 Numerický model poškozování vrstev a povlaků a ekonomická rozvaha

Numerický model poškozování

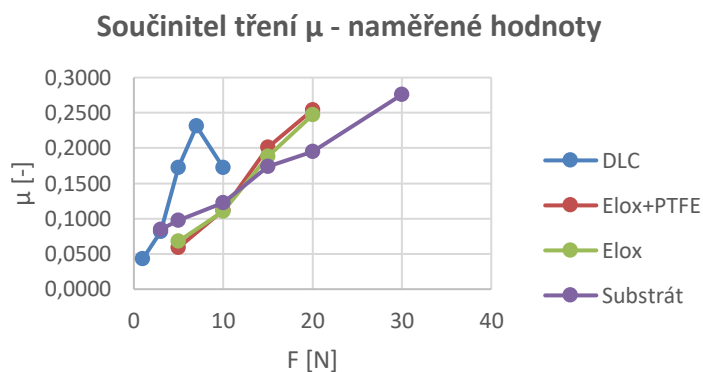
Na základě naměřených dat byl vytvořen numerický model poškozování. V rámci analýzy, vyhodnocení, návrhu vhodných přístupů a jejich aplikace do numerického modelu byla provedena řada dílčích kroků, které lze souhrnně sepsat do počátečních a okrajových podmínek, které jednotlivé modely charakterizují:

- Využití matematického aparátu statistického zpracování dat, pravděpodobnostní a regresní analýzy [29-31].
- Pro definované typy veličin (součinitel tření, vrypová odolnost, součinitel opotřebení) byly sestaveny separátní modely poškozování povrchu (tzn. lze predikovat průběh a výsledné hodnoty veličin).
- U některých modelů pro sledování průběhů poškození jsou použity dva typy výpočtů, které vycházejí z typu hledané veličiny. Tzn. hledáme-li vrypovou odolnost ze zadané síly, tak tento způsob výpočtu je charakterizován polynomičnou rovnicí x -tého řádu. Hledáme-li ovšem sílu, kde výchozí veličinou je potřebná vrypová tvrdost, tak použitá matematická rovnice může být jiného řádu či zcela jiného typu. Důvodem k tomuto přístupu byla snaha minimalizovat až eliminovat možnost šíření chyb (ať již chyby náhodné či systematické).

	Parametry:	Popis a jednotky:	Substrát	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ +PTFE	DLC
	Fyzikální parametry:	Teplota [°C]: Tloušťka vrstvy/povlaku [μm]: Základní materiál [-]:		21 37,9 ± 1,1 EN AW-6082		
Součinitel tření μ [-]:	Matematické parametry:	Spojnice bodů (naměřených veličin) charakterizuje: Prům. odchylka [%]:		Log. funkce ±18	±2	±2 ±3
Vrypová odolnost HSp [GPa]:	Matematické parametry:	Spojnice bodů (naměřených veličin) charakterizuje: Prům. odchylka [%]:	Exp. funkce	Pol. 3. řádu		
Síla F [N] z vrypové odolnosti:	Matematické parametry:	Spojnice bodů (naměřených veličin) charakterizuje: Prům. odchylka [%]:	-	Pol. 3. řádu	Pol. 4. řádu	Pol. 3. řádu
Součinitel opotřebení K [mm ⁻³ N ⁻¹ m ⁻¹]:	Matematické parametry:	Spojnice bodů (naměřených veličin) charakterizuje: Prům. odchylka [%]:	-	±5	±16,6	±7,5
Síla F [N] z součinitele opotřebení:	Matematické parametry:	Spojnice bodů (naměřených veličin) charakterizuje: Prům. odchylka [%]:	-	-	Pol. 4. řádu	-

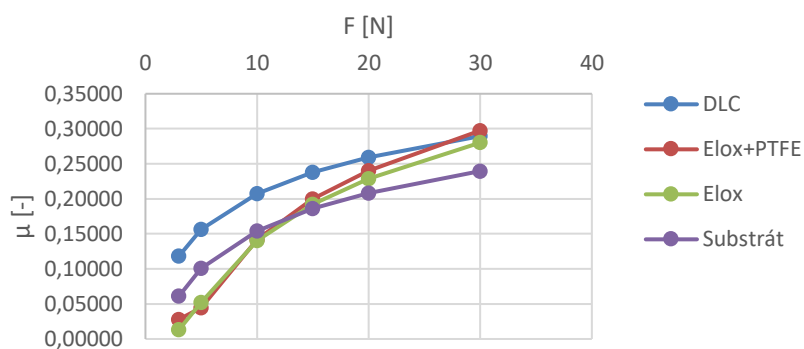
Tabulka 20: Přehled podmínek

Grafy níže uvádějí srovnání naměřených a vypočtených sledovaných veličin. Z grafů a tabulky výše je patrné, že pomocí matematických metod je dosaženo vysoké míry přesnosti modelů.



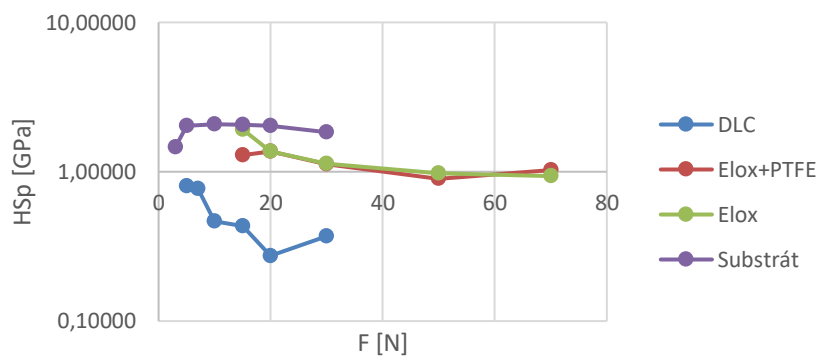
Graf 9: Součinitel tření (naměřené hodnoty).

Součinitel tření μ - numerický model



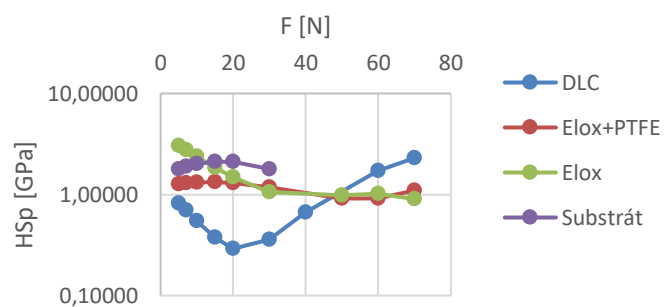
Graf 10: Součinitel tření (vypočtený).

Vrypová odolnost HSp - naměřené hodnoty (logaritmické měřítko)

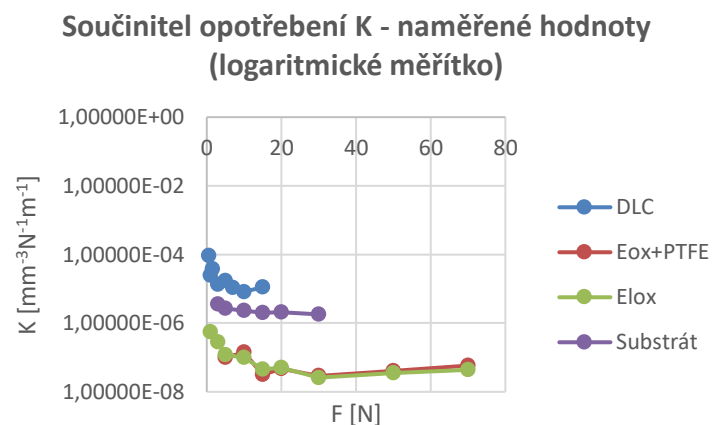


Graf 11: Vrypová odolnost (naměřená, vynesena v log. měřítku pro větší přehlednost).

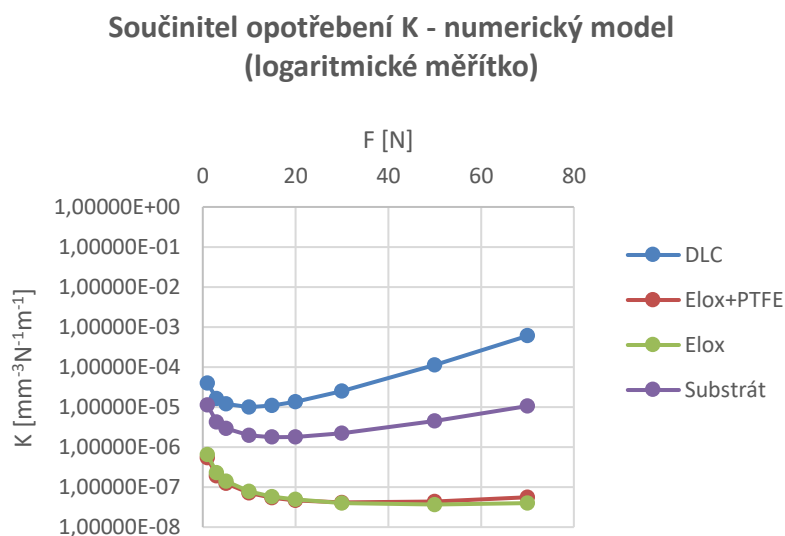
Vrypová odolnost HSp - numerický model (logaritmické měřítko)



Graf 12: Vrypová odolnost (vypočtená, vynesena v log. měřítku pro větší přehlednost).



Graf 13: Součinitel opotřebení (naměřená, vynesena v log. měřítku pro větší přehlednost).



Graf 14: Vrypová odolnost (vypočtená, vynesena v log. měřítku pro větší přehlednost).

Ekonomická a celková rozvaha

Jedním z klíčových parametrů pro volbu povrchové úpravy je cena. Rozvaha se opírá o historická data, průzkum současného trhu a splnění slibu o nesdělování cen. Níže je uvedena zevrubná metodika nacenění.

Počáteční podmínky pro nacenění:

- Typ materiálu, na kterém bude prováděna povrchová úprava.
 - Materiál: EN AW-6082 (slitina na bázi hliníku)
- Rozměry, obsah a tvarová členitost dílce:

- Tyto parametry mají zásadní vliv na výslednou cenu povrchové úpravy, neboť dle rozměrů a členitosti povrchu musí být užitá technologie přizpůsobena.

Z obdržených dat je sestaven žebříček od nejlevnější až po nejdražší povrchovou úpravu:

1. Tvrdá anodická vrstva:
 - Cena se pohybuje v řádů desítek korun až několika jednotek stokorun.
2. Tvrdá anodická vrstva s PTFE:
 - Cena je v rozmezí 1,2 - 1,5 násobku ceny za tvrdou anodizaci.
3. DLC povlak:
 - Cena povlaku se pohybuje od 6,5 až do 20,6 násobku ceny za tvrdou anodizaci.

	Základní požadavky:	Váha / Významnost:	Úroveň požadavků:			
			Substrát	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ +PTFE	DLC
Materiálová oblast:	Mikrotrhliny - minimum.	10	10	7	8	9
	Porozita - minimum	10	10	7	9	10
	Neřízená oxidace - minimum.	10	1	10	10	10
	Souvislost vrstvy/povlaku	10	1	9	10	10
	Rovnoměrnost vrstvy/povlaku	10	1	9	9	10
	Korozivzdornost	10	4	10	10	10
	Chem. netečnost:	10	1	10	10	10
	Součinitel tření:	10	7	9	9	10
	Topografie: Drsnost:	7	1	8	8	10
	Tvrdost/nanotvrdost:	9	1	8	9	10
	Tloušťka vrstvy/povlaku:	10	1	1	5	9
	Mezihodnocení:		37,6	84,8	93,7	104
Tribologie:	Scratch test (vrypová odolnost):	8	10	8	9	3
	Součinitel opotřebení:	10	4	8	9	3
	Mezihodnocení:		12	16	16,2	5,7
Ekonomické hledisko:		10	10	10	8	1
		Mezihodnocení:	10	10	8	1
		Celkové hodnocení:	59,6	111	117,9	110,7

Tabulka 21: Celková rozvaha (zhodnocení).

Vysvětlivky:

Váha/Významnost: číslo 1...minimální významnost,
 číslo 10...maximální významnost.

Úroveň požadavků: číslo 1...minimální úroveň či nesplňuje,
 číslo 10...maximální úroveň či splňuje

4.3.6.1 Dílčí závěry

Numerický model potvrzuje korektnost naměřených dat a zároveň umožňuje predikci poškození různých povrchů. Dále má přínos v reálných aplikacích na urychlení vývojové části z pohledu konstruktérských a materiálových, neboť popisuje základní chování materiálu a povlaků za definovaných podmínek.

Dalším směrem k rozšíření modelu a jeho použitelnosti by mohlo být:

- Příprava vzorků s různou tloušťkou vrstev/povlaků.
- Testování za různých teplot.

Tyto směry by mohly sloužit k rozšíření komplexnosti modelu, který by umožňoval v daných limitech simulovat kompletní chování povlaků.

Model byl vytvořen v prostředí MS Excel z důvodu minimalizace požadavků na různá softwarová vybavení a je součástí digitální přílohy této disertační práce.

5 ZÁVĚR

V rámci disertační práce byly připraveny tři typy povrchových úprav, u kterých byl predikován pozitivní dopad na primární funkční vlastnosti vakuových systémů, jakož jsou snížení opotřebování dílců, zlepšení sacích vlastností, ale taktéž přispět ke zlepšení sekundárních vlastností (hlučnost, provozní teplota).

Tyto povlaky byly vybrány zcela záměrně podle předem nastavených počátečních podmínek (požadavky společnosti, obchodní trh, funkční a ekonomické požadavky).

Jelikož nebylo možné realizovat materiálovou změnu základního materiálu (z důvodu požadavku společnosti), tak všechny zkoumané vzorky obsahují stejné typy částic β -fáze (intermetalik) na bázi Mn, Fe, Si. Tyto částice během přípravy vrstvy nevykazovaly oxidaci.

Výsledky zkoumání v materiálové oblasti (mikrostruktura, topografie, tloušťka, tvrdost a drsnost povrchu) určily pořadí následovně:

1. DLC povlak.
2. Anodická vrstva s PTFE.
3. Anodická vrstva.

Z hlediska tribologického zkoumání (součinitel tření, opotřebení a vrypové odolnosti) určily pořadí následovně:

1. Anodická vrstva s PTFE.
2. Anodická vrstva.
3. DLC povlak.

Dle ekonomické rozvahy vychází pořadí následovně:

1. Anodická vrstva.
2. Anodická vrstva s PTFE.
3. DLC povlak.

Výsledné pořadí dle zvolených parametrů bylo určeno následovně:

1. Anodická vrstva s PTFE.
2. Anodická vrstva.
3. DLC povlak.

Numerický model lze využít s jistými počátečními omezeními/podmínkami, jak bylo uvedeno v dřívější kapitole, ale i přes tato omezení může být cenným nástrojem pro získání rychlého přehledu o chování povlaků v této práci zkoumaných.

U anodické vrstvy s PTFE byly odhaleny mikrotrhliny, které mohou souviset s technologií přípravy vrstvy. Tyto trhliny mohou vést postupem času k šíření trhlin napříč vrstvou až do substrátu a následně zapříčinit odlupování vrstvy a povlaku. Tloušťka PTFE povlaku nedosáhla potřebných hodnot, které mohou souviset s technologií teflonování, ale navzdory tomuto stavu další zkoumání poukázalo na vysokou míru vhodnosti této technologie.

Technologie anodizování, teflonování a i DLC jsou velmi známé napříč různými průmyslovými i vědními obory. A přestože tu jsou s námi mnoho let, stále je zde mnoho podnětů k bádání. Příkladem může být rozšíření numerického modelu o chování povrchových úprav při různých tloušťkách, teplotách a dalších parametrech, které dál umožní posunout stav poznání o materiálových vlastnostech a chování nejen povlaků, ale zároveň umožní prohloubit poznání o sériových technologiích a procesech. Ty pak bude možné dále optimalizovat.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MECHLOVÁ, E. a KOŠTÁL, K. *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz*. Praha: Prometheus, 1999. ISBN 80-7196-151-5.
- [2] *Zpravodaj ČVS 18(1)*. str. 2-3, 2010, MK ČR E 11156.
- [3] HARRIS, N.S. *Modern vacuum practice*. 3rd ed. (1st revision). Great Britain: Nigel S. Harris, 2007. ISBN 0-9551501-1-6.
- [4] MICHNA, Š. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [5] TOTTEN, G.E., MACKENZIE, D.S., *Handbook of Aluminium – Vol. 1*, Marcel Dekker, 2001. 1296 p. ISBN 0-8247-0494-0.
- [6] ROBERTSON, J. *Advances in Physics*, roč. 1986, č. 35(4), s. 317.
- [7] PAGNOUX, G., FOUVRY, S., PEIGNEY, M., DELATTRE, B. a MERMAZ-ROLLET, G. Influence of scratches on the wear behavior of DLC coatings. *Wear*. 2015, **330-331**, 380-389. Dostupné z: DOI: 10.1016/j.wear.2014.12.010. ISSN 0043-1648.
- [8] OKUBO, H., TSUBOI, R. a SASAKI, S. Frictional properties of DLC films in low-pressure hydrogen conditions. *Wear*. 2015, **340-341**, 2-8. Dostupné z: DOI: 10.1016/j.wear.2015.03.018. ISSN 0043-1648.
- [9] POLAKI, S.R., KUMAR, N., GANESAN, K., MADAPU, K., BAHUGUNA, A., KAMRUDDIN, M., DASH, S. a TYAGI, A.K.. Tribological behavior of hydrogenated DLC film: Chemical and physical transformations at nano-scale. *Wear*. 2015, **338-339**, 105-113. Dostupné z: DOI: 10.1016/j.wear.2015.05.013. ISSN 0043-1648.
- [10] QIANG, L., GAO, K., ZHANG, L., WANG, J., ZHANG, B. a ZHANG, J. Further improving the mechanical and tribological properties of low content Ti-doped DLC film by W incorporating. *Applied Surface Science*. 2015, **353**, 522-529. Dostupné z: DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.06.040. ISSN 0169-4332.
- [11] VOEVODIN, A.A., MURATORE, C. a AOUADI, S.M. Hard coatings with high temperature adaptive lubrication and contact thermal management: review. *Surface and Coatings Technology*. 2014, **257**, 247-265. Dostupné z: DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.04.046. ISSN 0257-8972.
- [12] BEWILOGUA, K. a HOFMANN, D. History of diamond-like carbon films — From first experiments to worldwide applications. *Surface and Coatings Technology*. 2014, **242**, 214-225. Dostupné z: DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.031. ISSN 0257-8972.
- [13] VETTER, J. 60years of DLC coatings: Historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various DLC types, and their

- evolution for industrial applications. *Surface and Coatings Technology*. 2014, **257**, 213-240. Dostupné z: DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.017. ISSN 0257-8972.
- [14] SOSNOVÁ, M., Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování, 2006, FRVŠ 1230/2006.
- [15] LEDRAPPIER, F., HOUZE, L., HEAU, C. a GERSTENBERGER, J. Tenké povlaky pro snížení ztrát třením: tribologie. Ostrava: Tanger, 2008. ISBN 978-80-254-1987-8.
- [16] MERNA, J.: *Polymery – úvod*, [cit. 2021-10-29]. Dostupné z: <http://merna.eu/wp-content/uploads/2017/03/Polymery-uvod.pdf>
- [17] PROKOPOVÁ, I. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [18] ALMS. [online]. [cit. 2020-10-05]. Dostupné z: <http://www.alms-brno.cz/produkty/1-hlinik/>
- [19] ALUNET. [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-6082>
- [20] GOUEFFON, Y., ARURAUULT, L., MABRU, C., TONON, C. a GUIGUE, P. Black anodic coatings for space applications: Study of the process parameters, characteristics and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, vol. 209, issue 11.
- [21] NOVÁK, P. Koroze kovů: Elektrochemická koroze kovů [online]. Učební text. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemické technologie [cit. 2020-08-01]. Dostupné z: <https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected>.
- [22] VUHZ. [online]. [cit. 2021-10-29]. Dostupné z: <https://vuhz.cz/images/povlaky/pdf/prospekt-povlakovna-brozura.pdf>
- [23] SUI, X., LIU, J., ZHANG, S., YANG, J. a HAO, J. Microstructure, mechanical and tribological characterization of CrN/DLC/Cr-DLC multilayer coating with improved adhesive wear resistance. *Applied Surface Science* [online]. 2018, **439**, 24-32 [cit. 2021-12-15]. ISSN 0169-4332. Dostupné z: DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.266
- [24] OLIVER, W.C., PHARR, G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research* 7, 1564–1583 (1992). Dostupné z: DOI: 10.1557/JMR.1992.1564
- [25] EBATCO. [online]. [cit. 2021-08-19]. Dostupné z: <https://www.ebatco.com/resources/support-videos/>

- [26] ASTM D6425-99 Ball-on-Disc,
- [27] ASTM G1333-95 Ball-on-Flat.
- [28] SHIJUN, D., WEIPING, J. a ZHIJUAN, S. Linear-regression models and algorithms based on the Total-Least-Squares principle. *Geodesy and Geodynamics* [online]. 2012, 3(2), 42-46 [cit. 2021-12-05]. ISSN 1674-9847. Dostupné z: DOI: 10.3724/SP.J.1246.2012.00042
- [29] KUBÁČEK, L. a TESAŘÍKOVÁ, E. *Weakly nonlinear regression models*. Olomouc: Palacký University, 2008. ISBN 9788024422046.
- [30] BOTEK, M. a ADAMEC, L. *Sbírka příkladů z inženýrské ekonomiky a managementu*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2004. ISBN 80-7080-544-7.
- [31] HENDL, J. *Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza dat*. Páté, rozšířené vydání. Praha: Portál, 2015. ISBN 978-80-262-0981-2.

7 SEZNAM AKTIVIT AUTORA

7.1 Seznam publikací

Publikace jsou řazeny chronologicky (od nejstarších po nejnovější):

- KLAČURKOVÁ, L.; HÉGR, E.; ČELKO, L.; PODRÁBSKÝ, T.; JULIŠ, M.; REMEŠOVÁ, M.; ŠVEJCAR, J. *Comparative Analysis of Hard Anodized Layers on Aluminium Alloy*. Abstract Booklet, 15th International Symposium on Metallography, METALLOGRAPHY 013. 1. Košice, Slovakia: Department of Materials Science, Faculty of Metallurgy, Technical University of Košice, 2013. s. 156-156. ISBN: 978-80-553-1412-9.
- KLAČURKOVÁ, L.; HÉGR, E.; ČELKO, L.; PODRÁBSKÝ, T.; JULIŠ, M.; REMEŠOVÁ, M.; ŠVEJCAR, J. *Comparative Analysis of Hard Anodized Layer on Aluminium Alloy*. *Materials Science Forum*, 2014, roč. 2014, č. 782, s. 615-618. ISSN: 0255-5476.
- KLAČURKOVÁ, L.; JULIŠ, M.; ČELKO, L.; HORYNOVÁ, M.; HÉGR, E.; ŠVEJCAR, J. Analysis of surface defects of aluminium components with hard anodized layers. *ENGINEERING FAILURE ANALYSIS*, 2015, roč. 56, č. 1, s. 300-306. ISSN: 1350-6307.
- JULIŠ, M.; KLAČURKOVÁ, L.; GEJDOŠ, P.; HORYNOVÁ, M.; HÉGR, E.; SYTAŘ, P. Methods and techniques of samples preparation for assessment of layers after chemical and heat treatment. In *Conference on Chemical Heat Treatment of Metal Surfaces*. Čerčany, Czech Republic: Asociace pro tepelné zpracování kovů ECOSOND s. r. o., 2015. p. 96-101. ISBN: 978-80-904462-8-1.
- GEJDOŠ, P.; KLAČURKOVÁ, L.; JULIŠ, M.; HORYNOVÁ, M.; REMEŠOVÁ, M.; HÉGR, E. Analysis of Surface Layer Defects on Carburezed Steel Component after Alkaline Blackening. In *Metallography XVI. Materials Science Forum*. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 2017. s. 274-277. ISBN: 978-3-0357-1018-2. ISSN: 0255-5476.
- GEJDOŠ, P.; KLAČURKOVÁ, L.; JULIŠ, M.; HORYNOVÁ, M.; REMEŠOVÁ, M.; HÉGR, E. Analysis of Surface Layer Defects on Carburezed Steel Component after Alkaline Blackening. In *Metallography XVI. Materials Science Forum*. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 2017, pp. 274-277. ISSN: 0255-5476.
- HÉGR, E.; STUDENY, Z.; NGUYEN, H.Ch.; PROCHAZKA, J.; ADAM, J. Evaluation of DLC coating parts of weapons and military equipment. *29th International Conference on Metallurgy and Materials*. Brno, Czech Republic, 2020. p. 632-641. ISBN: 978-80-87294-97-0.

7.2 Projekty

Interní projekt (ve firmě EDWARDS, s.r.o.): Zvýšení životnosti suché spirálové vývěvy.

8 CURRICULUM VITAE

Osobní informace:

Jméno a příjmení: Eduard Hégr
Datum narození: 19.10.1981
Národnost: česká
Rodinný stav: ženatý

Vzdělání:

1994 – 2001: Středoškolské studium: Gymnázium Vyškov.
2001 – 2006: Magisterský studijní program, obor Fyzikální inženýrství, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.

Praxe:

březen – září

2005: Půlroční stáž v Německu na FH – Wiesbaden. Stáž byla zaměřena na akustickou fyziku. Při svém pobytu jsem se zúčastnil i dalších projektů, které tamní fakulta vypsal (např. televizní technika,...).

prosinec – květen

2008/09: Půlroční stáž v rámci doktorského studia na AV ČR v Praze. Cílem stáže bylo vytvoření matematického modelu pro přesné určení pohybu plošiny v celém prostoru (zjednodušená Stewartova plošina), na základě matematického modelu zkonstruovat plošinu založenou na slitinách s tvarovou pamětí a následně tuto plošinu patentovat. Dále bylo třeba vyvinout ovládání plošiny pomocí softwaru LabVIEW

2006 - 2009: Podnikání v oblasti software a hardware. Vytváření programů, webových stránek a dalších na zakázku.

2019 - 2014: Zaměstnanec firmy EDWARDS s.r.o. (vývoj a výroba vakuových systémů) na seniorské pozici vývojového inženýra.

Pracovní náplň:

1. Vědecko-výzkumná činnost.

- Vývoj nových produktů: vytvoření matematického modelu pro určení chování vývěvy za definovaných podmínek, konstrukce vývěvy, vytvoření prototypu vývěvy, krátkodobé a dlouhodobé testy, vytvoření

předprodukční linky, testy u zákazníků a následné uvolnění sériové výroby.

- Zlepšování stávajících vývřev: prioritně na základě materiálové problematiky (vylepšení základního materiálu – pomocí povrchové úpravy, povlaků (tenkých vrstev), či záměnu za nový materiál), konstrukční vylepšení.

- Vytváření vztahů a úzká spolupráce mezi firmou Edwards a vysokými školami, tvorba projektů/grantů, vedení bakalářských a diplomových prací.

- Vytváření projektů jak na úrovni státní - získávání dotací od státu, tak interních projektů, tj. plnohodnotné projektové řízení. Definování řešené problematiky, příprava (definování časového harmonogramu, finanční náročnosti, sestavení multifunkčního týmu a přesné určení zodpovědnosti jednotlivých členů týmu, vedení projektu až k jeho úspěšnému konci vč. aplikace těchto výsledků v praxi.

2. Vedení projektů.

- Vedení týmů (multifunkčních a multikulturních), které byly zaměřeny na R&D problematiku (tj. samotný vývoj a vylepšování produktů, výrobní linky, procesů). Dále pak technickou podporou výrobních linek, stávajících produktů, vytváření interních školení určených pro rozvoj zaměstnanců.

- Transfer R&D oddělení z UK do ČR.

- Vybudování laboratoří, R&D procesů.

3. Ostatní.

- Vytvoření úzké spolupráce s univerzitami, CEITEC VUT Brno.

2014 – 2017:

Zaměstnanec firmy IFE, a.s. (člen KNORR - BREMSE, vývoj a výroba nástupních systémů pro kolejovou dopravu) na pozici vývojového inženýra a projektového vedoucího.

Pracovní náplň:

1. Vědecko-výzkumná činnost.

- Vývoj nových produktů: vytvoření matematického modelu pro určení chování nástupních systémů za definovaných podmínek, konstrukce dveřních křídel, vytvoření prototypu dveřních křídel, krátkodobé a dlouhodobé testy, vytvoření předprodukční linky a následné uvolnění sériové výroby.

- Zlepšování stávajících produktů a technologie: prioritou byla zejména materiálová problematika (vylepšení základního materiálu – pomocí

povrchové úpravy, povlaků (tenkých vrstev), nový materiál) a konstrukční vylepšení nebo aplikace nových směrů v konstrukční oblasti.

2. Vedení projektů.

- Vedení týmů (multifunkčních a multikulturních), které jsou zaměřeny na R&D problematiku (tj. samotný vývoj a vylepšování produktů, výrobní linky, procesů).

3. Proces a technologie.

- Definování/vytváření nových procesů, testování, technologie.

2017 – srpen 2018: Zaměstnanec firmy ZETOR TRACTORS, a.s. (vývoj a výroba zemědělské techniky – traktorů) na pozici projektového manažera a následně manažera projektového oddělení.

Pracovní náplň:

1. Procesní:

- Zavedení projektové metodiky (její definice, popis apod. – např. přípravná fáze TES, SWOT analýza, ROI,...), definování projektových fází, milníků a dalších.

- Popis a definice procesu vývoje (od definice základních požadavků až po uvolnění do sériové výroby – včetně zohlednění, definování, optimalizování všech navazujících a podpůrných procesů – např. nákup materiálu, jeho tok firmou apod.).

- Reorganizace organizační struktury společnosti. Optimalizace standardní struktury společnosti na projektovou strukturu, definování dalších podpůrných procesů (viz výše a další) a popis pracovních náplní zaměstnanců.

2. Vedení projektů, lidí:

- Vedení produktových řad traktorů (stávajících, optimalizace stávajících, nových).

- Vedení projektů určených ke zlepšení efektivity práce, pracovních podmínek atd.

- Nastavování cílů oddělení, strategických cílů firmy, směřování/definice stěžejních projektů atd.

září 2018 –
září 2021:

Zaměstnanec společnosti Déhora Česká republika na pozici (konzultantská společnost) na seniorské konzultantské pozici:

Pracovní náplň:

1. Enterprise Management (řízení podniku):

- Organizační struktura.
- Vize, mise, strategie.
- Procesy (hlavní, podpůrné).

2. Management (řízení):

- Štíhlá výroba.
- Projektové a procesní.
- Kvalita, HR a další.

3. Leadership.

říjen 2021 –

dosud:

Managing Director (Výkonný ředitel) / jednatel společnosti Déhora
Česká republika.