

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



VLASTNOSTI POVLAKŮ S OBSAHEM
NANOČÁSTIC

PROPERTIES OF COATINGS CONTAINING
NANOPARTICLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2023

Autor:	Bc. Petr Hejna
Studijní program:	N0715A270001 Výrobní inženýrství
Studijní obor:	N071TVIN Bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hejna** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **483128**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vlastnosti povlaků s obsahem nanočástic

Název diplomové práce anglicky:

Properties of coatings containing nanoparticles

Pokyny pro vypracování:

1. Nanotechnologie (definice, nanomateriály, nanostruktury, nanočástice)
2. Metody přípravy nanostruktur, nanočástic
3. Vlastnosti nanočástic
4. Nanočástice v povrchových úpravách
5. Zhotovení vzorků
6. Vyhodnocení vzorků (otěruvzdornost, přilnavost, metalografie)

Seznam doporučené literatury:

Fluorinated Coatings and Finishes Handbook. The Definitive User's Guide. A volume in Plastics Design Library. 2nd Edition. 2016. 630 s. ISBN 978-0-323-37126-1.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Vlastnosti povlaků s obsahem nanočástic“ vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Jiřího Kuchaře, Ph.D., IWE. Dále prohlašuji, že veškeré podklady a prameny, ze kterých jsem ve své práci čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Bc. Petr Hejna

PODĚKOVÁNÍ

Nejdříve bych rád poděkoval vedoucímu své závěrečné práce panu Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE za jeho odborné vedení, za cenné rady, připomínky a konzultační hodiny. Dále bych rád poděkoval technickému řediteli firmy Nanotech-Europe panu Milanu Štelcovi za poskytnutí nanopovlaků s obsahem nanočástic IF-WS₂ a za konzultace týkající se problematiky nanopovlaků.

Chtěl bych také poděkovat mé rodině, především pak mým rodičům, kteří mě vždy ve studiu na vysoké škole podporovali a byli mi oporou v těžkých studijních i životních situacích. Vždy byli, jsou a budou mým životním vzorem.

ABSTRAKT

Teoretická část práce shrnuje informace týkající se nanotechnologie a představuje metody přípravy nanostruktur a vlastnosti nanočástic spolu s jejich hlavními aplikačními oblastmi. Jsou uvedeny příklady využití nanočástic v povrchových úpravách zejména pak v nátěrových hmotách a galvanickém pokovování. Práce se v experimentální části věnuje vybraným zkouškám přilnavosti, otěruvzdornosti a mikrostrukturní analýze povlaků s obsahem nanočástic disulfidu wolframu (IF-WS₂). Závěr práce shrnuje získané výsledky.

ABSTRACT

The theoretical part of the thesis summarizes information related to nanotechnology and presents methods of preparation of nanostructures and properties of nanoparticles together with their main areas of application. Examples of the use of nanoparticles in surface treatments, especially in paints and galvanic plating, are given. In the experimental part, the work is devoted to selected tests of adhesion, abrasion resistance and microstructural analysis of coatings containing nanoparticles of tungsten disulfide (IF-WS₂). The conclusion of the work summarizes the obtained results.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nanotechnologie, nanomateriály, nanočástice, nanočástice v povrchových úpravách

KEYWORDS

Nanotechnology, nanomaterials, nanoparticles, nanoparticles in surface treatments

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	9
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	11
1 ÚVOD.....	12
2 NANOTECHNOLOGIE	13
2.1 DEFINICE POJMU NANOTECHNOLOGIE	14
2.2 KLASIFIKACE NANOMATERIÁLU NA ZÁKLADĚ ROZMĚRU – NANOOBJEKTY.....	15
2.2.1 TYPY NANOOBJEKTŮ.....	16
2.3 NANOMATERIÁLY NA BÁZI UHLÍKU	18
2.3.1 FULLERENY.....	18
2.3.2 UHLÍKOVÉ NANOTUBY	19
2.3.3 GRAFEN	20
2.4 NANOSTRUKTURY A NANOČÁSTICE	21
2.4.1 ORGANICKÉ NANOČÁSTICE	22
2.4.2 ANORGANICKÉ NANOČÁSTICE	22
2.4.3 KERAMICKÉ NANOČÁSTICE	22
2.4.4 BIO NANOČÁSTICE	22
2.5 METODY PŘÍPRAVY NANOSTRUKTUR.....	23
2.5.1 METODA TOP-DOWN	23
2.5.2 METODA BOTTOM-UP	23
2.6 VLASTNOSTI NANOČÁSTIC.....	24
2.6.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	24
2.6.2 FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÉ VLASTNOSTI	25
2.6.3 OPTICKÉ VLASTNOSTI.....	25
2.7 HLAVNÍ APLIKACE NANOČÁSTIC	26
2.7.1 MEDICÍNSKÉ APLIKACE	26
2.7.2 ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ.....	27
2.7.3 PRŮMYSLOVÉ APLIKACE.....	27
3 NANOČÁSTICE V POVRCHOVÝCH ÚPRAVÁCH	28
3.1 NANOČÁSTICE V NÁTĚROVÝCH HMOTÁCH	28

3.1.1	NANOČÁSTICE OXIDU TITANIČITÉHO	32
3.1.2	NANOČÁSTICE OXIDU ZINEČNATÉHO	32
3.1.3	NANOČÁSTICE OXIDU KŘEMIČITÉHO	32
3.1.4	NANOČÁSTICE OXIDU HLINITÉHO	32
3.2	NANOČÁSTICE V GALVANICKÉM POKOVOVÁNÍ.....	33
3.2.1	PRINCIP GALVANICKÉHO POKOVOVÁNÍ	34
3.2.2	TECHNOLOGICKÝ POSTUP GALVANICKÉHO POKOVOVÁNÍ.....	36
3.2.3	POUŽÍVANÉ NANOČÁSTICE V GALVANICKÉM POKOVOVÁNÍ	37
4	PŘEDÚPRAVA POVRCHU	38
4.1	MECHANICKÉ PŘEDÚPRAVY POVRCHU	38
4.1.1	OMÍLÁNÍ	39
4.1.2	TRYSKÁNÍ	40
4.1.3	BROUŠENÍ, LEŠTĚNÍ A KARTÁČOVÁNÍ.....	41
4.2	CHEMICKÉ PŘEDÚPRAVY POVRCHU	42
4.2.1	ODMAŠŤOVÁNÍ	42
4.2.2	MOŘENÍ	43
4.2.3	ODREZOVÁNÍ	45
4.2.4	CHEMICKÉ A ELEKTROCHEMICKÉ LEŠTĚNÍ	45
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	46
5.1	NANOTECH-EUROPE.....	46
5.2	NANOČÁSTICE IF-WS ₂	47
5.2.1	POVLAKY POSKYTNUTÉ FIRMOU NANOTECH-EUROPE.....	50
5.3	POPIS EXPERIMENTU.....	52
5.4	PŘEDÚPRAVA POVRCHU	53
5.5	ZHOTOVENÍ VZORKŮ	55
5.5.1	METODA NANESENÍ POVLAKU – DESKA A, B	55
5.5.2	METODA NANESENÍ POVLAKU – DESKA C.....	58
5.6	VYHODNOCENÍ VZORKŮ	61
5.6.1	PŘILNAVOST.....	61
5.6.2	OPOTŘEBENÍ A OTĚRUVZDORNOST.....	65

5.6.3	METALOGRAFIE	84
6	ZÁVĚR.....	96
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	97
	SEZNAM OBRÁZKŮ	109
	SEZNAM TABULEK.....	111
	SEZNAM GRAFŮ.....	112
	SEZNAM PŘÍLOH.....	113
	PŘÍLOHY.....	114

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Caltech	California Institute of Technology
STM	Scanning Tunneling Microscope
AFM	Atomic Force Microscopy
TUS	Tokyo University of Science
CNT	Carbon NanoTube
SWCNT	Single Wall Carbon NanoTube
MWCNT	Multi Wall Carbon NanoTube
TEM	Transmission Electron Microscope
SLG	Single-layer Graphene
HRTEM	High-resolution Transmission Electron Microscopy
CATRIN	Czech Advanced Technology and Research Institute
ICN2	Institut Català de Nanociència i Nanotecnologia
TiO ₂	Oxid titaničitý
SiO ₂	Oxid křemičitý
Fe ₂ O ₃	Oxid železitý
ZnO	Oxid zinečnatý
CeO ₂	Oxid ceričitý
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
CuCl ₂	Chlorid měďnatý
CuSO ₄	Síran měďnatý
Cu	Měď
Cl	Chlor
WC	Karbid wolframu
Ni	Nikl
SiC	Karbid křemíku
NIS	Nanotech Industrial Solutions

WIS	Weizmann Institute of Science
N03	NANOTECH 03
NFM	NANOTECH FM
NEX	NANOTECH EX
hBN	Hexagonální nitrid bóru
RMA	Rychleschnoucí mazací aerosol
MA	Mazací aerosol

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

μ_s [-]	Statický koeficient tření
μ_d [-]	Dynamický koeficient tření

1 ÚVOD

Vývoj moderních technologií je v posledních dvou dekáдах značným způsobem ovlivněn nanotechnologiemi a možnostmi jejich využití. Tato práce si ve své teoretické části klade za cíl seznámit čtenáře s širokým pojmem nanotechnologie jeho definicí s metodami přípravy nanostruktur a vlastnostmi nanočástic společně s jejich hlavními aplikačními oblastmi.

Práce se dále zaměřuje na využití nanočástic v povrchových úpravách, a to především v nátěrových hmotách a galvanickém pokovování. Vhodnou povrchovou úpravou materiálů lze získat požadované vlastnosti povrchů potřebných pro jejich optimální a dlouhodobou funkci. Použitím nanočástic v povrchových úpravách lze dosáhnout jedinečných vlastností, které mají výrazný vliv na koeficient tření či odolnost proti opotřebení materiálu.

Závěr teoretické části je věnován předúpravě povrchu, která je jedním ze základních faktorů ovlivňujících životnost povrchových úprav. Vhodně zvolená a správně aplikovaná předúprava je nezbytným předpokladem pro úspěšné provedení povrchové úpravy.

Cílem experimentální části diplomové práce je podrobit povlaky s obsahem nanočástic disulfidu wolframu (IF-WS_2) poskytnuté firmou Nanotech Europe s.r.o. vybraným zkouškám přilnavosti, otěruvzdornosti a provést mikrostrukturní analýzu na vybraných vzorcích. Získané výsledky ze zvolených zkoušek jsou shrnuty v závěru práce.

2 NANOTECHNOLOGIE

Poprvé přišel s myšlenkou možností vytváření materiálů a mechanismů na úrovni atomů a molekul již v roce 1959 teoretický fyzik a laureát Nobelovy ceny Richard Philips Feynman, který ji nastínil při své přednášce „There’s Plenty of Room at the Bottom“ na výročním zasedání American Physical Society na Kalifornském technologickém institutu (Caltech) v Pasadeně, USA. Feynman tehdy uvedl, že příroda má schopnost vytvářet a využívat tyto struktury, a není důvod, proč by člověk nemohl také. V době, kdy Richard P. Feynman předpovídal možnost vytváření materiálů a mechanismů na úrovni atomů a molekul však ještě neexistovala technologie, která by umožnila pozorování a manipulaci s velmi malými “nano” objekty. Proto byly některé z těchto úvah považovány za pouhé utopie. Feynman tehdy nazýval tento obor mikrotechnologií. [1,2,3,5,6]

Po roce 1960 se začaly postupně vyvíjet různé metody tvorby nanočástic. Klíčový průlom v rozvoji nanotechnologií nastal však až v osmdesátých letech dvacátého století s objevem mikroskopových metod Skenovacího tunelovacího mikroskopu (STM – Scanning Tunneling Microscope) a Mikroskopu atomových sil (AFM – Atomic Force Microscopy), které umožnily pozorovat a měřit procesy až na úrovni jednotlivých atomů. Od tohoto okamžiku dochází k prudkému nárůstu počtu objevených faktů, publikací, patentů a praktických aplikací nanotechnologií v různých oblastech lidské činnosti. [1,2,3,4,5,6]

O vůbec první použití slova “nanotechnologie” se obecně zasloužil v roce 1974 japonský profesor fyziky Norio Taniguchi z Tokijské univerzity (Tokyo University of Science), který tímto způsobem pojmenoval novou měřicí metodu, která umožňovala vyvíjet materiály s přesností na nanometry. Tento název se postupem času stal široce užívaným pojmem pro studium tzv. nanovědy. [1,2,3,4,5,6]

Nanověda se zabývá zkoumáním vlastností nanomateriálů, jejichž základní stavební jednotkou jsou nanoobjekty (tzn. oblasti částic a struktur o rozměrech mezi 1 nm až 100 nm, které vykazují unikátní vlastnosti, které se v makroskopických rozměrech dané látky nevyskytují). [1,2,3,4,5,6]

2.1 DEFINICE POJMU NANOTECHNOLOGIE

Nanotechnologie je multidisciplinární vědní obor, který propojuje oblasti fyziky, chemie, biologie, medicíny, a inženýrství. Zahrnuje jevy, techniky, zařízení nebo struktury, které mají rozměry v řádu nanometrů, což je jedna miliardtina metru. Takovéto rozměry odpovídají úrovni atomů a molekul. [1,2,5,6]

Existuje několik různých podmínek, které musí dané materiály, systémy, jejich aplikace nebo způsob tvorby splňovat, aby mohly být označeny za nanotechnologie. [1]

Podmínky:

- Disponují minimálně jedním rozměrem nebo svou vnitřní strukturou v rozmezí 1 –100 nm.
- Uplatňují své fyzikální a chemické vlastnosti na atomové a molekulové úrovni.
- Lze je kombinovat tak, aby utvářely větší struktury s důsledky do makrosvěta. [1]

Pojem nanotechnologie nemá v současné době univerzálně platnou a jednotnou definici. Avšak existuje několik obecně rozšířených definic, které tento pojem formulují.

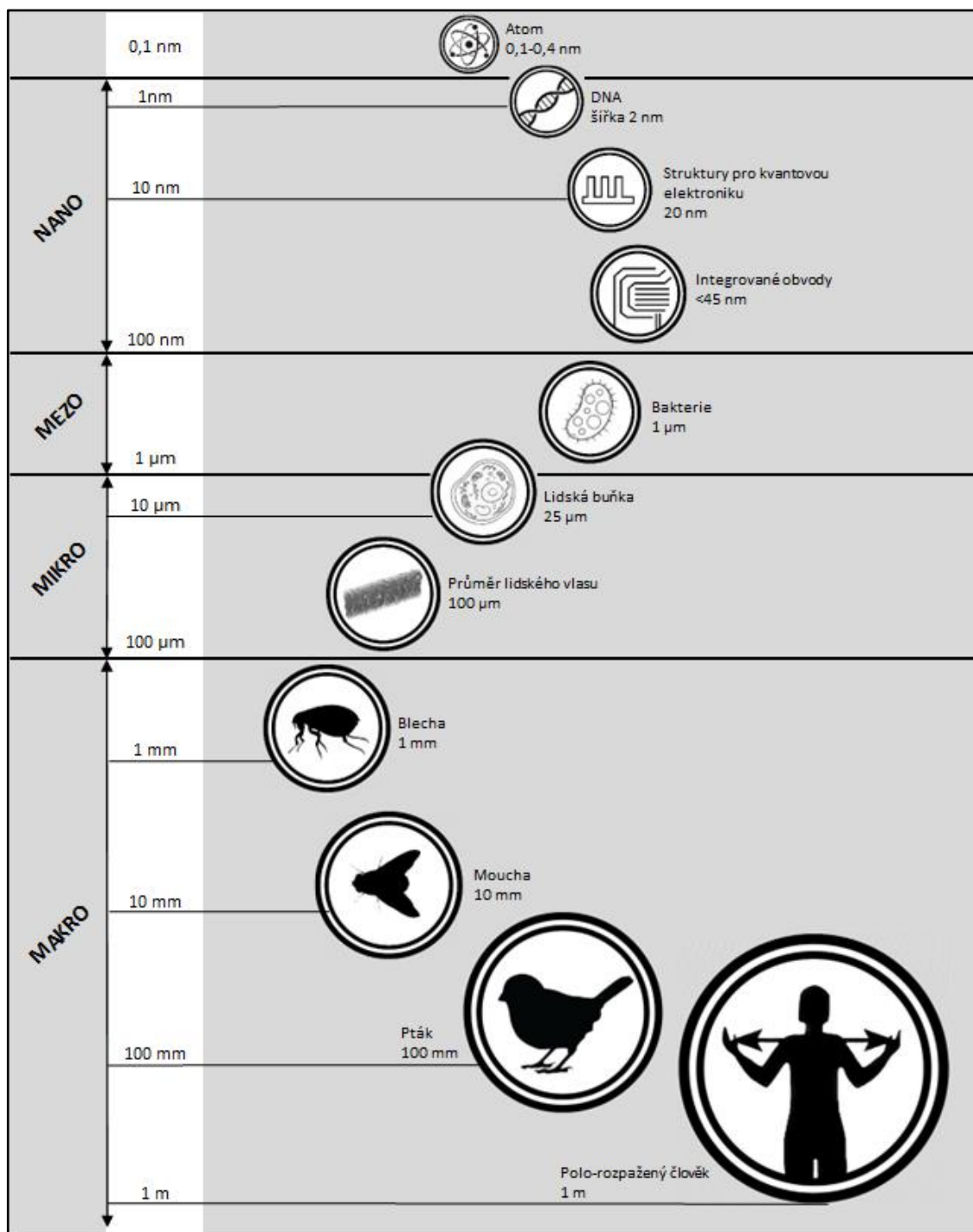
Obecně platné definice:

- Nanotechnologie zkoumá jevy a zdokonaluje materiály na úrovni atomů, molekul a makromolekul, jejichž vlastnosti se výrazným způsobem odlišují od vlastností ve větším měřítku. [4]
- Nanotechnologie se věnuje zkoumání a využití struktur o rozměrech v rozmezí 1 –100 nm. [7]
- Materiály, struktury, systémy a jejich aplikace, které získávají nové vlastnosti a schopnosti díky uspořádání jejich atomů v rozsahu velikostí od 1 –100 nm. [8]

Z uvedených definic je patrné, že se většina z nich zakládá na vymezení rozsahu velikosti nanoobjektu. Naopak jednotlivé definice od sebe navzájem odlišuje důraz na různé aspekty nanotechnologie.

2.2 KLASIFIKACE NANOMATERIÁLU NA ZÁKLADĚ ROZMĚRU – NANOOBJEKTY

Z definic, které byly uvedeny výše vyplývá, že nanoobjekty jsou základní stavení jednotkou nanomateriálů. Nanoobjekty lze považovat za částice, jejichž vnitřní struktura disponuje minimálně jedním rozměrem o velikosti 1–100 nm. Za účelem usnadnění představy o velikostech různých objektů byla vytvořena rozměrová škála nano a makro světa – viz. obr. 1. [1,2,3,4,5,6]

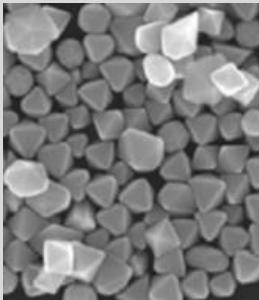
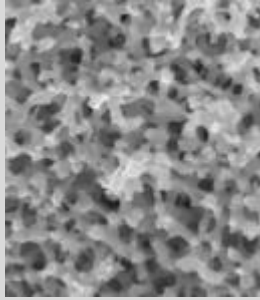
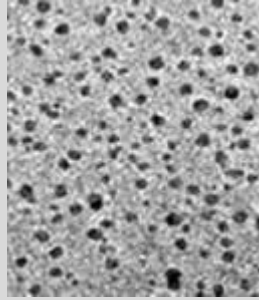

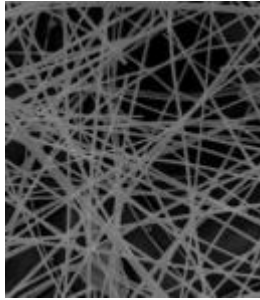
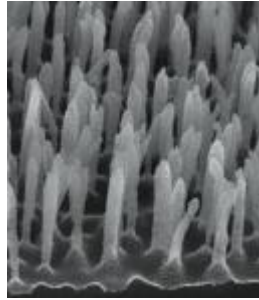
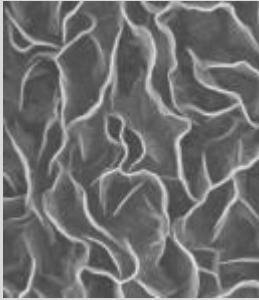
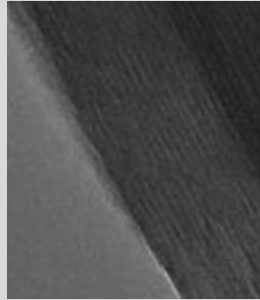
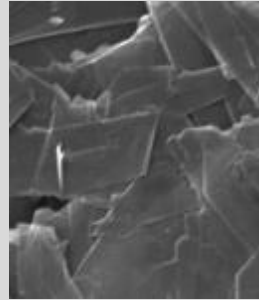


Obr. 1– Rozměrová škála nano a makro světa [1,81-87]

2.2.1 TYPY NANOOBJEKTŮ

Nanoobjekty lze rozlišovat na základě řady kvalitativních parametrů. Norma ISO/TS 27687 definuje, že základním parametrem pro rozdělení nanoobjektů je počet souřadnic, ve kterých daná částice nabývá hodnot od 1 do 100 nm. Dle této normy je možné nanoobjekty rozdělit na:

- 0 dimenzionální nanoobjekty – nabývají rozměrů od 1 do 100 nm ve všech třech souřadných osách. Souhrnným pojmem jsou označovány jako tzv. nanočástice. Kromě samostatných nanočástic mohou být do této skupiny zařazeny i nanomateriály typu:
 - kvantové tečky,
 - porézní nanomateriály a nanopěny,
 - vrstvy, povlaky a objemy tvořené z nanomateriálů,
 - objemové nanomateriály a nanostroje složené z makromolekul.
- 1 dimenzionální nanoobjekty, tzv. nanovlákná – nabývají rozměrů od 1 do 100 nm ve dvou souřadných osách. Souhrnným pojmem jsou označovány jako tzv. nanovlákná, která lze dále dělit na:
 - nanopilíře,
 - nanotyče,
 - nanodráty,
 - nanopásky,
 - nanovlákná,
 - nanotrubičky,
 - kvantové dráty.
- 2 dimenzionální nanoobjekty, tzv. nanodesky – nabývají rozměrů od 1 do 100 nm pouze v jedné souřadné ose. Souhrnným pojmem jsou označovány jako tzv. nanodesky. Tyto nanoobjekty lze dále rozdělit na:
 - nanostěny,
 - tenké vrstvy,
 - kvantové jámy,
 - deskovité nanokrystaly,
 - rovinné makromolekuly – viz. obr. 2. [1,5,6]

<p>Nanočástice 0 D</p>	 <p>Nanokrystaly [88]</p>	 <p>Nanopěna [89]</p>	 <p>Kvantové tečky [90]</p>
<p>Nanovláčna 1 D</p>	 <p>Nanovláčna [91]</p>	 <p>Nanodráty [92]</p>	 <p>Nanopilíře [93]</p>
<p>Nanodesky 2 D</p>	 <p>Nanostěny [94]</p>	 <p>Tenké vrstvy [95]</p>	 <p>Rovinné makromolekuly [96]</p>

Obr. 2– Ukázky různých typů nanoobjektů [88-96]

Dále lze rozeznávat také tzv. 3D nanoobjekty. Jedná se o makroskopické typy vícefázových materiálů, které obsahují nanoobjekty¹ libovolného typu. Pokud se materiál v pevné fázi kombinuje s nanostrukturním materiálem, jedná se o nanokompozity. Pokud je nanostrukturní materiál rozptýlen v kapalině nebo plynu, označuje se jako nanotekutiny (mezi nanotekutiny patří jak nanokapaliny, tak koloidní roztoky nanočástic). [1,6]

¹) Termín "nanoobjekty" zahrnuje jak nanočástice, tak nanostruktury.

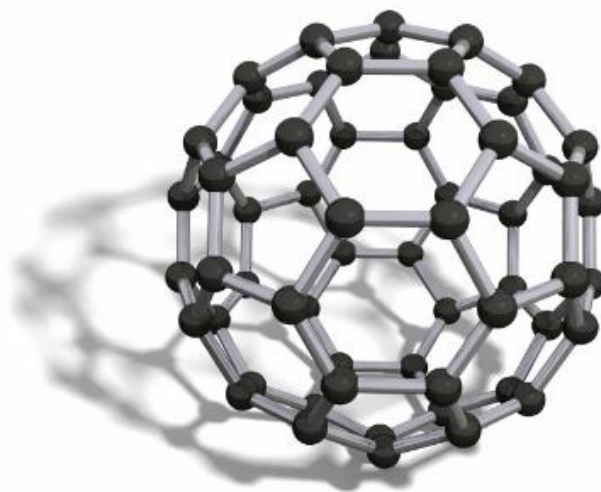
2.3 NANOMATERIÁLY NA BÁZI UHLÍKU

Nanomateriály na bázi uhlíku představují jedny z nejperspektivnějších typů nanomateriálů. V makroskopickém měřítku jsou známy dvě základní alotropické modifikace uhlíku, a to grafit a diamant. Pokud se však hovoří o "nano" materiálech, které jsou zcela složeny z uhlíku, mluví se především o fullerelech, uhlíkových nanotrubičkách a o grafenu (též alotropické modifikace uhlíku). Tyto formy čistého uhlíku jsou složeny z přímých uhlíkových řetězců nebo jeho cyklických struktur. Mezi další nanomateriály, které jsou zcela na bázi uhlíku patří například uhlíková nanovlákna [1,2,6,15]

2.3.1 FULLERENY

Fullereny jsou obrovskou skupinou uhlíkových molekul, které nabývají různých tvarů. Tato skupina začíná molekulou C_{20} a končí molekulami s několika stovkami až tisíci atomů. Postupem času jsou objevovány stále nové molekuly čítající tisíce atomů, proto není horní hranice této skupiny uhlíkových molekul jasně definována. [1,2,4,6]

Fulleren C_{60} je nejvýznamnějším představitelem této skupiny uhlíkových molekul a vykazuje mnoho zajímavých vlastností. Mezi tyto vlastnosti patří například vynikající mechanická odolnost a snadná reaktivita s řadou molekul. Fulleren C_{60} je také nejstabilnější a nejsymetričtější zástupcem uhlíkových molekul – viz. obr. 3. Pro představu, velikost fullerenu C_{60} činí 0,706 nm. [1,2,4,6,20]



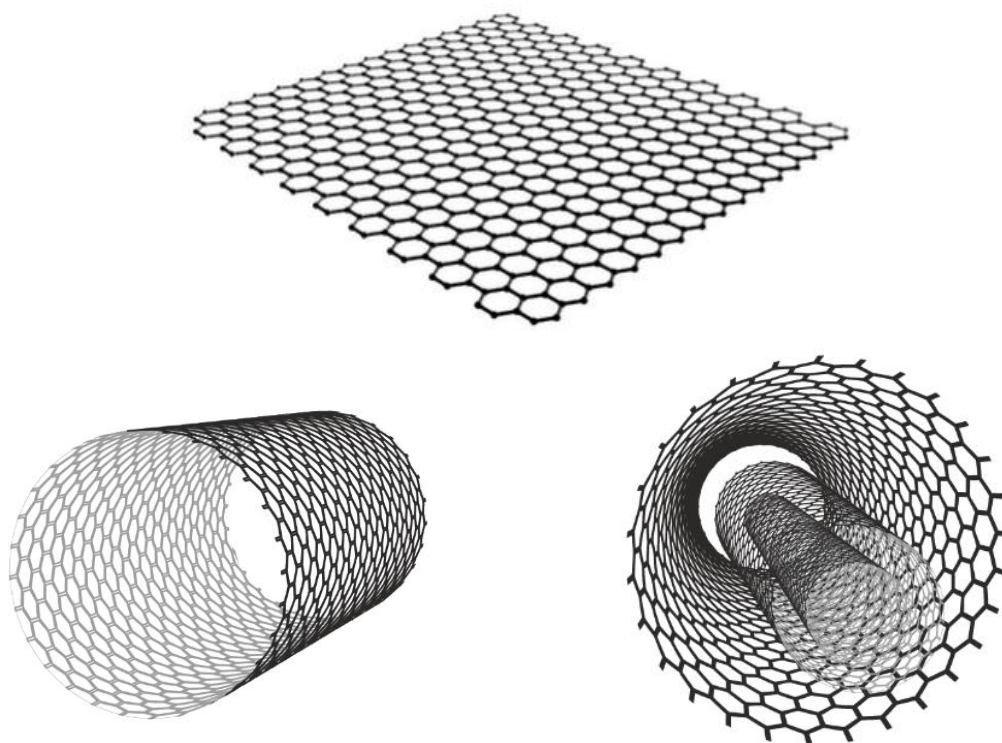
Obr. 3 – Fulleren C_{60} [97]

Laureát Nobelovy ceny Sir Harold Walter Kroto objevil fullereny v roce 1985 při experimentech se zplyňováním grafitu pomocí pulzního Nd: YAG laseru v He atmosféře. Objev fullerenů byl oceněn roku 1996 Nobelovou cenou za chemii. Sir Harold Kroto nazval tyto molekuly "fullereny" na počest amerického architekta Buckminstera Fullera, který se proslavil stavbami kulovitých tvarů složených z pěti- a šestiúhelníků v šedesátých letech dvacátého století. [1,2,4,6,20]

2.3.2 UHLÍKOVÉ NANOTUBY

Fullereny jsou uhlíkové molekuly, které představují deformovaný grafénový list do kulovitého tvaru 0 dimenzionální nanočástice, zatímco uhlíkové nanotuby (Carbon NanoTube) jsou 1 dimenzionální nanočástice, které vznikají lineárním stočením grafénového listu do trubice válcového tvaru. Uhlíkové nanotuby tvoří struktury o průměru 1–2 nm a délce až 300 μm . [1,2,4,6,15]

Uhlíkové nanotuby mají několik významných vlastností, mezi které patří například velká pevnost v tahu, vysoká tepelná a elektrická vodivost, odolnost vůči vysokým teplotám a také vysoká mechanická poddajnost. Nicméně, tyto vlastnosti se mohou lišit v závislosti na typu, velikosti nebo modifikaci dané uhlíkové nanotuby. Mezi základní druhy uhlíkových nanotub patří jednostěnné nanotuby (SWCNT), víceštěnné nanotuby (MWCNT) – viz. obr. 4 a duté či plné nanotuby. [1,2,4,6,15]



Obr. 4 – Uhlíkové nanotuby (CNT) [98,99]

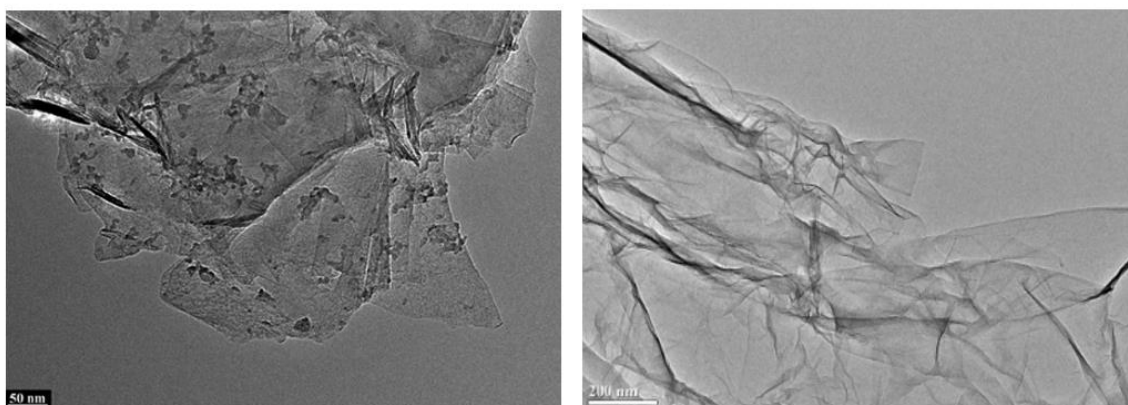
(nahore – destička grafenu, vlevo – SWCNT, vpravo – MWCNT)

Za objevitele uhlíkových nanotrubic je celosvětově považován japonský profesor fyziky Sumio Iijima, který roku 1991 publikoval zprávu o koncentrických mnohostěnných uhlíkových nanotrubicích (MWCNT) jakožto vedlejším produktem při tvorbě fullerenu. Dva roky poté došlo k vědeckému průlomům, když dva nezávislé výzkumné týmy neočekávaně objevily jednostěnné uhlíkové nanotrubicce (SWCNT). [1,2,4,6,15]

2.3.3 GRAFEN

Grafen je v současnosti jedním z nejzajímavějších materiálů v oblasti vědy a technologie. Jedná se o dvoudimenzionální materiál skládající se z jedné vrstvy atomů uspořádaných do hexagonální mřížky. Tento jednovrstvý materiál, jehož šířka struktury je 0,142 nm, má mnoho zajímavých vlastností, které ho činí velmi atraktivním pro různé aplikace. Grafen je zároveň jeden z nejpevnějších materiálů na světě. [2,4]

Grafen je v současné době využíván v obrovské škále různých aplikací, například v elektronice, solárních bateriích či v biomedicíně. Zároveň se používá například k ochraně povrchů před korozí nebo k výrobě super pevných materiálů. Jeho vlastnosti jsou ovlivněny nejen chemickou strukturou, ale také fyzikálními vlastnostmi a interakcemi s dalšími materiály. Mezi jeho nejvýznamnější vlastnosti patří vysoká tepelná vodivost, tuhost a pevnost. [2,4,23,24]



Obr. 5 – TEM snímek grafenových vrstev [100,101]
(vlevo – vícevrstvý grafen, vpravo – jednovrstvý grafen)

Grafen si lze představit jako nanodestičku – viz. obr. 4. Vrstvením těchto nanodestiček, které jsou od sebe vzdáleny jen několik desetin nanometru lze vytvořit grafit. Pro představu, pro vytvoření jednoho milimetru grafitu je zapotřebí asi tří milionů nanodestiček. [26]

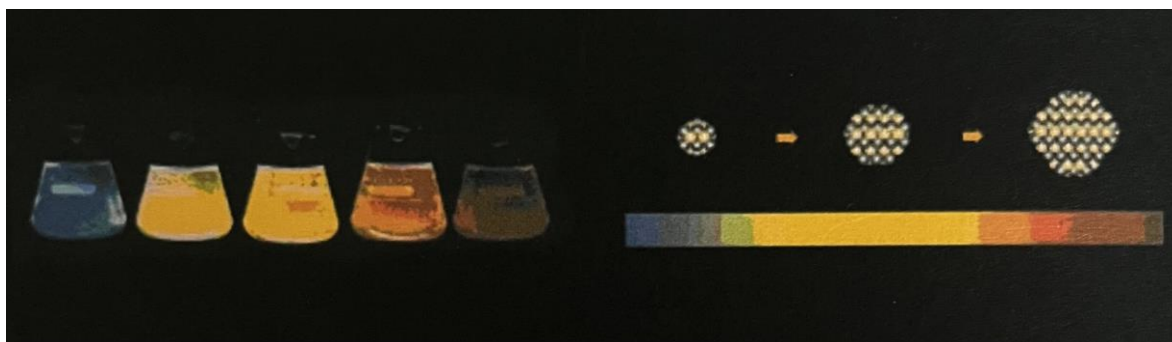
Poprvé se grafen podařilo získat roku 2004 skupině vedené britsko-ruským fyzikem Konstantinem Sergejevičem Novoselovem a jeho kolegou Andreem Konstantinem Geimem na univerzitě v Manchesteru ve Velké Británii. Jejich skupina jako první zdokumentovala za pomoci optického mikroskopu vločky jednovrstvého grafenu (SLG), které byly do té doby z důvodu své úplné průhlednosti prakticky nedetekovatelné. Za tento významný úspěch na poli vědy byla dvojice v roce 2010 oceněna Nobelovou cenou za fyziku. [2]

Samotný pojem "grafen" jako první použil již v roce 1962 německý profesor chemie Hans-Peter Boehm, který tímto pojmem popsal jednovrstvé uhlíkové fólie. [25]

2.4 NANOSTRUKTURY A NANOČÁSTICE

Nanostrukturami nazýváme materiálové útvary, které mají alespoň jeden rozměr v řádu nanometrů. Tyto struktury mají specifické vlastnosti, které nejsou pozorovatelné v makroskopických rozměrech stejné látky. Podstatou těchto unikátních vlastností je jev, který obecně označujeme jako tzv. kvantové omezení (quantum confinement). K tomuto jevu dochází při zmenšování rozměrů struktury, čímž se zároveň zmenšuje prostor pro volný pohyb elektronů či fotonů. Pokud by velikost struktury nebo částice byla minimálně v jednom rozměru menší než vlnová délka elektronu (tj. 6 nm), musí se daný elektron přizpůsobit takové velikosti, a zkrátit tak svou vlnovou délku na rozměr částice. Tento krok způsobí, že elektron zvýší svou energii a vytvoří vyšší energetickou hladinu. V důsledku toho se začnou měnit fyzikální, fyzikálně-chemické a optické vlastnosti látky jako je například světelná absorpce, barva, rozpustnost a další. [1,2,3,4,6]

Konkrétní případ, kdy snížení rozměru nanočástice pod určitou hranici způsobí změnu ve fyzikálně-chemických vlastnostech dané látky je ukázán na obr. 6. [6]



Obr. 6 – Fluorescence částic Cd_3P_2 [6]

Jak již bylo zmíněno, nanočástice jsou malé částice s rozměry v řádu nanometrů, zatímco nanostruktury jsou materiálové útvary s minimálně jedním rozměrem v řádu nanometrů, které mohou nabývat různých tvarů a složení. Rozdíl mezi danými pojmy spočívá v tom, že nanočástice jsou jedním konkrétním typem nanostruktury, zatímco nanostruktura je širším pojmem, který zahrnuje různé druhy materiálových útvarů. [1,2,3,4,5,6]

Nanočástice lze rozdělit na několik druhů, které se od sebe navzájem liší svou morfologií, velikostí a tvarem. Mezi ty nejdůležitější druhy nanočástic patří:

- organické nanočástice,
- anorganické nanočástice,
- keramické nanočástice,
- bio nanočástice. [15]

2.4.1 ORGANICKÉ NANOČÁSTICE

Organické nanočástice jsou malé částice, které jsou složeny z proteinů, sacharidů, lipidů, polymerů nebo jiných organických sloučenin. Nevykazují žádné toxické účinky a jsou biologicky rozložitelné. Vyznačují se také mnoha dalšími vlastnostmi jako je například rozpustnost v organických rozpouštědlech, biologická kompatibilita a schopnost reagovat s jinými organickými sloučeninami. Organické nanočástice jsou navíc citlivé na tepelné a elektromagnetické záření jako je teplo a světlo. [17,29,30]

Tyto nanočástice mají široké spektrum aplikací v oblastech biomedicíny, sensoriky a dalších. V současné době se organické nanočástice využívají především v oblasti biomedicíny pro cílenou dodávku léčiv. Mezi nejvýznamnější nanočástice tohoto typu patří feritin, micely, den-drimery a liposomy. [15,27,28]

2.4.2 ANORGANICKÉ NANOČÁSTICE

Anorganické nanočástice se liší od organických tím, že nejsou vyráběny z uhlíku nebo organických materiálů. Nicméně stejně jako organické jsou i tyto nanočástice netoxické a biologicky kompatibilní. Anorganické nanočástice se dále dělí na nanočástice kovů a oxidů kovů. [15,27]

Kovové nanočástice jsou vyrobeny z čistě kovových prekurzorů (tj. materiál, který je potřebný pro výrobu daného produktu), přičemž mezi známé nanočástice tohoto typu patří nanočástice hliníku, zlata, železa, olova, stříbra, kobaltu, zinku, kadmia a mědi. Tento typ nanočástic má kromě specifických optických a elektrických vlastností též unikátní i tepelné, magnetické či biologické vlastnosti. Mezi nanočástice oxidů kovů patří oxid zinečnatý (ZnO), oxid křemičitý (SiO₂), oxid železitý (Fe₂O₃), oxid hlinitý (Al₂O₃), oxid ceričitý (CeO₂), oxid titaničitý (TiO₂) a magnetit (Fe₃O₄). [15,27]

2.4.3 KERAMICKÉ NANOČÁSTICE

Keramické nanočástice jsou anorganické tuhé látky skládající se z uhlíčanů, fosforečnanů, karbidů a oxidů kovů (například titan a vápník), přičemž mohou nabývat amorfni, polykrystalické, porézní nebo duté formy. Připravují se pomocí tepelné syntézy a postupného ochlazování. Díky své vysoké stabilitě se keramické nanočástice využívají především v biomedicínských aplikacích a také ve fyziologii a optoelektronice. [15,27]

2.4.4 BIO NANOČÁSTICE

Bio nanočástice jsou přirozeně se vyskytující nanočástice, které se dělí v závislosti na své struktuře na intracelulární a extracelulární. Příkladem bio nanočástic jsou například viry či exosomy, což jsou malé membránové válečky, které jsou uvolňovány z různých buněk v těle včetně buněk imunitního systému. [15,29]

2.5 METODY PŘÍPRAVY NANOSTRUKTUR

Jsou známy dva základní technologické přístupy k přípravě nanočástic. V literatuře jsou známy pod označením Top-down (shora dolů) a Bottom-up (zdola nahoru). [1,2,3,6,11]

2.5.1 METODA TOP-DOWN

Jedná se o metodu, která je založená na fyzikálním přístupu k tvorbě nanoobjektů. Jde o proces, který spočívá ve zmenšování materiálu částic – tvorba nanostruktur z makrolátky. Jedná se o prostorové omezování, kterého může být dosahováno různým způsobem, například mechanickým drcením a mletím, ultrazvukem či chemickým rozpouštěním. [1,2,3,6,11]

Chemické rozpouštění neboli Chemical etching je typickým příkladem metody Top-down, které spočívá v rozpouštění materiálu z povrchu velkých částic. Připravené nanostruktury velkých rozměrů se přenesou do kapalného systému, vlivem kterého dochází k rozpouštění nanočástice a tím i k jejímu zmenšování. Velikost částic se během procesu zmenšování průběžně kontroluje například pomocí transmisního elektronového mikroskopu s vysokým rozlišením (HRTEM). Ve chvíli, kdy se dosáhne požadované velikosti, částice z kapalného systému odebereme. [1,2,3,6]

2.5.2 METODA BOTTOM-UP

Jedná se o metodu, která je založená na chemickém přístupu k tvorbě nanoobjektů. Metoda spočívá ve slučování menších základních prvků – atomů, molekul a makromolekul, čímž se vytvářejí větší a složitější struktury. [1,2,3,6,11]

Typickým příkladem metody Bottom-up jsou metody chemické syntézy nanočástic, které patří v současné době k těm nejužívanějším a nejrozšířenějším. V podstatě se jedná o řízené chemické reakce jednotlivých složek iontů, které tvoří materiál nanočástic. Cílem této metody je ve vhodném okamžiku zastavit nebo přerušit růst nanočástic. Tímto okamžikem je čas, kdy nanočástice dosáhnou zvolené velikosti. Jestliže by k zastavení či k přerušení růstu nanočástic nebo nanostruktur nedošlo, hrozilo by riziko, že dojde k jejich vzájemnému kontaktu a následnému propojení. V důsledku tohoto propojení by došlo k nežádoucímu zvětšování velikosti nanočástic. Aby ke kontaktu nedošlo používají se tzv. stabilizátory, tj. látky, které na povrchu nanočástic vytvářejí potenciální bariéru. [1,2,3,6]





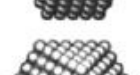
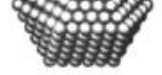
2.6 VLASTNOSTI NANOČÁSTIC

Jak již bylo uvedeno, nanočástice mají unikátní vlastnosti, které nejsou pozorovatelné v makroskopických rozměrech stejné látky. Podstatou těchto vlastností je jev zvaný kvantové omezení (quantum confinement), který byl vysvětlen v kapitole 2.4. Při daném jevu dochází k tvorbě nových energetických hladin, což má zásadní vliv zejména na změny v elektrických a optických vlastnostech nanočástic. Klíčový vliv na změny ve fyzikálních (např. teploty fázových přechodů, hustota látky atd.) a chemických (např. reaktivita) vlastnostech má jev označovaný jako „surface effect“ který spočívá v nárůstu počtu povrchových atomů v povrchové vrstvě – viz. obr. 7. [1,2,3,4,6]

2.6.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

Výrazného nárůstu poměru počtu atomů v povrchové vrstvě oproti atomům v objemu je dosaženo v případě, kdy se rozměry strukturních prvků materiálu začínají přibližovat k řádu nanometrů – viz. obr. 7. Toto výrazné zvýšení měrného povrchu má za následek změnu celkových vlastností materiálu a také dalších fyzikálních vlastností jako je například hustota a teplota tání materiálu. [1,6,9,10]

Mezi fyzikální vlastnosti nanočástic patří také změna elektrického potenciálu, elektrického chování a vodivosti. [6]

Full-shell Clusters		Total Number of Atoms	Surface Atoms (%)
1		13	92
2		55	76
3		147	63
4		309	52
5		561	45
7		1415	35

Obr. 7 – Vztah mezi celkovým počtem atomů v plných klastrech² a procentem povrchových atomů [102]

2.6.2 FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÉ VLASTNOSTI

Vzácné kovy jsou obecně stabilní vůči chemickým reakcím. Vlivem rostoucího měrného povrchu se u nanostruktur vzácných kovů zvětšuje plocha, na které dochází ke katalytickým reakcím. Katalytická reakce je chemická reakce, která probíhá za přítomnosti látky zvané katalyzátor. Katalyzátor je látka, která umožňuje snížení aktivační energie potřebné k reakci, což umožňuje reakci probíhat rychleji nebo v podmínkách, které by bez katalyzátoru nebyly možné. Dané nanostruktury obsahují také zvýšený počet atomů na hranách a v rozích krystalové mřížky, což zvyšuje reaktivitu. [1,2,6,9,10]

Do fyzikálně-chemických vlastností řadíme vysoké kvantové výtěžky z emise světla, rozpustnost v rozpouštědlech (v polárních i v nepolárních) a silnou luminiscenci. [6]

2.6.3 OPTICKÉ VLASTNOSTI

Mezi optické vlastnosti řadíme změnu barvy, změny absorpce, nelineární efekty a index lomu. Příklad změny zbarvení můžeme pozorovat například u nanočástic zlata (Au) s kulovým tvarem – viz. obr. 8. Tato změna se projevuje přibližně od 2 nm, přičemž při velikostech menších než 2 nanometry zlato přichází o svůj kovový charakter a již nedochází k projevu tzv. plasmonů. Plasmony jsou energetické stavy, při kterých dochází k interakci mezi elektromagnetickým polem a elektrony. Tyto plasmony jsou velmi důležité právě pro optické vlastnosti látek, zejména ty, které se vyskytují na povrchu materiálu – tzv. povrchové plasmony. [6,9,10,12]



Obr. 8 – Koloidní roztoky nanočástic zlata (Au) o různém průměru [10]

²⁾ Klastr je malá skupina atomů nebo molekul, které jsou navzájem přímo vázány vazbou kov-kov. Tyto skupiny mají specifické vlastnosti v závislosti na počtu atomů, jejich uspořádání a typu vazeb. [13]

2.7 HLAVNÍ APLIKACE NANOČÁSTIC

Nanočástice můžeme díky jejich specifickým vlastnostem nalézt ve velkém množství aplikací v různých oblastech lidské činnosti.

V odborných člancích a publikacích lze najít různé oblasti aplikací, ve kterých lze nanočástice využít. Ve většině případech se autoři shodují na několika hlavních oblastech využití. Tyto oblasti zahrnují medicínské aplikace, průmyslové aplikace, energetiku, pokročilé materiály, zemědělství a jídlo, elektroniku a životní prostředí. Obr. 9 představuje jeden konkrétní příklad tohoto způsobu kategorizace. [1,4,8,9,10,11,14,15,16,17]



Obr. 9 – Oblasti aplikací nanočástic [17]

2.7.1 MEDICÍNSKÉ APLIKACE

Přínos nanotechnologií v medicínských aplikacích spočívá například ve vytváření systémů pro cílenou dopravu léčiv do organismu. Motivací pro zmenšování těchto systémů na úroveň nanorozměrů je především co možná nejmenší zásah do těla pacienta či zvýšení účinnosti léků. S tím souvisí snížení potřebné dávky a možných vedlejších účinků. [4,6,15]

Cílem těchto nově vzniklých systémů cílené dodávky léčiv do organismu je minimalizovat ztrátu a znehodnocení léku, zabránit jeho škodlivým vedlejším účinkům, a naopak zvýšit dostupnost léku v místě výskytu nemoci. Jako nosiče léku slouží právě nanočástice. [4,6,15]

2.7.2 ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Využití nanočástic k ochraně životního prostředí se v poslední době stává stále více významným tématem. Na tuzemské vědecké scéně došlo nedávno k zásadnímu pokroku v oblasti detekce a likvidace těžkých kovů. Ze spolupráce vědců z Českého institutu výzkumu a pokročilých technologií – CATRIN Univerzity Palackého v Olomouci a z Katalánského institutu nanovědy a nanotechnologie (ICN2) v Barceloně vzešel nový, cenově dostupný, účinný a recyklovatelný nanomateriál, který dokáže ve vodě nejen odhalit, ale především také likvidovat těžké kovy. Zejména pak kadmium a olovo. Výzkumníci využili grafenových teček pro přípravu papírového detektoru (senzoru), který rychle a spolehlivě identifikuje kadmium a olovo i ve velmi malém množství a následně ve formě nanočástic tyto těžké kovy s rekordní účinností odstraní. [18,19]

Během tohoto jednoduchého testu, který trvá přibližně 30 minut, lze snadno zjistit přítomnost rizikových těžkých kovů bez potřeby nákladných přístrojů. [18,19]

Znečištění odpadních vod průmyslovými činnostmi je aktuálně velmi závažným problémem. Mezi nejtoxičtější těžké kovy patří kadmium, olovo a rtuť. Vypouštění těchto kovů do přírody může mít rozsáhlé negativní dopady na vodní ekosystémy a zemědělské plodiny. U člověka může dlouhodobá zátěž těmito kovy vést k vážnému poškození orgánů a životně důležitých funkcí, stejně jako k riziku rakoviny. [18,19]

V současné době se intenzivně zkoumá, jak nanočástice ovlivňují životní prostředí a ekosystémy. Zkoumají se například účinky na vodní organizmy a možné znečištění půdy. Některé výzkumy totiž ukazují, že se mohou určité nanočástice hromadit v půdě či ve vodě a mohou být poté přeneseny do potravního řetězce. Cílem těchto zkoumání je nejen zjistit jakým způsobem ovlivňují nanočástice životní prostředí, ale také jak se dají minimalizovat jejich negativní dopady. Součástí těchto výzkumů je také hledání nových metod, které by umožnily recyklaci a odstraňování nanočástic z životního prostředí. [18,40]

2.7.3 PRŮMYSLOVÉ APLIKACE

V průmyslových aplikacích lze nanočástice využít v mnoha oblastech, například v materiálovém inženýrství, elektronice nebo optice. Nanočástice mohou napomoci k vylepšení vlastností materiálů, zvýšení jejich pevnosti a tvrdosti, vylepšení jejich optických vlastností, ale mohou také napomoci ke snížení tření materiálů či snížení nákladů na výrobu. Mohou být také využity pro zlepšení vodivosti materiálů nebo pro výrobu tenčích a flexibilnějších elektronických součástí. V průmyslových aplikacích se využívají i speciální nanočástice, které mají vysokou odolnost vůči teplotě a chemickým látkám a lze je využít například při výrobě speciálních povlaků pro ochranu materiálu. [10,14,15]

3 NANOČÁSTICE V POVRCHOVÝCH ÚPRAVÁCH

Nanočástice se vzhledem ke svým specifickým vlastnostem a schopnostem stále více prosazují v oblasti povrchových úprav materiálů. Díky přítomnosti nanočástic získávají povrchové úpravy unikátní vlastnosti, kterých by bez jejich využití mohli jen stěží dosáhnout. Použitím nanočástic v povrchových úpravách lze dosáhnout široké škály specifických vlastností. Tyto vlastnosti mají výrazný vliv například na adhezi či odolnost proti opotřebení materiálu. [41,42,43]

V současné době existuje několik různých technik nanášení povrchových úprav s obsahem nanočástic. Mezi nejpoužívanější patří aplikace prostřednictvím nátěrových hmot a galvanického neboli elektrolytického pokovování. Dále pak metoda plazmového stříkání, metoda elektrochemická, metoda magnetronového naprašování a další. [43,44,45]

3.1 NANOČÁSTICE V NÁTĚROVÝCH HMOTÁCH

Nátěrové hmoty definujeme jako tekuté až pastovité hmoty, které vytváří na povrchu součástí souvislý film. Používají se k vytvoření nátěrů (povlaků) na povrchu předmětů, přičemž jejich hlavním cílem je zejména ochránit a také zlepšit jejich vzhled. Nátěrem je nazýván povlak, který je souvislý a nabývá požadovaných vlastností. Nátěry vznikají nanesením a zaschnutím jedné či více vrstev na povrchu předmětu. Podle této logiky se nátěry rozdělují na jednovrstvé a vícevrstvé, které se dále rozdělují do dalších podskupin podle svého účelu a svých vlastností. [21,22,42,47]

Vzhledem ke snadnému způsobu zhotovení těchto povlaků, jejich dostupnosti, a především vzhledem k jejich relativně velkému ochrannému účinku nátěrových systémů jsou organické povlaky z nátěrových hmot nejpoužívanějším způsobem povrchové úpravy předmětů. [21,22,48]

Podle charakteristických vlastností lze nátěrové hmoty rozdělit na pigmentované a transparentní. Pigmentované nátěrové hmoty utváří na povrchu předmětů vždy neprůhledný, respektive barevný krycí film. Transparentní nátěrové hmoty (laky) oproti tomu vytváří na povrchu předmětů průhledný až průsvitný film. [47,48]

Odolnost nátěru ovlivňuje řada faktorů, z nichž největší vliv má předúprava povrchu kovu pod samotný nátěr dále pak přilnavost nátěru, tloušťka nátěru, teplota, přítomnost mikroorganismů, pórovitost nátěrů, propustnost nátěrů a sluneční záření. K základním požadavkům na organické povlaky poté patří především korozní odolnost, odolnost proti UV záření, odolnost pro povětrnostním podmínkám či odolnost proti chemikáliím. [21,46]

Výrazný vliv na ochranné vlastnosti těchto povlaků má zejména volba vhodného druhu nátěrového systému, úroveň jeho zhotovení a jednotlivé předúpravy povrchu daného materiálu. [21,22]

Nátěrové hmoty se ve většině případů skládají z několika základních složek a sice z :

- filmotvorných látek,
- pigmentů,
- plnidel,
- těkavých složek,
- aditiv. [21,22,42]

Filmotvorné látky (v literatuře též nazývané jako pojiva) jsou obvykle organické látky netěkavé, mezi které patří například přírodní pryskyřice, deriváty kaučuku a celulózy, vinylové polymery a mnoho dalších látek. Filmotvorné látky jsou schopny na povrchu materiálu utvářet pevný a nepřetržitý film o různé tloušťce. Do této skupiny látek patří také změkčovadla, například chlorovaný parafin či chlorovaný bifenyly. Změkčovadla lze definovat jako tuhé viskozni látky, které modifikují vlastnosti filmotvorných látek (zejména křehkost a tvrdost) takovým způsobem, aby výsledné nátěry dosáhly požadovaných vlastností. [21,22,42]

Pigmenty jsou látky organického, anorganického nebo směsného původu, které jsou nerozpustné ve filmotvorných látkách a rozpouštědlech. Jde o barevné prášky, díky kterým získávají nátěrové hmoty barevný odstín a krycí schopnost (schopnost nátěru zakrýt daný podklad). [21,22,42,47]

Podle funkce, jakou zastávají při ochraně součástí proti korozi, lze pigmenty rozdělit do tří základních skupin:

- stimulující pigmenty – pigmenty zrychlující průběh korozního procesu,
- inhibiční pigmenty – pigmenty zpomalující průběh korozního procesu,
- neutrální pigmenty – pigmenty bez vlivu na průběh korozního procesu. [21,22,47]

Vzhledem k tomu, že se struktura povlaku zesiluje plnidly je možné tyto pevné částice popsat jako kostru nátěrových filmů. Jako plnidla se běžně pro svou velmi dobrou chemickou stálost používají chemické sloučeniny jako jsou křemičitany či živec. Plnidla mají oproti pigmentům výrazně nižší index lomu a vzhledem k tomu, že se od nich neočekává žádné ovlivňování odstínu je preferováno, aby plnidla byla, pokud je to možné, co možná nejsvětlejší. [21,47]

Mezi těkavé složky nátěrových hmot patří rozpouštědla a ředidla. Výběr rozpouštědla závisí na rozpustnosti filmotvorných látek, přičemž nejčastěji používanými rozpouštědly je etylalkohol, toluen, xylen či aceton. Rozpouštědla je možné dle rychlosti odpařování rozdělit na těžká, střední a lehká. [21,22,42,47]

Pomocí ředidel³ se modifikuje tekutost a konzistence nátěrových hmot, a to takovým způsobem, aby se zajistilo předepsané viskozity nátěrové hmoty před jejím samotným aplikováním na daný povrch konkrétní metodou nanášení. [21,22,47]

V dnešní době jsou na nátěrové hmoty kladeny velmi vysoké požadavky, které obvykle nejsou bez použití menšího množství aditiv splnitelné. Přidáním aditiv do nátěrových hmot se zabraňuje jejich pění, omezuje se díky nim usazování pigmentů a nedochází k utváření škraloupů uvnitř plechovek. Dále je možné použitím aditiv zvýšit jejich odolnost proti povětrnostním vlivům a proti napadení mikroorganismy. Aditiva jsou přidávána do nátěrových hmot v rozmezí od desetin procenta až do jednoho procenta. [42,47]

Přidáním nanočástic do nátěrových hmot se získávají specifické multifunkční povlaky, které vykazují jednu unikátní vlastnost či kombinaci několika různých vlastností. Jedná se například o následující povrchové vlastnosti:

- mechanické – tribologie, tvrdost, odolnost proti poškrábání,
- smáčivé – antiadhezivní, hydrofobní,
- tepelné a chemické – tepelná odolnost a izolace, odolnost proti korozi,
- biologické – biokompatibilita, antiinfekční vlastnost,
- optické – antireflexní povaha, fotochromatické a mnoho dalších. [41]

Využitím jedinečných vlastností nanočástic v nátěrových hmotách se vytvářejí zcela nové produkty, jako například:

- snadno čistitelné nátěry,
- antibakteriální nátěry,
- nátěry odolné proti opotřebení,
- nátěry s UV ochranou,
- elektricky vodivé nátěry,
- samo-regenerační nátěry,
- tepelně izolační nátěry atd. [43]

³) ředidla jsou směsí rozpouštědel

Nátěrové hmoty obsahující nanočástice mají oproti konvekčním nátěrům řadu výhod, a to například vyšší chemickou odolnost, vyšší odolnost proti korozi, zvýšenou tepelnou stabilitu, snadno čistitelný povrch, anti-grafitové vlastnosti, vyšší tepelnou a elektrickou vodivost, vyšší tvrdost a odolnost proti opotřebení. [43]

Mezi nanočástice, které se hojně využívají v nátěrových hmotách patří například oxid titaničitý (TiO_2), oxid křemičitý (SiO_2), oxid železitý (Fe_2O_3), oxid zinečnatý (ZnO), oxid hlinitý (Al_2O_3) a další. [43] Tab. 1 vyobrazuje některé aplikace nanomateriálů obsahující nanočástice v nátěrových hmotách a jejich funkce.

Tab. 1 – Aplikace a funkce nanočástic [43]

Funkce	Nanočástice	Efekt	Použití
Ohnivzdornost	SiO_2	Při překročení určité teploty se na povrchu dřeva vytvoří tepelně izolační vrstva uhlíkové pěny následovaná ohnivzdornou keramickou vrstvou	Konstrukce, ochrana dřeva proti požáru
Ochrana proti korozi	Zinek nebo hliník potažený TiO_2	Povlak zvyšuje odolnost proti korozi	Konstrukce, automobilový průmysl
UV ochrana, infračervené záření	ZnO , CeO_2	Zvýšená odolnost proti UV záření, blokování infračerveného a viditelného světla	Konstrukce, fasády, ochrana skla či plastů
Odolnost proti poškrábání	SiO_2 , Al_2O_3	Zvýšená odolnost proti poškrábání	Automobilový průmysl, informace a komunikace, letectví, spotřební zboží, optika (čočky)
Samočistění	Organicky modifikovaná keramika, TiO_2	Odpuzování nečistot a vody, ochrana proti řasám a houbám, anti – grafitová ochrana	Automobilový průmysl, stavebnictví, sklo

V textu (kapitoly 3.1.1 až 3.1.4) jsou dále rozebrány konkrétní přínosy vybraných nanočástic.

3.1.1 NANOČÁSTICE OXIDU TITANIČITÉHO

Nanočástice TiO_2 představují jeden z nejčastěji používaných anorganických nanomateriálů. V nátěrových hmotách se využívají k zajištění samočistícího efektu a antibakteriálních vlastností okenních skel či fasád domů. K těmto efektům dochází vlivem ozáření vrstev TiO_2 UV zářením, což má za následek vznik aktivních radikálů O^\cdot , O_3^\cdot , OH (vysoce reaktivní částice) a řady dalších, které atakují všechny látky, které ulpívají na daném povrchu. Mezi látky, které ulpívají na povrchu a jsou atakovány radikály se řadí organické materiály jako jsou viry a bakterie. K zahubení těchto látek dochází zpravidla během několika hodin. Dalším využitím nanočástic TiO_2 v nátěrových hmotách je například zvýšení odolnosti proti korozi. [1,43]

3.1.2 NANOČÁSTICE OXIDU ZINEČNATÉHO

Přítomnost nanočástic ZnO v nátěrech zvyšuje odolnost povlakovaných povrchů předmětů proti působení vody, díky čemuž se předměty stávají odolnějšími. Zmíněné vlastnosti se využívá u povlakovaných předmětů jako je například sklo, dřevo a ocel. Důvodem využití těchto nanočástic může být i skutečnost, že nemění estetiku povrchu, která může ovlivnit výslednou hodnotu povrchu. [49,50]

Nátěry, které obsahují nanočástice ZnO vykazují kromě vynikajících UV ochranných vlastností také výborné superhydrofobní vlastnosti, mechanické vlastnosti či antimikrobiální a antikorozi vlastnosti. [43,49]

3.1.3 NANOČÁSTICE OXIDU KŘEMIČITÉHO

Přidáním nanočástic SiO_2 do nátěrů se docílí výrazně zvýšené odolnosti proti opotřebení, stárnutí, odolnosti proti poškrábání a houževnatosti, než vykazují standardní nátěry bez obsahu nanočástic SiO_2 . Zároveň obsah SiO_2 v nátěrech zlepšuje vodoodpudivost. V případě laků zvyšuje jejich ochranu proti korozi a přináší předmětům vysoký lesk. Pokud jsou nanočástice SiO_2 naneseny na dřevo mohou mít účinek zpomalující hoření. [51,52,53]

3.1.4 NANOČÁSTICE OXIDU HLINITÉHO

Nanočásticemi Al_2O_3 se například zvyšují některé vlastnosti epoxidové pryskyřice. Obohacením epoxidové pryskyřice o nanočástice Al_2O_3 se zvýší tuhost, rázová energie, adhezní pevnost i odolnost proti působení vody. Epoxidová pryskyřice má sama o sobě vysoký modul pružnosti a výbornou chemickou stabilitu. [54]

Nátěry z epoxidové pryskyřice se obvykle používají pro ty aplikace, kde je zapotřebí ochránit povrch předmětu proti korozi. [54]

Nanočástice Al_2O_3 tvoří podstatnou složku několika kompozitů (např. NiAl_2O_3), ve kterých přispívají ke zvýšení abrazivních či mechanických vlastností. [1]

3.2 NANOČÁSTICE V GALVANICKÉM POKOVOVÁNÍ

Jak již bylo řečeno výše, galvanické pokovování je jedním z nejrozšířenějších technik nanášení povrchových úprav. Elektrochemické děje jako je elektrolýza či různé procesy, které probíhají v galvanických člancích mají v elektrolytickém pokovování zásadní roli. Hlavním cílem galvanického pokovování je vyloučení kovových povlaků na površích zejména kovových materiálů. Účelem tohoto typu vyloučených povlaků je především vytvořit ochrannou protikorozní vrstvu či vylepšit vzhledové vlastnosti. Povlaky mohou v některých případech zastávat i funkční vlastnosti samotných výrobků. [22,37]

Vyloučení kovového povlaku je možné ve své podstatě u všech obvykle využívaných konstrukčních materiálů jako je například měď, hliník, bronz, mosaz atd. Pokovit lze například i některé plasty. Aby mohlo k vyloučení kovového povlaku dojít je nejprve třeba chemickým způsobem aktivovat organický základ. [22,37]

Tloušťka povlaku a jeho poréznost tvoří hlavní parametry, pomocí kterých se vyhodnocují ochranné funkce kovových povlaků. Tloušťka povlaku je zároveň úzce propojena s životností povlaku. [22,37]

Kovové povlaky lze vzhledem ke své funkci v elektricky vodivém prostředí rozdělit do dvou skupin, a to na:

- katodické ochranné povlaky,
- anodické ochranné povlaky. [22,37]

Použití katodické ochrany povlaků je určitým způsobem rizikové. Dojde-li k porušení povlaku, začne základní kov (anoda) silně korodovat. Katodické povlaky jsou zároveň ušlechtilější než základní kov, protože narozdíl od základního kovu fungují jako katoda. Charakteristickými představiteli jsou například povlaky z niklu, chromu nebo mědi. Oproti katodickým povlakům nejsou anodické povlaky ušlechtilější nežli základní kov a fungují vůči základnímu kovu jako anoda. Příkladem anodického ochranného kovu je zinek či hliník. [22,37]

Na jakost a kvalitu galvanicky vyloučeného kovového povlaku má vliv řada tepelně-technických, technologických a elektrických veličin a podmínek – viz tab. 2. Důležitost jednotlivých podmínek se odvíjí od typu procesu nebo dle kritéria na výslednou jakost. Veličiny je potřeba správně nastavit a v průběhu procesu sledovat, měřit a je-li zapotřebí tak i měnit z důvodu dosažení požadované jakosti. [22,37]

Tepelně-technické pracovní podmínky jsou charakterizovány zejména mezním stavem hladiny, teplotou lázně a účinným mícháním. Elektrické veličiny jsou pak charakterizovány především hodnotami napětí, proudu a proudové hustoty. Optimalizaci jakosti a produktivity výrazným způsobem ovlivňují naopak veškeré technologické podmínky. [22,37]

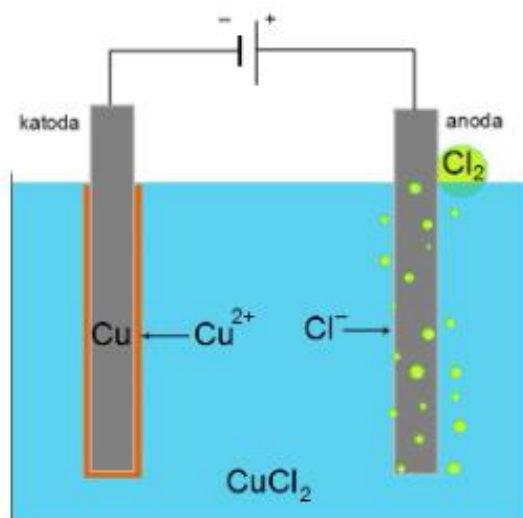
Tab. 2 – Provozně významné parametry při galvanickém pokovování [22]

Pracovní podmínky	Tepelně-technické	Tlak
		Teplota
		Účinnost míchání
		Hladina
	Elektrické	Proud
		Napětí
		Proudová hustota
		Polarita
Technologické podmínky	Složení lázně	Vylučovací rychlost
		Proudový výtěžek
		Hloubková účinnost
		Vyrovnávací schopnost

3.2.1 PRINCIP GALVANICKÉHO POKOVOVÁNÍ

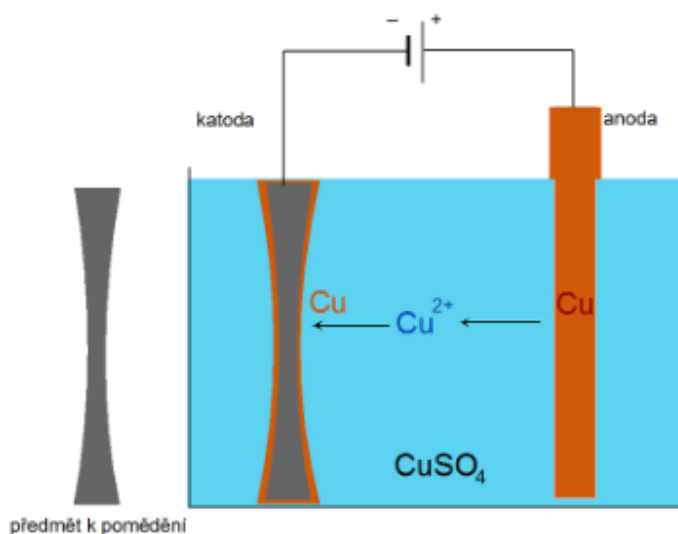
Pro galvanické pokovování má z elektrochemických dějů klíčovou roli elektrolyza a procesy probíhající v galvanických člancích. Elektrolyza je proces, při kterém dochází k disociaci molekul v ionty. Ionty sloučenin anorganických solí jsou v tuhém stavu uspořádány ve specifickém systému do krystalické mřížky. Když se však anorganické soli rozpustí ve vodě dojde k uvolnění jednotlivých iontů z krystalické mřížky, načež se takto uvolněné ionty začnou ve vodě volně pohybovat – nastává elektrolytická disociace. Tímto způsobem uvolněné záporné ionty nesou přebytečné elektrony, mezitím co kladně nabitě ionty jich mají nedostatek. Elektrický náboj iontů rozpuštěných solí umožňuje roztoku vedení elektrického proudu. Pokud prostřednictvím elektrod z vnějšího zdroje do roztoku disociované látky přivedeme stejnosměrný proud, začnou se záporně nabitě ionty vylučovat na kladné elektrodě a

kladně nabitě ionty na záporné elektrodě. U záporné elektrody (katody) dochází při vylučování kladně nabitých kationtů k jejich redukci, zatímco u kladné elektrody (anody) dochází při vylučování záporně nabitých aniontů k jejich oxidaci. Příklad procesu elektrolýzy je vyobrazen na obr. 10. [22,37,55]



Obr. 10 – Proces elektrolýzy roztoku CuCl_2 [55]

V případě dlouhodobé elektrolýzy mezi dvěma nerozpustnými elektrodami (např. platinovými či zlatými) by postupně docházelo k vylučování jednotlivých složek soli z daného roztoku až do té doby, dokud by se tyto složky kompletně nevyčerpaly, čímž by se (vlivem vysokého odporu čisté vody) zároveň přerušil i průchod elektrického stejnosměrného proudu. Pokračování v elektrolýze by poté bylo možné jen v takovém případě, kdy by se ve zbylé vodě opět rozpustilo určité množství soli. Z tohoto důvodu se daný postup, kde se využívá nerozpustných elektrod příliš nepoužívá. V praxi byly nerozpustné elektrody nahrazeny elektrodami rozpustnými. [22,37]



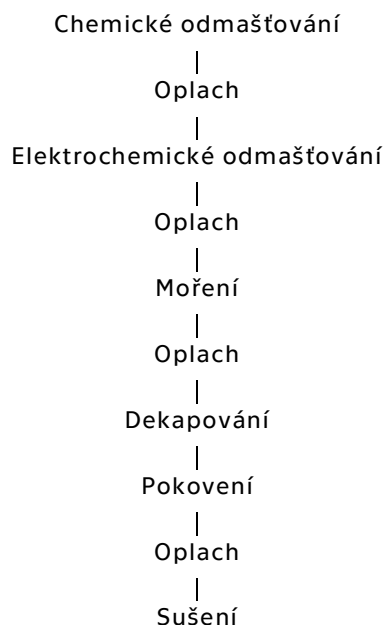
Obr. 11 – Proces galvanického pokovování – mědění [55]

Využije-li se při elektrolýze rozpustné elektrody (anody), dochází pak vlivem připojení elektrického proudu k jejímu postupnému rozpouštění, díky čemuž nedojde k vyčerpání jednotlivých složek soli a zároveň k přerušení průchodu elektrického proudu. Množství kovu, které se vyloučí na katodě je ekvivalentní s množstvím kovu, které se rozpustí na anodě. V zásadě jde o proces, při kterém se materiál, který je zapojen jako anoda, rozpouští a ulpívá na povrchu pokovované součásti, která je připojena jako katoda – viz. obr. 11. [22,37,55]

3.2.2 TECHNOLOGICKÝ POSTUP GALVANICKÉHO POKOVÁNÍ

Před samotným galvanickým pokovením je nezbytné provést dokonalou předúpravu povrchu, neboť po předchozích technologických operacích je na povrchu součásti přítomna řada nečistot jako jsou okuje, různé mastné látky či rez. Odstraněním těchto nečistot se dosáhne vhodného povrchu pro vyloučení kovového povlaku. Pokud by povrch nebyl dokonale očištěný, nedošlo by k přestupu kovového iontu z roztoku na povrch materiálu (katody) a jeho následného začlenění do krystalové mřížky. [21,22,37]

Volba vhodného technologického postupu se odvíjí od druhu zboží a lázně, stavu povrchu zboží či technologického vybavení střediska, ve kterém k pokovování dochází. Tato střediska (galvanovny) disponují specifickými zařízeními, a to především kvůli práci s kyselinami, louhy či jedy. Základní technologický postup galvanického pokovování je vyobrazen na obr. 12. [22,37]



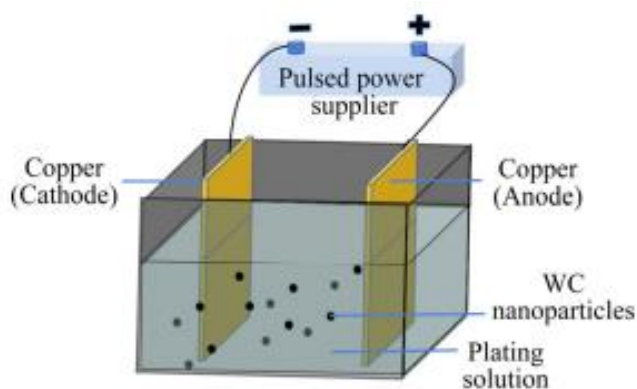
Obr. 12 – Základní technologický postup galvanického pokovování [37]

Při velkých sériích se předměty pokovují ve vanách, bubnech nebo závěsech, které jsou zavěšeny na dopravnících, a to v pořadí jednotlivých technologických operací. V případě malých sérií se využívají podobná zařízení, avšak s manuální obsluhou. [22]

3.2.3 POUŽÍVANÉ NANOČÁSTICE V GALVANICKÉM POKOVOVÁNÍ

Nanočástice karbidu wolframu (WC) vykazují velmi dobrou odolnost proti kyselinám, odolnost proti opotřebení a mají též vysoký modul pružnosti, teplotu tání a dobrou stabilitu. Teplota tání nanočástic WC je přibližně 2870 °C a Youngův modul pak zhruba 530-700 GPa. Na Mohsově stupnici je tvrdost nanočástic WC hodnocena jako 9-9,5. Nanočástice WC jsou široce používány v povrchových úpravách vysoko pevných rezných nástrojích, těžebních nástrojích atd. Výhodou nanočástic WC je jejich cenová dostupnost. [56,57]

Kombinací nanočástic WC a mědi (Cu) lze vytvořit kompozitní materiál WC-Cu (viz. obr. 13) s vysokou odolností proti opotřebení, odolností proti změkčování při vysokých teplotách a s dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí. Kompozitní materiál WC-Cu má též díky svým samomazným vlastnostem v porovnání s čistou mědí nižší koeficient tření. Kompozitní materiály WC-Cu nachází uplatnění v celé řadě různých aplikací. Používají se například v elektrodách pro odporové svařování či v integrovaných obvodech. [56,57]



Obr. 13 – Schéma galvanického pokovování nanočásticemi WC [56]

Mezi další používané nanočástice v galvanickém pokovování patří nanočástice oxidu titaničitého (TiO_2). Ve studii [58] byly nanočástice TiO_2 přidány do pokovovací lázně za účelem zacelení pórů na povrchu oceli, aby nedošlo k lokální korozi v důsledku přítomnosti zinku pod nanoseným povlakem. Jednalo se o galvanické pokovování oceli používané k výrobě podvozkové části civilního letadla Airbus A32X (modely 2022). [56,58]

Nanočástice oxidu křemičitého (SiO_2) se pro svou dobrou tepelnou a mechanickou stabilitu používají v oblastech senzorky či syntézy materiálů. Studie [59] uvádí, že přidáním nanočástic SiO_2 do niklové (Ni) matrice získala hybridní vrstva vytvořená galvanickým pokovováním dobrou odolnost proti korozi. [58,59]

K dalším často používaným nanočásticím v galvanickém pokovování patří například nanočástice oxidu hlinitého (Al_2O_3), nanočástice karbidu křemíku (SiC) atd. [56]

4 PŘEDÚPRAVA POVRCHU

Předúprava povrchu je jedním ze základních faktorů ovlivňujících životnost povlaků. Vhodně zvolenou a správně aplikovanou předúpravou povrchu se dosáhne kvalitně připraveného povrchu, což je nezbytný předpoklad pro úspěšné provedení povrchové úpravy. [21,22,36]

Během výrobního procesu se na povrchu součásti tvoří a hromadí různé nečistoty, které následně zabraňují správnému přilnutí povlaku. Tyto nečistoty mohou být rozděleny do dvou skupin. První skupinu tvoří tzv. cizí nečistoty. Mezi tyto nečistoty patří převážně mastné látky, jako například zbytky chladících obráběcích kapalin a řezných olejů. Do této skupiny patří dále kovové nečistoty (například kovové třísky či kovový prach) a nerozpustné anorganické nečistoty (například zbytky brusiv a leštících prostředků). Tyto nečistoty jsou k povrchu součásti vázány adhezními silami. Druhou skupinu tvoří tzv. vlastní nečistoty, které jsou s povrchem spojeny chemickou vazbou. Jedná se o korozní zplodiny (například okuje a rez), které vznikají na povrchu kovu při reakci kovu s prostředím. [21,22,36]

Na předúpravy povrchu jsou kladeny dva základní požadavky. Prvním požadavkem je nejprve příprava určité požadované geometrie a kvalita povrchu. Druhým požadavkem je poté zajištění požadované čistoty daného povrchu. K jejich naplnění dochází postupně pomocí dvou základních skupin pracovních operací. [21,22]

Předúpravy povrchu lze rozdělit na dvě základní skupiny pracovních operací podle způsobu splnění požadavků a to na:

- mechanické předúpravy povrchu,
- chemické předúpravy povrchu. [21,22,36]

4.1 MECHANICKÉ PŘEDÚPRAVY POVRCHU

Mechanické předúpravy povrchu jsou procesy, které slouží k dosažení požadované kvality a jakosti povrchu. Hlavním cílem mechanických předúprav povrchu je především očištění povrchu od nečistot, zajištění vhodných podmínek pro správnou přilnavost následujících vrstev, zvýšení korozní odolnosti či zlepšení mechanických vlastností povrchu. Podle způsobu dosažení těchto základních cílů lze mechanické předúpravy rozdělit do následujících skupin:

- omílání
- tryskání
- broušení, leštění a kartáčování. [21,22,36]

4.1.1 OMÍLÁNÍ

Omílání představuje technologii, které se používá ke hromadné úpravě povrchu menších výrobků ve velkých sériích. Při této mechanické předúpravě povrchu dochází k úběru materiálu a k vyhlazení jeho povrchu vlivem na sebe navzájem působících omílaných výrobků a omílacích prostředků. Obecně rozlišujeme tři způsoby omílání v závislosti na používaných strojích:

- rotační omílání,
- vibrační omílání – viz. obr. 14,
- odstředivé omílání. [21,22,30]

Omílání se používá především z důvodu odstranění otřepů a okují, ke srážení hran a pro vyhlazování povrchu po předchozích operacích, ale také k povrchovému zpevňování. [21,22,30]

Omílací a chemické prostředky se volí podle způsobu omílací operace podle požadované kvality povrchu a podle charakteru výrobků. První z dvojice jmenovaných prostředků se nejčastěji skládají z umělého korundu či z organických materiálů. Chemické prostředky mají v celém procesu několik funkcí. Zabraňují korozi součástí během a po omílání, čistí omílané součásti a ovlivňují též brusný účinek omílacích tělísek. Dále se používají k odmašťování či hlazení. [21,22,30,36]



Obr. 14 – Vibrační omílací stroj [103]

4.1.2 TRYSKÁNÍ

Tryskání je technologie mechanické předúpravy povrchu, která slouží k čištění a sjednocení drsnosti povrchové vrstvy. Tato technologie spočívá ve vrhání tryskacího materiálu neboli volných zrn různých materiálů na součást vysokou rychlostí, čímž dojde k odstranění nečistot (rzí a okují) z povrchu dané součásti. Tryskanému materiálu je během procesu tryskání dodávána kinetická energie prostřednictvím stlačeného vzduchu, tlakové vody, metacího kola nebo kombinací vzduchu, tlaku a vody. [21,22,31,36]

Na výsledný vzhled otrýskaného povrchu součásti má vliv jak kinetická energie, tak velikost a druh volných zrn. Při využití tvrdých ostrých zrn dochází při tryskání k jejich zasekávání do povrchu součásti vlivem čehož odstraňují společně s nežádoucími nečistotami i určité množství kovových částic z povrchu. Vytváří tak díky tomu ideální kotvící profil pro různé druhy aplikací. K úběru materiálu naopak nedochází využitím se tvrdá tupá zrna. Při jejich dopadu na povrch součásti dochází pouze k očištění a zpevnění dané součásti a dále také k tvorbě malých důlků. Při využití těchto zrn vzniká však nebezpečí v podobě možného zatlačení nečistot těmito zrny do povrchu dané součásti. [21,22]

Tryskání lze rozdělit na mechanické a pneumatické. Princip mechanického tryskání spočívá v pohybu abraziva vlivem rotujících lopatek – viz. obr. 15. Abrazivní částice jsou zde přiváděny do středu rotujících lopatek, odkud jsou vlivem odstředivé síly vymrštěny na jejich konec a následně do prostoru stroje, kde se nachází tryskaná součást. Princip pneumatického tryskání je založen na přivádění abraziva do proudu stlačeného vzduchu, který je následně směřován pod vhodným úhlem na povrch tryskané součásti. Mezi nejpoužívanější materiály pro tryskání patří různé drtě a granuláty, převážně mletý korund či ocelová drť. [21,22,36]

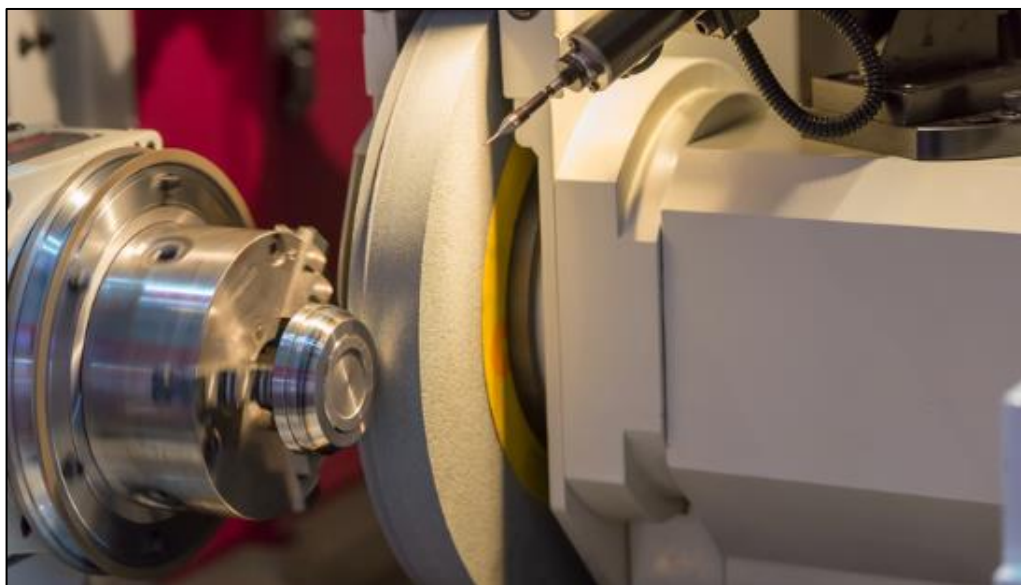


Obr. 15 – Ukázka mechanického tryskání [104]

4.1.3 BROUŠENÍ, LEŠTĚNÍ A KARTÁČOVÁNÍ

Technologie broušení, leštění a kartáčování patří mezi nejrozšířenější metody mechanických předúprav povrchu. Tyto technologie se používají buď jako předúprava povrchu před nanesením povlaků, či jako konečné úpravy povrchu. [21,22,33,36]

Broušení je velmi jemné obrábění součástí, při kterém se k dosažení požadované drsnosti povrchu součásti využívají speciální nástroje obsahující brusivo – viz. obr. 16. Tyto speciální nástroje jsou vyrobeny z různých materiálů a mají různé tvary a velikosti. Postupným zjemňováním použitého brusiva se dosáhne požadované kvality povrchu. Kvalita povrchu je klíčová pro dosažení správné funkčnosti nebo vzhledu výsledných výrobků. [21,22,32,33]



Obr. 16 – Broušení tvarovým kotoučem [105]

Leštění je proces, při kterém dochází k odstaňování stop po předcházejících operacích (jemném broušení či kartáčování). Cílem tohoto procesu je především dosáhnout velmi nízké drsnosti a vysokého lesku. Při leštění je materiál odstraňován brusnými zrny, která se nacházejí buď ve speciálních leštících kotoučích či v leštících pastě. [21,22,34,36]

Kartáčování je metoda mechanické předúpravy povrchu, která se používá především k odstraňování hrubých nečistot z povrchu součásti, například rzi. Dále se používá také k odstranění oxidické vrstvy, vzniklé po předešlé operaci broušení, či ke zjemnění upravovaného povrchu. [21,22,32,36]

4.2 CHEMICKÉ PŘEDÚPRAVY POVRCHU

Chemické předúpravy povrchu jsou procesy, které slouží především k odstraňování nežádoucích nečistot z povrchu součástí za pomoci chemických reakcí. Tyto nečistoty mohou být rozděleny do dvou skupin, a to na cizí (ulpělé) a vlastní – viz. kapitola 4. Hlavním cílem chemických předúprav povrchu je tedy odstranění těchto nečistot. Jak již bylo řečeno výše, cizí nečistoty (například mastné látky, kovové nečistoty či nerozpustné anorganické nečistoty) jsou k povrchu součásti vázány adhezními silami. Proces, kterým se odstraňují tyto nečistoty z povrchu součásti se nazývá odmašťování. Nazývá se tak vzhledem k tomu, že do těchto nečistot spadají především zmíněné mastné látky. Vlastní nečistoty jsou s povrchem spojeny chemickou vazbou. Jedná se o korozní zplodiny (například rez a okuje), které vznikají na povrchu kovu při reakci kovu s prostředím. Způsobů, kterými lze odstranit korozní zplodiny je mnoho, ale tím nejčastějším je moření. [21,22,36]

Mezi základní chemické předúpravy povrchu patří:

- odmašťování,
- moření,
- odrezování,
- chemické a elektrolytické leštění. [21,22,36]

Neodstranění, či nedostatečné očištění povrchu součásti může negativně ovlivnit výsledné vlastnosti konečného povlaku jako například přilnavost, vzhled a další. Nečistoty, jako například mastnoty mohou díky své nestabilitě postupem času a vlivem rozkladu vytvářet příznivé podmínky pro vnik koroze. Z tohoto důvodu jsou chemické předúpravy povrchu zcela zásadní. Zmíněné procesy (odmašťování, moření atd.) jsou základním stavebním kamenem pro dosažení správné přilnavosti a trvanlivosti následujících vrstev povlaků. [21,22,36]

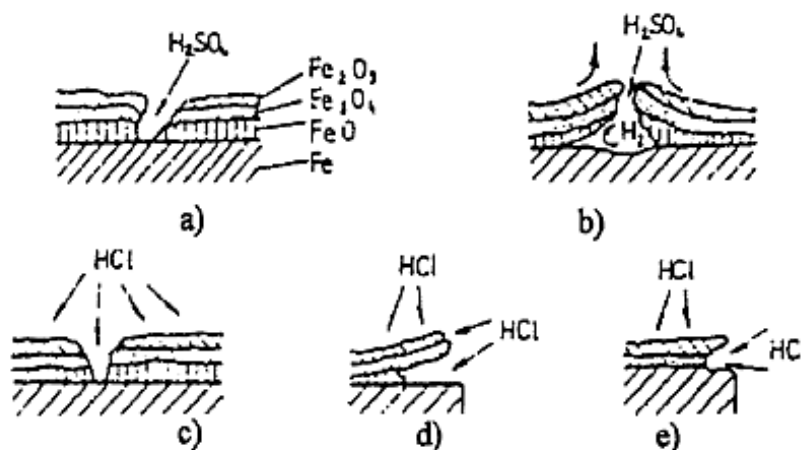
4.2.1 ODMAŠŤOVÁNÍ

Odmašťování bývá prvním krokem v chemické předúpravě povrchu, díky kterému dojde k odstranění cizích (ulpělých) nečistot z povrchu. Cílem odmašťovacích přípravků je nejen odstranění těchto nečistot z povrchu, ale též zabránění jejich opětovnému vyloučení. Správné provedení odmašťovacího procesu má nezanedbatelný vliv na následné technologické operace a výslednou kvalitu povrchové úpravy. Při nedokonalém odmaštění povrchu součásti, či při využití nevhodného odmašťovacího prostředku může dojít k výraznému snížení přilnavosti povlaků. Odmaštění lze provést celou řadou způsobů při využití velkého množství různých odmašťovacích prostředků. [21,22,35,36]

Odmašťování lze rozdělit podle druhu probíhajících pochodů na odmašťování ve vodných alkalických roztocích, odmašťování v organických rozpouštědlech, odmašťování vodnými tenzidovými prostředky a emulzní odmašťování. [21,22,36]

4.2.2 MOŘENÍ

Moření je dalším krokem v chemické předúpravě povrchu, při kterém dochází k odstraňování korozních produktů (rzí, okují) z povrchu kovů. Tyto nečistoty vznikají na povrchu kovů například při tepelném zpracování, či při působení okolního prostředí. Korozní produkty se odstraňují rozpouštěním v kyselinách, nejčastěji pak v kyselině sírové a chlorovodíkové. Mezi další možné kyseliny, které se používají k odstraňování korozních produktů patří kyselina dusičná a kyselina fluorovodíková. Moření kovů jako je zinek a hliník může být též uskutečněno v alkalických roztocích. Celý proces odstraňování oxidických nečistot spočívá v pronikání kyselin do pórů oxidického povlaku na fázovém rozhraní oxid-kov – viz. obr. 17. [21,22,36,37,38]



Obr. 17 – Schématické znázornění rozpouštění a odlupování okují [22]

(Kyselina sírová: a) odleptávání, b) odlupování; Kyselina chlorovodíková: c) odleptávání, d/e) rozpouštění okují vzniklých při vysokých/nízkých teplotách)

Při moření vzniká atomární vodík, který je pohlcován ocelí. Při kontaktu s kovem může být vodík pohlcen do struktury kovu a může tak nepříznivým způsobem ovlivnit mechanické vlastnosti materiálu, způsobuje tzv. vodíkovou křehkost. Míra absorpce vodíku závisí na teplotě, druhu kyseliny, stavu povrchu a čistotě oceli. [21,22,37]

Zabránit vnikání vodíku do kovu při moření lze při využití vysokomolekulárních organických látek, tzv. inhibitorů. Tyto povrchově aktivní látky vytvářejí na povrchu oceli tenký ochranný povlak, který zabraňuje vnikání vodíku do kovu. Účinnost těchto látek se vyjadřuje pomocí tzv. inhibičního koeficientu, což je poměr mezi rychlostí rozpouštění oceli v lázni s přídavkem inhibitoru a bez něho. K odstranění vodíku a vodíkové křehkosti po moření se používá žihání. [21,22,37]

Při moření v kyselině sírové dochází k částečnému rozpouštění okují a k současnému silnému rozpouštění základního kovu – viz. obr. 13. Nejpodstatnější vliv na rychlost moření mají parametry mořící lázně, především pak její teplota a koncentrace kyseliny. Nejčastěji se pro moření v kyselině sírové používá lázeň s koncentrací 10 až 20 % při teplotách od 40 až do 70 °C v čase 10 až 30 minut. Nejvyšší rychlosti moření se dosahuje při koncentraci přibližně 25 %. Délka mořícího cyklu závisí zejména na tloušťce a struktuře materiálu. Moření v kyselině sírové má několik výhod. Za ty nejzásadnější je považována především její nízká spotřeba. Při tomto druhu moření totiž zůstává většina okují v lázni nerozpouštěných ve formě kalu a není třeba ji z tohoto důvodu často doplňovat. Mezi další výhody patří například nízká pořizovací cena, či málo uvolňujících se zdravotně nebezpečných látek do okolního prostředí. [21,22,37]

Stejně jako u moření v kyselině sírové i při moření v kyselině chlorovodíkové mají nejpodstatnější vliv na rychlost moření parametry mořící lázně. Nejčastěji se pro moření v kyselině chlorovodíkové používá lázeň s koncentrací 5 -17 %. Při vyšších koncentracích se značným způsobem snižuje rozpustnost železnatých solí, které se v lázni během moření hromadí. Jejich vylučování na povrchu způsobuje potíže při následném oplachování. Při moření v kyselině chlorovodíkové je kovový povrch kyselinou méně napadán, než je tomu u moření v kyselině sírové. Tato skutečnost má za následek dosažení čistšího povrchu po moření. Výhodou tohoto způsobu moření je například rychlost celého procesu, která je oproti moření v kyselině sírové rychlejší. Mezi nevýhody patří především velká spotřeba kyseliny chlorovodíkové, což je do značné míry způsobeno tím, že tato kyselina narozdíl od kyseliny sírové okuje rozpouští. Další nevýhodou představují například výpary z mořící lázně, které působí silně korozivně na ocelové zařízení. Z toho důvodu se do procesu zařazují odsávací systémy, které vzniklé výpary odvádí. [21,22,37,39]

Specifickým typem moření je tzv. dekapování. Dekapování se využívá při galvanickém pokovování k odstranění tenkých vrstev oxidů, které vznikají například při anodickém odmašťování. [21,22,36]

Jako chemická předúprava povrchu se využívá k odstraňování nečistot též sdružené moření s odmašťováním. Tento proces zahrnuje použití roztoků minerálních kyselin s vysokým obsahem organických tenzidů. Roztoky tohoto typu mají nejen mořící schopnosti, ale také schopnosti odmašťovací, což umožňuje provádět oba procesy najednou v jedné lázni. [21,22]

4.2.3 ODREZOVÁNÍ

Odrezování je technologie chemické předúpravy povrchu, která spočívá v odstraňování rzi z povrchu ocelových předmětů, na kterých nejsou přítomny okuje. Odstraňování rzi může probíhat dvojím způsobem. V prvním případě dochází k odstranění rzi minerální kyselinou, která obsahuje inhibitory a látky usnadňující penetraci (oplachové odrezovače). V druhém případě se převede korozní vrstva na komplexy s vysokou adhezí k povrchu kovu tvořící anodickou ochranu daného kovu (bezoplachové odrezovače). K odstranění rzi z povrchu oceli je možné použít většinu kyselin. Mezi ty nejčastěji používané patří odrezovače založené na kyselině fosforečné. Odstranění rzi lze provést buď ponorem do lázně nebo natíráním. Volba vhodného typu odrezovače závisí na mnoha faktorech, jako je například stupeň a charakter koroze, následná technologie, technologické možnosti zařízení atd. Odrezovače mohou být buď pro oplachové, či bezoplachové aplikace. [21,22,36,37]

Oplachové odrezovače se používají k odstraňování rzi rozpouštěním. Tyto prostředky obsahují silné anorganické kyseliny, inhibitory, smáčedla a další látky usnadňující penetraci. Odrezování může být v případě dílů menších rozměrů provedeno ponorem do odrezovacího prostředku. Rozměrnější díly lze odrezovat nátěrem štětcem, potíráním houbou atd. Délka celého procesu odrezování závisí na stupni koroze a na její "kvalitě". [21,22,37]

Prostředky pro bezoplachové aplikace obsahují stabilizátory a inertizátory korozních produktů. Reakcí těchto prostředků s oxidy železa a podkladovým materiálem dochází k utváření inertní organokovové vrstvy, která na povrchu vytváří anodickou ochranu. Příkladem takového bezoplachového prostředku je například stabilizátor Synkor 100, který se používá především v oblastech úpravy konstrukčních dílů a velkoplošných těžko demontovatelných částí. [21,22,37]

4.2.4 CHEMICKÉ A ELEKTROCHEMICKÉ LEŠTĚNÍ

Leštění kovů lze provést chemickým nebo elektrochemickým způsobem. Tento proces probíhá ve speciálních leštících lázních za specifických podmínek. Chemické a elektrochemické leštění je rychlejší, kvalitnější a čistší oproti mechanickému způsobu. Chemické a elektrochemické leštění se používá zejména u malých a složitých tvarových součástí, pro které je ze zmíněných důvodů mechanické leštění neproveditelné. [21,22,37]

Proces chemického leštění spočívá v rozpouštění kovu agresivními roztoky. Celý proces je řízen tak, aby se odleptávala přednostně výše položená místa mikronerovností na povrchu kovových materiálů. Při elektrochemickém leštění dochází k mnohem silnějšímu odleptávání vyvýšených míst, což vede ke snížení celkové výšky mikronerovností na povrchu kovu. [21,22,37]

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části diplomové práce bylo podrobit povlaky s obsahem nanočástic disulfidu wolframu (IF-WS_2) poskytnuté firmou Nanotech Europe s.r.o. vybraným zkouškám přilnavosti, otěruvzdornosti a provést mikrostrukturní analýzu na vybraných vzorcích. Získané výsledky provedených zkoušek jsou shrnuty v závěru práce.

5.1 NANOTECH-EUROPE

Nanotech-Europe je českou firmou zabývající se distribucí wolframových nanopovlaků. Nanopovlaky tohoto typu se používají jako přísady do motorových olejů pro naftové nebo benzinové motory či jako přísady do olejů manuálních i automatických převodovek a diferenciálů – obr. 18. Přidáním wolframových nanopovlaků do motorů, převodovek či diferenciálů se sníží jejich spotřeba o 5 až 15 %, zvýší se jejich výkon (díky snížení pasivních odporů) a zároveň se sníží škodlivé emise, a to až o 8 %. [60,62]



Obr. 18 – Produkty firmy Nanotech-Europe [60]

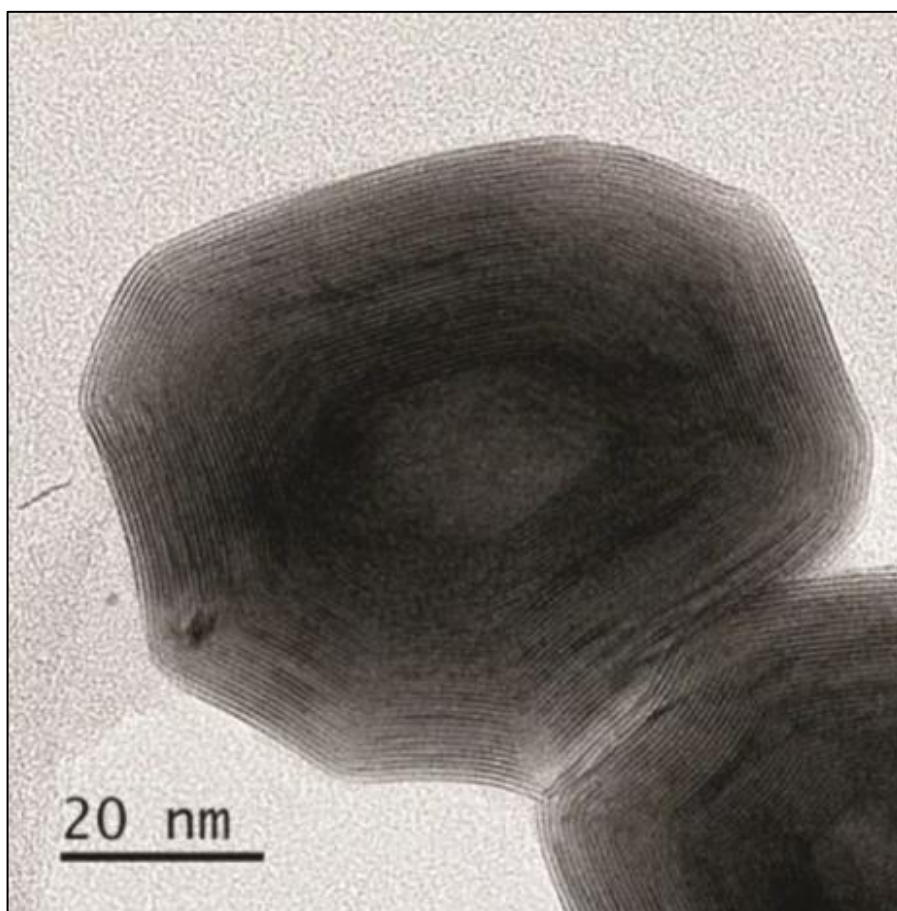
Firma Nanotech-Europe se zároveň zaměřuje na prodej maziv a aditiv pro procesní kapaliny jako jsou emulze či řezné a tvářecí oleje. Mazání chrání kluzné plochy na molekulární úrovni a výrazně prodlužuje životnost zařízení. Mazání také chrání kluzné plochy proti výskytu mikroeroze, pittingu, vibrační koroze a snižuje tření a hlučnost stroje. Přidáním aditiv do procesních kapalin se dosahuje větší životnosti řezných a tvářecích nástrojů obvykle o 50 až 150 %, v některých případech až o 400 %. Dále pak nižší spotřeby elektrické energie – v případě třískového obrábění je to 15-20 % a u tváření za studena 20-30 %. Přidáním aditiv do procesních kapalin dosáhneme i kvalitnějšího opracování (nižší Ra), nižší hlučnosti při samotném obrábění a nižší spotřeby běžných emulzí o 30-50 %. Aditiva jsou zároveň netoxická, zdravotně nezávadná a šetrná k životnímu prostředí. [60,62]

Výrobky, které firma Nanotech-Europe distribuje vyrábí americká společnost Nanotech Industrial Solutions (NSI) se sídlem v Avenel v New Jersey, USA. [61,62]

Firma Nanotech-Europe se zabývá kromě distribuce též vývojem nových aditiv do závodních motorů. V kooperaci se závodními týmy jako je Škoda Motorsport či Buggyra Racing firma Nanotech-Europe vyvíjí a testuje unikátní aditiva s obsahem nanočástic, která jsou používána dle požadované funkčnosti nanočástic na konkrétní aplikaci. [60,65]

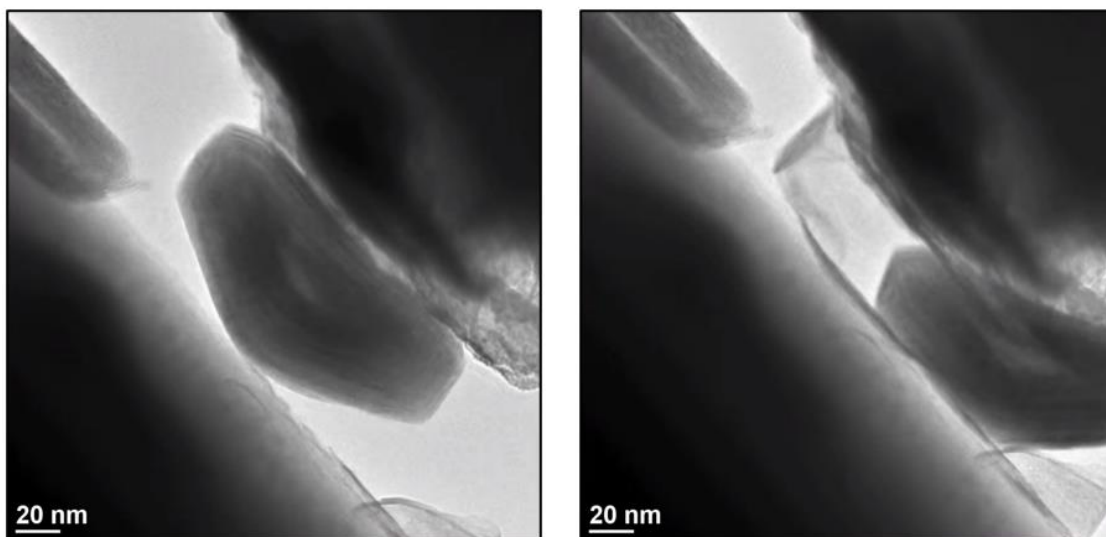
5.2 NANOČÁSTICE IF-WS₂

Nanočástice disulfidu wolframu (IF-WS₂) v suchém stavu představují jedny z nejvíce dosud známých mazacích chemických sloučenin. Jedná se o anorganické nanočástice (obr. 19) ve formě nanotrubic, které fungují na principu tzv. cibulového efektu. Jedná se o princip, při kterém se za vysokého tlaku z fullerenům podobných kuliček postupně uvolňují jednotlivé cibulové slupky, které ulpívají na povrchu a vytváří tak vysoce odolný nanopovlak chránící kluzné plochy proti opotřebení i poškození a zároveň snižující tření. [60,62,65]



Obr. 19 – TEM snímek nanočástice IF-WS₂ [106]

Nanočástice IF-WS₂ se při statickém tlaku do 1-1,2 GPa chovají v podstatě jako nanokuličková ložiska. Jakmile však dojde k pohybu, a s ním spojenému smykovému namáhání, dochází k onomu cibulovému efektu, a tedy k uvolňování jednotlivých vrstev, které ulpívají na povrchu kluzných ploch. Ukázka tzv. cibulového efektu je zobrazena na obrázku 20. [60,62,65]



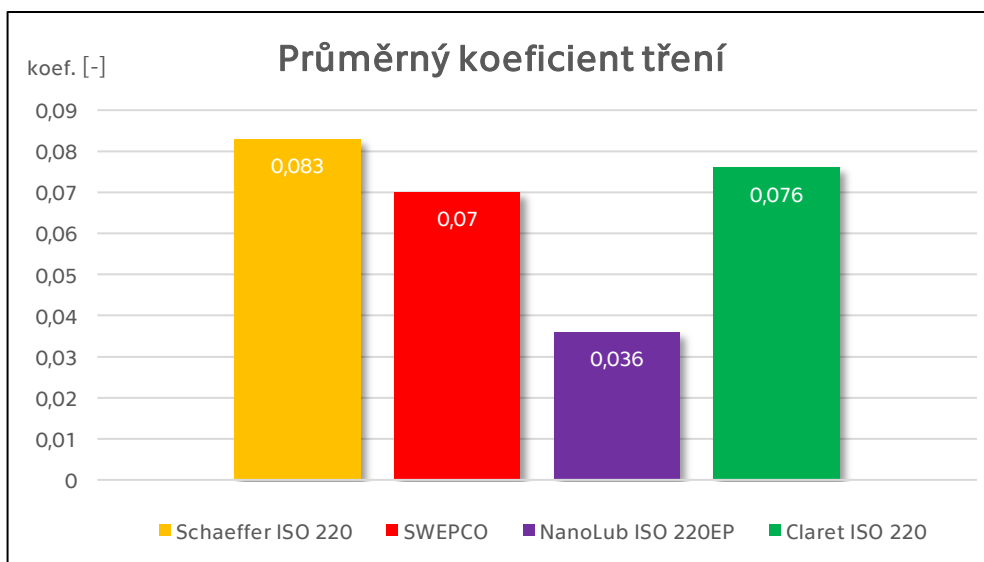
Obr. 20 – HRTEM snímek cibulového efektu nanočástice IF-WS₂ [107]
(před odloupenutím vrstvy (vlevo), po odloupenutí vrstvy (vpravo))

Díky postupnému uvolňování jednotlivých cibulových vrstev dochází k vyrovnávání určité nepravidelnosti a zacelování různých trhlin na povrchu kluzných ploch (obr. 21). Fullereny, které vyplní prostor trhliny, pohltí díky svému dutému jádru veškerou energii, která by jinak na základě dynamických rázů nadále rozšiřovala a zvětšovala trhlinu. Lze říci, že nanočástice tohoto typu vykazují i autoreparační vlastnosti. [65]

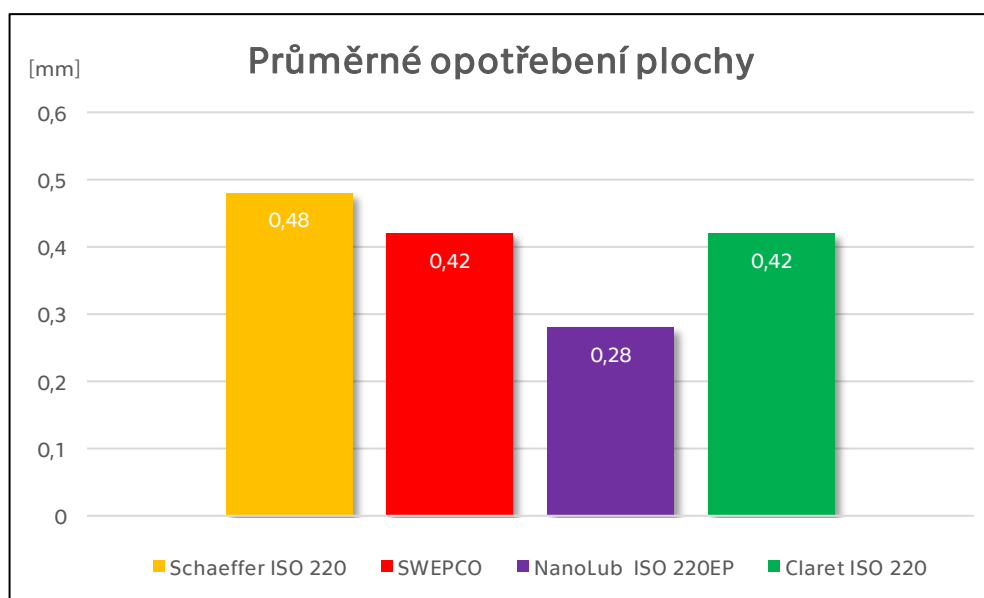


Obr. 21 – Vyhlazení povrchu a zacelení trhlin [108]

Jak již bylo zmíněno, nanočástice disulfidu wolframu fungují v podstatě jako miniaturní nanokuličková ložiska a napovlakované kluzné plochy, díky tomu dosahují velice nízkého koeficientu tření. Díky specifickým vlastnostem těchto nanokuliček disponují převodové oleje NanoLub oproti tradičním převodovým olejům na bázi disulfidu molybdenu bezprecedentně nízkým průměrným koeficientem tření a průměrným opotřebením plochy (Wear Scar Diameter) – viz. graf 1 a 2. [62,65,66]



Graf 1 – Porovnání koeficientů tření [66,108,114]



Graf 2 – Porovnání opotřebenění povrchu [66,108,114]

Zároveň dokáží nanočástice IF-WS₂ díky svému kulovitému tvaru a dutému jádru odolávat extrémním dynamickým i statickým zatížením. Poprvé dokázal syntetizovanými nanočásticemi disulfidu wolframu (IF-WS₂) výrazně vylepšit vlastnosti maziv profesor Reshef Tenne z Weizmannova vědeckého institutu (WIS) v Izraeli roku 1992. [60,62,65]

5.2.1 POVLAKY POSKYTNUTÉ FIRMOU NANOTECH-EUROPE

Firma Nanotech-Europe poskytla pro experimentální část práce celkem pět druhů povlaků s obsahem nanočástic IF-WS₂. Tři druhy suchých povlaků a dva druhy servisních povlaků. Suché druhy povlaků:

- NANOTECH 03 (N03),
- NANOTECH FM (NFM),
- NANOTECH EX (NEX).

NANOTECH 03 je suchý wolframový nanopovlak, který je dominantním způsobem postaven na nanočásticích IF-WS₂. Další významnou složku daného nanopovlaku tvořil grafit a doplňkovou složkou byl poté hexagonální nitrid bóru (hBN). U suchého wolframového nanopovlaku NANOTECH FM je převládající složkou hexagonální nitrid bóru. Menší zastoupení u tohoto druhu nanopovlaku měly naopak nanočástice IF-WS₂ a doplňkovou složkou byl grafit. Posledním suchým povlakem byl wolframový nanopovlak NANOTECH EX, který je postaven pouze na nanočásticích IF-WS₂.

Nanočástice IF-WS₂ zajišťují po zapracování vysokou ochranu povrchu proti opotřebením a vynikající kluzné vlastnosti. Tyto druhy povlaku zároveň vykazují vysokou tepelnou stabilitu a dobrou chemickou stabilitu.[78]

Nitrid bóru (BN) patří díky svým specifickým vlastnostem do skupiny nejslibnějších anorganických materiálů současnosti. Mezi jeho unikátní vlastnosti patří vysoká mechanická tuhost, velmi nízký koeficient tření, či vysoká chemická a tepelná stabilita. Nitrid bóru se používá v nátěrech odolných proti korozi, lepidlech, při čištění vody, podávání léků atd. Hexagonální nitrid bóru je též spolu s grafitem jedním z nejpoužívanějších tuhých (pevných) maziv. [74,75]

Grafit je nejčastější přírodní modifikací uhlíku. Jak již bylo řečeno dříve grafit se skládá z nanodestiček grafenu, které jsou od sebe vzdáleny jen několik desetin nanometru. Grafit má dobrou tepelnou vodivost a dobře vede elektrický proud. Je zároveň neprůhledný a nerozpustný ve vodě. Odolává vysokým teplotám a má výborné mazací vlastnosti. Používá se jako materiál elektrod v lithium-iontových bateriích, či jako materiál žáruvzdorných vyzdívek. [76,77]

Nitrid bóru a grafit se do povlaků obsahující nanočástice IF-WS₂ přidávají zejména za účelem dosažení minimálního koeficientu tření a opotřebením součástí, na kterých je povlak nanesen. S tím souvisí samozřejmě dosažení zvýšené životnosti daných součástí a snížení hlučnosti celého zařízení.

Pro experiment byly též firmou Nanotech-Europe dodány dva druhy servisního povlaku:

- NANOTECH Rychleschnoucí mazací aerosol (RMA) – wolframový nanopovlak
- NANOTECH Mazací aerosol (MA) – wolframový nanopovlak [78]

Rychleschnoucí mazací aerosol (RMA) je wolframový nanopovlak na uhlovodíkové bázi (obr. 22), který po aplikaci zanechává tenký film s persistentním mazacím a vodoodpudivým efektem. Mazací povlak aktivně vytěsňuje vlhkost z povrchu a zajišťuje limitovanou formu antikorozi ochrany po dobu své přítomnosti. Přítomnost nanočástic IF-WS₂ zajišťuje po zapracování (pohybu kluzných ploch vůči sobě) vysokou ochranu povrchu proti opotřebení a vynikající kluzné vlastnosti. [78]

Mazací aerosol (MA) je wolframový nanopovlak na vodní bázi (obr. 22). Tento nanopovlak, taktéž jako RMA, zanechává po své aplikaci tenký film s persistentním mazacím efektem. Nanesený povlak je poté v případě potřeby snadno odstranitelný běžnými čistícími prostředky. I v tomto případě nanočástice IF-WS₂ zajišťují po zapracování vysokou ochranu povrchu proti opotřebení a vynikající kluzné vlastnosti. [78]



Obr. 22 – Wolframový nanopovlak MA (vlevo) a RMA (vpravo) [autor práce]

Na obrázku 22 je zřetelným způsobem pozorovat usazenou vrstvu sedimentu na dně lahvíček. Z tohoto důvodu bylo nutné před samotnou aplikací povlaků na povrch zkušebních vzorků důkladným způsobem lahvičky promíchat.

5.3 POPIS EXPERIMENTU

Pro experimentální část práce bylo použito celkem 14 kusů vzorků třech různých typů. Vzorky byly podle rozměru a druhu naneseného povlaku označeny následovně:

- deska A – 6 kusů – 3 druhy povlaku – rozměr 150x100x2 mm,
- deska B – 2 kusy – 2 druhy povlaku – rozměr 135x50x8 mm,
- deska C – 6 kusů – 2 druhy povlaku – rozměr 40x20x6 mm.

Na jednotlivých vzorcích byly nanесeny různé druhy povlaku v různých vrstvách. Typy vzorků s jejich příslušným označením a použitým druhem naneseného povlaku na jednotlivých vzorcích jsou přehledně zobrazeny v tabulce 3. Vzorky jsou pro lepší přehlednost dále v textu označovány pouze číslicemi 1 až 14.

Tab. 3 – Rozdělení vzorků [autor práce]

Deska A	Vzorek č.	Deska B	Vzorek č.	Deska C	Vzorek č.
5 vrstev	1_NEX	3 vrstvy	7_NFM	3 vrstvy	9_RMA
	2_NEX		8_N03		10_RMA
	3_N03		11_MA		
	4_N03		12_MA		
	5_NFM		13_RMA		
	6_NFM		14_RMA		

Materiálem desek A a B byla neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti S235JRG1 a desky C pak ložisková ocel EN 100Cr6 (AISI 52100). Chemické složení v % hmot. obou ocelí je uvedeno v tabulkách 4 a 5.

Tab. 4 – Chemické složení v % hmot. – konstrukční ocel S235JRG1 [63]

Prvky v oceli	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Cu
Chemické složení v % hmot.	0,17	1,40	0,60	max 0,03	0,007	0,045	0,045	max 0,30

Tab. 5 – Chemické složení v % hmot. – ložisková ocel 52100 [64]

Prvky v oceli	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Cu
Chemické složení v % hmot.	1,05	0,45	0,35	1,65	0,30	0,030	0,025	max 0,30

Samotný experiment se skládal z několika na sebe navzájem navazujících kroků. Prvním krokem byla předúprava povrchu vzorku, která byla provedena pro zajištění úspěšného provedení povrchové úpravy. Následně byly na vzorky aplikovány jednotlivé druhy povlaků s obsahem nanočástic, přičemž k jejich vytvrzení došlo při pokojové teplotě. Po vytvrzení všech povlaků se přistoupilo k provedení zvolených mechanických zkoušek a k vyhodnocení získaných výsledků.

5.4 PŘEDÚPRAVA POVRCHU

Pro úspěšné provedení povrchové úpravy je nezbytným předpokladem vhodně zvolená, a především správně provedená předúprava povrchu, která je jedním ze základních faktorů ovlivňující životnost povlaků. Pro experiment bylo nejprve, jako mechanická předúprava povrchu, zvoleno broušení, načež následovalo odmašťování, jakožto chemická předúprava povrchu.

Vzorky byly broušeny na magnetické brusce typu BPH 20 (číslo 402309) od výrobce Považské strojárny n. p., Považská Bystrica – viz. obr. 23. Výsledná drsnost povrchu po broušení je uvedena v tabulkách 6, 7 a 8 (přílohy 1 až 5). Drsnost povrchu jednotlivých vzorků byla naměřena drsnoměrem Mitutoyo SJ 301 (příloha 15). Charakteristický vzhled vzorku desky A před a po broušení je zobrazen na obrázku 24.



Obr. 23 – Magnetická bruska BPH 20 [autor práce]

Tab. 6 – Průměrná drsnost povrchu, deska A [autor práce]

Deska A							
Vzorek č.		1	2	3	4	5	6
Drsnost	Ra [μm]	0,62	0,63	0,67	0,71	0,69	0,60
	Rz [μm]	3,88	3,93	4,13	4,40	4,20	3,85

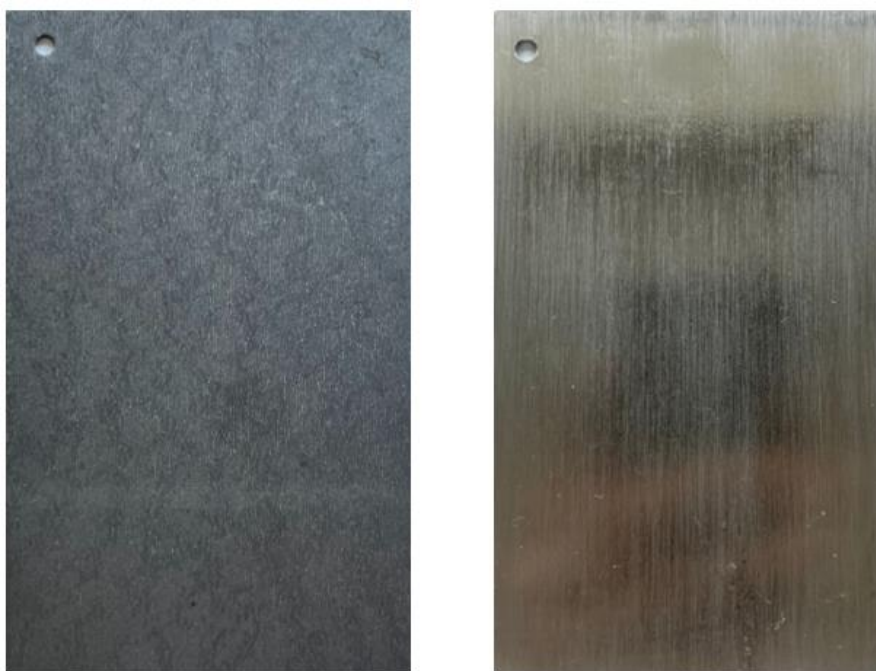
Tab. 7 – Průměrná drsnost povrchu, deska B [autor práce]

Deska B			
Vzorek č.		7	8
Drsnost	Ra [μm]	0,49	0,28
	Rz [μm]	3,21	2,00

Tab. 8 – Průměrná drsnost povrchu, deska C [autor práce]

Deska C							
Vzorek č.		9	10	11	12	13	14
Drsnost	Ra [μm]	0,15	0,10	0,10	0,14	0,11	0,10
	Rz [μm]	1,19	0,88	0,72	1,20	0,83	0,92

Pro odmaštění vzorků byl použit odmašťovací prostředek Isopropanol (CAS 67-63-0) – viz. příloha 6 a čistič Nanotech – viz příloha 7.



Obr. 24 – Charakteristický vzorek desky A před (vlevo) a po (vpravo) broušení [autor práce]

5.5 ZHOTOVENÍ VZORKŮ

Vzorky desek A a B byly po mechanické a chemické předúpravě povrchu doručeny do firmy Nanotech-Europe za účelem aplikace nanopovlaků s obsahem nanočástic IF-WS₂. Vzorky desky C byly po dodání servisního povlaku firmou Nanotech-Europe napovlakovány později v tribologické laboratoři Ústavu strojírenské technologie na Fakultě strojní ČVUT v Praze.

Zhotovování povlaků je tvořeno dvěma po sobě jdoucími procesy. Nejprve se jedná o samotné nanesení povlaku a následně o jejich vytvrzení. Mezi nejčastěji používané technologie k nanášení povlaků patří technologie ručního nanášení (nanášení štětcem), stříkání (pneumatické, vysokotlaké, v ohřátém stavu, v elektrostatickém poli vysokého napětí), máčení, elektrochemické nanášením, či navalování povlaků. Vytvrzování povlaků probíhá poté několika způsoby:

- zasycháním na vzduchu (teplota kolem 20 °C),
- vypalováním infračerveným zářičem,
- sušením a vypalováním ohřátým vzduchem,
- indukčním vypalováním,
- vytvrzováním elektronovými zářiči,
- vytvrzováním ultrafialovým zářením. [21,22,37]

Při experimentu byla použita k nanesení povlaků na jednotlivé vzorky metoda ručního nanášení (nanášení štětcem) při následném vytvrzení na vzduchu. Technologický postup nanášení povlaku na jednotlivé vzorky byl z důvodu rozdílných zkušeností mírně odlišný a je detailněji popsán v následujících kapitolách 5.5.1 a 5.5.2.

5.5.1 METODA NANESENÍ POVLAKU – DESKA A, B

Povlak byl na desky A a B nanesen firmou Nanotech-Europe pomocí metody ručního nanášení. Tato metoda patří k těm vůbec nejrozšířenějším technologiím nanášení povlaků a používá se v případech, kdy není vhodné nebo přímo nelze uplatnit výkonnějšího způsobu nanášení povlaku. [21,22,37]

Technologie nanášení štětcem se skládala z několika na sebe navzájem navazujících kroků. Prvním krokem bylo samotné nanesení povlaku, přičemž před jeho prvním nanesením bylo nejprve zapotřebí povlak v nádobě důkladně zamíchat. Před každou další aplikací byl povlak v nádobě promíchán štětcem. Po prvním nátěru se plocha vzorků kartáčovala za mokra nerezovým kartáčem z důvodu otevření povrchové mikrostruktury. Povlak tak mohl lépe ulpět na povrchu vzorků a nanočástice díky tomu mohly vnikat i do povrchové mikrostruktury. Dalším krokem bylo vytvrzení na vzduchu

při teplotě kolem 20 °C. Po vytvrzení následovalo kartáčování za sucha. Následně se celý proces vyjma kartáčování za mokra opakoval, dokud nebylo na površích jednotlivých vzorků desek A a B nanášeno všech pět vrstev povlaku. Interval mezi nanášením dílčích vrstev byl brán vždy do zaschnutí povlaku.

Výhoda metody nanášení štětcem spočívá v možnosti lokálního povlakování součástí v místech, která jsou vystavována vysokému opotřebení. Další výhodou této metody je možnost nanášení optimálního počtu vrstev v závislosti na požadované odolnosti proti opotřebení. Nevýhodou metody nanášení štětcem je v případě povlakování rozměrnějších součástí malá produktivita práce. [37,48]

Nanášení povlaku danou technologií je zobrazeno na obrázku 25. V daném případě se jednalo o nátěr NANOTECH povlaku na kluzné plochy podavače pro odvíjení ocelových sviteků. Charakteristický vzhled napovlakovaných vzorků desek A a B je poté ukázán na obrázku 26 na straně 57.



Obr. 25 – Nanášení povlaku NANOTECH [78]



Obr. 26 – Charakteristický vzhled napovlakovaných vzorků desek A (vlevo) a desek B (vpravo)
[autor práce]

5.5.2 METODA NANESENÍ POVLAKU – DESKA C

Pro vzorky desky C byla použita taktéž metoda ručního nanášení povlaku (nanášení štětcem). Jak již bylo řečeno jedná se o metodu, která patří mezi nejrozšířenější způsoby zhotovování povlaků. Ruční nanášení povlaku je jednoduchá a zároveň universální metoda, která se používá zejména pro provádění povrchové úpravy v montážních podmínkách, či při nanášení servisních nebo renovačních povlaků. [21,22,37]

Vzorky desky C byly povlakovány dvěma různými druhy povlaků (RMA a MA). Před první aplikací bylo zapotřebí lahvičku se servisním povlakem v uzavřeném stavu pečlivým způsobem protřepat. Před každým dalším nanesením povlaku bylo nutné pomocí štětce povlak znovu promíchat. Tímto způsobem byly naneseny oba druhy povlaku (obr. 27). Nejprve povlak RMA (obr. 28), který byl nanesen na vzorky 9, 10, 13 a 14. a poté povlak MA (obr. 29), který byl aplikován na vzorky 11 a 12. Povlak byl nanesen ve třech vrstvách, přičemž interval mezi aplikacemi jednotlivých vrstev byl vždy 30 minut. Vytvrzení u této metody probíhalo na vzduchu při teplotě přibližně 20 °C.



Obr. 27 – Nanášení povlaku RMA a MA štětcem [autor práce]



Obr. 28 – Nanesený povlak RMA, deska C, vzorek 9 [autor práce]



Obr. 29 – Nanesený povlak MA, deska C, vzorek 11 [autor práce]

Při experimentu se též zjišťovalo, jaké bude mít na tribologické vlastnosti desky C s povlakem RMA následky aplikace přímočarého vratného pohybu. Z tohoto důvodu byl experiment doplněn o dva vzorky (13 a 14), které byly danému pohybu vystaveny. Přímočarý vratný pohyb byl proveden autorem práce a probíhal za mokra (tzn. před zaschnutím povlaku) po dobu 5 minut. Obrázky 30 a 31 ukazují stav vzorku před proběhnutím procesu a po něm.



Obr. 30 – Nanesený povlak RMA, deska C, vzorek 13 před procesem [autor práce]



Obr. 31 – Nanesený povlak RMA, deska C, vzorek 13 po procesu [autor práce]

5.6 VYHODNOCENÍ VZORKŮ

Na vzorcích desek A, B a C se v rámci experimentu postupně provedlo několik zkoušek ke zjištění přilnavosti a otěruvzdornosti nanesených povlaků. Zároveň byla provedena mikrostrukturní analýza pomocí světelného mikroskopu. Vzorky byly pro jednotlivé zkoušky rozděleny následovně. Pro měření přilnavosti povlaku byla provedena odtrhová zkouška na vzorcích 2, 3 a 6. Zjištění tribologických vlastností proběhlo tribologickým testováním na tribometru TOP 3 a multifunkčním tribometru MFT-5000 na vzorcích 7, 8, 9, 11 a 13. Analýza mikrostruktury pomocí světelného mikroskopu byla poté provedena na vzorcích 1, 4, 5, 10, 12 a 14.

5.6.1 PŘILNAVOST

Pro měření přilnavosti povlaků k základnímu materiálu byla provedena odtrhová zkouška, která byla prováděna dle normy ČSN EN ISO 4624. Zkouška odtrhem byla provedena u vzorků 2, 3 a 6 desky A. Podstata odtrhové zkoušky spočívá ve změření síly potřebné k odtržení, či roztržení povlaku od základního materiálu. Pro zkoušku odtrhem byla použita zkušební tělíska ve formě panenek (příloha 10), která byla na povrch vzorku přilepena dvousložkovým epoxidovým lepidlem UHU PLUS ENDFEST 300. Měření se poté provádělo pomocí automatického odtrhoměru Elcometer 510 Model T. [67]

Postup odtrhové zkoušky byl následující. Nejprve bylo zapotřebí zkušební tělíska ve formě panenek zdrsnit a poté je odmastit technickým lihem. Pomocí dvousložkového epoxidového lepidla UHU PLUS ENDFEST 300 (příloha 8) se pak zkušební tělíska nalepila na povrch vzorku. Dalším krokem bylo vytvrzení naneseného lepidla spojující zkušební tělíska s povrchem vzorku v horkovzdušné peci při 100 °C po dobu 10 minut (příloha 9). Po vychladnutí vzorků byl povlak pomocí speciálního řezného nástroje (příloha 11) po obvodu zkušebních tělísek proříznut. Povlak byl proříznut k základnímu materiálu z důvodu lepšího určování typu lomu, a proto aby lom nastal v požadovaných místech. Posledním krokem bylo samotné odtržení zkušebních tělísek pomocí automatického odtrhoměru Elcometer 510 Model T – viz. obr. 32 (příloha 10). [67]

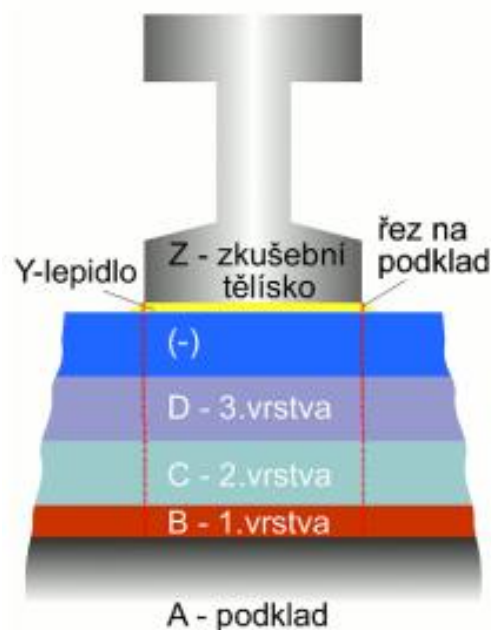


Obr. 32 – Automatický odtrhoměr Elcometer 510 [110]

Vyhodnocení odtrhové zkoušky pro měření přilnavosti povlaků se stanovuje v závislosti na charakteru porušení (obr. 33, tabulka 9) a průměrné hodnotě odtrhového napětí. Vzhledem k charakteru jednotlivých povlaků a k výsledku provedenému odtrhnu nebylo možné provést vyhodnocení v závislosti na charakteru porušení, tudíž nelze přesně říci, zda docházelo k adheznímu, nebo koheznímu porušení. Cílem zkoušky tak bylo porovnat průměrné hodnoty odtrhových napětí u dílčích druhů povlaků.

Tab. 9 – Charakter porušení [67]

Klasifikace	Popis
A	Kohezní lom v podkladu
A / B	Adhezní lom mezi podkladem a první vrstvou
B	Kohezní lom první vrstvy
B / C	Adhezní lom mezi první a druhou vrstvou
-	Kohezní lom poslední vrstvy
-/Y	Adhezní lom mezi poslední vrstvou a lepidlem
Y	Kohezní lom v lepidle
Y / Z	Adhezní lom mezi lepidlem a zkušebním tělískem



Obr. 33 – Odtrhová zkouška [67]

Vyhodnocení odtrhové zkoušky

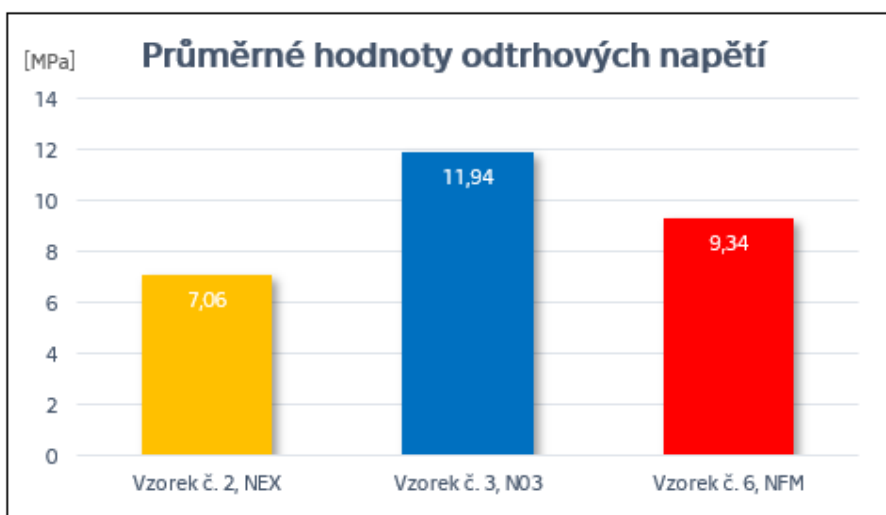
Naměřené hodnoty byly po provedení odtrhové zkoušky názorně zpracovány do tabulky 10. Z naměřených hodnot je patrné, že nejvyšších hodnot odtrhových napětí dosahuje vzorek číslo 3. Tento výsledek mohl být zapříčiněn hned několika různými faktory. V první řadě mohlo rozhodovat různé složení jednotlivých povlaků nanesených na příslušných vzorcích společně s rozdílným hmotnostním, respektive procentuálním podílem jednotlivých složek obsažených v povlaku.

Tab. 10 – Naměřené hodnoty odtrhových napětí [autor práce]

Deska A			
Číslo měření	Napětí – Vzorek č. 2	Napětí – Vzorek č. 3	Napětí – Vzorek č. 6
1.	6,24 MPa	11,14 MPa	9,34 MPa
2.	8,14 MPa	12,09 MPa	9,20 MPa
3.	6,79 MPa	12,58 MPa	9,49 MPa
Průměrná hodnota	7,06 MPa	11,94 MPa	9,34 MPa

Na vzorek číslo 3 byl nanesený povlak N03, který byl dominantním způsobem postaven na nanočásticích IF-WS₂. Další významnou složku daného povlaku tvořil grafit a doplňkovou složkou byl poté nitrid bóru. Převládající složkou byl nitrid bóru u povlaku NFM naneseného na vzorku číslo 6. Menší zastoupení zde měly naopak nanočástice IF-WS₂ a doplňkovou složkou tohoto druhu povlaku byl grafit. Posledním zkušebním vzorkem, u kterého byla provedena odtrhová zkouška byl vzorek číslo 2. Povlak NEX nanesený na daném vzorku byl postaven pouze na nanočásticích IF-WS₂ – viz. graf 4.

Vzhledem k tomu, že vzorek číslo 6 s naneseným povlakem NFM dosahoval spolu se vzorkem číslo 3 (povlak N03) vyšších hodnot odtrhových napětí nežli povlak NEX aplikovaný na vzorku číslo 2 – viz. tab. 10 lze dle této skutečnosti vyvodit následující závěr. Povlaky obsahující nitrid bóru a grafit dosahují díky přítomnosti těchto složek vyšších hodnot odtrhových napětí nežli povlak obsahující pouze nanočástice IF-WS₂, a to ať už jsou v povlaku tyto složky obsaženy jako doplňkové, či je z některé z nich povlak dominantním způsobem složen – viz. graf 3. Průměrné hodnoty odtrhových napětí byly ovlivněny jak charakterem samotného povlaku, tak jeho tloušťkou.

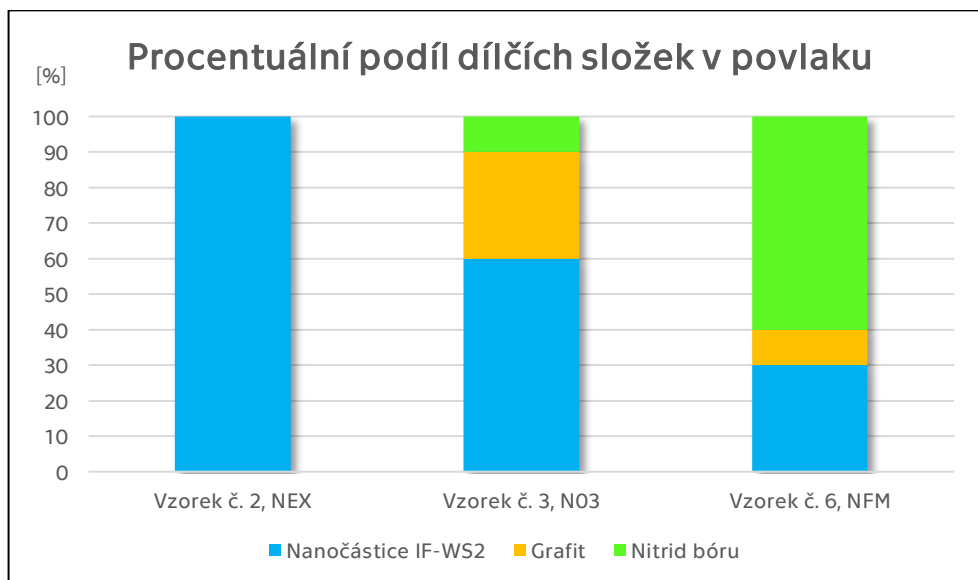


Graf 3 – Průměrné hodnoty odtrhových napětí [autor práce]



Obr. 34 – Vzorek po odtrhu [autor práce]

Rozhodujícím faktorem byl v případě rozdílných hodnot odtrhových napětí též odlišný hmotnostní, respektive procentuální podíl⁴ nanočástic IF-WS₂, grafitu a nitridu bóru – viz. graf 4. Vzhledem k tomu, že firma Nanotech-Europe z pochopitelných důvodů nezveřejnila konkrétní hmotnostní podíl jednotlivých složek, či koncentraci obsažených nanočástic v povlaku nelze říci, jaký vliv měly konkrétní složky na rozdílné hodnoty v odtrhových napětích.



Graf 4 – Procentuální podíl dílčích složek v povlaku [autor práce]

Dalším faktorem mohla být například chemická reakce mezi povlakem a použitým dvousložkovým epoxidovým lepidlem. Závěrem lze konstatovat, že nejvyšších hodnot odtrhových napětí po provedení odtrhové zkoušky dosáhl vzorek číslo 3 s nanoseným povlakem N03.

Pro měření přilnavosti povlaků k základnímu materiálu se obvykle provádí odtrhová zkouška, mřížková zkouška a zkouška křížovým řezem. Vzhledem k charakteru povlaku – viz. obr. 26 (vlevo) a 34 použitého pro experiment bylo vyhodnoceno, že nejprůkaznější zkouškou, pro zjištění přilnavosti povrchu, bude zkouška odtrhem.

⁴) Uvedené procentuální zastoupení dílčích složek v jednotlivých povlacích neodpovídají skutečnosti.

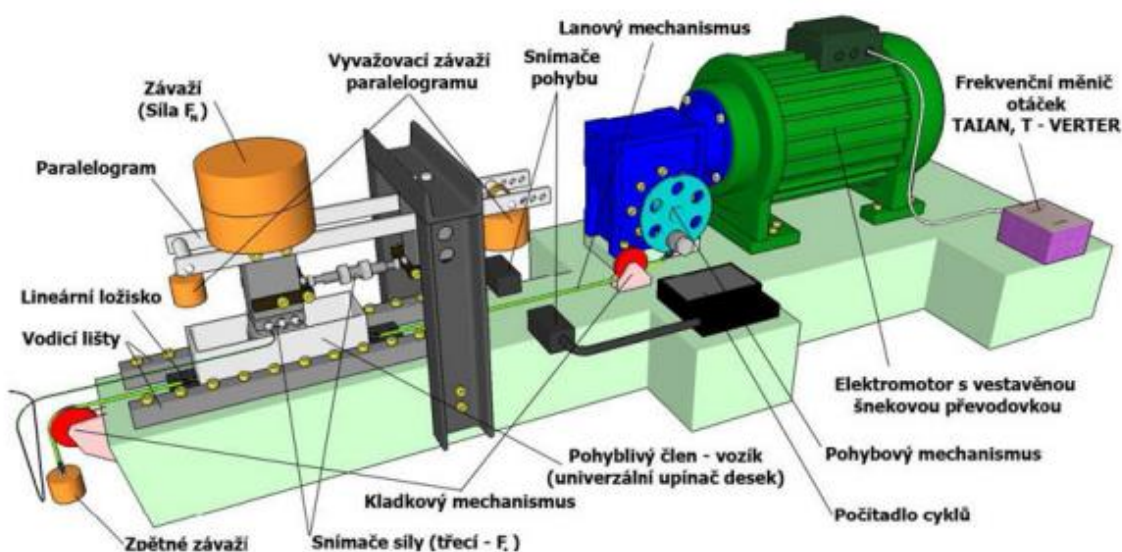
5.6.2 OPOTŘEBENÍ A OTĚRUVZDORNOST

Opotřebení je v obecné rovině definováno jako nežádoucí změna rozměrů, či povrchu tuhých těles. K této změně rozměrů či povrchu tuhých těles dochází při vzájemném působení funkčních povrchů nebo působením vnějších vlivů prostředí a pracovních podmínek. Věda, která se zabývá opotřebením a také třením, či mazáním se nazývá tribologie. V principu je tribologie definovaná jako věda zabývající se interakcí dvou povrchů při vzájemném pohybu. [37,68,69, 70]

Při opotřebení dochází k přemístování částic hmoty opotřebovávaného povrchu těles mechanickým účinkem. Tento proces je obvykle doprovázen fyzikálními, či chemickými jevy. Opotřebení povrchu úzce souvisí s třením. Jedná se v podstatě o reakci daného systému na odehrávající se tření. Opotřebení lze dle podmínek vzniku rozdělit na opotřebení abrazivní, adhezivní, kavitační, erozivní, vibrační a únavové. Otěruvzdorností se pak nazývá schopnost materiálu vzdorovat, respektive odolávat otěru. [37,68,69]

Měření opotřebení, tření a zkoušením maziv se zabývá tribometrie. Pro vyhodnocování tribologických vlastností se používají speciální přístroje nazývané jako tribometry. Tyto přístroje lze podle typu zkoumaného opotřebení rozdělit na tribometry pro zjišťování odolnosti proti adhezivnímu, abrazivnímu, erozivnímu, kavitačnímu či únavovému opotřebení. [70,71]

V současné době existuje několik metod ke zjišťování různých tribologických vlastností, které se od sebe navzájem odlišují z hlediska druhu kontaktu mezi třecími plochami. Při experimentu se zjišťovaly tribologické vlastnosti tribologickým testem na tribometru TOP 3 – viz. obr. 35 (vzorky č. 7, 8) a tribometru MFT–5000 (vzorky č. 9, 11, 13).



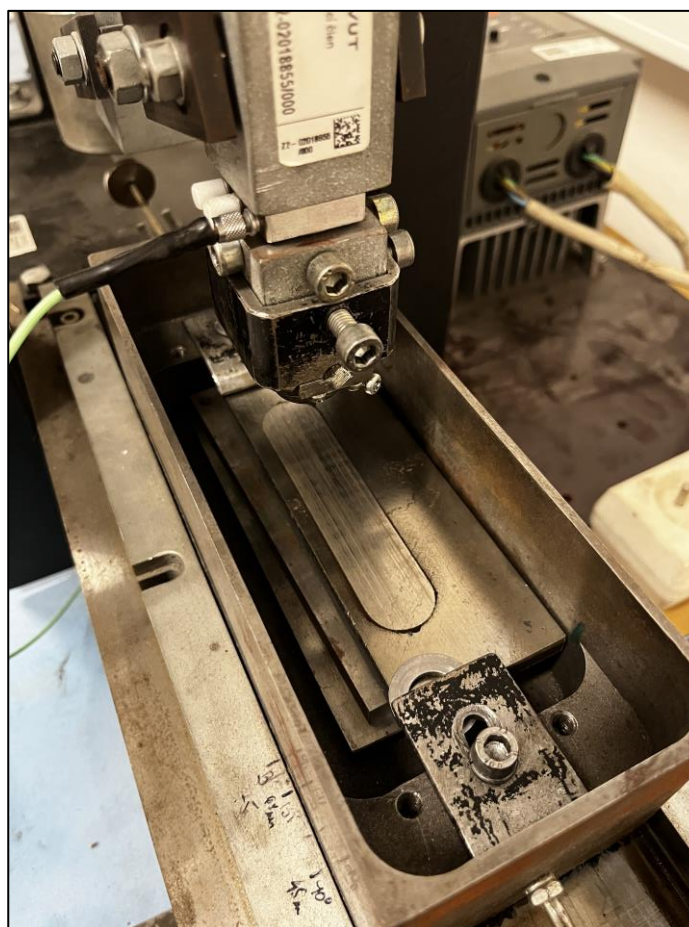
Obr. 35 – Tribometr TOP 3 – charakteristický model sestavy [72]

Tribologické testování povlaků na tribometru TOP 3

Tribometr TOP 3 se používá k měření adhezivního tření a opotřebení povrchů příslušných vzorků. Mezi funkční dvojicí tableta – deska dochází k translačně oscilačnímu pohybu, kdy pohyb vykonává deska umístěná v univerzálním upínači desek v pohyblivém vozíku. Zkušební tableta je při testu zatížena zvoleným závažím, které působí na tabletu normálovou silou. Při průběhu tribologického testu jsou naměřená data zaznamenávána v příslušném počítačovém programu. Ze získaných dat je možné vyhodnotit jak statický, tak i dynamický koeficient tření. Tribometr TOP 3 se skládá ze sestavy několika dílů, které jsou schématicky znázorněny na obrázku 35. [72]

Postup měření na tribometru TOP 3

Postup měření na tribometru TOP 3 se skládal z několika na sebe navzájem navazujících kroků, které musely být vždy provedeny před samotným zahájením měření. V první řadě bylo zapotřebí upnout zkušební tělísko ve formě tablety (obr. 37) do příslušného prostoru pro upnutí na ramenu tribometru. Po upnutí tablety následovalo její důkladné očištění benzinovým technickým čističem (příloha 16). Poté se do univerzálního upínače desek, respektive do pohyblivého vozíku upnula i zkušební deska s naneseným povlakem – viz. obr. 36.



Obr. 36 – Snímek zkušební desky při měření na tribometru TOP 3 [autor práce]

Dalším krokem bylo umístění příslušného závaží na tribometr. V případě obou měření se na tribometr umístilo závaží o hmotnosti 2 kg. Následovala celková kontrola pracoviště, která obsahovala překontrolování správného upnutí zkušební desky, zkušební tablety a stability umístěného závaží. Po kontrole pracoviště se přistoupilo k zahájení samotného měření. Doba měření byla v obou případech stanovena na 60 minut. Záznam měřených dat byl proveden za pomoci programu Charge Meter 5015A. Před měřením proběhla kalibrace přístroje.

Popsaný postup měření na tribometru TOP 3 byl stejným způsobem aplikovaný na oba vzorky (7 a 8) zkušební desky B s nanesenými povlaky NFM a N03. Parametry tribologického testování povlaku pro jednotlivá měření jsou zapsána v tabulce 11. Cílem prováděných měření bylo získat hodnoty jak statického, tak dynamického koeficientu tření.

Tab. 11 – Parametry tribologického testování povlaku [autor práce]

Číslo měření	Číslo vzorku	Počet cyklů/min.	Čas [min.]	Dráha jednoho cyklu [mm]	Celková dráha po 60 min. [m]	Zatížení [kg]
1.	7	35	60	190	399	2
2.	8	35	60	190	399	2



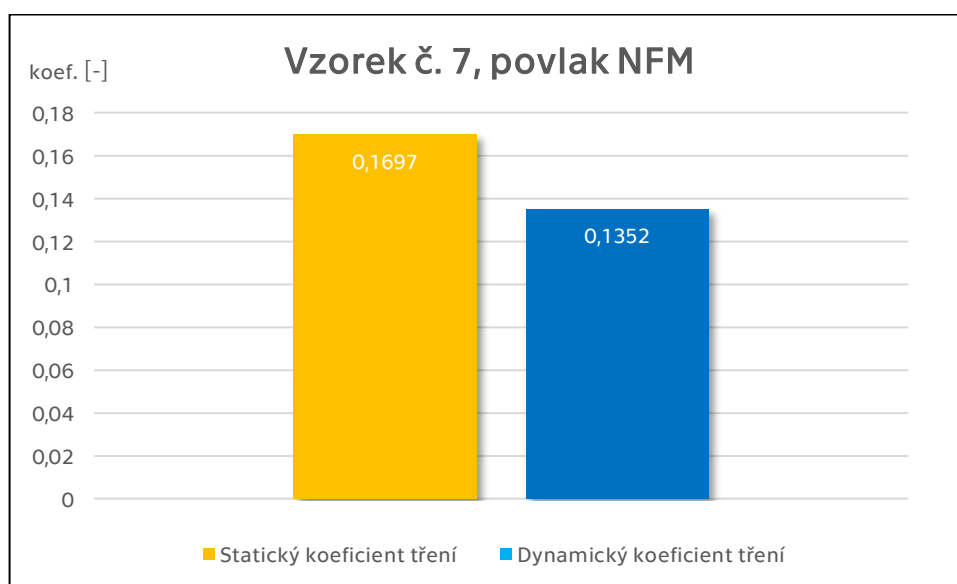
Obr. 37 – Zkušební tableta [autor práce]

Pro měření byla použita zkušební tableta zobrazená na obr. 37. Po ukončení prvního měření došlo k vyjmutí a následnému otočení opotřebované tablety směrem vzhůru. Druhé měření se tak provádělo na neopotřebované straně tablety za stejných podmínek jako měření první. Po ukončení druhého měření byla tableta vyřazena z provozu. Materiálem zkušební tablety byla ocel S235JRG1. Průměr zkušební tablety byl 20 mm a její výška 10 mm.

Vyhodnocení tribologického testování povlaků na tribometru TOP 3

Přes sériový kabel RS 232 jsou naměřené hodnoty třecích sil v průběhu tribologického testování posílány z vyhodnocovací jednotky Kistler do stolního počítače umístěného vedle tribometru TOP 3. Naměřená data jsou následně zobrazována v podobě grafického znázornění v programu Charge Meter 5015A. [72]

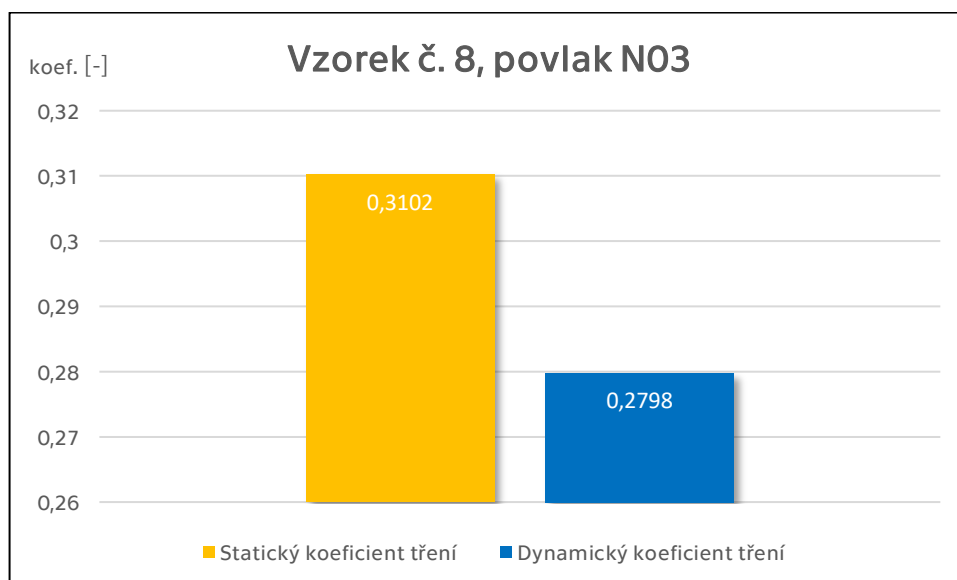
Naměřená data jsou po ukončení tribologického testování uložena jako textový soubor. Každé dílčí měření poté představuje jednu proměřenou stopu. Vyhodnocení jednotlivých dat každé stopy je posléze provedeno v programu Matlab (Matrix Laboratory). Daný program byl sestaven speciálně pro vyhodnocování měření prováděných na tribometru TOP 3. [72]



Graf 5 – Vzorek číslo 7, μ_s a μ_d , povlak NFM [autor práce]



Obr. 38 – Stopa po provedeném měření, vzorek č. 7, povlak NFM [autor práce]

Graf 6 – Vzorek číslo 8, μ_s a μ_d , povlak N03 [autor práce]

Obr. 39 – Stopa po provedeném měření, vzorek č. 8, povlak N03 [autor práce]

Tab. 12 – Hodnoty μ_s a μ_d

Deska B		
Vzorek číslo	7	8
Statický koeficient tření [μ_s]	0,1697	0,3102
Dynamický koeficient tření [μ_d]	0,1352	0,2798

Z naměřených dat byly prostřednictvím programu Matlab získány hodnoty statického (μ_s) i dynamického (μ_d) koeficientu tření – viz. tabulka 12. Porovnáním získaných hodnot statického koeficientu tření u vzorků číslo 7 a 8 s nanesenými povlaky NFM a N03 a dle grafů 5 a 6 lze dojít k závěru, že hodnota statického koeficientu tření vzorku číslo 7 je přibližně o polovinu nižší než li u vzorku číslo 8. V případě dynamického koeficientu tření dosahuje také vzorek číslo 7 s naneseným povlakem NFM nižších hodnot než vzorek číslo 8 s povlakem N03. Rozdíl mezi danými hodnotami je přibližně 48 %.

Tribologické testování povlaků na multifunkčním tribometru MFT-5000

Multifunkční tribometr MFT-5000 od firmy Rtec instruments (obr. 40) může být vybaven řadou vyměnitelných modulů, díky kterým lze na jednom zařízení měřit tribologické vlastnosti pomocí několika různých tribologických testů. Samotné měření může probíhat v širokém pásmu pracovních teplot a to od $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tribometr MFT-5000 je zároveň vybaven integrovaným 3D profilometrem jenž umožňuje analyzovat změnu povrchu v závislosti na čase. [80]

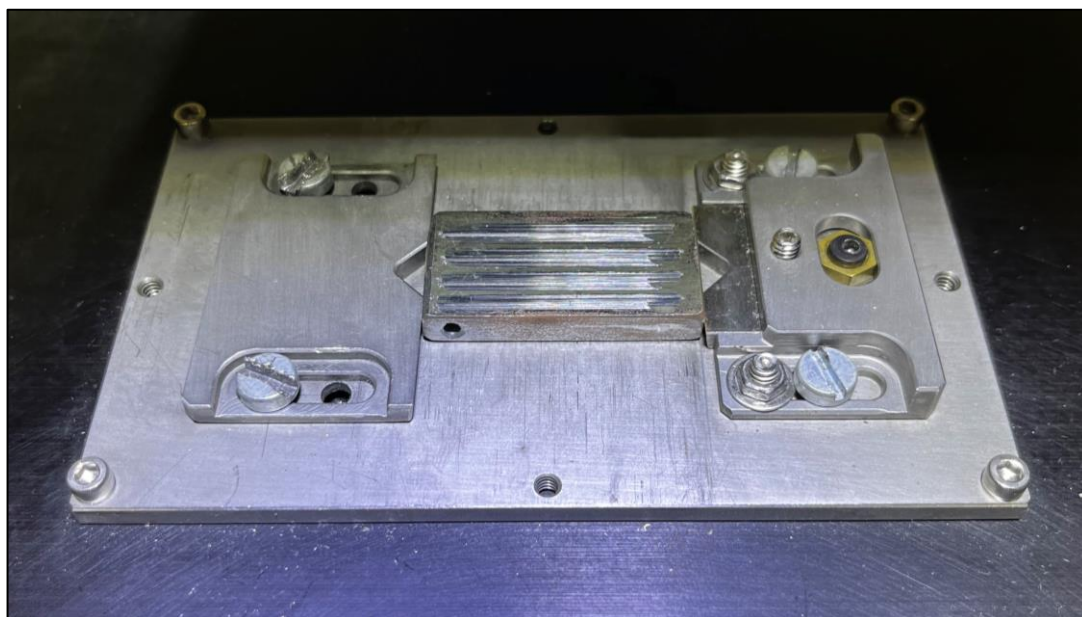


Obr. 40 – Tribometr MFT-5000, Rtec instruments [80]

Pro experiment byla ke zjištění tribologických vlastností použita lineární metoda. Při lineární metodě dochází k lineárnímu vratnému pohybu vzorku, který je upnutý na pohyblivém stole (modulu). Princip metody spočívá v upnutí vzorku do připraveného modulu a jeho následné zatížení zkušebním tělískem (pinem). Zkušební tělísku může být ve formě válečku nebo kuličky a je po celou dobu experimentu zatěžováno předem definovanou normálovou silou. V průběhu testu je měřena a zaznamenávána třecí síla, ze které je určen průměrný koeficient tření. Dále je možné lineární metodou vyhodnocovat míru opotřebení vzorku, velikost tření v závislosti na zvolené rychlosti, body selhání atd. [79]

Postup měření na multifunkčním tribometru MFT-5000

Před zahájením samotného měření bylo třeba provést několik dílčích kroků. Nejprve bylo zapotřebí spustit tribometr MFT-5000 spolu se softwarem MFT17 na počítači, který byl umístěn vedle pracovního zařízení. Po ujištění, že se v pracovním prostoru stroje nenachází žádný předmět, který by bránil v pohybu pohyblivému stolu, či ramenu tribometru se provedlo spuštění funkce "Home All". Cílem funkce je nalezení výchozího bodu souřadného systému. Po dokončení tohoto procesu byl do připraveného přípravku upnut zkušební vzorek s naneseným povlakem (obr. 41)



Obr. 41 – Přípravek s upnutým zkušebním vzorkem (po měření) [autor práce]

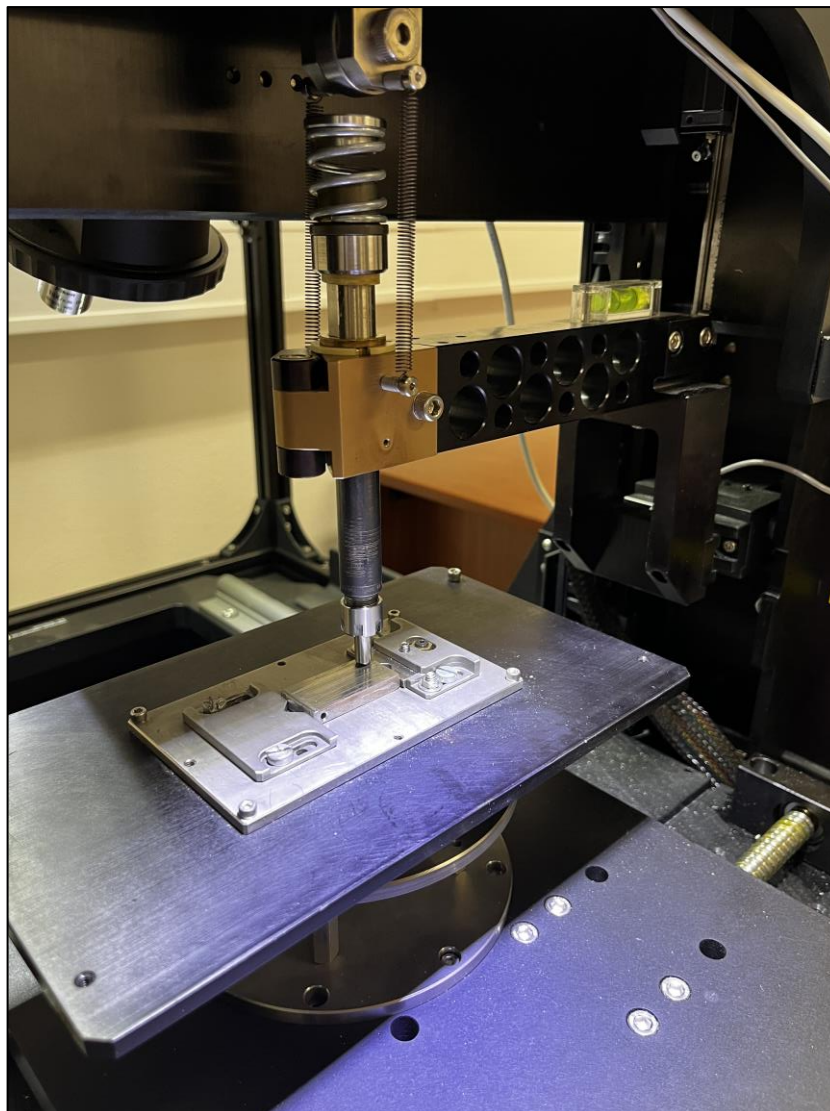
Po upnutí zkušební vzorku bylo s ramenem tribometru pomocí ručního ovládání najeto do vhodného prostoru pro výměnu zkušebního tělíška (pinu), které bylo pomocí převlečné matice upnuto v držáku zkušebních tělíšek (obr. 42). Držák byl vyjmut z ramena tribometru a byla provedena výměna zkušebního tělíška jehož funkční plocha byla očištěna benzinovým technickým čističem (příloha 16). Poté byl držák upnut zpět na rameno tribometru kolmo na povrch zkušební vzorku.

Zajištění správné polohy držáku lze ověřit pomocí vodováhy, která je upnuta na rameno tribometru. K výměně zkušebního tělíška stejně jako k provedení funkce "Home All" došlo vždy po ukončení měření na příslušném vzorku. Zkušebním tělíškem byl zvolen váleček (materiál 416 SS (nerezová ocel), rozměr: $\varnothing 6,3$ mm, délka 19 mm, styková plocha 5 mm).



Obr. 42 – Držák zkušebního tělíška [autor práce]

Před začátkem měření se zkušební tělíško upnuté v držáku ramena tribometru přivedlo za pomoci manuálního ovládání do výchozí pozice pro zahájení měření. (obr. 43). Poté se provedla kontrola upnutí zkušební vzorku, držáku zkušebního tělíška a celkového pracovního prostoru stroje.

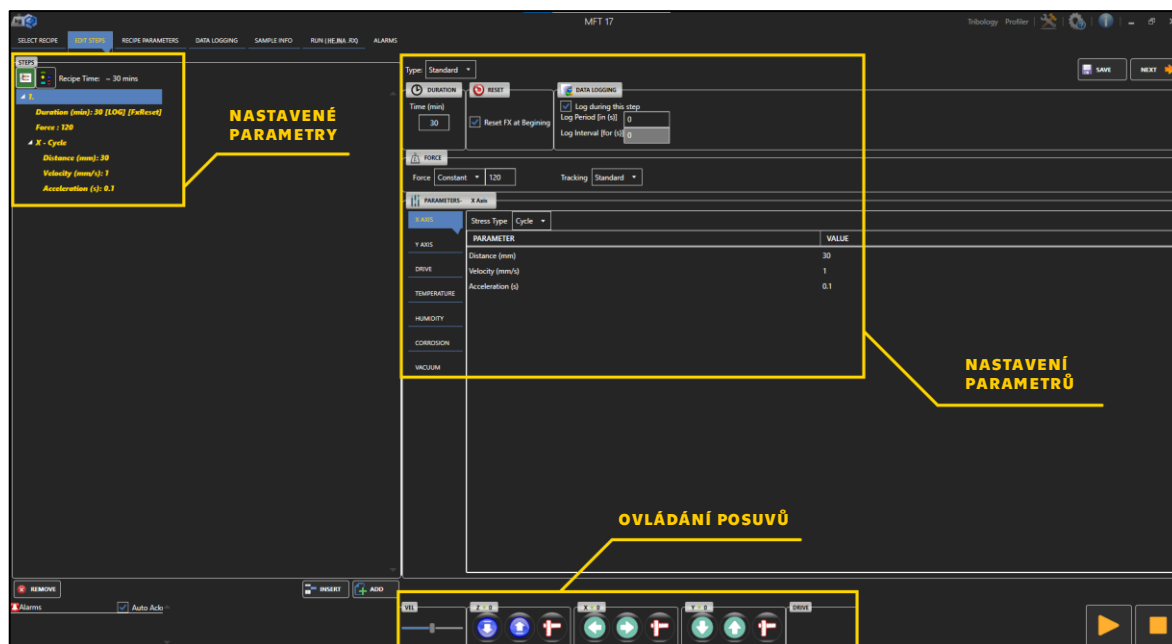


Obr. 43 – Výchozí pozice pro zahájení měření [autor práce]

Po kontrole pracovního prostoru stroje, zkušebního vzorku a držáku zkušebního tělíška se v softwaru MFT17 nejprve v sekci "EDIT STEPS" nastavily a uložily parametry měření (obr. 44). Parametry měření jsou uvedeny v tabulce 13 a obr. 44.

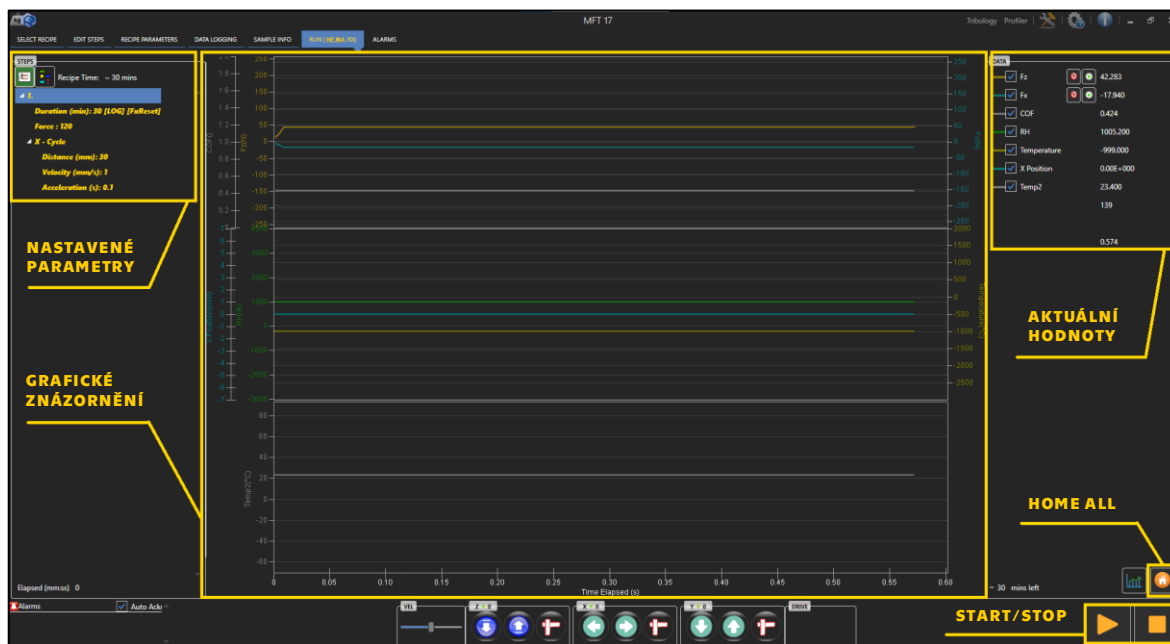
Tab. 13 – Parametry měření, tribometr MFT-5000 [autor práce]

Deska B, C				
Čas	Zatěžující síla	Dráha	Rychlost	Zrychlení
30 min	120 N	30 mm	1 mm/s	0,1 s



Obr. 44 – Nastavení parametrů měření v softwaru MFT17 [autor práce]

Po nastavení všech parametrů se přistoupilo k samotnému zahájení měření, což se provedlo v sekci "RUN" prostřednictvím tlačítka start (obr. 45). V této sekci byly též v průběhu měření zobrazovány aktuální hodnoty parametrů a jejich grafické znázornění. Po ukončení prvního měření, respektive po první dokončené dráze bylo zkušební tělísko upnuté v držáku ramena tribometru přivedeno za pomoci manuálního ovládání do výchozí pozice pro zahájení druhého měření (dráhy). Celkově byly na každém vzorku provedeny čtyři měření (čtyři měřené dráhy).

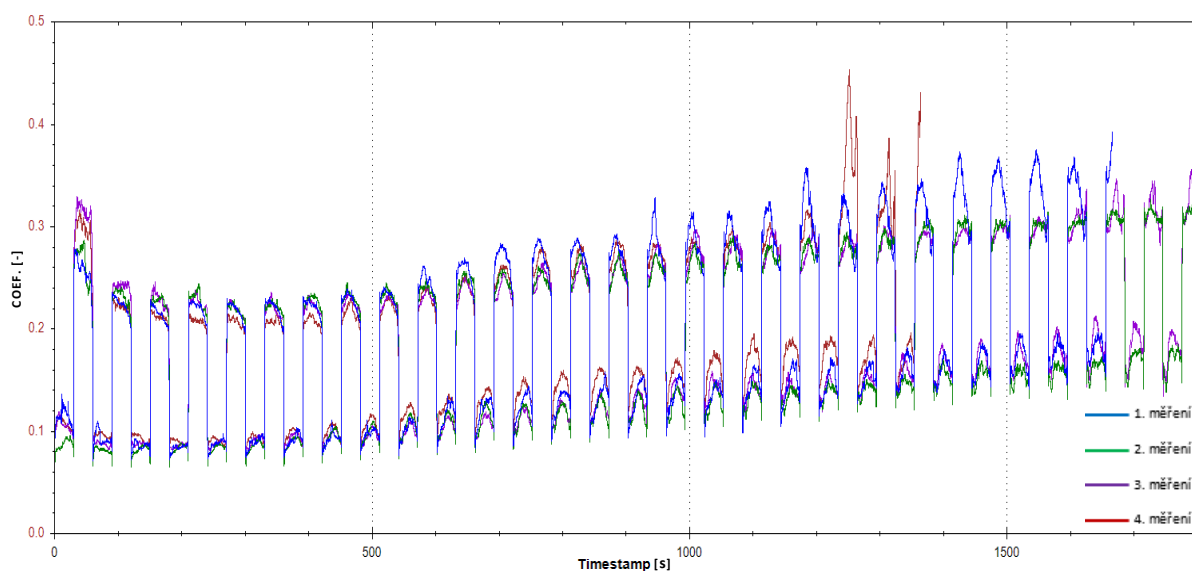


Obr. 45 – Okno s grafickým znázorněním vybraných parametrů [autor práce]

Vyhodnocení tribologického testování povlaků na multifunkčním tribometru MFT-5000

Pro vyhodnocení tribologického testování vybraných zkušebních vzorků byl použit software MFT17 spolu se softwarem Rtec Viewer16. Prostřednictvím daných softwarů byla vyhodnocena a vzájemně porovnána příslušná měření.

Následující grafy 7 –15 zobrazují dílčí měření provedené na vzorcích číslo 7, 8, 9, 11 a 13 s nanosenými povlaky NFM, N03, RMA a MA a RMA aktivovaný tlakem. V tabulkách 14–22 jsou uvedeny stanovené hodnoty průměrných koeficientů tření spolu se směrodatnou odchylkou pro každé dílčí měření. Na každém vzorku byla provedena celkem čtveřice měření.



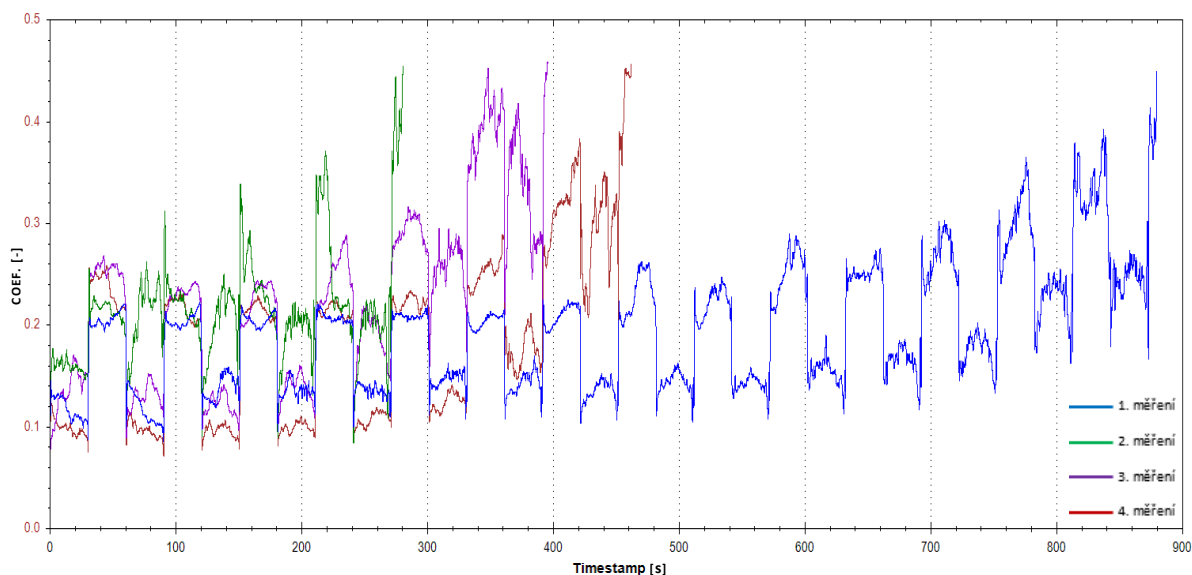
Graf 7 – Závislost koeficientu tření na čase, vzorek č. 9 [autor práce]

Tab. 14 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, vzorek č. 9 [autor práce]

Vzorek číslo 9, povlak RMA				
Číslo měření	Průměrný koeficient tření [-]	Čas [min]	Zatěžující síla [N]	Směrodatná odchylka [-]
1.	0,1982	27	120	0,0833
2.	0,1908	30	120	0,0771
3.	0,1953	30	120	0,0765
4.	0,1911	22	120	0,0749



Obr. 46 – Vzorek číslo 9 po provedeném měření [autor práce]



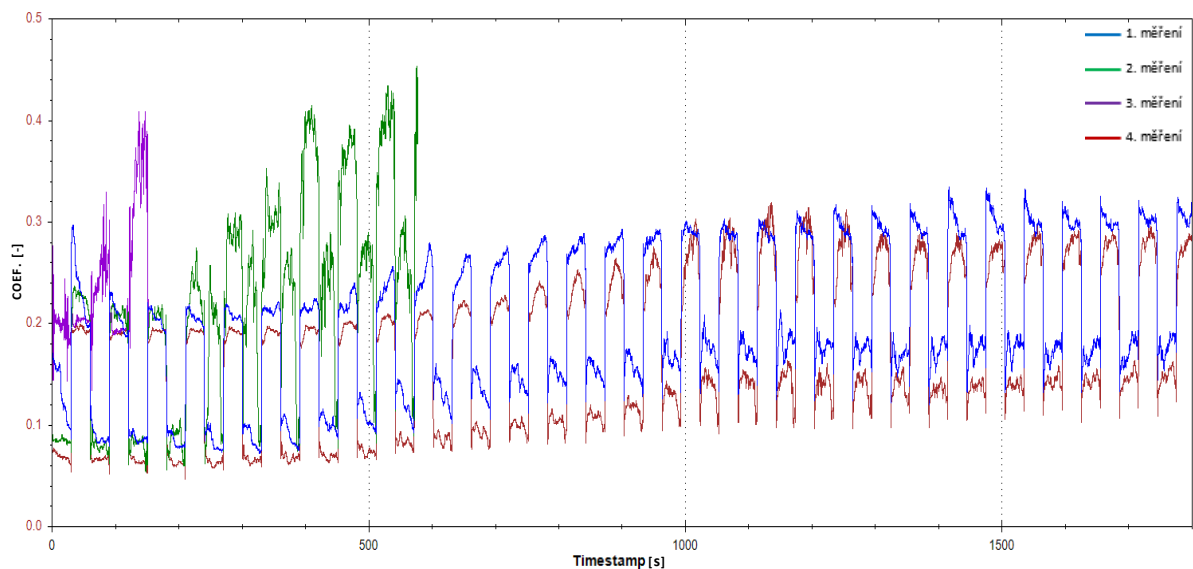
Graf 8 – Závislost koeficientu tření na čase, vzorek č. 11 [autor práce]

Tab. 15 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, vzorek č. 11 [autor práce]

Vzorek číslo 11, povlak MA				
Číslo měření	Průměrný koeficient tření [-]	Čas [min]	Zatěžující síla [N]	Směrodatná odchylka [-]
1.	0,1941	15	120	0,0597
2.	0,2149	5	120	0,0548
3.	0,2271	6	120	0,0859
4.	0,1883	7	120	0,0819



Obr. 47 – Vzorek číslo 11 po provedeném měření [autor práce]



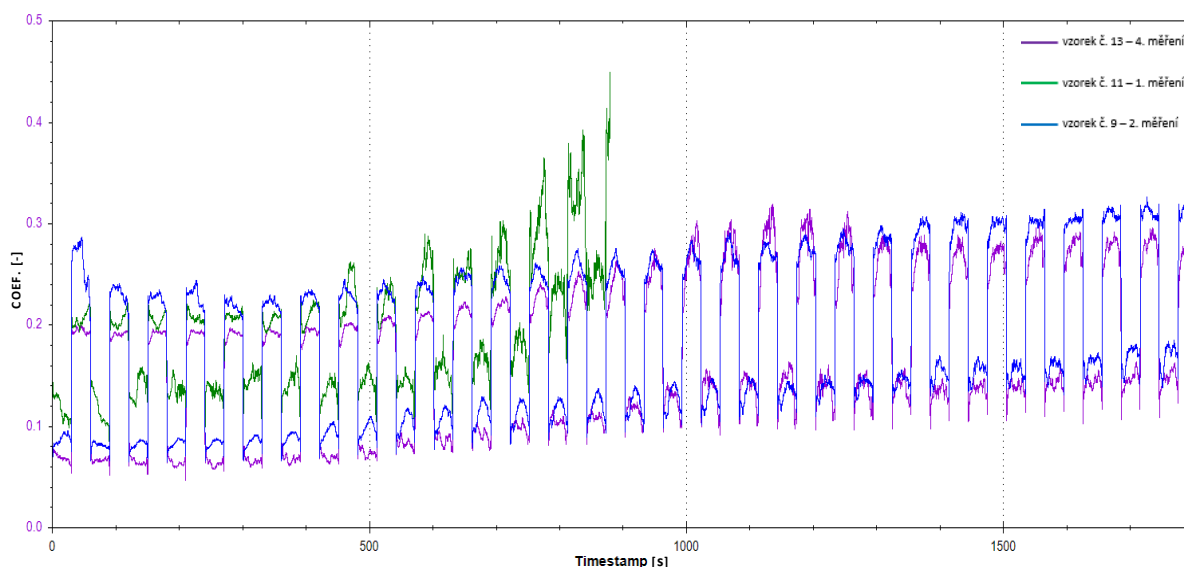
Graf 9 – Závislost koeficientu tření na čase, vzorek č. 13 [autor práce]

Tab. 16 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, vzorek č. 13 [autor práce]

Vzorek číslo 13, povlak RMA aktivovaný tlakem				
Číslo měření	Průměrný koeficient tření [-]	Čas [min]	Zatěžující síla [N]	Směrodatná odchylka [-]
1.	0,2031	30	120	0,0719
2.	0,2193	10	120	0,1008
3.	0,2328	2	120	0,0614
4.	0,1714	30	120	0,0739



Obr. 48 – Vzorek číslo 13 po provedeném měření [autor práce]



Graf 10 – Závislost koeficientu tření na čase, porovnání vybraných měření (vzorek č. 9, 11, 13)
[autor práce]

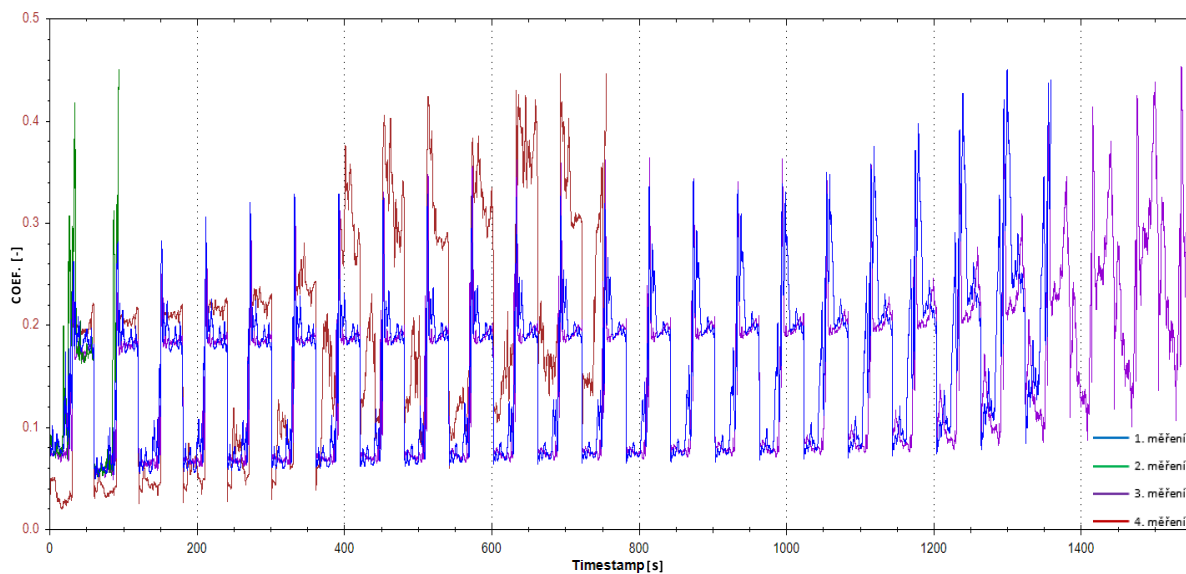
Tab. 17 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, porovnání vybraných měření (vzorek č. 9, 11, 13) [autor práce]

Porovnání vybraných měření, vzorek č. 9, 11, 13					
Číslo vzorku	Číslo měření	Průměrný koeficient tření [-]	Čas [min]	Zatěžující síla [N]	Směrodatná odchylka [-]
13	4.	0,1714	30	120	0,0739
11	1.	0,1941	15	120	0,0597
9	2.	0,1908	30	120	0,0771

Graf 10 porovnává vybraná měření vzorků 9, 11 a 13. Zvolená měření byla v případě vzorků 9 a 13 vybraná z důvodu splnění předem nastavených parametrů měření (tab. 17). U vzorku číslo 11 nebyl ani v jednom případě splněn nastavený časový parametr měření, a proto se přistoupilo k vybrání druhého nejvhodnějšího měření, a to měření číslo 1. Dílčí měření byla zároveň vybrána z důvodu nejnižších hodnot průměrných koeficientů tření. Nastavené časové parametry nebyly pravděpodobně splněny díky charakteru samotného povlaku a jeho specifickým vlastnostem.

Porovnáním vybraných hodnot průměrných koeficientů tření z tabulky 17 a dle grafu 10 lze říci, že nejnižší hodnoty průměrného koeficientu tření z vybraných měření vykazuje vzorek číslo 13 s naneseným povlakem RMA aktivovaným tlakem. Při porovnání se stejným povlakem naneseným na vzorku 9, který nebyl aktivován tlakem lze vyvodit závěr, že povlak aktivovaný tlakem vykazuje nižší průměrný koeficient tření oproti neaktivovanému.

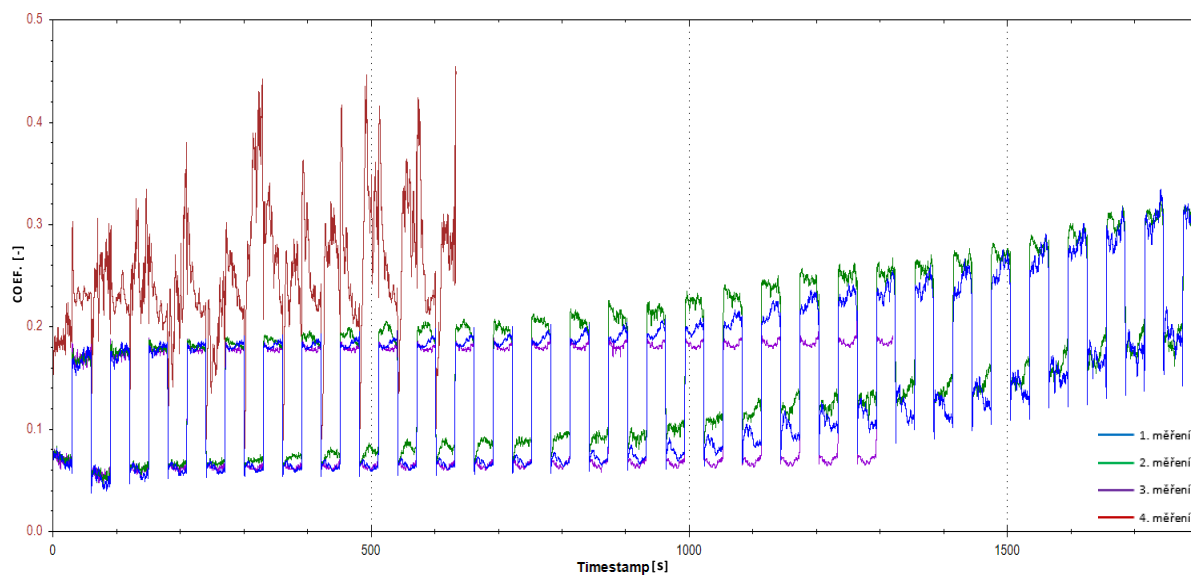
Vzorky 7 a 8, které již byly testovány na tribometru TOP3, byly z důvodu kontroly získaných výsledků a z důvodu ucelení a možného porovnání všech měřených vzorků též testovány na univerzálním tribometru MFT-5000.



Graf 11 – Závislost koeficientu tření na čase, vzorek č. 7 [autor práce]

Tab. 18 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, vzorek č. 7 [autor práce]

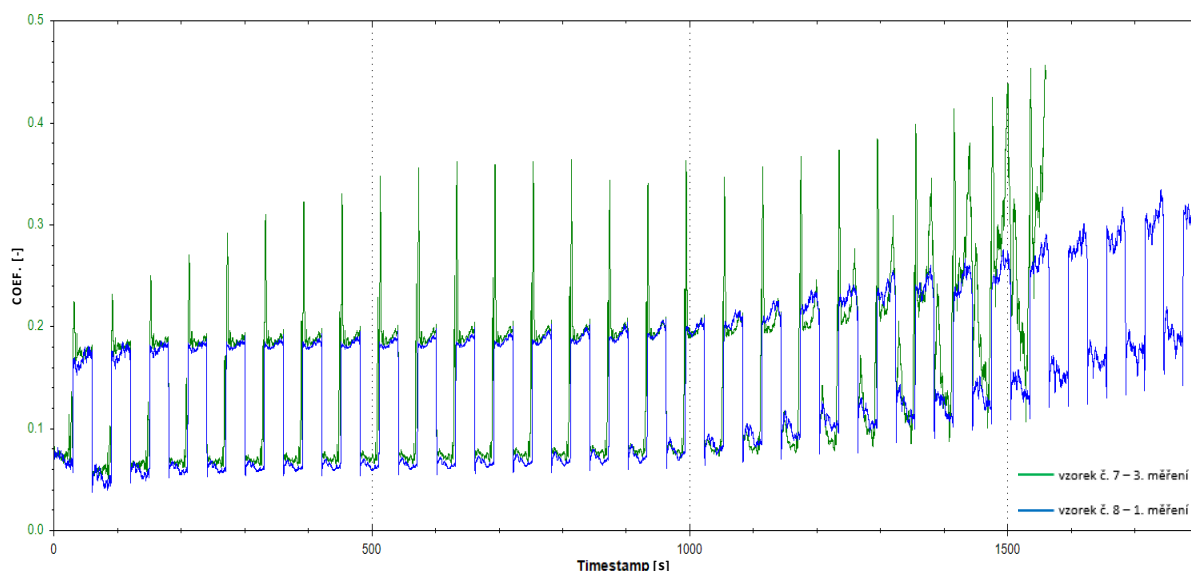
Vzorek číslo 7 , povlak NFM				
Číslo měření	Průměrný koeficient tření [-]	Čas [min]	Zatěžující síla [N]	Směrodatná odchylka [-]
1.	0,1573	23	120	0,0759
2.	0,1408	2	120	0,0876
3.	0,1574	26	120	0,0778
4.	0,1864	13	120	0,1061



Graf 12 – Závislost koeficientu tření na čase, vzorek č. 8 [autor práce]

Tab. 19 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, vzorek č. 8 [autor práce]

Vzorek číslo 8 , povlak N03				
Číslo měření	Průměrný koeficient tření [-]	Čas [min]	Zatěžující síla [N]	Směrodatná odchylka [-]
1.	0,1527	30	120	0,0725
2.	0,1653	30	120	0,0722
3.	0,1220	22	120	0,0577
4.	0,2494	10	120	0,0595



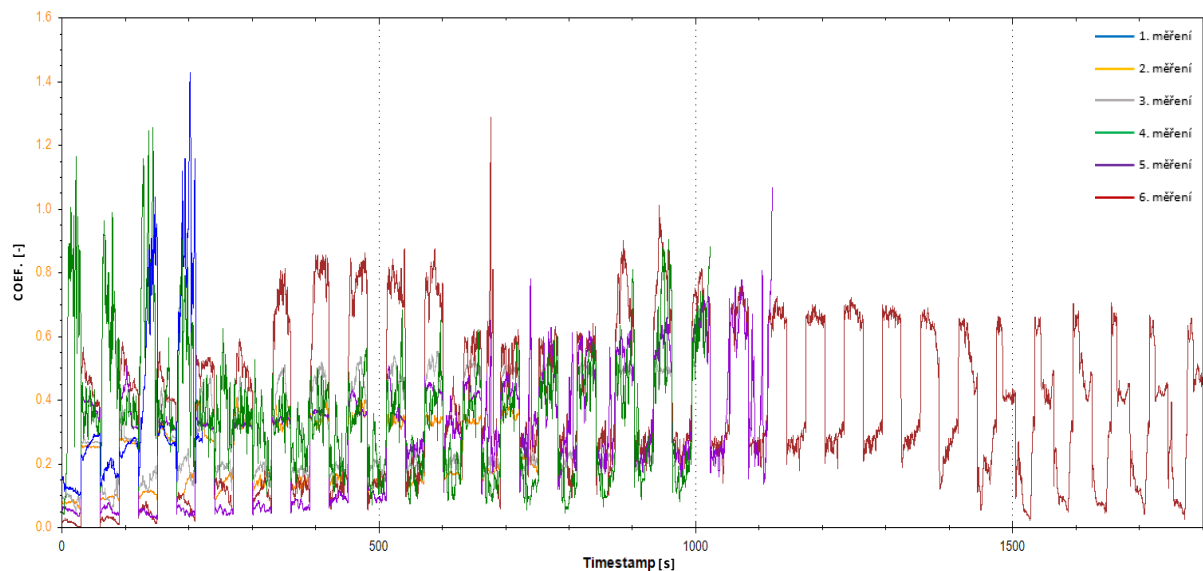
Graf 13 – Závislost koeficientu tření na čase, porovnání vybraných měření (vzorek č. 7, 8) [autor práce]

Tab. 20 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, porovnání vybraných měření (vzorek č. 7, 8) [autor práce]

Porovnání vybraných měření, vzorek č. 7. 8					
Číslo vzorku	Číslo měření	Průměrný koeficient tření [-]	Čas [min]	Zatěžující síla [N]	Směrodatná odchylka [-]
7	3.	0,1574	26	120	0,0778
8	1.	0,1527	30	120	0,0725

Graf 13 zobrazuje porovnání dvou vybraných měření na vzorcích 7 a 8. Daná měření byla i v tomto případě vybraná z důvodu splnění předem nastavených parametrů měření (tab. 13, vzorek č. 8). U vzorku číslo 7 ke splnění předem nastavených parametrů měření nedošlo, tudíž bylo vybráno druhé nejvhodnější měření – měření číslo 3. Měření byla zároveň vybrána (stejně jako u vzorků č. 9, 11 a 13) z důvodu nejnižších hodnot průměrných koeficientů tření.

Dle uvedených průměrných hodnot koeficientu tření uvedených v tabulce 20 a dle přiloženého grafu 13 lze konstatovat, že nejnižších průměrných hodnot koeficientu tření z dané dvojice vzorků dosahuje vzorek číslo 8 s nanoseným povlakem NANOTECH 03 (N03).



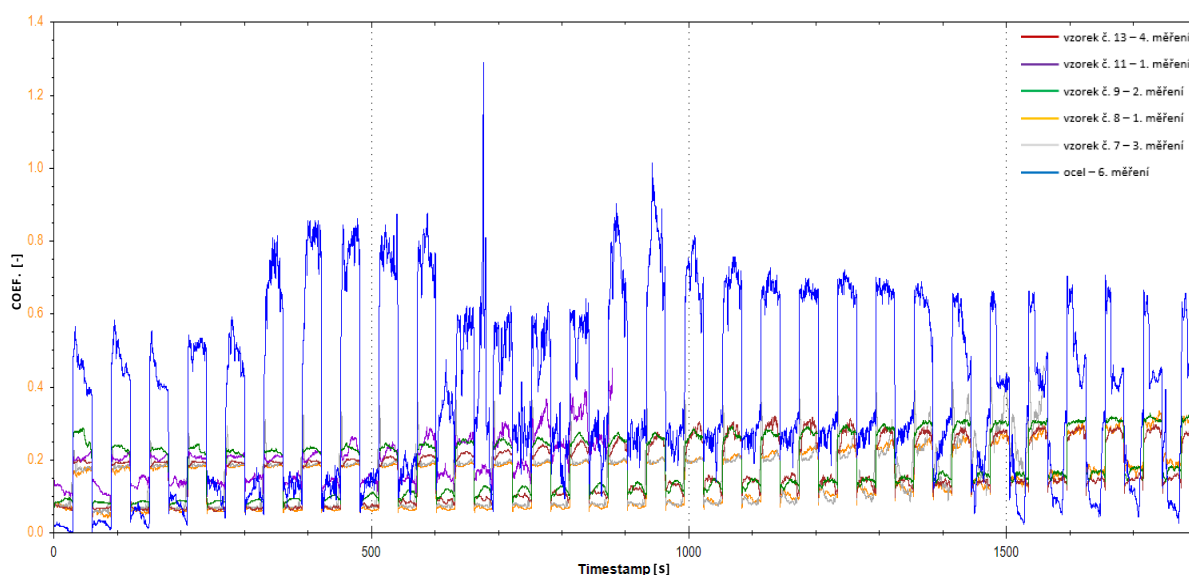
Graf 14 – Závislost koeficientu tření na čase, nenapovlakovaný vzorek, ocel [autor práce]

Tab. 21 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, nenapovlakovaný vzorek, ocel [autor práce]

Nenapovlakovaný vzorek, ocel				
Číslo měření	Průměrný koeficient tření [-]	Čas [min]	Zatěžující síla [N]	Směrodatná odchylka [-]
1.	0,3614	3	120	0,2769
2.	0,2267	12	100	0,1007
3.	0,2992	16	80	0,1422
4.	0,3648	17	60	0,1979
5.	0,3052	18	50	0,1811
6.	0,3918	30	40	0,2392



Obr. 49 – Nenapovlakovaný vzorek po provedeném měření [autor práce]



Graf 15 – Závislost koeficientu tření na čase, porovnání vybraných měření (vzorek č. 7, 8, 9, 11, 13) s nenapovlakovaným vzorkem (ocelí) [autor práce]

Tab. 22 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, porovnání vybraných měření (vzorek č. 7, 8, 9, 11, 13) s nenapovlakovaným vzorkem (ocelí) [autor práce]

Porovnání vybraných měření (vzorek č. 7, 8, 9, 11, 13) s nenapovlakovaným vzorkem (ocelí)					
Číslo vzorku	Číslo měření	Průměrný koeficient tření [-]	Čas [min]	Zatěžující síla [N]	Směrodatná odchylka [-]
13	4.	0,1714	30	120	0,0739
11	1.	0,1941	15	120	0,0597
9	2.	0,1908	30	120	0,0771
8	1.	0,1527	30	120	0,0725
7	3.	0,1574	26	120	0,0778
ocel	6.	0,3918	30	40	0,2392

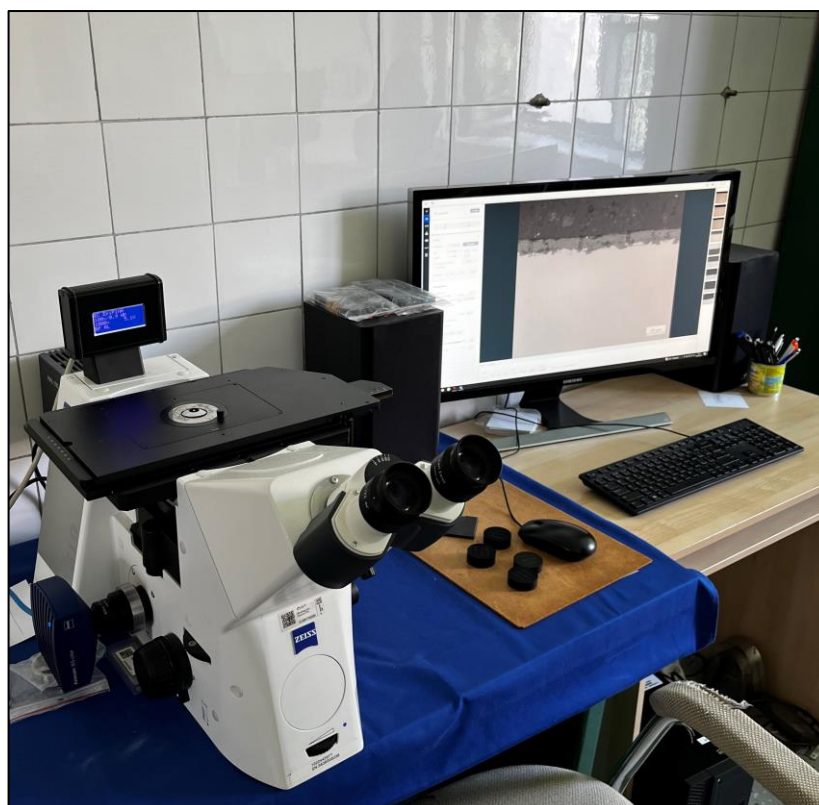
Pro zjištění, jakým způsobem se liší hodnoty průměrných koeficientů tření napovlakovaných vzorků oproti nenapovlakovaným (samotná ocel), byla provedena další série měření. Při tomto měření se zjišťovaly hodnoty průměrných koeficientů tření při různé zatěžující síle do doby, než byl u daného vzorku splněn předem nastavený časový parametr 30 minut. K jeho splnění došlo při nastavení zatěžující síly na 40 N.

Graf 15 porovnává vybraná měření vzorků 7, 8, 9, 11 a 13 vůči vybranému měření nenapovlakovaného vzorku. Porovnáním vybraných hodnot průměrných koeficientů tření z tabulky 22 a dle grafu 15 lze říci, že napovlakované vzorky 7, 8, 9, 11 a 13 vykazují přibližně dvojnásobně nižší průměrné hodnoty koeficientu tření než nenapovlakovaný vzorek. Tento experiment potvrdil teoretický předpoklad.

5.6.3 METALOGRAFIE

Metalografie je nauka zabývající se vnitřní strukturou kovů a slitin. Metalografická, respektive mikrostrukturní analýza nám také poskytuje pohled do vnitřní struktury povlaků na površích kovů. Cílem metalografie je tak zviditelnění struktury příslušného vzorku (materiálu) a její následná studie. Ke zviditelnění a studii těchto struktur se používá světelný, či elektronový mikroskop. Pomocí metalografické analýzy je možné zjišťovat souvislosti mezi strukturou materiálu a jeho vlastnostmi, sledovat a také kontrolovat vlastnosti daného materiálu. Zároveň je možné prostřednictvím této analýzy hledat příčiny vad materiálu. [73]

Cílem metalografické analýzy v experimentální části práce bylo zviditelnění struktury povlaku na vybraných vzorcích. Analýza mikrostruktury byla provedena pomocí světelného mikroskopu Axio Observer od firmy ZEISS (obr. 50) na vzorcích číslo 1, 4, 5, 10, 12 a 14.



Obr. 50 – Mikroskop Axio Observer D1m od firmy ZEISS [autor práce]

Pro vyhodnocení metalografické analýzy bylo nejprve třeba zhotovit metalografické výbrusy dle následujícího postupu.

Postup přípravy metalografického výbrusu

Postup přípravy metalografického výbrusu se skládá z odběru vzorku, preparace, broušení, leštění a leptání vzorku. Odběr vzorku vhodné velikosti byl ve všech případech proveden pomocí ručního řezacího stroje Labotom – 3 (příloha 12) od firmy

Struers. Tímto způsobem odříznutý vzorek byl poté vysušen teplým vzduchem. Následovala preparace připravených vzorků na automatickém elektrohydraulickém montážním lisu CitoPress-1 (Struers, příloha 14). Vzorky byly vloženy do montážního lisu a zasypány bakelitovou pryskyřicí MultiFast v kombinaci s termoplastickou akrylátovou pryskyřicí ClaroFast. Lisování vzorků probíhalo za teploty 180 °C při tlaku 25 MPa po dobu 4 minut. Po zalisování byly vzorky tři minuty chlazeny.

Preparované vzorky (obr. 51 a 52) byly dále broušeny a leštěny na automatické dvoukotoučové brusce a leštičce SAPHIR 250 A2 – ECO (Struers, příloha 13). Celkem proběhlo pět operací broušení a dvě operace leštění. Před zahájením dílčí operace byl na příslušné místo na zařízení umístěn brusný/leštící kotouč (Struers). Vzorky byly poté vloženy do rotační hlavy brousícího/leštícího zařízení a byl spuštěn předem nastavený program pro danou operaci. Po ukončení programu byly vzorky vyjmuty a byl vyměněn brousící/leštící kotouč. Vzorky byly vysušeny a očištěny a posléze opět vloženy do rotační hlavy, aby mohla proběhnout další operace. Tento proces proběhl jak mezi jednotlivými operacemi, tak i po ukončení poslední operace. Parametry provedeného broušení a leštění jsou zobrazeny v tabulce 23.

Tab. 23 – Parametry broušení a leštění [autor práce]

Pořadí operace	Operace	Čas [min]	Přítlaková síla [N]	Otáčky kotouče [ot/min]	Použitý kotouč – velikost zrna [μm]
1.	Broušení	2:00	30	300	P180 – 82
2.	Broušení	2:00	30	300	P180 – 82
3.	Broušení	2:00	30	300	P1200 – 15
4.	Broušení	3:00	30	300	P2000 – 10
5.	Broušení	3:00	30	300	P4000 – 5
6.	Leštění	4:30	30	150	Struers – 1
7.	Leštění	4:30	30	150	Struers – 0,25

Z důvodu chlazení a mazání broušených povrchů, čištění (odvod odbroušeného materiálu), či zvýšení rychlosti opracování byla v případě operací 1 až 5 do procesu přiváděna voda. Při první leštící operaci byl do procesu za účelem vytvoření dokonalého leštěného povrchu přidán monokrystal diamantu spolu se smáčedlem (příloha 17 a 18). V průběhu poslední leštící operace byla do procesu přidávána po malých dávkách leštící suspenze MasterMet (příloha 19).

Metalografický výbrus obsahující zkušební vzorky 1, 4 a 5 byl zhotoven zmíněným postupem a jeho finální podoba před pozorováním na světelném mikroskopu je zobrazena na obr. 51.



Obr. 51 – Metalografický výbrus obsahující vzorky číslo 1, 4 a 5 [autor práce]

Postup přípravy metalografických výbrusů byl v případě vzorků 10, 12 a 14 mírně odlišný. V průběhu přípravy metalografických výbrusů došlo vlivem chladicí emulze u ručního řezacího stroje (příloha 12) k odtrhnutí a "smytí" povlaku z povrchů zkušebních vzorků. K odtrhnutí došlo pravděpodobně z důvodu příliš velké tloušťky naneseného povlaku a nedokonalého přilnutí k základnímu materiálu. Z těchto důvodů byla napovlakována nová sada vzorků 10, 12 a 14 stejnými povlaky jako v prvním případě. Vzorky byly před samotným napovlakováním nejprve odříznuty na požadovaný rozměr na ručním řezacím stroji, aby se eliminoval vliv chladicí emulze.

Připravené vzorky byly poté vloženy do speciálních formiček ve formě válečků a následně zality směsí skládající se z produktů EpoFix Resin (směs epoxidové pryskyřice a alkyly glycidyletheru) a EpoFix Hardener (tvrdidlo). Tato směs byla zvolena pro svou nízkou roztažnost a pro možnost vytvrzení směsi na vzduchu, čímž se předešlo možnému ovlivnění vzorků zvýšenou teplotou, které by byly vzorky vystaveny při využití lisovacího zařízení CitoPress-1.

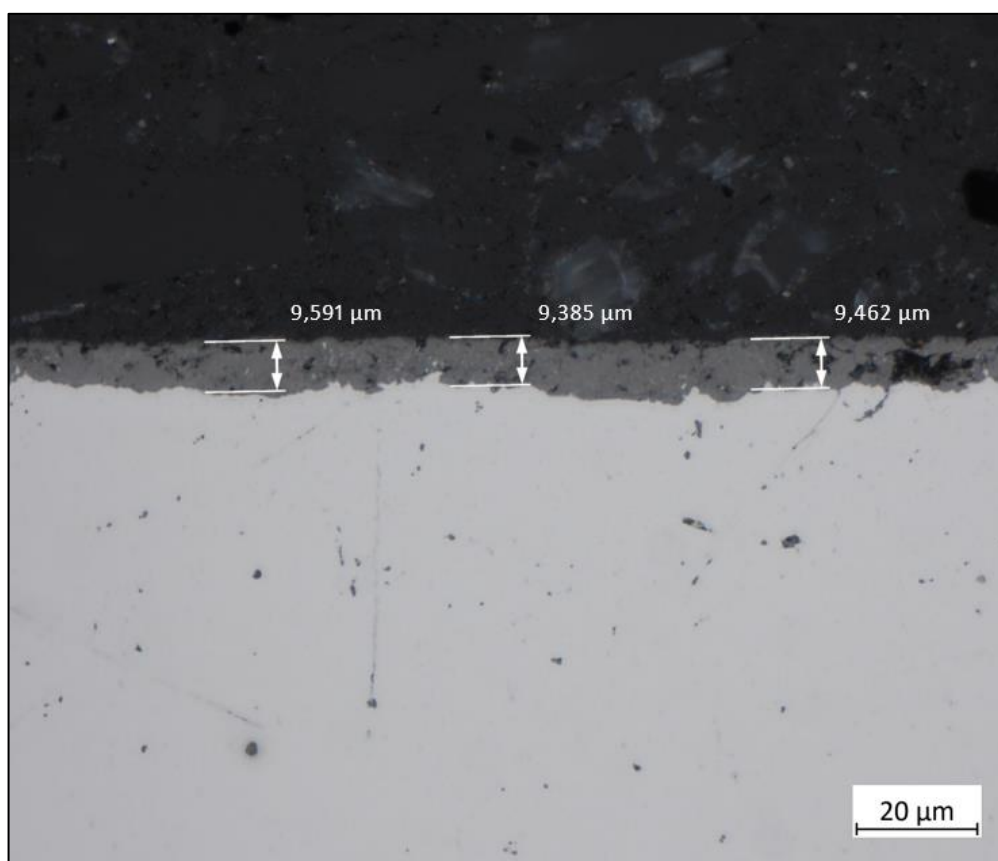


Obr. 52 – Metalografický výbrus obsahující vzorek číslo 10 [autor práce]

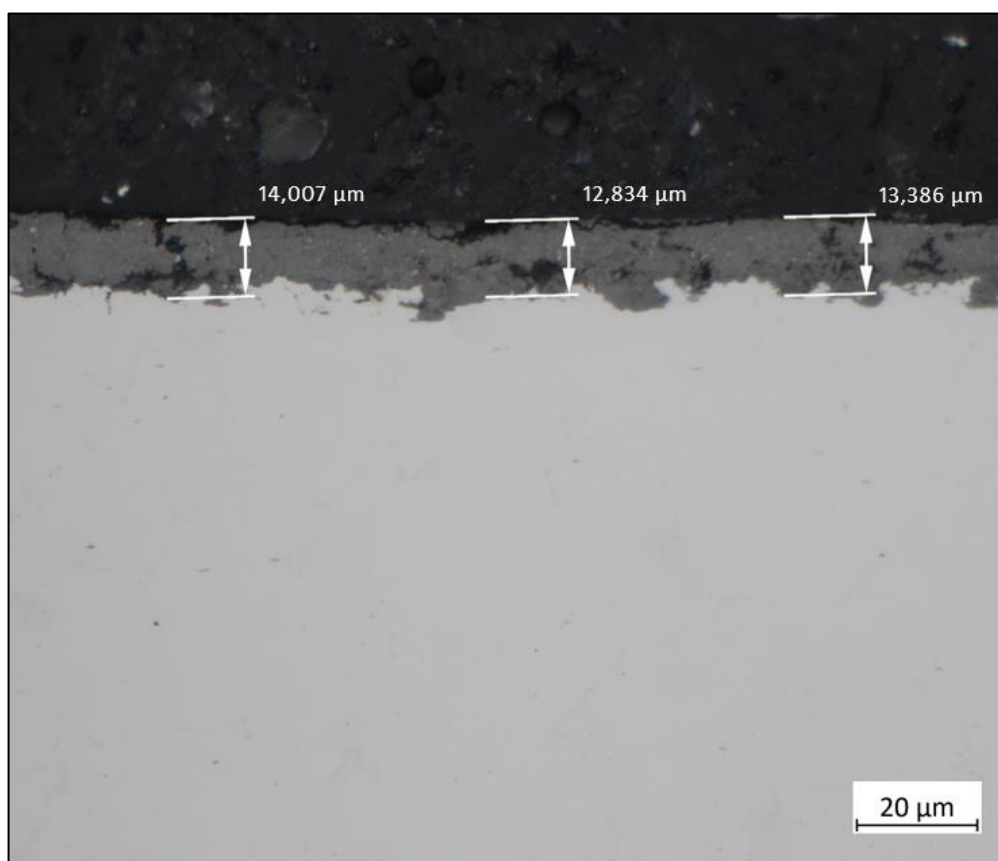
Vytvrzení metalografických výbrusů probíhalo na vzduchu při teplotě přibližně 20 °C po dobu 24 hodin. Po vyjmutí metalografických výbrusů z válečků následovalo jejich broušení a leštění dle stejného postupu a parametrů jako v případě prvního metalografického výbrusu. Jediným rozdílem byl z důvodu rozdílného průměru vzorků použitý typ zařízení, na kterém byly metalografické výbrusy broušeny a leštěny. V daném případě to byla automatická jednokotoučová bruska a leštička od firmy Buehler (příloha 20). Tímto způsobem byla zhotovena trojice metalografických výbrusů obsahující vzorky 10, 12 a 14. Obrázek 52 na straně 86 zobrazuje jeden z trojice stejně vypadajících metalografických výbrusů.

Vyhodnocení metalografických výbrusů

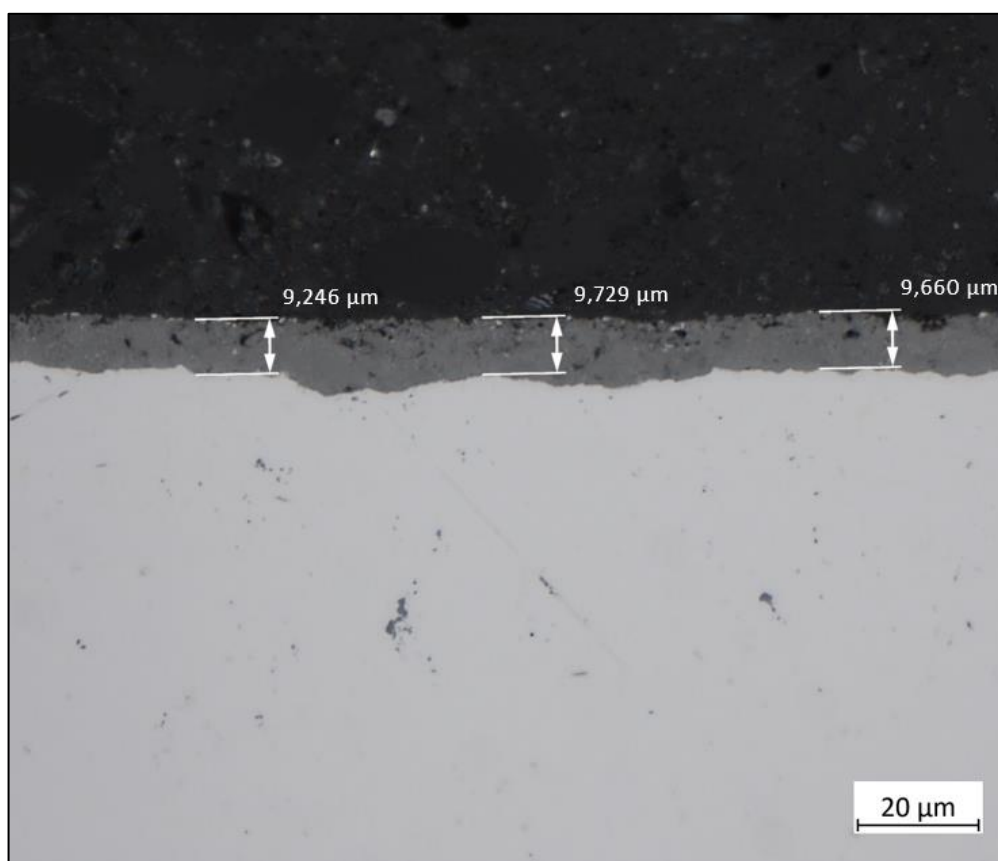
Připravené metalografické výbrusy byly analyzovány pomocí světelného mikroskopu Axio Observer umístěného v metalografické laboratoři na Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT v Praze. Pomocí světelného mikroskopu Axio Observer (ZEISS) a softwaru ZEN-Core (ZEISS) byla nejprve provedena analýza metalografického výbrusu obsahujícího vzorky číslo 1, 4 a 5 s nanesenými povlaky NEX, NO3 a NFM – viz. obr. 53 až 55.



Obr. 53 – Metalografický snímek vzorku číslo 1, povlak NEX [autor práce]



Obr. 54 – Metalografický snímek vzorku číslo 4, povlak N03 [autor práce]



Obr. 55 – Metalografický snímek vzorku číslo 5, povlak NFM [autor práce]

Jednotlivé metalografické snímky byly vyfoceny prostřednictvím speciální kamery a softwaru ZEN-Core (ZEISS). Pomocí nástroje v daném softwaru byla na dílčích metalografických snímcích zakótována tloušťka povlaků. Získané hodnoty byly zpracovány do tabulky 24.

Tab. 24 – Tloušťka povlaků, deska A [autor práce]

Deska A			
Číslo měření	Tloušťka povlaku – vzorek č. 1, povlak NEX [μm]	Tloušťka povlaku – vzorek č. 4, povlak N03 [μm]	Tloušťka povlaku – vzorek č. 5, povlak NFM [μm]
1.	9,591	14,007	9,246
2.	9,385	12,834	9,729
3.	9,462	13,386	9,660

Jak je patrné z obrázků 53 až 55 a z tabulky 24 nejvyšší hodnoty tlouštěk povlaků byly naměřeny na vzorku číslo 4, na kterém byl nanesen povlak NANOTECH 03.

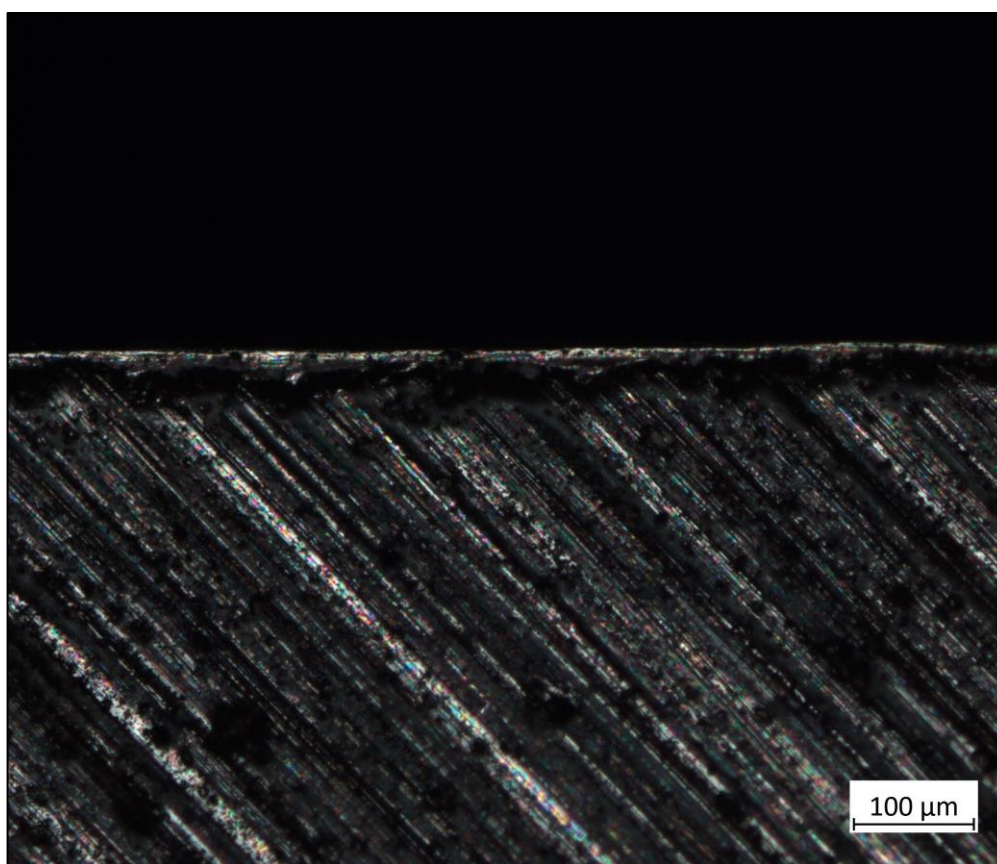
Povlaky se nanášejí na povrch základních materiálů v několika vrstvách v závislosti na požadavcích na jejich funkčnost. Tloušťka jedné vrstvy se pohybuje v rozmezí od několika jednotek po několik desítek mikrometrů [78]. Výsledná tloušťka jednotlivých vrstev bývá ovlivněna zvolenou technologií nanášení a subjektivním dojmem (zejména při aplikaci povlaku štětcem).

Na zkušební vzorky 1, 4 a 5 byly v celkem pěti vrstvách nanесeny povlaky NEX, N03 a NFM. Dle naměřených hodnot tlouštěk jednotlivých povlaků lze vyvodit následující závěr. Dílčí povlaky s rezervou splňují zmíněné kritérium týkající se tloušťky dílčích vrstev. Nejvyšší hodnoty tlouštěk povlaků byly naměřeny na vzorku číslo 4 s naneseným povlakem NANOTECH 03.

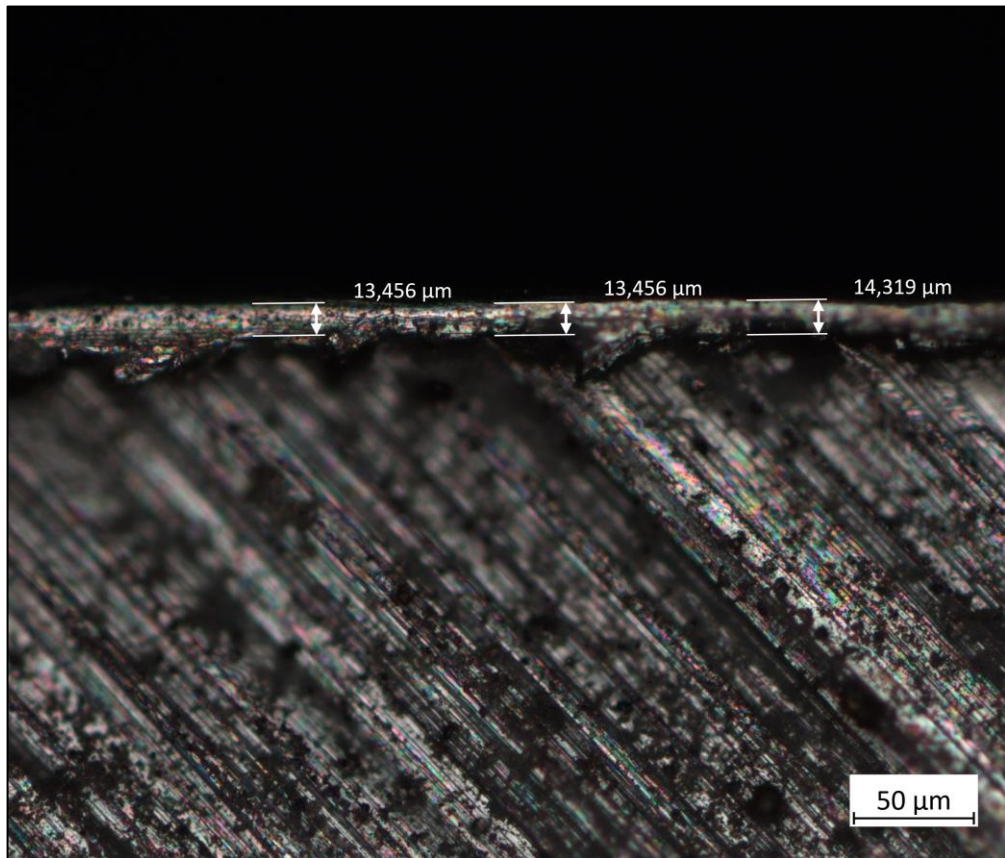
Získané výsledky mohly být vzhledem k charakteru povlaků ovlivněny například nevhodnou manipulací se vzorky s nanesenými povlaky, či hned několika různými faktory v průběhu přípravy metalografických výbrusů. Těmito faktory mohla být například nastavená teplota při lisování (vytváření metalografických výbrusů), či chemická reakce mezi použitou bakelitovou pryskyřicí MultiFast spolu s termoplastickou akrylátovou pryskyřicí ClaroFast a použitým povlakem. Zmíněné faktory mohly mít vliv na místy trhanou strukturu daných povlaků.

Pomocí světelného mikroskopu Axio Observer (ZEISS) a softwaru ZEN-Core (ZEISS) byla dále provedena analýza metalografického výbrusu obsahujícího vzorky číslo 10, 12 a 14 s nanesenými povlaky RMA, MA a RMA aktivovaný tlakem – viz. obrázky 58, 61 a 64.

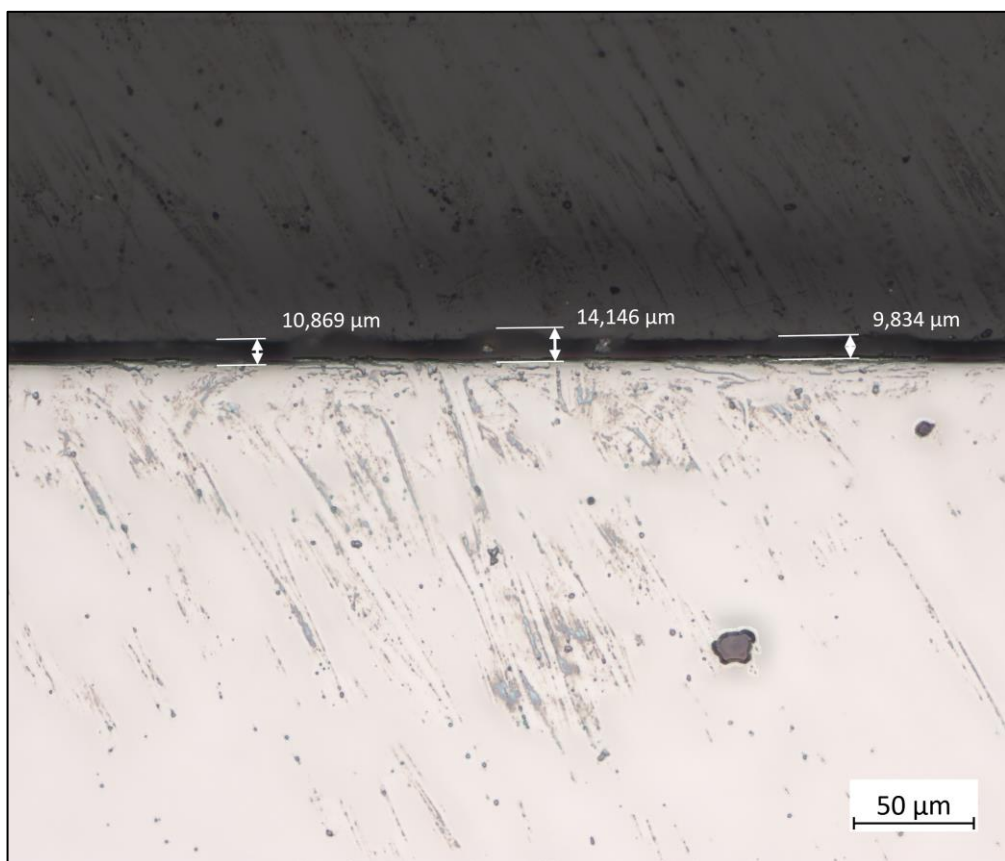
Před zalitím jednotlivých vzorků směsí produktů EpoFix Resin a EpoFix Hardener byly vzorky pozorovány pod okem mikroskopu v surovém stavu – viz. obr. 56, 57, 59, 60, 62 a 63. Vzorek v surovém stavu je v daném experimentu chápán jako vzorek, na kterém je nanesen povlak, ale prozatím nebyl vytvořen metalografický výbrus, který by daný vzorek obsahoval. K tomuto kroku se přistoupilo vzhledem k převažujícím obavám z možné ztráty povlaků vlivem zalití vzorků směsí produktů EpoFix Resin a EpoFix Hardener nebo vlivem brousících a leštících operací prováděných na již zhotoveném metalografickém výbrusu.



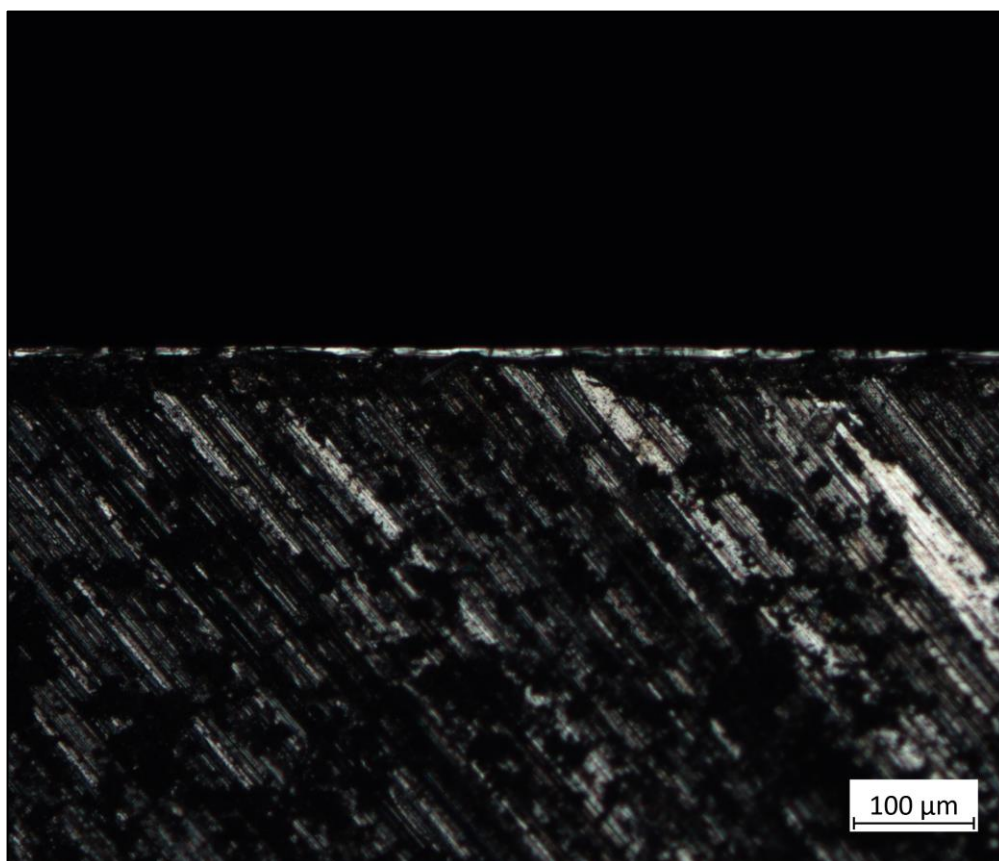
Obr. 56 – Snímek vzorku číslo 10 v surovém stavu, povlak RMA [autor práce]



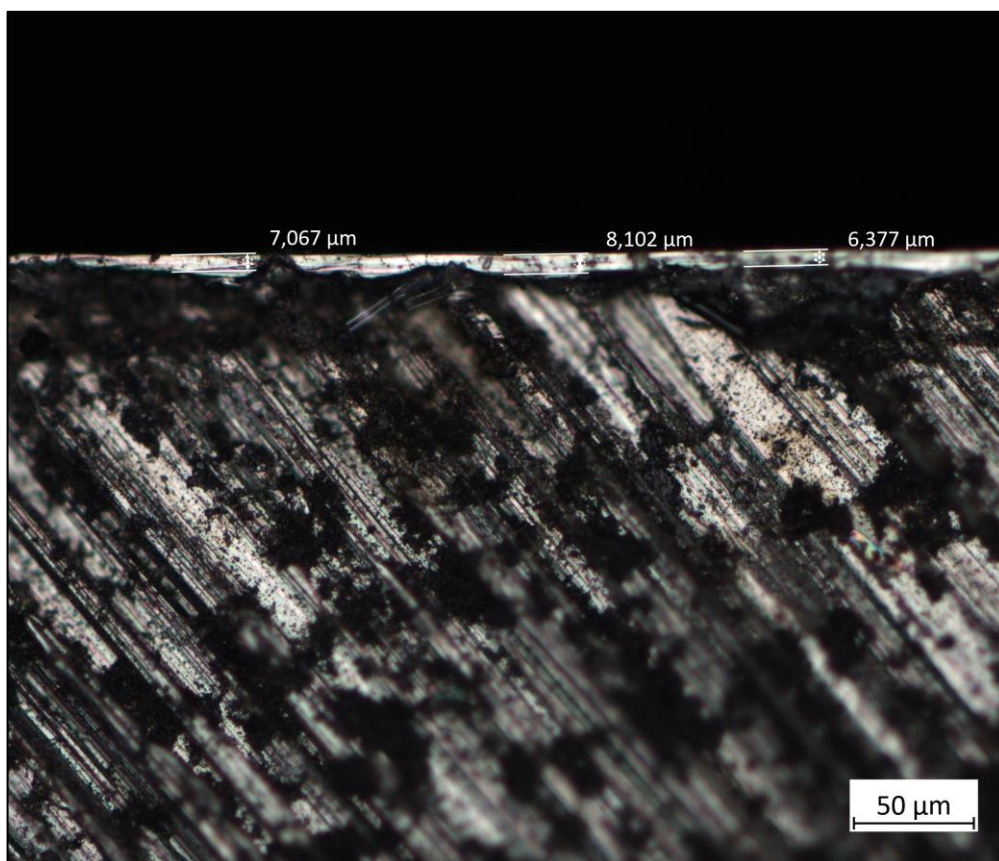
Obr. 57 – Zakótný snímek vzorku číslo 10 v surovém stavu, povlak RMA [autor práce]



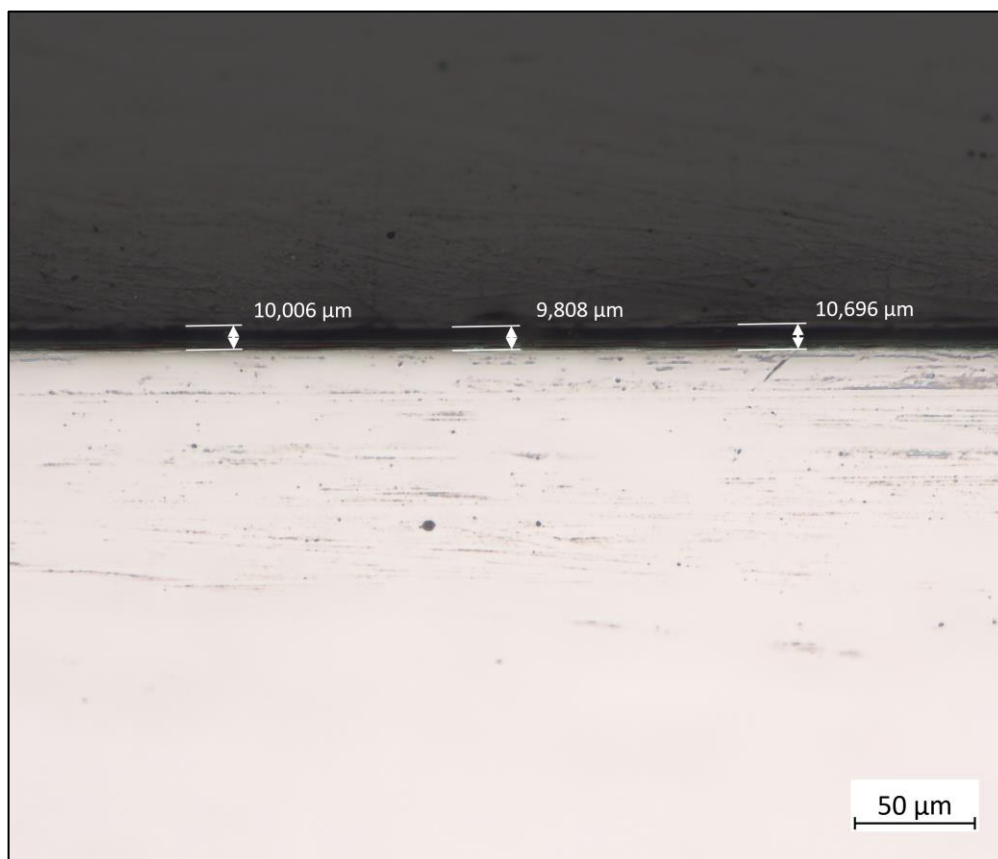
Obr. 58 – Metalografický snímek vzorku číslo 10, povlak RMA [autor práce]



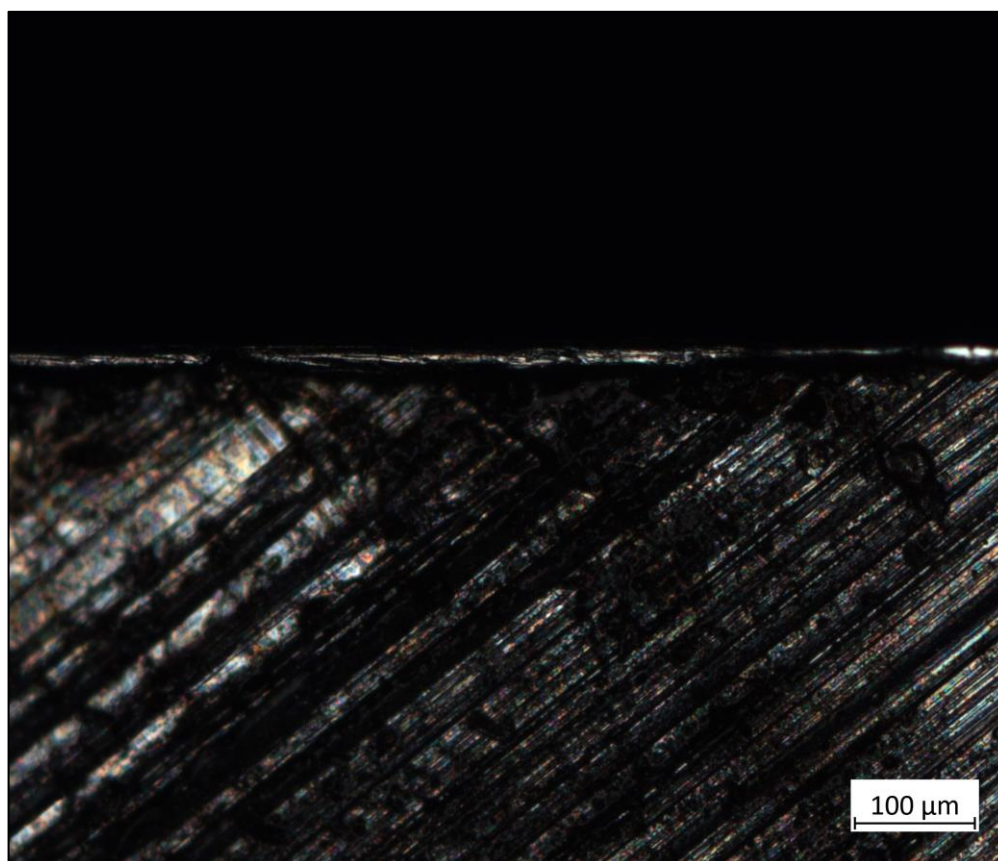
Obr. 59 – Snímek vzorku číslo 12 v surovém stavu, povlak MA [autor práce]



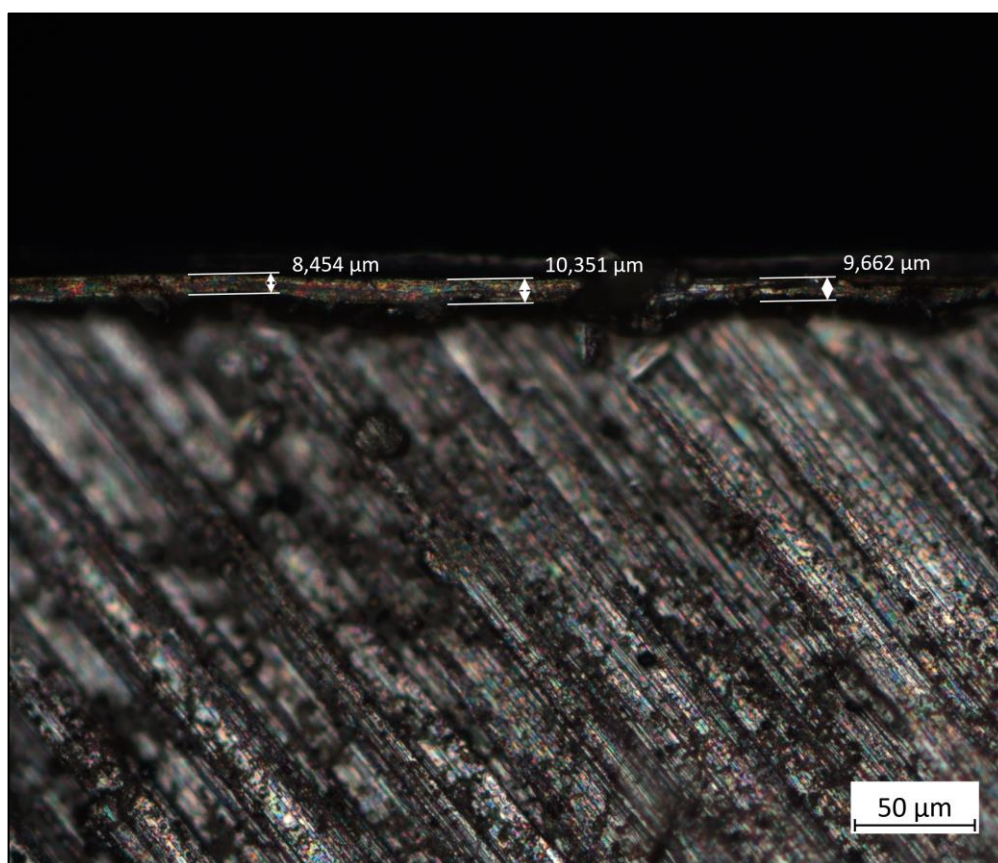
Obr. 60 – Zakótovaný snímek vzorku číslo 12 v surovém stavu, povlak MA [autor práce]



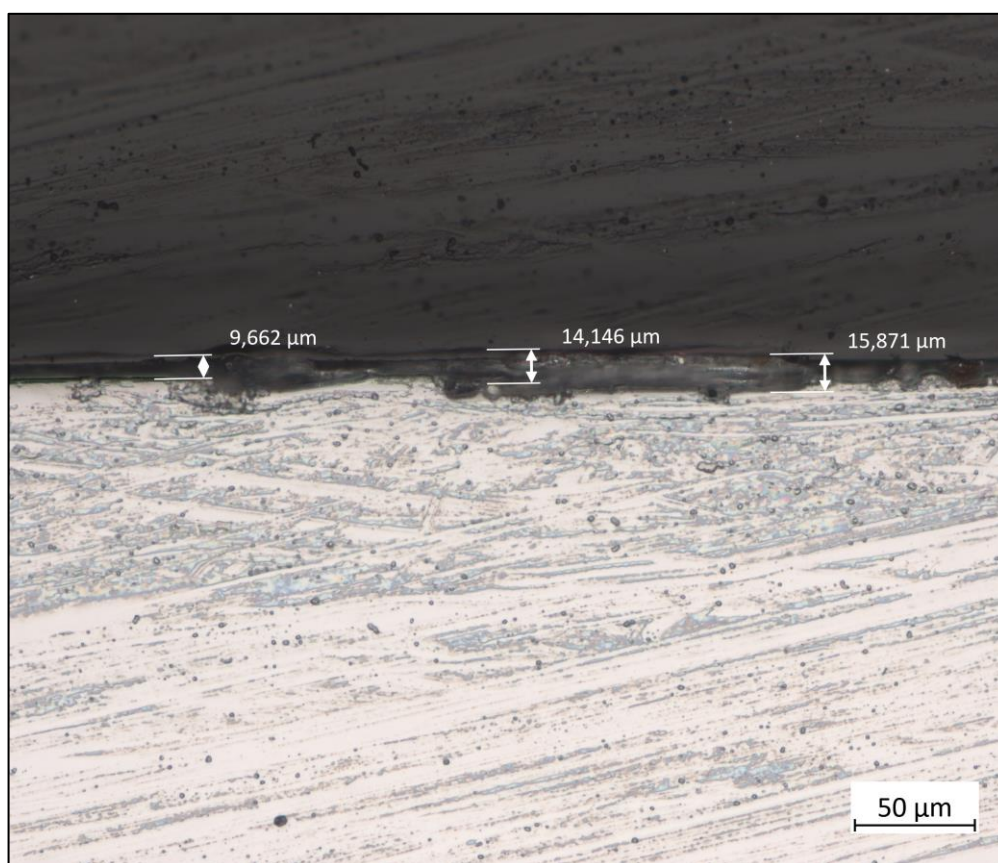
Obr. 61 – Metalografický snímek vzorku číslo 12, povlak MA [autor práce]



Obr. 62 – Snímek vzorku číslo 14 v surovém stavu, povlak RMA aktiv. [autor práce]



Obr. 63 – Zakótný snímek vzorku číslo 14 v surovém stavu, povlak RMA aktiv. [autor práce]



Obr. 64 – Metalografický snímek vzorku číslo 14, povlak RMA aktiv. [autor práce]

Nejprve byly změřeny tloušťky povlaků u vzorků v surovém stavu (tab. 25) a následně u vzorků v již zalitém stavu (metalografický výbrus, tab. 26).

Tab. 25 – Tloušťka povlaků, deska C – surový stav [autor práce]

Deska C – surový stav			
Číslo měření	Tloušťka povlaku – vzorek č. 10, povlak RMA [μm]	Tloušťka povlaku – vzorek č. 12, povlak MA [μm]	Tloušťka povlaku – vzorek č. 14, povlak RMA aktiv. [μm]
1.	13,456	7,067	8,454
2.	13,456	8,102	10,351
3.	14,319	6,377	9,662

Tab. 26 – Tloušťka povlaků, deska C – metalografický výbrus [autor práce]

Deska C – metalografický výbrus			
Číslo měření	Tloušťka povlaku – vzorek č. 10, povlak RMA [μm]	Tloušťka povlaku – vzorek č. 12, povlak MA [μm]	Tloušťka povlaku – vzorek č. 14, povlak RMA aktiv. [μm]
1.	10,869	10,006	9,662
2.	14,146	9,808	14,146
3.	9,834	10,696	15,871

Porovnáním zakótovaných metalografických snímků vzorků 10, 12 a 14 (obr. 58, 61 a 64) spolu se zakótovanými snímky vzorků 10, 12 a 14 v surovém stavu (obr. 57, 60 a 63) lze dojít k závěru, že byl povlak pravděpodobně vlivem zalití vzorků směsí EpoFix Resin a EpoFix Hardener či vlivem chemické reakce mezi směsí a použitým povlakem částečně (obr. 64) nebo zcela ztracen (obr. 61).

Povlaky RMA a MA byly na zkušební vzorky 10, 12 a 14 nanášeny ve třech vrstvách. Dle naměřených hodnot lze říci, že jednotlivé povlaky splňují zmíněné kritérium týkající se tloušťky dílčích vrstev. Vyšší naměřené hodnoty tlouštěk povlaků vypovídají o rozdílné tloušťce jedné vrstvy. Tento rozdíl byl zcela jistě způsobem nekonzistencí jednotlivých vrstev při nanášení povlaků štětcem.

Naměřené hodnoty tlouštěk povlaků před zalitím a po zalití vzorků směsí zvolených produktů uvedené v tabulkách 25 a 26 si přibližně odpovídají. Tato skutečnost podporuje teorii, že byly povlaky ať už vlivem chemické reakce mezi zvolenou směsí a použitým povlakem, či vlivem brousících a leštících operací prováděných na již zhotoveném metalografickém výbrusu, částečně nebo zcela ztraceny. Nejvyšších naměřených hodnot tlouštěk povlaků v surovém stavu dosahoval vzorek číslo 10 s nanášeným povlakem RMA.

6 ZÁVĚR

V diplomové práci je shrnuta problematika týkající se nanotechnologie a nanočástic v povrchových úpravách, a to zejména v nátěrových hmotách a galvanickém pokovování. Jsou uvedeny metody přípravy nanostruktur a vlastnosti nanočástic spolu s jejich hlavními aplikačními oblastmi. Cílem diplomové práce bylo podrobit zkušební vzorky s nanosenými povlaky s obsahem nanočástic disulfidu wolframu (IF-WS₂) poskytnuté firmou Nanotech Europe s.r.o. vybraným zkouškám přilnavosti, otěruvzdornosti a na vybraných vzorcích zároveň provést mikrostrukturní analýzu.

Pro měření přilnavosti povlaků k základnímu materiálu byla zvolena zkouška odtrhem, která byla provedena dle normy ČSN EN ISO 4624. Z trojice testovaných vzorků (č. 2, 3 a 6) dosáhl nejvyšších hodnot odtrhových napětí vzorek číslo 3 s nanoseným povlakem NANOTECH 03 (N03). Rozhodujícím faktorem v případě rozdílných hodnot odtrhových napětí mohl být odlišný procentuální podíl dílčích složek (nanočástic IF-WS₂, grafitu a nitridu bóru) obsažených v příslušném povlaku.

Tribologické vlastnosti byly testovány tribologickým testem na tribometru TOP 3 a tribometru MFT-5000. Na tribometru TOP 3 byly testovány vzorky číslo 7 a 8. Z naměřených hodnot vyplývá, že vzorek číslo 7 s nanoseným povlakem NANOTECH FM dosahuje zhruba o 50 % nižších hodnot statického i dynamického koeficientu tření než vzorek číslo 8 s nanoseným povlakem NANOTECH 03.

Na tribometru MFT-5000 byly testovány vzorky číslo 7, 8, 9, 11 a 13. V případě zkušebních vzorků číslo 9, 11 a 13, na kterých byly napovlakovány servisní povlaky RMA (rychleschnoucí mazací aerosol) a MA (mazací aerosol) dosáhl nejnižších průměrných hodnot koeficientu tření vzorek číslo 13. Vzorek číslo 13 s nanoseným povlakem RMA aktivovaný tlakem vykazuje v porovnání s jinými vzorky servisních povlaků nižších průměrných hodnot koeficientu tření vlivem aktivace povlaku tlakem.

Z provedené mikrostrukturní analýzy vyplývá, že nejvyšších naměřených hodnot tloušťek povlaků v surovém stavu dosahoval vzorek číslo 10 s nanoseným povlakem RMA (rychleschnoucí mazací aerosol). Provedením mikrostrukturní analýzy metalografických snímků bylo zároveň zjištěno, že byl povlak pravděpodobně vlivem zalití vzorků směsí EpoFix Resin a EpoFix Hardener či vlivem chemické reakce mezi směsí a použitým povlakem částečně nebo zcela ztracen z povrchu vzorku. Mikrostrukturní analýzou byl splněn i poslední vytyčený cíl z úvodní části práce.

Povlaky s obsahem nanočástic představují perspektivní oblast povrchových úprav materiálů, které je třeba se intenzivně věnovat. Diplomová práce představuje konkrétní poznatky z oblasti suchých a servisních povlaků, na které je možno plynule navázat tvorbou dalších akademických prací či vědeckých článků.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HOŠEK, Jan. Úvod do nanotechnologie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 170 s. ISBN 978-80-01-04555-8.
- [2] BINNS, Chris. Introduction to Nanoscience and Nanotechnology. Second edition. Hoboken (United States of America): Wiley, 2022, 406 s. ISBN 9781119172246.
- [3] BHUSHAN, Bharat. Springer Handbook of Nanotechnology [online]. Fourth edition. Berlin: Springer Nature, 2017, 1500 s. [cit. 2023-04-21]. ISBN 9783662543559. Dostupné z: <https://books.google.cz/>
- [4] FILIPPONI, Luisa a Duncan SUTHERLAND. Nanotechnologies: Principles, applications, implications and hands-on activities [online]. Luxembourg: Publication Office of the European Union, 2013, 416 s. [cit. 2023-04-21]. ISBN 978-92-79-21437-0. Dostupné z: <https://op.europa.eu/en/home>
- [5] KUBÍNEK, Roman. Vzdělávání v nanotechnologiích. In: Internet archive: Wayback Machine [online]. Univerzita Palackého v Olomouci, Březen 2011 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://web.archive.org/>
- [6] FOJTÍK, Antonín. NANO fascinující fenomén současnosti. Dobřany: COMTES FHT, 2014, 288 s. ISBN 978-80-260-7135-8.
- [7] The appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies. In: European Commission [online]. Brussels: The Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks, 10 March 2006 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: https://commission.europa.eu/index_cs
- [8] About Nanotechnology. Foresight Institute [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://legacy.foresight.org/nano/>
- [9] KOLÁŘOVÁ, Lucie. Úvod do nanovědy a nanotechnologií [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014, 46 s. [cit. 2023-04-21]. ISBN 978-80-244-4179-5. Dostupné z: <http://mofychem.upol.cz/>
- [10] KVÍTEK, Ondřej, Petr SLEPIČKA, Oleksiy LYUTAKOV a Václav ŠVORČÍK. Nanostruktury zlata: příprava, vlastnosti a vybrané aplikace. Chemické listy [online]. Ústav inženýrství pevných látek, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 10. října 2016, 110(12), 922-930 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy>

- [11] BHATTACHARYYA, Koyel. The Functionalization of White Phosphorus towards Metal Phosphide Nanoparticles and Organophosphines [online]. Toulouse, 2017 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://theses.hal.science/>. Disertační práce. University of Toulouse. Vedoucí práce Dr. Nicolas Mézailles.
- [12] AMENDOLA, Vincenzo, Roberto PILOT, Marco FRASCONI, Onorfio M MARAGÒ a Maria ANTONIA. Surface plasmon resonance in gold nanoparticles: a review. *Journal of Physics: Condensed Matter* [online]. IOP Publishing, 20 April 2017, 29(20), 1-49 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-648X/aa60f3>
- [13] SOORAJ, Bhuvanachandran Nai Sreekala a Thalappil PRADEEP. Optical properties of metal clusters. In: PRADEEP, Thalappil. *Atomically Precise Metal Nanoclusters* [online]. Elsevier, 2023, s. 83-101 [cit. 2023-04-24]. ISBN 978-0-323-90879-5. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978032390879500010X>
- [14] AIRI/NANOTEC IT. Roadmaps at 2015 on nanotechnology application in the sectors of: materials, health & medical systems, energy, Synthesis report. In: *Nanowerk Nanotechnology* [online]. January 2006 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.nanowerk.com/>
- [15] IJAZ, Irfan, Ezaz GILAN, Ammara NAZIR a Aysha BUKHARI. Detail review on chemical, physical and green synthesis, classification, characterizations and applications of nanoparticles. *Green Chemistry Letters and Reviews* [online]. 17 August 2020, 13(3), 223-245 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17518253.2020.1802517>
- [16] KRISHNAN, Nishta, Fei-Xing PENG, Animesh MOHAPATRA, Ronnie H. FANG a Liangfang ZHANG. Genetically engineered cellular nanoparticles for biomedical applications. *Biomaterials* [online]. Elsevier, 18 February 2023, 296, 1-15 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014296122300073X>
- [17] ZAMAN, Masihuz, Ejaz AHMAD, Atiyatul QADEER, Gulam RABBANI a Rizwan Hasan KHAN. Nanoparticles in relation to peptide and protein aggregation. *International Journal of Nanomedicine* [online]. Dovepress, 12 February 2014, 9, 899-912 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3928455/>
- [18] Odhalit i likvidovat těžké kovy ve vodě pomůže recyklovatelný nanomateriál z Olomouce. In: *Univerzita Palackého v Olomouci* [online]. Olomouc, 16. září 2022 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.upol.cz/>

- [19] PANÁČEK, David, Lukáš ZDRAŽIL, Michal LANGER, et al. Graphene Nanobeacons with High-Affinity Pockets for Combined, Selective, and Effective Decontamination and Reagentless Detection of Heavy Metals. *Small* [online]. Wiley, 1 July 2022, 18(33), 1-13 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sml.202201003>
- [20] MIRDERIKVAND, Fatemeh a Hamid Reza SHAMLOUEI. Novel nanobuds from C20 with C30, C40, C50, C60 and C70 fullerene: Structural, electrical and optical properties and solvent effect. *Journal of Molecular Liquids* [online]. Elsevier, 1 May 2023, 377, 1-9 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732223003537>
- [21] KREIBICH, Viktor a Karel HOCH. *Koroze a technologie povrchových úprav*. Druhé vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1991, 270 s. ISBN 80-01-00476-7.
- [22] KREIBICH, Viktor. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha: České vysoké učení technické, 1996, 89 s. ISBN 80-010-1472-X.
- [23] GEIM, A. K. a K. S. NOVOSELOV. The rise of graphene. *Nature Materials* [online]. March 2007, 6, 183-191 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/nmat1849>
- [24] RAZA, Hassan. *Graphene nanoelectronics: metrology, synthesis, properties and applications* [online]. Berlin: Springer, c2012 [cit. 2023-04-24]. Nanoscience and Technology. ISBN 978-3-642-20467-8. Dostupné z: <https://link.springer.com/>
- [25] SOKOLNIKOV, Andre U. *Graphene for Defense and Security* [online]. CRC Press, July 2017, 282 s. [cit. 2023-04-24]. ISBN 9781315120379. Dostupné z: <https://www.routledgehandbooks.com/home>
- [26] MÁRA, Vladimír. *Uhlík a jeho alotropické modifikace: Nano a biomateriály*. In: Moodle [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2023 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://moodle-vyuka.cvut.cz/>
- [27] JOUDEH, Nadeem a Dirk LINKE. Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. *Journal of Nanobiotechnology* [online]. Springer, June 2022, 20(262), 1-29 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://jnanobiotechnology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12951-022-01477-8>

- [28] MITRAGOTRI, Samir a Stayton PATRICK. Organic nanoparticles for drug delivery and imaging. MRS Bulletin [online]. Springer, 13 March 2014, 39, 219-223 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1557/mrs.2014.11#citeas>
- [29] AMIJI, Mansoor a Rajagopal RAMESH. Diagnostic and Therapeutic Applications of Exosomes in Cancer [online]. Elsevier, 2018 [cit. 2023-04-24]. ISBN 978-0-12-812774-2. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/>
- [30] Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů. MM Průmyslové spektrum [online]. 16. února 2002, (5) [cit. 2023-04-24]. 20535. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/>
- [31] Blasting. In: Corrosionpedia [online]. Edmonton, 11 January 2019 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.corrosionpedia.com/>
- [32] BORNMYR, Anders a Björn HOLMBERG. Handbook for the pickling and cleaning of stainless steel. In: Derek Shuman: Xenon TPC [online]. Avesta Polarit Welding, 1995 [cit. 2023-06-14]. Dostupné z: <https://www-eng.lbl.gov/~shuman/>
- [33] AZARHOUSHANG, Bahman a Heike KITZIG-FRANK. Principles of grinding processes. In: AZARHOUSHANG, Bahman, Ioan D. MARINESCU, W. Brian ROWE, Boris DIMITROV a Hitoshi OHMORI. Tribology and Fundamentals of Abrasive Machining Processes [online]. Third edition. Elsevier, 2022, s. 351-468 [cit. 2023-04-24]. ISBN 978-0-12-823777-9. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/>
- [34] MARINESCU, Ioan D., Eckart UHLMANN a Toshiro K. DOI. Handbook of Lapping and Polishing [online]. Boca Raton: CRC Press, 2006, 512 s. [cit. 2023-04-24]. ISBN 9781420017632. Dostupné z: <https://books.google.com/>
- [35] Povrcháři [online]. Listopad–2018, (7. číslo). [cit. 2023-06-14]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: <http://www.povrchari.cz/>
- [36] Predúprava povrchu. In: Univerzita Pardubice: Fakulta chemicko-technologická [online]. [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://fcht.upce.cz/sites/default/files/public/luva3059/mater-vstrojar-vyrobe.pdf>
- [37] KRAUS, Václav. Povrchy a jejich úpravy. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000, 216 s. ISBN 80-7082-668-1.
- [38] CROOKES, Roger. Pickling and Passivating Stainless Steel. Materials and Applications Series [online]. Euro Inox, 2007,4, 1-16 [cit. 2023-07-02]. 978-2-87997-224-4. Dostupné z: https://www.edelstahl-rostoffrei.de/fileadmin/user_upload/ISER/downloads/Passivating_Pickling_EN.pdf

- [39] VÁŇA, Pavel. Moření v kyselině solné. In: EKOMOR: Process Equipment & Engineering [online]. [cit. 2023-07-02]. Dostupné z: <https://www.ekomor.cz/cs/technicka-knihovna/>
- [40] RAY, Paresh Chandra, Hongtao YU a Peter P FU. Toxicity and environmental risks of nanomaterials: challenges and future needs. *Journal of environmental science and health: Environmental carcinogenesis & ecotoxicology reviews* [online]. January 2009, 27(1), 1-35 [cit. 2023-07-02]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2844666/>
- [41] ALIOFKHAZRAEI, Mahmood. *Modern Surface Engineering Treatments* [online]. Rijeka: Intech, 2019 [cit. 2023-07-02]. ISBN 978-953-51-6343-5. Dostupné z: https://mts.intechopen.com/storage/books/3530/authors_book/authors_book.pdf
- [42] DUBBERT, Wolfgang, Kathrin SCHWIRN, Doris VÖLKER a Petra APEL. Use of nanomaterials in coatings. In: Umwelt Bundesamt [online]. Germany, 9 April 2014 [cit. 2023-07-02]. Dostupné z: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/use_of_nanomaterials_in_coatings_0.pdf
- [43] Nanocoatings: Construction & Exterior Protection. In: Ministerstvo zahraničních věcí České republiky [online]. April 2014 [cit. 2023-07-02]. Dostupné z: https://www.mzv.cz/public/8a/2c/ba/3173333_2067163_NanoCoatings_in_Construction.pdf
- [44] JOSHI, Mangala a Bapan ADAK. *Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology: Advances in Nanotechnology Based Functional, Smart and Intelligent Textiles: A Review* [online]. 2019, 5, 253-290 [cit. 2023-07-02]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128035818104710>
- [45] FAROOQ, Sheikh Aamir, Ankush RAINA, Sanjay MOHAN, Ramachandra Arvind SINGH, Subramanian JAYALAKSHMI a Mir Irfan UL HAQ. Nanostructured Coatings: Review on Processing Techniques, Corrosion Behaviour and Tribological Performance. *Nanomaterials* [online]. 12 April 2022, 12(8), 1-37 [cit. 2023-07-02]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/8/1323>
- [46] SEDLÁČEK, Vladimír. *Povrchy a povlaky kovů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1992, 176 s. ISBN 80-01-00799-5.

- [47] KUBÁTOVÁ, Hana. Nátěry kovů. Praha: Grada, 2000, 101 s. ISBN 80-247-9035-1.
- [48] NOVOTNÝ, Jiří, Jan ŠANOVEC, Bohumír BEDNÁŘ a Viktor KREIBICH. Technologie I: Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2006. ISBN 80-01-02351-6.
- [49] ROHANI, Rosiah, Nur Syafiqah Farhanah DZULKHARNIEN, Nurul Hidayah HARUN a Iqma Asyila ILIAS. Green Approaches, Potentials, and Applications of Zinc Oxide Nanoparticles in Surface Coatings and Films. *Bioinorganic Chemistry and Applications* [online]. Hindawi, 4 August, 2022, 1 -22 [cit. 2023-07-02]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/bca/2022/3077747/>
- [50] SANUJA, S., A. AGALYA a M.J. UMAPATHY. Synthesis and characterization of zinc oxide–neem oil–chitosan bionanocomposite for food packaging application. *Biological Macromolecules* [online]. Elsevier, March 2015, 74, 76-84 [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813014007958>
- [51] HAI, Le Huy. The effect of SiO₂ nanoparticles in polyurethane paint formulation on metal surfaces. *Science and Research Archive* [online]. July 2021, 3 (1), 31-36 [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://doi.org/10.30574/ijsra.2021.3.1.0101>
- [52] HILTON, Simon. Who's Using Nanoproducts in Coatings and Paints? In: *AG chemigroup* [online]. 8 October 2020 [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://blog.agchemigroup.eu/whos-using-nanoproducts-in-coatings-and-paints/>
- [53] KAISER, J.P., L. DIENER a P. WICK. Nanoparticles in paints: A new strategy to protect façades and surfaces? *Journal of Physics: Conference Series* 429 [online]. IOP Publishing, November 2012, 1-11 [cit. 2023-07-03]. 012036. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/429/1/012036>
- [54] Effect of Al₂O₃ particles on the adhesion, wear, and corrosion performance of epoxy coatings for protection of umbilical cables accessories for subsea oil and gas production systems. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. Elsevier, April 2019, 8 (2), 1729-1736 [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878541830320X>
- [55] Elektrolýza a její aplikace. In: *Eluc* [online]. [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/2285>

- [56] ZHAO, Yu-chao, Jian-cheng TANG, Nan YE, Wei-wei ZHOU, Chao-long WEI a Ding-jun LIU. Influence of additives and concentration of WC nanoparticles on properties of WC–Cu composite prepared by electroplating. Transactions of Nonferrous Metals Society of China [online]. Elsevier, June 2020, 30(6), 1594-1604 [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632620653225>
- [57] Tungsten Carbide (WC) Nanoparticles. In: Nanografi [online]. [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://nanografi.com/nanoparticles/compounds-nanoparticles/tungsten-carbide-wc-nanoparticles/>
- [58] SASSI, W., H. BOUBAKER, S. BAHAR, M. OTHMAN, A. GHORBAL, R. ZRELLI a J.-Y. A challenge to succeed the electroplating of nanocomposite Ni–Cr alloy onto porous substrate under ultrasonic waves and from a continuous flow titanium nanofluids. Journal of Alloys and Compounds [online]. Elsevier, 5 July 2020, 828, 1-10 [cit. 2023-07-03]. 154437. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838820308008>
- [59] YANG, Rong, Pengyuan XU a Gang XIN. Influence of Silica Particle Size on the Corrosion Behavior of Electroplated Silica–Ni Hybrid Layer. Omega [online]. ACS Publications, 23 June 2020, 5, 15983-15991 [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsomega.0c01248>
- [60] Maziva, která chrání kluzné plochy na molekulární úrovni. In: Nanotech-Europe [online]. [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://www.nanotech-europe.cz/>
- [61] Where we started. Nanotech Industrial Solutions [online]. Avenel [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://nisusacorp.com/about-us/>
- [62] KOPECKÝ, Leoš. Pokročilé mazání pro úspornost a spolehlivost. MM Průmyslové spektrum [online]. 03. 11. 2021, (11) [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrocile-mazani-pro-uspornost-a-spolehlivost>
- [63] S235JRG1: Chemical composition (mass fraction) (wt. %) of the S235JRG1. In: Steel Grades [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.steel-grades.com>
- [64] Ložisková ocel. In: Linkun [online]. [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <http://cz.lksteelpipe.com/52100-bearing-steel>
- [65] BLÜMELOVÁ, Kristýna Kadlas. Dakar prověřil částice v principu fungující jako nanoložiska a zacelující mikrotrhliny. Technický týdeník. 2023(7), 10-11.

- [66] Průmyslový převodový olej NanoLub ISO-220EP: Výsledky testování. In: Lijingwei International: Power Micro International [online]. [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.power-micro.com.tw/show-1166215.html>
- [67] ČSN EN ISO 4624 (673077). Nátěrové hmoty: Odtrhová zkouška přilnavosti. 3. Praha, 2016.
- [68] Opatrebenie a materiály odolné proti opotrebeniu. In: Materiálovotechnologická fakulta STU v Trnave [online]. Trnava [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <http://mtdca.szm.com/subory/opotrebenie.pdf>
- [69] POŠTA, Josef, Petr VESELÝ a Milan DVOŘÁK. Degradace strojních součástí. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2002. ISBN 80-213-0967-9.
- [70] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. Technická diagnostika a spolehlivost I: Tribodiagnostika. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2000. ISBN 80-7078-883-6.
- [71] KŘÍŽ, Antonín. Tribologická analýza Pin-on-Disc. In: DOCPLAYER [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2004 [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/>
- [72] ROŠKANIN, Petr. Tribologické vlastnosti galvanicky vyloučených kompozitních povlaků Zn-PTFE. In: DOCPLAYER [online]. České vysoké učení technické v Praze [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/>
- [73] Metalografie I. In: DOCPLAYER [online]. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/>
- [74] ROY, Soumyabrata a Xiang ZHANG. Structure, Properties and Applications of Two-Dimensional Hexagonal Boron Nitride. Advanced Materials [online]. Wiley, 24 September, 33(44), 1-42 [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202101589>
- [75] SARKAR, Moumita a Nilrudra MANDAL. Solid lubricant materials for high temperature application: A review. Materials today: Proceedings [online]. 2022, 66(9), 3762-3768 [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322039633>
- [76] Grafit v mazivech - proč a kdy: Výroba a technologie. MM Průmyslové spektrum [online]. 07. 11. 2001, (11) [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/grafit-v-mazivech-proc-a-kdy>

- [77] DAS, Namrata. Graphite: Structures, Applications, Properties and Uses. In: Collegedunia: Occurrence Of Metals [online]. [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://collegedunia.com/exams/graphite-structures-applications-properties-and-uses-science-articleid-6374>
- [78] ŠTELCL, Milan. Nanotech-Europe: Firemní literatura. Brno, 2023.
- [79] Linear Wear Friction Intro. In: NANOVEA [online]. [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <https://nanovea.com/linear-wear-test/>
- [80] Multi Function Tribometer: MFT-5000. In: Rtec instruments [online]. [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <https://rtec-instruments.com/tribometer/universal-tribometer/>

Obrázky

- [81] Atom. Pixers [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://pixers.cz/>
- [82] DNA. Shutterstock [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.shutterstock.com/cs/>
- [83] Zázrak jménem buňka. Česká televize [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://edu.ceskatelevize.cz/>
- [84] Human Hair With Damaged Cuticle. Pixels [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://pixels.com/>
- [85] Samolepky na auto. DesignExpress [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.designexpress.cz/>
- [86] Bird. IStock [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.istockphoto.com/cs>
- [87] Set of outline bacteria sketch on a white background. Freepik [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.freepik.com/>
- [88] WU, Yan, Peng JIANG, Ming JIANG, Tie-Wei WANG, Chuan-Fei GUO, Si-Shen XIE a Zhong-Lin WANG. The shape evolution of gold seeds and gold@silver core-shell nanostructures. Nanotechnology [online]. IOP Publishing, 8 July 2009, 20(30), 1 - 10 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/20/30/305602>
- [89] Nanofoams could create better body armor. United Press International [online]. 26 March 2013 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.upi.com/>

- [90] BISWAS, Manik Chandra, Md Tariqul ISLAM, Pranab Kumar NANDY a Md Milon HOSSAIN. Graphene Quantum Dots (GQDs) for Bioimaging and Drug Delivery Applications: A Review. ACS Materials Letters [online]. ACS Publications, 26 May 2021, 3 (6), 889-911 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsmaterialslett.0c00550>
- [91] CHANDLER, David L. Technique could produce strong, resilient nanofibers for many applications. In: Science X [online]. IOP Publishing, 5 January 2018 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://phys.org/news/2018-01-technique-strong-resilient-nanofibers-applications.html>
- [92] NGUYEN, Quang a Jae W . KWON. Silver nanowire-based transparent electrode as FTO replacement for dye-sensitized solar cell. International Nano Letters [online]. Springer, 14 December 2018, (9), 83-87 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40089-018-0258-y>
- [93] KEMSLEY, Jyllian. Silicon Nanopillars Have Antibacterial Properties: Material has structure similar to dragonfly, cicada wings. In: Chemical & Engineering News [online]. ACS Publications, 2 December 2013 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://cen.acs.org/articles/91/i48/Silicon-Nanopillars-Antibacterial-Properties.html>
- [94] ZHOU, Haitao, Dabo LIU, Bingwei LUO, Ye TIAN, Dongsheng CHEN a Chengmin SHEN. Preparation of graphene nanowalls on nickel foam as supercapacitor electrodes. Micro & Nano Letters [online]. The Institution of Engineering and Technology, 1 June 2018, 13(6), 842-844 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/mnl.2017.0922>
- [95] MITCHELL, James B., William C. LO, Arda GENC, James LEBEAU a Veronica AUGUSTYN. Transition from Battery to Pseudocapacitor Behavior via Structural Water in Tungsten Oxide. Chemistry of Materials [online]. ACS Publications, 19 April 2017, 29(9), 3928-3937 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.chemmater.6b05485>
- [96] Graphene Sheet – SEM. In: Nanografi [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://nanografi.com/>
- [97] Rotating C60 Fullerene. In: Pond5 [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.pond5.com/>
- [98] FILCHAKOVA, Marina. What are multi walled carbon nanotubes? MWCNT production, properties, and applications. In: Tuball [online]. 29 December 2021 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://tuball.com/articles/multi-walled-carbon-nanotubes>

- [99] ARUN, Henridass. Advancements in the use of carbon nanotubes for antenna realization. *AEU – International Journal of Electronics and Communications* [online]. Elsevier, July 2021, (136) [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841121001503>
- [100] TEM Image of Single Layer Graphene. In: *ACS Material: Advanced Chemicals Supplier* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.acsmaterial.com/>
- [101] FU, Hanmin, Xiaoqiang FAN, Wen LI, Minhao ZHU, Jinfang PENG a Hao LI. In situ modified multilayer graphene toward high-performance lubricating additive: TEM micrographs of ILS–modified multilayers graphene sheets MLGLB106-15V. *RSC Advances* [online]. Royal Society of Chemistry, 4 May 2017, (7), 24399-24409 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2017/ra/c7ra03920d>
- [102] ERDOĞAN, Huriye. In-situ generation of poly(n -vinyl-2 -pyrrolidone)-stabilized palladium(0) and ruthenium(0) nanoclusters as catalysts for hydrogen generation from the methanolysis of ammonia-borane [online]. Ankara, 2010 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/>. Diplomová práce. Middle East Technical University. Vedoucí práce prof. Dr. Saim Özkar.
- [103] Omílačí stroje: Multivibrátory MT. In: *Technostroj* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://technostroj.cz/>
- [104] Principles of Blast Cleaning: Wheelblast. In: *Blast & Wash Systems* [online]. October 2013 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://blastwashsystems.com/>
- [105] Grinding Department. In: *A -1 Jay's Machining* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <http://www.a1jays.com/>
- [106] KOPECKÝ, Leoš. Aditiva s nanočásticemi a vlastnosti procesních kapalin. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 09.10. 2022, (10) [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aditiva-s-nanocasticemi-a-vlastnosti-procesnich-kapalin>
- [107] SGROI, Mauro Francesco. In situ HRTEM compression test on a single IF-WS2 nanoparticle. In: *Youtube* [online]. 01. 07. 2013 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=OAN6qHP0Jio&ab_channel=MauroFrancescoSgroi
- [108] NANOTECH-EUROPE. Nanotech: prezentace. In: *Youtube* [online]. 24.07. 2018 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=NMGY7K3fa98&ab_channel=NANOTECH-EUROPE

- [109] UHU PLUS ENDFEST 300 EPOXY. In: UHU: Lepidla pro školu, kancelář a domácnost [online]. [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://www.uhu.cz/>
- [110] Automatický odtrhoměr Elcometer 510. In: Gamin [online]. [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://www.gamin.cz/elcometer-510/>
- [111] Thermo Scientific Heratherm OGS400: Ovens & Furnaces. In: Global Industrial & Commercial Supplies [online]. [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://www.globalindustrial.com/>
- [112] Mitutoyo SJ-301: Portable Surface Roughness Tester. In: Berg Engineering & Sales Company [online]. [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://www.bergeng.com/product/178-954-4A.html>
- [113] Refurbished Struers: LABOTOM 3. In: Spectrographic [online]. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://spectrographic.co.uk/products/refurbished-struers-labotom-4>
- [114] Průmyslový převodový olej NanoLub ISO-220EP: Výsledky testování. In: Lijingwei International: Power Micro International [online]. [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.power-micro.com.tw/show-1166215.html>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1– Rozměrová škála nano a makro světa [1,81-87].....	15
Obr. 2– Ukázky různých typů nanoobjektů [88-96].....	17
Obr. 3 – Fulleren C ₆₀ [97].....	18
Obr. 4 – Uhlíkové nanotuby (CNT) [98,99].....	19
Obr. 5 – TEM snímek grafenových vrstev [100,101]	20
Obr. 6 – Fluorescence částic Cd ₃ P ₂ [6].....	21
Obr. 7 – Vztah mezi celkovým počtem atomů v plných klastrech ² a procentem povrchových atomů [102].....	24
Obr. 8 – Koloidní roztoky nanočástic zlata (Au) o různém průměru [10].....	25
Obr. 9 – Oblasti aplikací nanočástic [17]	26
Obr. 10 – Proces elektrolýzy roztoku CuCl ₂ [55].....	35
Obr. 11 – Proces galvanického pokovování – mědění [55].....	35
Obr. 12 – Základní technologický postup galvanického pokovování [37].....	36
Obr. 13 – Schéma galvanického pokovování nanočásticemi WC [56]	37
Obr. 14 – Vibrační omílací stroj [103]	39
Obr. 15 – Ukázka mechanického tryskání [104]	40
Obr. 16 – Broušení tvarovým kotoučem [105].....	41
Obr. 17 – Schématické znázornění rozpouštění a odlupování okují [22]	43
Obr. 18 – Produkty firmy Nanotech-Europe [60].....	46
Obr. 19 – TEM snímek nanočástice IF-WS ₂ [106]	47
Obr. 20 – HRTEM snímek cibulového efektu nanočástice IF-WS ₂ [107]	48
Obr. 21 – Vyhlazení povrchu a zacelení trhlin [108]	48
Obr. 22 – Wolframový nanopovlak MA (vlevo) a RMA (vpravo) [autor práce].....	51
Obr. 23 – Magnetická bruska BPH 20 [autor práce]	53
Obr. 24 – Charakteristický vzorek desky A před (vlevo) a po (vpravo) broušení [autor práce].....	54
Obr. 25 – Nanášení povlaku NANOTECH [78].....	56
Obr. 26 – Charakteristický vzhled napovlakovaných vzorků desek A (vlevo) a desek B (vpravo) [autor práce].....	57
Obr. 27 – Nanášení povlaku RMA a MA štětcem [autor práce]	58
Obr. 28 – Nanesený povlak RMA, deska C, vzorek 9 [autor práce].....	59
Obr. 29 – Nanesený povlak MA, deska C, vzorek 11 [autor práce]	59
Obr. 30 – Nanesený povlak RMA, deska C, vzorek 13 před procesem [autor práce].....	60
Obr. 31 – Nanesený povlak RMA, deska C, vzorek 13 po procesu [autor práce].....	60
Obr. 32 – Automatický odtrhoměr Elcometer 510 [110]	61
Obr. 33 – Odtrhová zkouška [67]	62
Obr. 34 – Vzorek po odtrhu [autor práce]	63

Obr. 35 – Tribometr TOP 3 – charakteristický model sestavy [72]	65
Obr. 36 – Snímek zkušební desky při měření na tribometru TOP 3 [autor práce]	66
Obr. 37 – Zkušební tableta [autor práce]	67
Obr. 38 – Stopa po provedeném měření, vzorek č. 7, povlak NFM [autor práce].....	68
Obr. 39 – Stopa po provedeném měření, vzorek č. 8, povlak N03 [autor práce].....	69
Obr. 40 – Tribometr MFT–5000, Rtec instruments [80]	70
Obr. 41 – Přípravek s upnutým zkušebním vzorkem (po měření) [autor práce]	71
Obr. 42 – Držák zkušebního tělíška [autor práce].....	72
Obr. 43 – Výchozí pozice pro zahájení měření [autor práce]	72
Obr. 44 – Nastavení parametrů měření v softwaru MFT17 [autor práce]	73
Obr. 45 – Okno s grafickým znázorněním vybraných parametrů [autor práce].....	74
Obr. 46 – Vzorek číslo 9 po provedeném měření [autor práce].....	75
Obr. 47 – Vzorek číslo 11 po provedeném měření [autor práce].....	76
Obr. 48 – Vzorek číslo 13 po provedeném měření [autor práce]	77
Obr. 49 – Nenapovlakovaný vzorek po provedeném měření [autor práce]	82
Obr. 50 – Mikroskop Axio Observer D1m od firmy ZEISS [autor práce]	84
Obr. 51 – Metalografický výbrus obsahující vzorky číslo 1, 4 a 5 [autor práce]	86
Obr. 52 – Metalografický výbrus obsahující vzorek číslo 10 [autor práce]	86
Obr. 53 – Metalografický snímek vzorku číslo 1, povlak NEX [autor práce]	87
Obr. 54 – Metalografický snímek vzorku číslo 4, povlak N03 [autor práce]	88
Obr. 55 – Metalografický snímek vzorku číslo 5, povlak NFM [autor práce]	88
Obr. 56 – Snímek vzorku číslo 10 v surovém stavu, povlak RMA [autor práce]	90
Obr. 57 – Zakótovaný snímek vzorku číslo 10 v surovém stavu, povlak RMA [autor práce].....	91
Obr. 58 – Metalografický snímek vzorku číslo 10, povlak RMA [autor práce].....	91
Obr. 59 – Snímek vzorku číslo 12 v surovém stavu, povlak MA [autor práce].....	92
Obr. 60 – Zakótovaný snímek vzorku číslo 12 v surovém stavu, povlak MA [autor práce]	92
Obr. 61 – Metalografický snímek vzorku číslo 12, povlak MA [autor práce]	93
Obr. 62 – Snímek vzorku číslo 14 v surovém stavu, povlak RMA aktiv. [autor práce].....	93
Obr. 63 – Zakótovaný snímek vzorku číslo 14 v surovém stavu, povlak RMA aktiv. [autor práce].....	94
Obr. 64 – Metalografický snímek vzorku číslo 14, povlak RMA aktiv. [autor práce]	94

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Aplikace a funkce nanočástic [43].....	31
Tab. 2 – Provozně významné parametry při galvanickém pokovování [22]	34
Tab. 3 – Rozdělení vzorků [autor práce].....	52
Tab. 4 – Chemické složení v % hmot. – konstrukční ocel S235JRG1 [63].....	52
Tab. 5 – Chemické složení v % hmot. – ložisková ocel 52100 [64].....	52
Tab. 6 – Průměrná drsnost povrchu, deska A [autor práce]	54
Tab. 7 – Průměrná drsnost povrchu, deska B [autor práce].....	54
Tab. 8 – Průměrná drsnost povrchu, deska C [autor práce]	54
Tab. 9 – Charakter porušení [67].....	62
Tab. 10 – Naměřené hodnoty odtrhových napětí [autor práce].....	62
Tab. 11 – Parametry tribologického testování povlaku [autor práce]	67
Tab. 12 – Hodnoty μ_s a μ_d	69
Tab. 13 – Parametry měření, tribometr MFT-5000 [autor práce]	73
Tab. 14 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, vzorek č. 9 [autor práce].....	75
Tab. 15 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, vzorek č. 11 [autor práce]	76
Tab. 16 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, vzorek č. 13 [autor práce]	77
Tab. 17 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, porovnání vybraných měření (vzorek č. 9, 11, 13) [autor práce]	78
Tab. 18 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, vzorek č. 7 [autor práce]	79
Tab. 19 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, vzorek č. 8 [autor práce].....	80
Tab. 20 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, porovnání vybraných měření (vzorek č. 7, 8) [autor práce].....	81
Tab. 21 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, nenapovlakovaný vzorek, ocel [autor práce].....	82
Tab. 22 – Hodnoty průměrného koeficientu tření, porovnání vybraných měření (vzorek č. 7, 8, 9, 11, 13) s nenapovlakovaným vzorkem (ocelí) [autor práce]	83
Tab. 23 – Parametry broušení a leštění [autor práce]	85
Tab. 24 – Tloušťka povlaků, deska A [autor práce]	89
Tab. 25 – Tloušťka povlaků, deska C – surový stav [autor práce]	95
Tab. 26 – Tloušťka povlaků, deska C – metalografický výbrus [autor práce].....	95

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Porovnání koeficientů tření [66,108,114].....	49
Graf 2 – Porovnání opotřebení povrchu [66,108,114].....	49
Graf 3 – Průměrné hodnoty odtrhových napětí [autor práce].....	63
Graf 4 – Procentuální podíl dílčích složek v povlaku [autor práce].....	64
Graf 5 – Vzorek číslo 7, μ_s a μ_d , povlak NFM [autor práce].....	68
Graf 6 – Vzorek číslo 8, μ_s a μ_d , povlak N03 [autor práce].....	69
Graf 7 – Závislost koeficientu tření na čase, vzorek č. 9 [autor práce]	75
Graf 8 – Závislost koeficientu tření na čase, vzorek č. 11 [autor práce]	76
Graf 9 – Závislost koeficientu tření na čase, vzorek č. 13 [autor práce].....	77
Graf 10 – Závislost koeficientu tření na čase, porovnání vybraných měření (vzorek č. 9, 11, 13) [autor práce].....	78
Graf 11 – Závislost koeficientu tření na čase, vzorek č. 7 [autor práce].....	79
Graf 12 – Závislost koeficientu tření na čase, vzorek č. 8 [autor práce].....	80
Graf 13 – Závislost koeficientu tření na čase, porovnání vybraných měření (vzorek č. 7, 8) [autor práce].....	81
Graf 14 – Závislost koeficientu tření na čase, nenapovlakovaný vzorek, ocel [autor práce].....	82
Graf 15 – Závislost koeficientu tření na čase, porovnání vybraných měření (vzorek č. 7, 8, 9, 11, 13) s nenapovlakovaným vzorkem (ocelí) [autor práce].....	83

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Drsnost povrchu, deska A, vzorky č. 1, 2, 3 [autor práce].....	114
Příloha 2 – Drsnost povrchu, deska A, vzorky č. 4, 5, 6 [autor práce]	115
Příloha 3 – Drsnost povrchu, deska B, vzorky č. 7,8 [autor práce]	116
Příloha 4 – Drsnost povrchu, deska C, vzorky č. 9, 10, 11 [autor práce]	117
Příloha 5 – Drsnost povrchu, deska C, vzorky č. 12, 13, 14 [autor práce]	118
Příloha 6 – Odmašťovací prostředek Isopropanol (CAS 67-63-0) [autor práce]	119
Příloha 7 – Čistič Nanotech [autor práce].....	119
Příloha 8 – Dvousložkové epoxidové lepidlo UHU PLUS ENDFEST 300 [109]	120
Příloha 9 – Elektrická horkovzdušná pec od firmy Thermo Scientifi [111].....	120
Příloha 10 – Automatický odtrhoměr Elcometer 510 a zkušební tělísko [110].....	121
Příloha 11 – Ruční řezný nástroj [autor práce]	121
Příloha 12 – Ruční řezný stroj Labotom – 3 od firmy Struers [113]	122
Příloha 13 – Automatická dvoukotoučová bruska a leštička SAPHIR 250 A2 – ECO (Struers) [autor práce]	122
Příloha 14 – Automatický elektrohydraulický montážní lis CitoPress–1 (Struers) [autor práce].....	123
Příloha 15 – Drsnoměr Mitutoyo SJ-301 [112].....	123
Příloha 16 – Benzinový čistič technický P 6411 [autor práce]	124
Příloha 17 – Diamant, monokrystal [autor práce].....	124
Příloha 18 – Smáčedlo [autor práce].....	125
Příloha 19 – Leštící suspenze MasterMet [autor práce].....	125
Příloha 20 – Automatická jednokotoučová bruska/leštička od firmy Buehler, Beta [autor práce]	126

PŘÍLOHY

Příloha 1 – Drsnost povrchu, deska A, vzorky č. 1, 2, 3 [autor práce]

Deska A						
	Vzorek č. 1		Vzorek č. 2		Vzorek č. 3	
Číslo měření	Ra [μm]	Ra [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	0,64	4,27	0,86	7,39	0,77	5,73
2.	0,77	5,03	0,64	4,11	0,91	5,73
3.	0,89	5,40	0,98	6,14	0,91	5,69
4.	0,76	5,40	0,81	5,31	0,68	4,74
5.	0,73	4,94	0,78	5,09	0,84	5,65
6.	0,69	4,72	0,89	5,65	0,86	5,45
7.	0,35	2,00	0,37	1,98	0,48	2,86
8.	0,23	1,58	0,31	1,90	0,56	2,69
9.	0,49	1,67	0,34	1,91	0,42	2,63
10.	0,59	3,55	0,38	2,47	0,26	1,63
11.	0,60	3,22	0,54	2,96	0,41	2,41
12.	0,59	2,99	0,72	3,67	0,81	3,48
Minimum	0,23	1,58	0,31	1,90	0,26	1,63
Maximum	0,89	5,40	0,98	7,39	0,91	5,73
Průměr	0,62	3,88	0,63	3,93	0,67	4,13
Směrodatná odchylka	0,12	1,09	0,20	1,49	0,18	1,37

Příloha 2 – Drsnost povrchu, deska A, vzorky č. 4, 5, 6 [autor práce]

Deska A						
	Vzorek č. 4		Vzorek č. 5		Vzorek č. 6	
Číslo měření	Ra [μm]	Ra [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	0,73	5,08	0,91	6,04	0,84	5,32
2.	0,84	5,31	0,71	4,46	0,89	5,49
3.	0,96	6,07	0,95	6,20	0,72	5,02
4.	0,86	5,36	1,01	7,39	0,84	5,53
5.	0,99	5,90	0,94	5,27	0,81	5,11
6.	1,02	6,05	0,90	5,80	0,73	5,69
7.	0,67	3,69	0,55	2,96	0,42	2,17
8.	0,55	3,13	0,60	3,53	0,44	2,42
9.	0,45	2,51	0,41	2,31	0,45	2,46
10.	0,38	3,06	0,34	2,52	0,35	2,36
11.	0,51	3,61	0,50	2,90	0,38	2,23
12.	0,54	2,82	0,41	2,33	0,38	2,54
Minimum	0,38	2,51	0,34	2,31	0,35	2,17
Maximum	1,02	6,07	1,01	7,39	0,89	5,69
Průměr	0,71	4,40	0,69	4,20	0,60	3,85
Směrodatná odchylka	0,19	1,19	0,21	1,45	0,19	1,45

Příloha 3 – Drsnost povrchu, deska B, vzorky č. 7,8 [autor práce]

Deska B				
	Vzorek č. 7		Vzorek č. 8	
Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	0,69	4,58	0,33	2,56
2.	0,65	4,50	0,30	2,54
3.	0,71	4,67	0,31	2,33
4.	0,71	4,62	0,35	2,48
5.	0,66	4,65	0,31	2,53
6.	0,69	4,50	0,30	2,23
7.	0,27	1,57	0,29	1,90
8.	0,33	2,00	0,25	1,45
9.	0,24	1,84	0,20	1,29
10.	0,29	1,86	0,15	1,07
11.	0,31	1,65	0,31	1,99
12.	0,33	1,89	0,21	1,24
Minimum				
Minimum	0,24	1,57	0,15	1,07
Maximum				
Maximum	0,71	4,67	0,35	2,56
Průměr				
Průměr	0,49	3,21	0,28	2,00
Směrodatná odchylka				
Směrodatná odchylka	0,23	1,59	0,09	0,49

Příloha 4 – Drsnost povrchu, deska C, vzorky č. 9, 10, 11 [autor práce]

Deska C						
	Vzorek č. 9		Vzorek č. 10		Vzorek č. 11	
Číslo měření	Ra [μm]	Ra [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	0,14	0,91	0,12	1,14	0,10	0,75
2.	0,08	0,77	0,08	0,68	0,09	0,60
3.	0,38	1,96	0,07	0,76	0,12	0,92
4.	0,16	2,45	0,11	1,10	0,08	0,60
5.	0,10	0,78	0,08	0,61	0,08	0,58
6.	0,35	3,25	0,08	0,55	0,08	0,60
7.	0,14	1,12	0,10	0,85	0,10	0,69
8.	0,14	1,00	0,11	0,78	0,11	0,77
9.	0,11	0,95	0,12	1,28	0,10	0,72
10.	0,13	1,29	0,14	1,04	0,12	0,91
11.	0,09	0,61	0,11	0,80	0,10	0,71
12.	0,09	0,70	0,13	1,05	0,11	0,83
Minimum	0,08	0,61	0,07	0,55	0,08	0,58
Maximum	0,38	3,25	0,14	1,28	0,12	0,92
Průměr	0,15	1,19	0,10	0,88	0,10	0,72
Směrodatná odchylka	0,07	0,54	0,02	0,18	0,01	0,10

Příloha 5 – Drsnost povrchu, deska C, vzorky č. 12, 13, 14 [autor práce]

Deska C						
	Vzorek č. 12		Vzorek č. 13		Vzorek č. 14	
Číslo měření	Ra [μm]	Ra [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	0,18	1,40	0,13	1,81	0,11	0,99
2.	0,19	2,15	0,17	0,84	0,08	0,77
3.	0,09	0,73	0,05	0,41	0,11	0,89
4.	0,11	1,28	0,06	0,37	0,08	0,67
5.	0,09	1,47	0,08	0,58	0,10	1,03
6.	0,14	0,72	0,08	0,61	0,08	0,71
7.	0,09	0,68	0,18	1,77	0,11	1,00
8.	0,10	0,88	0,10	0,74	0,16	1,37
9.	0,20	1,43	0,10	0,70	0,10	0,79
10.	0,13	1,26	0,12	1,02	0,10	0,89
11.	0,23	1,73	0,12	0,92	0,10	0,74
12.	0,12	1,07	0,10	0,74	0,13	1,44
Minimum	0,09	0,68	0,05	0,37	0,08	0,67
Maximum	0,23	2,15	0,18	1,81	0,16	1,44
Průměr	0,14	1,20	0,11	0,83	0,10	1,92
Směrodatná odchylka	0,04	0,32	0,03	0,35	0,01	0,19

Příloha 6 – Odmašťovací prostředek Isopropanol (CAS 67-63-0) [autor práce]



Příloha 7 – Čistič Nanotech [autor práce]



Příloha 8 – Dvousložkové epoxidové lepidlo UHU PLUS ENDFEST 300 [109]



Příloha 9 – Elektrická horkovzdušná pec od firmy Thermo Scientifici [111]



Příloha 10 – Automatický odtrhoměr Elcometer 510 a zkušební tělísko [110]



Příloha 11 – Ruční řezný nástroj [autor práce]



Příloha 12 – Ruční řezný stroj Labotom – 3 od firmy Struers [113]



Příloha 13 – Automatická dvoukotoučová bruska a leštička SAPHIR 250 A2 – ECO (Struers) [autor práce]



Příloha 14 – Automatický elektrohydraulický montážní lis CitoPress-1 (Struers) [autor práce]



Příloha 15 – Drsnoměr Mitutoyo SJ-301 [112]



Příloha 16 – Benzinový čistič technický P 6411 [autor práce]



Příloha 17 – Diamant, monokrystal [autor práce]



Příloha 18 – Smáčedlo [autor práce]



Příloha 19 – Leštící suspenze MasterMet [autor práce]



