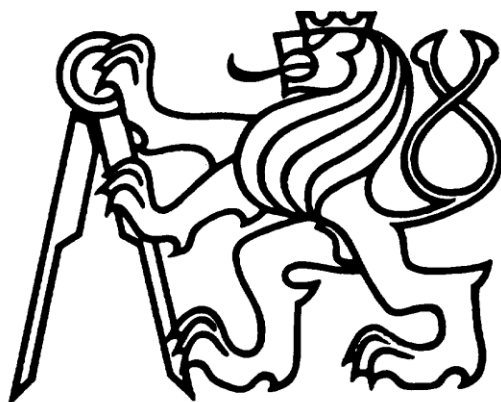


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

NÁHRADA TVRDÉHO CHROMOVÁNÍ ZA POVLAKY NA BÁZI NIKLU

Autor: Bc. Martin Chvojka
Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Dana Benešová
Konzultant: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

ZADANÍ PRÁCE (vložený list)

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití toho školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Praze dne 8. 6. 2015

Bc. Martin Chvojka

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval za vedení mé diplomové práce Ing. Daně Benešové, Ing. Janu Kudláčkovi, Ph.D., doc. Ing. Viktoru Kreibichovi, CSc. a celému kolektivu povrchových úprav.

Děkuji všem učitelům i rodině za podporu a pomoc během studia i tvorby této práce.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

Obor:	Výrobní a materiálové inženýrství
Zaměření:	Povrchové úpravy
Název diplomové práce:	Náhrada tvrdého chromování za povlaky na bázi niklu
Autor diplomové práce:	Bc. Martin Chvojka
Vedoucí diplomové práce	Ing. Dana Benešová
Konzultant:	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc
Rozsah diplomové práce:	Počet stran: 78
	Počet obrázků: 51
	Počet grafů: 32
	Počet tabulek: 36

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá náhradou povlaků tvrdého chromu povlaky na bázi niklu. V práci je veden rozbor sledované problematiky, současné směry a technologie povlaků vhodných jako náhrada tvrdého chromování s hlavním zaměřením na galvanicky vyloučené kompozitními povlaky. Tyto povlaky vykazují mimo jiných vlastností též vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení, což jim umožňuje stát se vhodnou náhradou za tvrdé chromování.

Experiment se věnuje tvorbě kompozitních povlaků se slitinovou maticí Nikl - Fosfor s použitím několika druhů disperzních materiálů a jejich testování z hlediska otěruvzdornosti. Povlaky jsou vytvářeny za stejných podmínek kvůli porovnatelnosti. Přítomnost vyloučených kompozitních povlaků je prokázána pomocí SEM mikroskopie a energo – disperzního spektrometru. Výsledky získané tribologickým testováním jednotlivých povlaků jsou uvedeny v této práci.

Klíčová slova:

Náhrada tvrdého chromování, kompozitní niklové povlaky, nanomateriály v galvanotechnice

Annotation:

This diploma thesis addresses substitution of hard chromium coatings with nickel based coatings. The hard chromium issue and modern technological ways of substitution are showed in this thesis with emphasis for electrodeposited composite coatings. These coatings show among others properties high hardness and abrasion resistance well needed for coatings which can substitute hard chromium coatings.

This experiment is about creating composite coatings (created with the same conditions) with nickel – phosphorous matrix with several additive materials and their future tribological testing. Existence of composite coating was proved by SEM microscopy a spectrometry. The results obtained from this experiment are presented in this thesis.

Key words: Substitution of hard chromium coatings, nickel based composite coatings, nanomaterials in electrodeposited coatings.

OBSAH

1	Úvod.....	9
2	Teoretická část.....	10
2.1	Tvrdochrom a jeho použití.....	10
2.2	Současné směry náhrady tvrdochromu.....	13
2.2.1	Náhrada tvrdochromu technologií PVD / CVD.....	14
2.2.2	Náhrada tvrdochromu technologií HVOF.....	15
2.2.3	Náhrada tvrdochromu kompozitními povlaky.....	19
2.2.4	Slitinový povlak Ni - P.....	21
2.2.5	Kompozitní povlak Ni - P - Diamant.....	22
2.2.6	Kompozitní povlak Ni - P - CNT	23
2.2.7	Kompozitní povlak Ni - P - XLS	24
2.2.8	Kompozitní povlak Ni - P - Al ₂ O ₃	25
2.2.9	Vytvrzení povlaků Ni - P.....	26
2.3	Chemicky vyloučené povlaky.....	28
2.3.1	Chemický Ni - P.....	28
3	Experimentální část.....	31
3.1	Sestava pro experimentální pokovení povlaků.....	31
3.2	Tribologické testování povlaků.....	32
3.3	Výroba lázně a její nasazení.....	35
3.4	Slitinový povlak Ni - P.....	37
3.4.1	Vylučovací rychlost lázně Ni - P.....	37
3.4.2	Tribologické vlastnosti povlaku Ni - P.....	38
3.4.3	SEM mikroskopie povlaku Ni - P.....	40
3.5	Kompozitní povlak Ni - P - Al ₂ O ₃	42

3.5.1	Vylučovací rychlost lázně Ni -P - AL ₂ O ₃	42
3.5.2	Tribologické vlastnosti povlaku Ni - P - AL ₂ O ₃	43
3.5.3	SEM mikroskopie povlaku Ni - P - AL ₂ O ₃	45
3.6	Kompozitní povlak Ni - P - D.....	47
3.6.1	Vylučovací rychlost lázně Ni - P - D.....	47
3.6.2	Tribologické vlastnosti povlaku Ni - P - D.....	48
3.6.3	SEM mikroskopie povlaku Ni - P - D.....	50
3.7	Kompozitní povlak Ni - P - CNT.....	52
3.7.1	Vylučovací rychlost lázně Ni - P - CNT.....	52
3.7.2	Tribologické vlastnosti povlaku Ni - P - CNT.....	53
3.7.3	SEM mikroskopie povlaku Ni - P - CNT.....	55
3.8	Kompozitní povlak Ni - P - XLS.....	57
3.8.1	Vylučovací rychlost lázně Ni - P - XLS.....	57
3.8.2	Tribologické vlastnosti povlaku Ni - P - XLS.....	58
3.8.3	SEM mikroskopie povlaku Ni - P - XLS.....	60
3.9	Chemicky vyloučený Ni - P.....	61
3.9.1	Tribologické vlastnosti povlaku Ni - P (chemický).....	62
3.10	Galvanický tvrdý chrom (Cr).....	64
3.10.1	Tribologické vlastnosti povlku Cr.....	64
4.	Srovnání tribologických vlastností povlaků.....	66
4.1	Srovnání úbytků hmotnosti jednotlivých povlaků.....	66
4.2	Srovnání koeficientů tření jednotlivých povlaků	68
5.	Ekonomicko - hospodářské zhodnocení.....	70
6.	Závěr	72
7.	Použitá literatura a seznamy obrázků, tabulek, grafů a zkratek.....	73

1. Úvod

Tvrdé chromování jako povrchová úprava je v současné době velice často využívána a to na široké spektrum aplikací. Bohužel je s touto technologií spojeno mnoho negativních aspektů. I když jsou vlastnosti tohoto povlaku velice výhodné, jeho výroba je poměrně neekonomická a hlavně neekologická. Z toho důvodu je ve světě kladen veliký důraz na výzkum a aplikace spolehlivých náhrad této technologie.

Rozbor sledované problematiky nám umožní nahlédnout do technologických možností a směrů vývoje náhradních povlaků. Moderní metody nanášení povlaků žárovými metodami a nezastavitelný vývoj v oblasti nanotechnologií určují oblast, kde je pravděpodobně možná náhrada za tvrdé chromování.

Teoretická část této práce pracuje s problematikou tvrdého chromování a s moderními metodami nanášení povlaků, vhodných jako substituce pro tvrdé chromování. A zaměřuje se na galvanicky vyloučené kompozitní povlaky na bázi niklu s mikro a nano disperzními částicemi.

Praktická část práce se zabývá experimentálním pokovením kompozitními povlaky, realizací pracoviště, pokovením jednotlivých vzorků různými kompozitními povlaky a jejich následným tribologickým testováním a vyhodnocením. Dále jsou povlaky sledovány z hlediska SEM mikroskopie a spektrometrie tak, aby byla prokázána existence disperzního materiálu v kompozitním povlaku.

2. Teoretická část

2.1 Tvrdochrom a jeho použití

Tvrdé chromování neboli tvrdochrom je elektrochemický (galvanický) proces vytvoření povrchové úpravy, používaný k nanesení vrstvy chromu na podkladový materiál. Tvrdé (funkční) chromování se používá tam, kde je potřeba především vysoká tvrdost a ořezuvzdornost. Tyto vlastnosti pak vedou k prodloužení životnosti součástí. Jednou z výhod tvrdého chromování je možnost nanášet silné vrstvy, a proto se často používá na renovaci opotřebovaných dílů s možností následného obrobení. Další velice časté použití této povrchové úpravy je pro pístní kroužky, které bylo používáno pro letecké motory již během druhé světové války. Důvodem použití je výrazné snížení opotřebování pístního kroužku a snížení tření tribologického systému pístní kroužek – vložka válce. V současné době se tvrdé chromování stále používá pro úpravu pracovní plochy těsnících i stíracích kroužků, jak litinových, tak ocelových. [1,2]

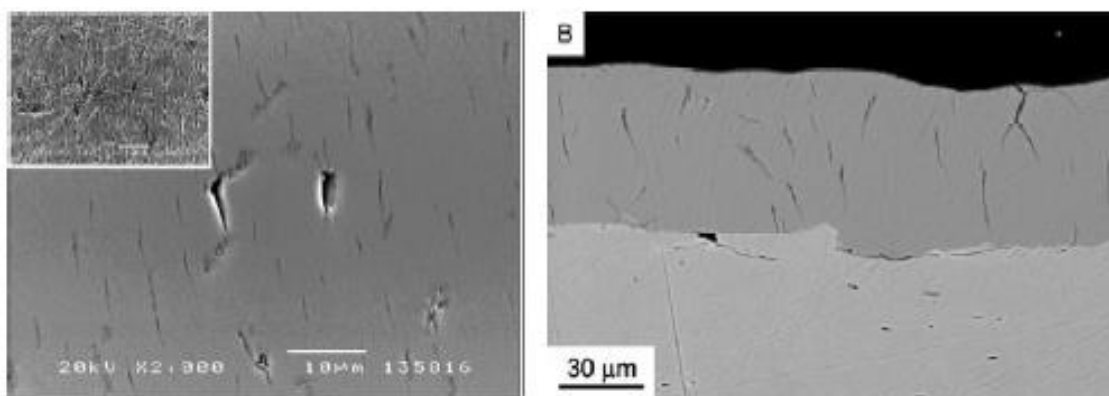
Díky svým specifickým vlastnostem se tvrdé chromování (tvrdochrom, funkční chrom) používá ve velkém množství aplikací. Používá se na nových i opotřebovaných dílech (repare) především pro svou tvrdost a ořezuvzdornost. Standartní tloušťka povlaku je od 5 μm – 1 mm. Tloušťky povlaků od 300 mikrometrů se používají zejména pro repasování dílů, kde nahrazují úbytek materiálu předchozím opotřebováním nebo pro velmi přesné součásti s následným obrobením a leštěním. [1,2]

Příklady nejčastějšího použití tvrdochromu:

- **Strojírenský průmysl:** tyče a trubky hydraulických válců, motorové hřídele, razidla, spinadla, ložiska železničních kol, držáky, atd.
- **Automobilový průmysl:** díly do motorů a hnacích ústrojí jako jsou pístní kroužky a ventily, tlumiče, vzduchové podpěry, atd.
- Díly pro letecký, textilní, a papírenský průmysl, formy pro gumárenský a plastikářský průmysl, a mnoho dalších aplikací. [1]

Základní vlastnosti povrchové úpravy tvrdým chromováním:

Základní charakteristickou vlastností povlaku je ořevzdornost, která u tvrdého chromu je až 5 - 6 TWI (tooth wear index). Ta je způsobená zejména vysokou tvrdostí povlaku, která se pohybuje dle parametrů lázně mezi 950 až 1 200 HV. Výhodou je též nízký koeficient tření (0,13 – 0,19 na testovací dvojici tvrdochrom - ocel) a chemická odolnost proti většině organických sloučenin, ropným produktům, kyslíku, síře a vlhkosti. Tvrdochromový povlak však neodolává chloridům, sírovým kyselinám a kyselině mravenčí. [2]

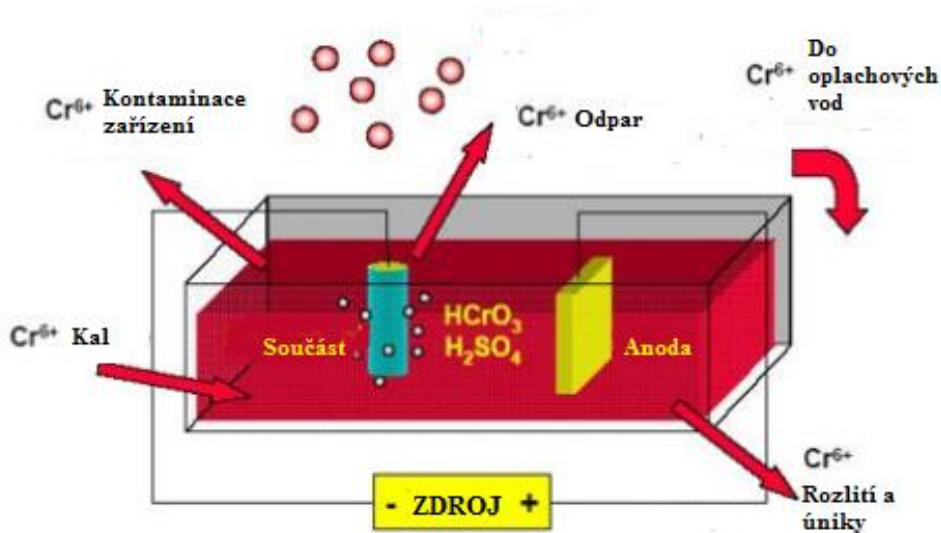


Obr. 1 a 2. Výbrus vrstvy tvrdochromu s mikrotrhlinami. [2]

Vznik povlaku tvrdého chromu:

K vytvoření povlaku se využívá oxidu chromového (CrO_3) a kyseliny sírové (H_2SO_4) a olověno-cínové (Pb – Sn) anody. Kyselina chromová je zdrojem chromu pro pokovovací proces, který je během reakce redukován z šestimocného chromu (Cr^{+6}). Kyselina sírová slouží jako katalyzátor v průběhu redukce za účasti 6 elektronů. Účinnost procesu je poměrně nízká (pouze 15 % vstupního proudu vede ke vzniku chromu v kovovém stavu). Zbytek proudu vede k uvolňování vodíku na povrchu součásti (disociace). Vedle nízké proudové výtěžnosti je další nevýhodou poměrně nízká vylučovací rychlost. Z tohoto důvodu a v případě složité geometrie součásti jsou v některých případech používány přídavné elektrody. [3]

Z důvodů občasných větších tlouštěk jsou součásti v procesu galvanizace deponovány i hodiny nebo dokonce dny, což vede především k vysokým energetickým nákladům. [3]



Obr. 3. Proces vzniku tvrdochromové vrstvy se vznikem šestimocného chromu. [3]

Ekologie:

Největší nevýhodou tvrdého chromování je zcela jistě neekologičnost celého procesu. V průběhu povlakování jsou používány sloučeniny obsahující šestimocný chrom. I když samotný kovový chrom a jeho třímocné chromové sloučeniny toxické nejsou, šestimocné sloučeniny chromu jsou velice nebezpečné a zdraví škodlivé. Chrom patří mezi látky, které se svým vysokým potenciálem vedou ke vzniku rakovinových onemocnění. Příprava kyselinové lázně vyžaduje vysokou ochranu pracovníků a okolního prostředí. Proto jsou v současné době kladeny důrazy na vývoj náhrady tvrdého chromování ekologičtějšími povlaky s ekologičtějšími procesy výroby těchto povlaků. [2]



Obr. 4. Varovný symbol ve výrobě upozorňující na proces obsahující šestimocný chrom. [4]

2.2 Současné směry náhrady tvrdochromu:

Při navrhování povlaků, které mají nahradit tvrdochrom se musí vycházet ze základních vlastností původního povlaku. Zejména z jeho tvrdosti a otěruvzdornosti. Další podmínkou je ekologie, kdy nové povlaky musí splňovat podmínky zdravotní nezávadnosti a snížení zátěže výroby na životní prostředí.

Aby bylo toto splněno, jeví se náhrada z těchto oblastí moderních povrchových úprav:

- Kompozitní a hybridní povlaky (elektrolytický a chemický vylučované)
- PVD A CVD technologie
- HVOF

Ve Spojených státech amerických a v Kanadě byla za tímto účelem založena státní vědecká organizace HCAT (Hard Chromium Alternative Team), která spolupracuje společně se soukromými kanadskými průmyslovými společnostmi a výzkumnými ústavami. Tento výzkum je sponzorován národními ministerstvy obrany a průmyslu a je zaměřen především do leteckého a zbrojního průmyslu, kde má tvrdé (funkční) chromování veliký podíl. V podstatě všechny projekty řešené tímto týmem upřednostňují ze všech náhrad tvrdochromu technologií žárových nástřiků metodu HVOF (High velocity oxygen fuel). [2]

2.2.1 Náhrada tvrdochromu technologií PVD / CVD

Technologie PVD (*Physical Vapour Deposition*) je fyzikální depozice povlaků z plynné fáze. Společným znakem PVD technik je skutečnost, že se zpravidla vychází z pevného substrátu na rozdíl od technik chemické depozice (CVD - *Chemical Vapour Deposition*), kdy jsou prvky obsaženy už v plynné fázi. Metoda PVD se svým povlakem CrN se jeví jako jedna z možností náhrady tvrdého chromování. [5]

Mezi techniky PVD tvorby povlaků patří:

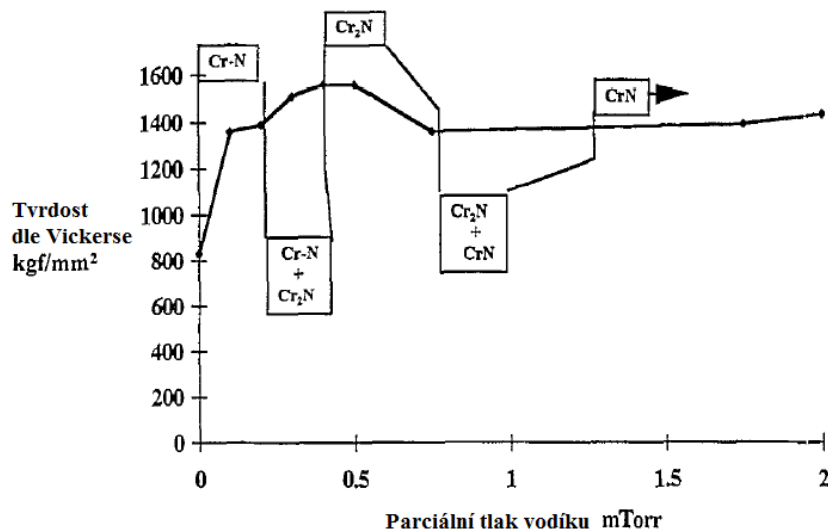
- Vakuové napařování
- Depozice elektronovým svazkem
- Pulsní laserová depozice (PLD)
- Naprašování

Použití PVD technologie není vhodné pro součásti o větších rozměrech a dále se nedá používat na opravu poškozených dílů, kde došlo k úbytku materiálu.

Jako vhodná náhrada tvrdochromového povlaku by byla metoda PVD, kde dochází k vytvoření tvrdého povlaku CrN. Tento povlak je vytvořen technologií PVD magnetronové naprašování (UBM - Unbalanced magnetron sputter deposition). Tato technologie využívá toho, že nitrid chromu má několik krystalografických fází s různou tvrdostí a pevností. Základním substrátem je CrN a jako medium je N_2 . Parciální tlak v komoře pro vytvoření povlaku 0,13 až 0,26 mikrobarů. [5]



Obr. 5. Součást a její vzhled po PVD pokovení CrN povlakem. [5]



Obr. 6. Výsledná tvrdost a chemické složení povlaku v závislosti na parciálním tlaku. [5]

2.2.2 Náhrada tvrdochromu technologií HVOF (High velocity oxygen fuel spraying):

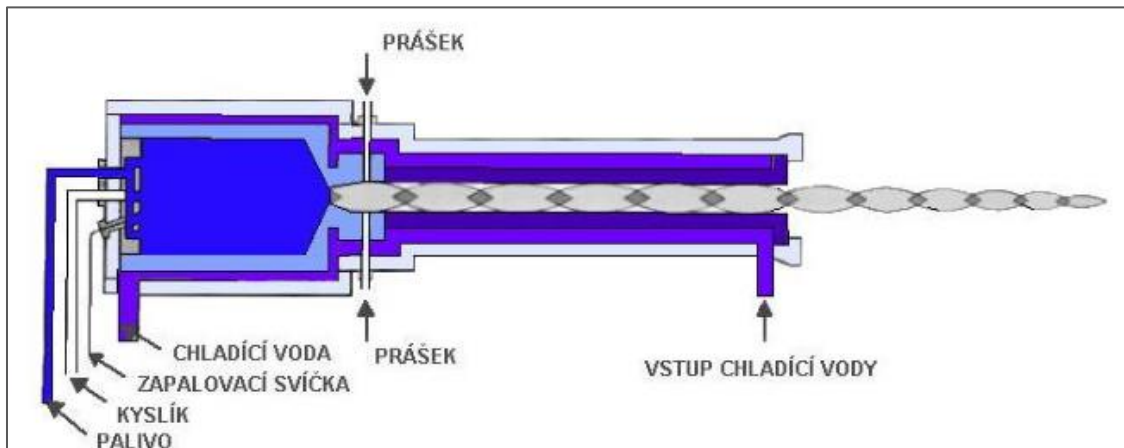
Jedná se o metodu spadající do kategorie žárových nástřiků. Tato metoda je založena na unikátní konstrukci hořáku, kde dochází ke spalování směsi kyslík-palivo. Palivem může být například kerosin, propylen, propan, acetylen, vodík atd. Zplodiny jsou urychleny v „konvergentně-divergentní“ trysce (viz obrázek číslo 7) na rychlosti přesahující rychlosti zvuku (až Mach 3). Materiál (prášek) je unášen v plynu směrem ke komoře, ve které probíhá extrémní hoření, kde se nataví a díky expandujícím spalinám dojde k jeho výraznému urychlení (až $1\,000\text{ ms}^{-1}$) směrem k součásti. Vysoká rychlost a kinetická energie nataveného prášku při dopadu způsobí dokonalé rozprostření a ulpívání nanášeného materiálu na základní materiál součástí, z čehož se odvíjí vysoká hustota a přilnavost HVOF stříkaných povlaků. Například HVOF stříkané WC – Co povlaky mají stejnou tvrdost a ořezuvzdornost (tribologické vlastnosti) jako stejný materiál připravený konvenčními metodami (prášková metalurgie). Pro náhradu tvrdochromu by nejvíce vyhovoval povlak $\text{Cr}_2\text{C}_2 - \text{Mo} - \text{Ni} - \text{Cr}$, který se pomocí technologie nanášení HVOF osvědčil jako spolehlivá náhrada tvrdochromu na pístních kroužcích. [6]

Díky relativně nízké teplotě tato technologie není vhodná pro nástřik keramických povlaků, kdy nedojde k dostatečnému natavení prášku (keramiky) a tedy není dokonalé navrstvení nanášeného povlaku na základní materiál. Takové nedokonalé povlaky pak mají vysokou porezitu a nedostačující přilnavost. Avšak nižší teplota procesu vede k nižšímu stupni oxidace a fázovým přeměnám. Také nedochází ke spalování (vyhořívání) některých prvků nanášeného materiálu, které by mohly mít nižší teplotu hoření, než hlavní prvky nanášeného materiálu. Unikátní vlastností této technologie je, že při vhodné volbě depozičních parametrů produkuje povlaky v tlakovém pnutí, což umožňuje vytvářet povlaky velkých tloušťek (až několik mm). [6]

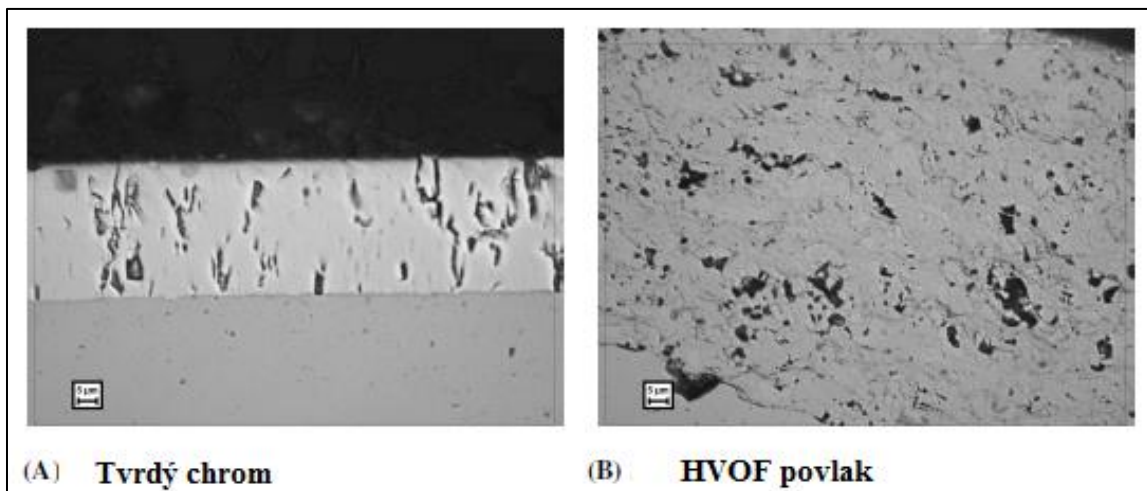
Základní vlastnosti HVOF nástřiků:

- vynikající zakotvení do základního materiálu (60 až 100 MPa),
- vysoká soudržnost a strukturní stabilita,
- vysoká tvrdost (až HRC 55 až 68) a mikrotvrdost (až $HV_{0,1}$ 1 700 až 1 800),
- pórovitost povlaků obvykle $< 1 \%$,
- pevnost se blíží hodnotám pevnosti materiálů připravovaných technologiemi práškové či klasické metalurgie,
- tloušťky povlaků na bázi kovů, ocelí, superslitin a cermetů mohou být 0,1 - několik mm,
- lze vytvářet povlaky obsahující vnitřní tlakové pnutí. [6]

Uvedené vlastnosti mají přímou souvislost s vlastnostmi materiálu (prášku). V případě použití povlaku $Cr_2C_2 - NiCr$ a $WC - CoCr$ jsou vlastnosti velice podobné vlastnostem tvrdochromu (tvrdochrom: 800 ~ 1 000 HV, $Cr_3C_2 - NiCr$ 25 %: 750 ~ 1 300 HV). Vytváření povlaků s tlakovým pnutím je v této oblasti zcela unikátní, nejenže umožňuje vytvářet povlaky větších tloušťek, ale je příznivé i s ohledem na únavové vlastnosti povlakovaných součástí. Povlaky cermet typu $WC - Co - Cr$ jsou navíc velice korozně odolné a to až do vysokých hodnot pH. [6,7]



Obr. 7. Zařízení pro nástřik HVOF povlaků. [6]



Obr. 8. Výbrus povlaků: vlevo tvrdochrom, vpravo HVOF. [7]

Materiály používané k získání povlaků metodou HVOF:

Skupina A: rozdělení dle otěruvzdornosti

Skupina B: Rozdělení dle korozivzdornosti [7]

A)

Produkt	Složení
Diamalloy 2003/4/5/6 Sulzer Metco5812/5810	WC-12~17%Co
WOKA 360/365/370 Sulzer Metco5843/7,5803	WC-Co-Cr
WOKA 710/720/730 Diamalloy 3004/5/7 Sulzer Metco 5255	Cr ₃ C ₂ -20/20/25%Ni Cr Cr ₃ C ₂ -25/20/7%Ni Cr Cr ₃ C ₂ -50%Ni Cr
AMDRY 4532/4535	Ni-Cr

B)

Produkt	Složení
Diamalloy 3001/3002NS AMDRY 4532/4535	Co-Mo Ni-Cr
WOKA 360/365/370 Sulzer Metco5843/7,5803	WC-Co-Cr
WOKA 710/720/730 Diamalloy 3004/5/7 Sulzer Metco5812/5810	Cr ₃ C ₂ -20/20/25%Ni Cr Cr ₃ C ₂ -25/20/7%Ni Cr WC-12~17%Co

Tab. 1. Skupiny produktů pro HVOF tvorbu povlaků a jejich složení. [7]

2.2.3 Kompozitní povlaky

Pro nahrazení tvrdochromu jsou velice vhodné moderní perspektivní kompozitní povlaky. Tyto povlaky vynikají výbornými vlastnostmi, jako je otěruvzdornost, tvrdost, samomaznost a v některých jsou výhodnější než samotný tvrdochrom. [8]

Kompozitní povlaky jsou stejně jako kompozitní materiály složeny alespoň ze dvou fází odlišných fyzikálních, chemických a ostatních vlastností, které společně určují výsledné vlastnosti. První fáze se nazývá matrice (nebo také pojivo). Většinou se jedná o kov (Fe, Co, Ni, Zn), ale můžeme se setkat i s polymerem či keramikou. Nikl má výhodu v mřížce s velmi těsným uspořádáním a tedy velkou vazebnou energií mřížky. Druhá fáze nazvaná disperzní část (také plnivo) je volně nebo i uspořádaně rozptýlená v matrici. Uspořádaná disperzní část determinuje výsledné vlastnosti kompozitního povlaku. [8]

V současné době je jednou z možností vytvoření těchto povlaků galvanické pokovení (anglicky Electrodeposited Composite Coating ECC). Tyto povlaky vznikají v elektrolytické lázni s rozptýlenými disperzními částicemi. Na povrchu pokovované součásti se pak elektrolyticky vylučuje povlak, který má v kovové matrici disperzní částice, jejich přítomnost výrazně ovlivní výsledné vlastnosti povlaku. V současné době se jako nejperspektivnější disperzní složka uvažují částice nanomateriálů. [9]

Nanomateriály používané v technologii hybridních povlaků:

Nanomateriály jsou obecně materiály ve formě ultra jemných částic s rozměry menšími než 1000 nm a většinou větší než 10 nm. Většina nanomateriálů používaných například v galvanotechnice má však disperzní částice výrazně menší než 100 nm. [9]

Částice	Hustota [kg.m ⁻³]	Bod tání [°C]	Mikrotvrdost [kPa]
TiB ₂	4,5	2 930	30,5 – 41
SiC	3,21	2 050	29 – 35
TiC	4,9	3 140	18-32
ZrC	6,8	3 540	26
WC	15,8	2 600 – 2 800	24
SiO ₂	2,2 - 2,6	1 470 – 1 710	20 – 24
Al ₂ O ₃	3,93 - 4,02	1 470 – 1 710	20 – 24
TaC	14,6	3 900	19
ZrO ₂	5,6 - 6,1	2 700 – 3 000	16
TiO ₂	3,8 - 4,2	1 640	12

Tab. 2. Tabulka srovnání vlastností běžně používaných nanočástic. [8]

Technologie nanášení galvanických kompozitních povlaků – vzorový technologický postup:

- 1) Předúpravy povrchu součásti – dokonalé odmaštění (elektrolytické odmaštění, ultrazvukové odmaštění atd.)
- 2) Aktivace a dekapování
- 3) Pokovení (probíhá za dodržení technologických parametrů – teplota, proudová hustota, míchání lázně za účelem rozptýlení disperze atd.)
- 4) Sušení a kontrola

Mezi jednotlivými operacemi je vždy dvoustupňové opláchnutí. Vzorový postup je velice zjednodušený, neboť se pro každý typ povlaku a lázně jemně liší.

Podle tvaru součásti volíme technologie závěsové, bubnové či rotační pokovovací systémy, kde rotuje součást v elektrolytu mezi elektrodami tak, aby bylo zajištěno rovnoměrné pokovení celé plochy rotační součásti.

2.2.4 Slitinový povlak Ni – P

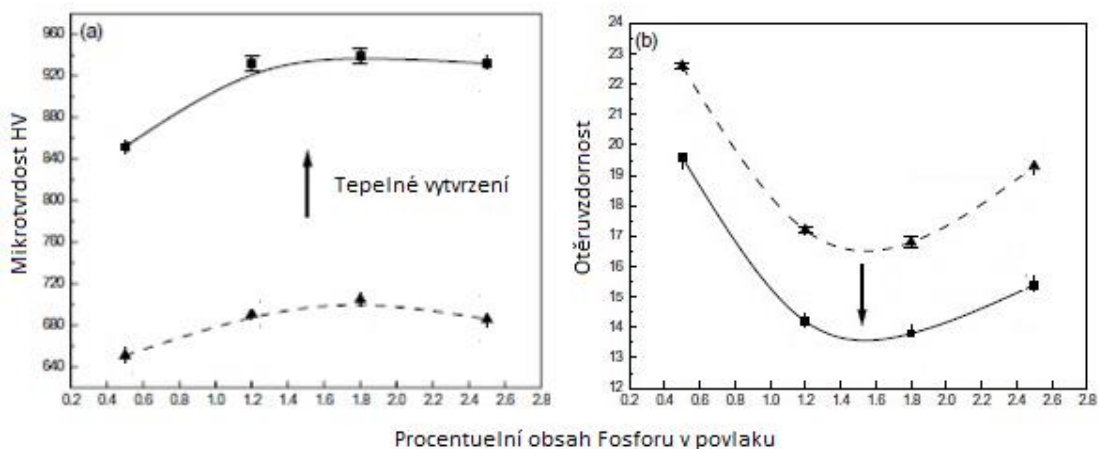
Tvrdość povlaku je jednou z nejžádanějších vlastností. Kompozitní povlaky využívající matrice slitinového povlaku Nikl – Fosfor jsou velmi příhodné pro zvýšení tvrdosti povrchu. Dále je možno pro ještě lepší tvrdost tepelně vytvrzovat, ale dojde ke snížení odolnosti proti opotřebení. Maximální tvrdosti je dosaženo precipitací Ni_3P ze supersaturovaného Ni – P povlaku na základním materiálu. [10,11]

Složení lázně Ni – P a provoz:

$\text{NiSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$	(137 g.l^{-1})	
NiCO_3	(36,5 g.l^{-1})	
H_3PO_4	(2 – 3 g.l^{-1})	(používá se pro správné nastavení pH v lázni (2,5))
Sacharin	(5 g.l^{-1})	
Laurethsulfát sodný	(0,1 g.l^{-1})	$(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OSO}_3\text{Na})$

Teplota lázně je 55 – 65 °C a lázeň musí být neustále míchána např. elektromagneticky.

Elektrický proud by měl být 4 A na 1 dm^2 [10]

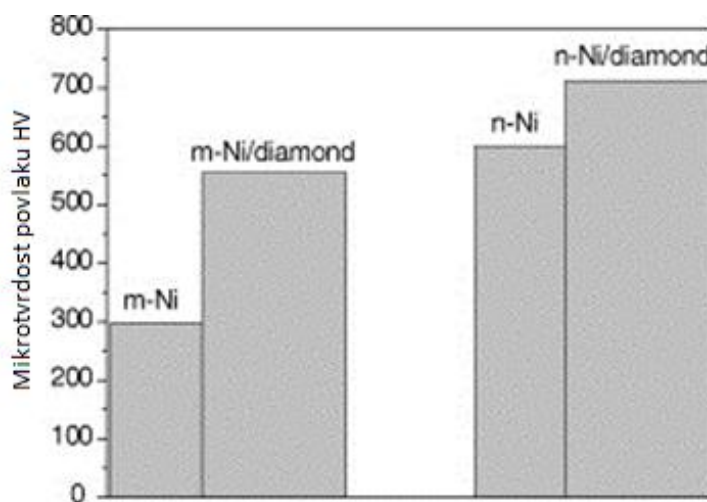


Obr. 9. Závislost tvrdosti na obsahu P a závislost opotřebení na obsahu P. [10]

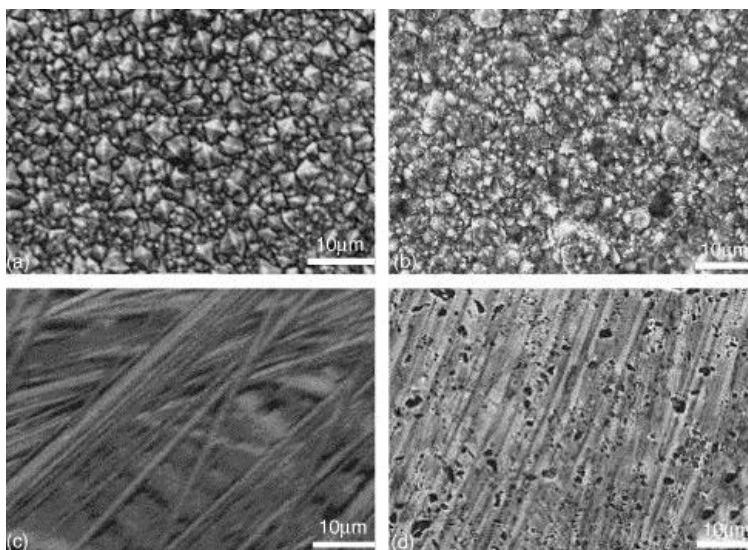
Sledované lázně Ni – P mohou být využívány jako základ pro tvorbu povlaků složených z více disperzních částí. Například povlak Ni – P – TiO₂. Pokud do této lázně přidáme ještě polytetrafluorethylen, získáme kompozitní povlak Ni – P – TiO₂ – PTFE. Disperzní částice je třeba v lázni udržet v pohybu pomocí mechanismu míchání například elektromagneticky. Míchání je třeba udržovat po celou dobu galvanického procesu, aby nedocházelo k usazování nanočástic a tedy ke snížení účinnosti lázně. Bylo zjištěno, že přítomnost PTFE částic má vliv na snížení velikosti zrn TiO₂ v Ni – P – TiO₂ – PTFE vrstvy ve srovnání s velikostí zrn TiO₂ v Ni – P – TiO₂ vrstev. [12]

2.2.5 Kompozitní povlak Ni – P – D

Jedná se o kompozitní povlak složený z kovové matrice (niklu s fosforem) vytvořené pomocí niklovací lázně, ve které je rozptýleno určité množství diamantových částic (DND) dané velikosti. Jelikož je diamant jednou z nejtvrdších látek, nese si i povlak tuto vlastnost s sebou. Jedná se o moderní povlak nacházející uplatnění v širokém spektru strojírenství. V případě správné orientace diamantových zrn může být docíleno vysokého tření mezi materiály a tedy k přenosu momentu. [13,14]



Obr. 10. Srovnání tvrdosti povlaku při použití mikro a nano diamantových částic. [13]



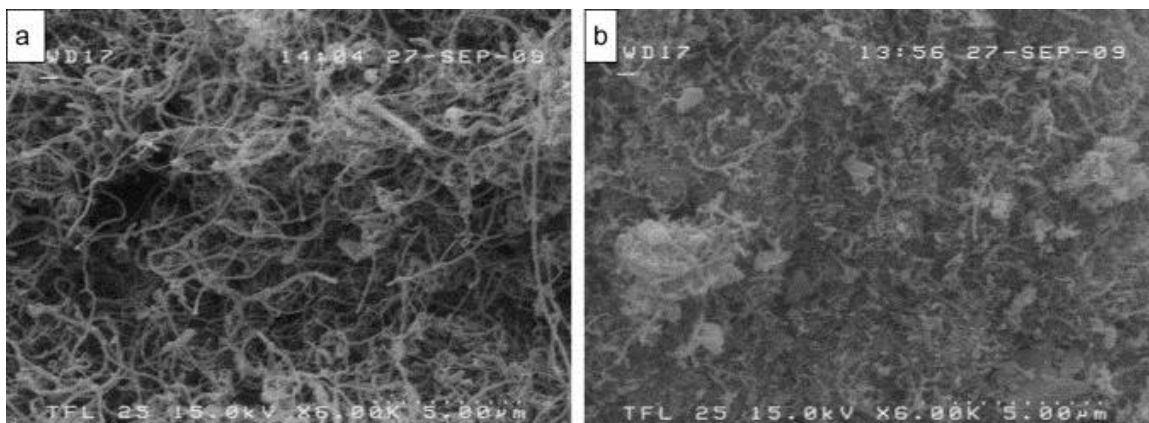
Obr. 11. SEM snímek povlaku Nikl – diamant s různou orientací diamantových zrn. [13]

2.2.6 Kompozitní povlak Ni – P – CNT

Kompozitní povlak, jehož základem je galvanicky vyloučený povlak Ni – P, kde do lázně byla rozptýlena disperze uhlíkových nanotrubic. Tyto vykazují výrazné zlepšení tribologických vlastností, zejména snížení koeficientu tření a to díky vlastnosti uhlíku, kterou je samomaznost. Další ze změněných vlastností je mikrotvrdość, která se při použití těchto nanotrubic zvýší. Hodnota jejího zvětšení koresponduje s množstvím nanomateriálu. [15]

Povlak (matrice - CNT)	Mikrotvrdość (Hv ₁₅₀)
Ni-P	607 ± 3
Ni-P-75 HTAB-5 mg/l CNTs	706 ± 20
Ni-P-2 g/l SDS-25 mg/l CNTs	806 ± 15

Tab. 3. Mikrotvrdość povlaků obsahující různý objemový podíl CNT. [15]



Obr. 12. SEM snímek rozptýlení nanotrubic v povlaku. [15]

2.2.7 Kompozitní povlak Ni – P – XLS

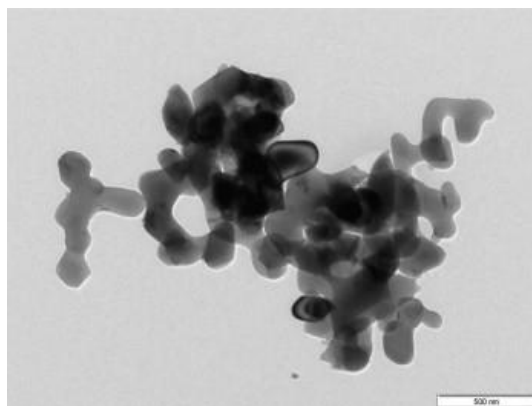
Nanomateriálem (disperzní částí) je zde syntetický jíl. Jíl - laponit XLS je syntetický vrstvený křemičitan s nízkým obsahem těžkých kovů, modifikovaný anorganickými polyfosfátovými disperzními činidly. Vzhledem je to bílý prášek s hustotou $1\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Přidáním do slitinového povlaku Ni – P získáme výraznou změnu mechanických vlastností a to zejména otěruvzdornosti, kdy výrazně snižuje koeficient tření. [8]

Chemické složení (suchý stav)	
SiO ₂	54.5%
MgO	26.0%
Li ₂ O	0.8%
Na ₂ O	5.6%
P ₂ O ₅	4.1%

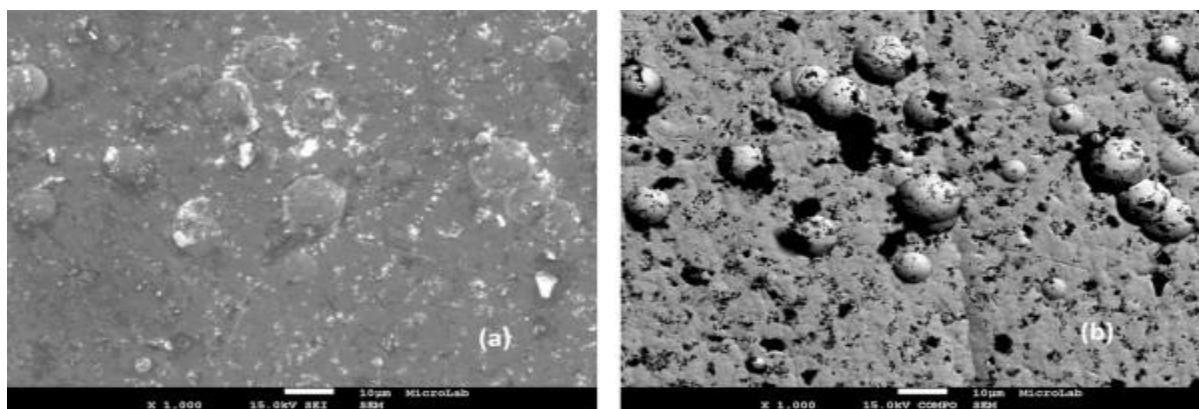
Tab. 4. Tabulka chemického složení syntetického materiálu XLS laponitu. [8]

2.2.8 Kompozitní povlak Ni – P – Al₂O₃

Disperze korundu ve formě prášku mění vlastnosti povlaku v oblasti tribometrických a mechanických vlastností. Dochází zde k nárůstu pevnosti a tvrdosti povlaku. Tvrdost povlaku vzroste v průměru 12 až 19%. Další zvýšení nastane po tepelném zpracování povlaků a to až na 1 080 HV. Otěruvzdornost se také zlepší, hodnoty opotřebení po aplikaci disperzních částic korundu jsou přibližně poloviční než bez jejich použití. [8]



Obr. 13. SEM snímek částic korundu. [8]



Obr. 14. SEM snímek povrchu Ni – P – Al₂O₃ povlaku. [8]

2.2.9 Vytvrzení povlaků Ni – P

Výše uvedené povlaky s matricí Ni – P jsou prokazatelně vytvrditelné pomocí zvýšené teploty. Teplotu vzorku s naneseným povlakem můžeme zvyšovat pro účely vytvrzení několika způsoby, například konvenční pecí nebo zářením v oblasti infračerveného spektra. Na obrázku č. 15 je patrné, že hodnota mikrotvrdosti po tepelném vytvrzení je úměrná teplotě. [16, 17]

Varianty vytvrzení povlaku a výsledná mikrotvrdost:

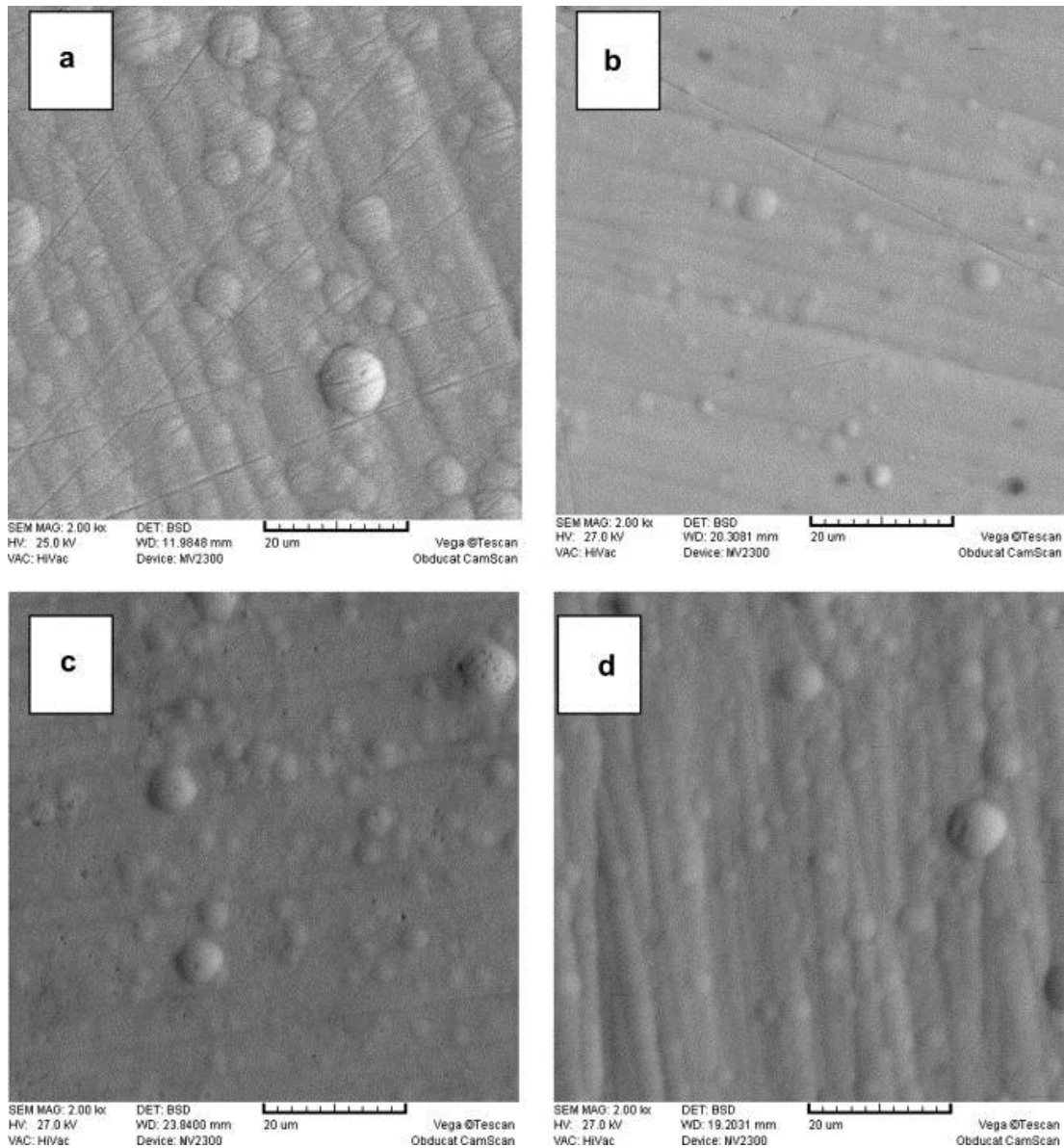
<u>Vzorek</u>	<u>Teplota vytvrzení</u>	<u>Doba vytvrzení</u>	<u>Mikrotvrdost HV₁₀₀</u>
Ni – P	Bez vytvrzení	Bez vytvrzení	612
Ni – P	200 °C	2 hod	607
Ni – P	400 °C	1 hod	876
Ni – P	600 °C	15 min	938

Tab. 5. Tabulka závislosti mikrotvrdosti na vytvrzovacím procesu.

Z výsledků experimentu je patrné, že přínos tepelného vytvrzení je patrný od teploty 400 °C. Naopak při teplotě tepelného zpracování povlaku 200 °C nedochází k pozitivní změně tvrdosti povlaku. Naopak došlo k jejímu mírnému poklesu zaviněnému pravděpodobně poklesem vnitřního pnutí v povlaku vlivem tepelného zpracování. Při navýšení teploty až na 400 °C a výše dojde k precipitaci Ni₃P ze supersaturovaného Ni – P povlaku. Při navýšení teploty na 600 °C dojde také ke zvýšení mikrotvrdosti, ale její hodnota oproti 400 °C není již o tolik větší, avšak doba expozice na této teplotě je čtvrtinová. [16, 17]



Obr. 15. Mikrotvrdost v závislosti na teplotě a času expozice při vytvrzování. [16,17]



Obr. 16. Struktury povlaku Ni – P po tepelném vytvrzení s různým tepelným zpracováním.

a) Ni – P bez tepelného zpracování,

b) Ni – P s tepelným zpracováním 200 °C – 2 hodiny,

c) Ni – P s tepelným zpracováním 400 °C – 1 hodina,

d) Ni – P s tepelným zpracováním 600 °C – 15 minut. [16]

2.3 Chemické bezproudé povlakování

Výše uvedené kompozitní povlaky lze vylučovat nejen galvanicky (elektrolyticky), ale také bezproudou (chemickou) cestou.

Jedná se o proces kdy bezproudovým (chemickým vylučování povrchových vrstev) pokovením vylučujeme na povrchu kovových i nekovových součástí kovové vrstvy bez nutnosti požití externího zdroje proudu. Tímto procesem lze vytvářet povlaky Cu, Ni, Ag, Sn, Au a další oxidické vrstvy. Nevýhodou je nutnost provádění doplňování a regeneraci lázní, což s sebou nese nežádoucí ekologicko-technologické komplikace. [18]

2.3.1 Chemický Ni - P:

Chemické niklování je další z řad povrchových úprav, kde dochází k autokatalytické reakci, která slouží k nanesení slitiny niklu a fosforu na základní materiál (součást). Oproti galvanickým metodám nanášení povrchové vrstvy chromu / niklu není u této metody chemického pokovení potřebný elektrický proud k nanesení vrstvy. Na rozdíl od galvanického procesu pokovení součástí je u bezproudého pokovení rovnoměrná tloušťka vrstvy i na dílech složitěho tvaru, kde v galvanických procesech může docházet k výkyvům vlivem rozdílné proudové hustoty, zejména však na ostrých hranách. Díky tomuto efektu není ve většině případů potřebné následné obrábění dílů, jako je tomu například u tvrdého chromování elektrolytickým procesem výroby. Vrstva chemicky vyloučeného Ni – P vyniká svojí nízkou porezitou, což vede k vysoké korozní odolnosti (tvrdochrom může být díky porezitě náchylný na korozi základního materiálu). Chemický nikl může být následně, stejně jako nikl vyloučený galvanicky, tepelně vytvrzen až na 1 000 HV. Vytvrzení se provádí různými způsoby podle zdroje tepla a jeho přenosu na součást. Chemické niklování s vytvrzením je v některých aplikacích možné použít jako náhradu za tvrdé chromování. [18]

Vlastnosti povrchové vrstvy chemického niklu:

Chemické niklování vede k rovnoměrné vrstvě i na nepravidelných dílech a nevyžaduje další broušení. Rozměrová stálost a rovnoměrný plošný růst tloušťky jsou nespornou výhodou. Povlaky dosahují tvrdosti po pokovení 570 – 660 HV (53 – 58 HRC) a po vytvrzení i 1 000 HV (69 HRC). Výborná korozní odolnost je dána nízkou porézností nanesené vrstvy oproti tvrdochromu a dále povlak vyniká vysokou otěruvzdorností s nízkým koeficientem tření (statický součinitel tření s ocelí: 0,13 s mazivem, až 0,4 bez maziva). Pololesklý až lesklý vzhled povlaku, který není toxický a je vhodný pro zdravotnický a potravinářský průmysl. Málo absorbuje vodík, přibližně 1/5 v porovnání s elektrolytickým niklováním a 1/10 v porovnání s tvrdým chromováním. Běžná tloušťka povlaků v průmyslové výrobě: 3 – 80 μm s maximálními rozměry součásti dle pokovovacího zařízení. Běžné provozy cca max. 2,5 m. [18]

Zjednodušený technologický postup vyloučení povlaku na součásti:

Č.op.	Operace	Doporučený přípravek - pracovní podmínky
01	Hrubé odmaštění v organickém rozpouštědle	Perchloroethylen 20 °C, 30 až 60 s
02	Chemické odmaštění	Pragolod 40, 85 °C, 30 až 45 s
03	Oplach dvoustupňový studený	Voda 10 až 20 °C, 60 s
04	Aktivace (dekapování)	Kyselina chlorovodíková 1:3, 20 °C, 1 až 3 min.
05	Oplach studený jednostupňový	Voda 10 až 20 °C, 30 až 45 s
06	Oplach teplý	Voda 60 až 80 °C, (do prohřátí předmětu)
07	Chemické niklování	Niklovací lázeň 95 °C, 3 až 5 hodin (podle požadované tloušťky)
08	Oplach teplý ekonomický	Demí voda 50 až 60 °C, 60 s
09	Oplach teplý dvoustupňový	Voda 50 až 60 °C, 60 s
10	Sušení	Teplým vzduchem (bezprostředně po oplachu)

Tab. 6. Technologický postup bezproudého niklování. [18]

Příklady nejčastějšího použití chemického niklu:

- Strojírenský průmysl: hřídele, válce, slévárenské formy a nesčetné množství dalších částí
- Automobilový průmysl: brzdové písty, spony, díly do převodovky, atd.
- Díly pro letecký, textilní, a papírenský průmysl, formy pro gumárenský a plastikářský průmysl, a mnoho dalších aplikací [18]

Ekologie chemického niklování a jeho nahrazení:

Na rozdíl od galvanických lázní, kde primárně dochází k doplňování koncentrace lázně z elektrod, jsou lázně na chemické niklování použitelné pouze omezenou dobu do vyčerpání kapacity. To vede ke zvýšené produkci odpadu oproti galvanickému niklu. Ekologická likvidace těchto lázní výrazně zvyšuje náklady na součásti. Z tohoto důvodu by bylo vhodné nahradit technologii chemického niklování jednou z technologií, které jsou výše uvedené při nahrazování tvrdochromu. Zejména metoda HVOF. [19]

3. Praktická část

3.1 Soustava pro experimentální vylučování povlaků

Specifické podmínky provozu Ni – P lázně si vyžadují navržení specializovaného pracoviště pro pokovení zkušebních vzorků. Při nedodržení těchto podmínek nedochází ke správnému vylučování povlaku na povrchu vzorku.

K zajištění podmínek je nádoba s elektrolytem umístěna na plochu vyhřívané elektromagnetické míchačky. Tak je zajištěn přenos tepla z topné desky do elektrolytu přes stěnu nádoby. Je tak zajištěno neznečišťování elektrolytu ohřívajícím zařízením. Teplota sice při použití tohoto zařízení může lehce kolísat okolo střední předepsané hodnoty, ale je v toleranci, která není v rozporu s pracovními podmínkami nasazení lázně. Míchání elektrolytu pomocí elektromagnetické míchačky zabraňuje sedimentaci dispergovaných částic. Dispergace materiálu do elektrolytu byla provedena ultrazvukovou sondou UP400S.



Obr. 17. Ultrazvukový homogenizátor UP400S.

K dodržení podmínek proudové hustoty bylo použito laboratorního zdroje elektrického proudu Manson SPS9600. Dále bylo zjištěno, že tolerance funkce vylučování povlaku je 0,1 pH. Z tohoto důvodu bylo potřeba digitálního pH metru GRYF 259, který byl během pokovování několikrát zkoušen a kalibrován pomocí roztoků o pH 10 a pH 4. Korekce pH byla prováděna pomocí roztoků kyseliny sírové (pro snížení hodnoty pH) a hydroxidu sodného (pro zvýšení pH).



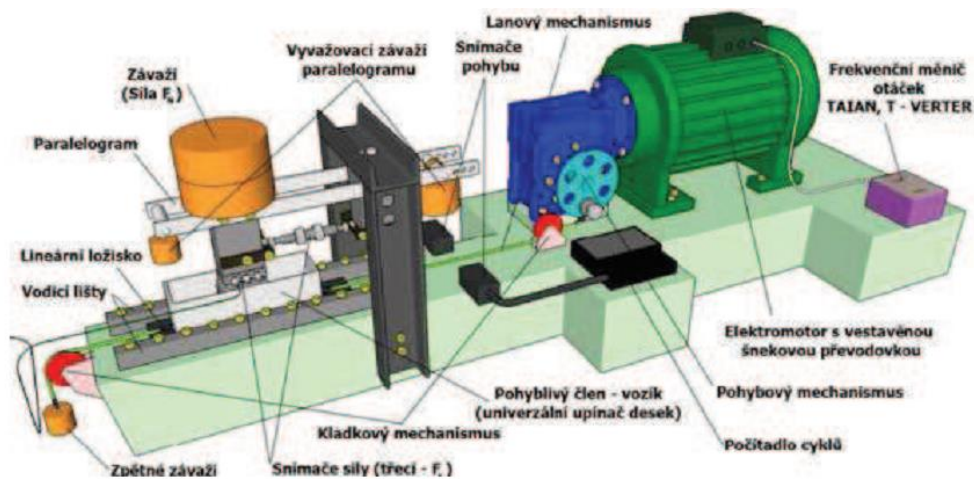
Obr. 18. Soustava pro tvorbu povlaků s dispergovanými částicemi.

Na obrázku č. 18 je vidět soustava pro pokovování zkušebních vzorků a tablet. Toto zařízení bylo identické pro všechny druhy kompozitních povlaků vytvářených v tomto experimentu. Byly pouze vyměňovány nádoby s elektrolytem, elektromagnetické míchadlo a teplotní čidlo bylo očištěno tak, aby nedošlo ke vzájemné kontaminaci lázní.

3.2 Tribologické testování povlaku

K měření tribologických vlastností byl použit tribometr TOP 3, který slouží k měření adhezivního tření a opotřebení povrchů, kde jsou tribologickému styku podrobeny funkční dvojice pokovená tableta - deska. Mezi dvojicí dochází k translačně oscilačnímu pohybu. Pohyb zde vykonává deska. Počet cyklů je dán frekvenčním měničem a zvoleným časem. Pro naše měření bylo zvoleno 35 cyklů za minutu a jeden cyklus má dráhu 190 mm. To znamená, že dráha při pěti minutovém měření je 33,25 m. Normálové zatížení je možné volit v rozmezí 0 – 250 N. Pro naše testy bylo zvoleno jednotné zatížení 1 kg (9,81 N), což vyvíjí na povrch testované tablety tlak 31,242 kPa. Piezokrystalický snímač Kistler 9251, umístěný v zatěžovacím sloupcu, určuje velikost deformací a předává ji dále do jednotky Kistler 5015, která ji vyhodnocuje a přes

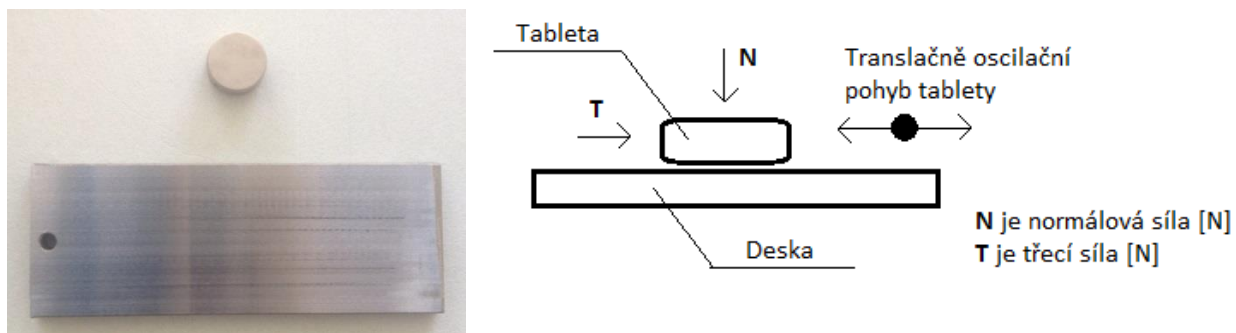
port RS232 předává do stolního počítače. Počítač pak pomocí softwaru Charge Meter 5015A vytvoří soubory potřebné k vyhodnocení koeficientů tření v programu Matlab.



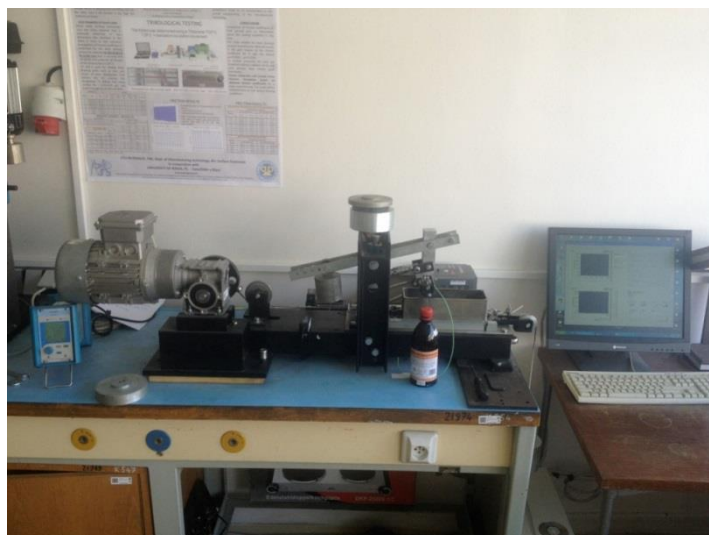
Obr. 19. Tribometr TOP 3 – model.

Rozměry zkušebních vzorků:

- 1) Tableta: $d = 20$, $h = 10$ a zkosené hrany $0,5 \times 45^\circ$, $R_a = 0,2 \mu\text{m}$, materiál 34Cr4
- 2) Deska: $135 \times 50 \times 8$ s drsností $R_a = 0,25 \mu\text{m}$ a z materiálu S235JRG1

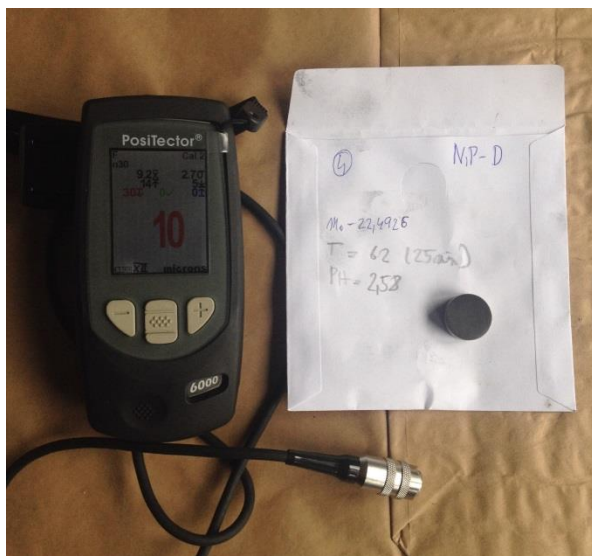


Obr. 20. Tribometr TOP 3 – funkční dvojice a schéma měření.



Obr. 21. Tribometr TOP 3.

Dále bylo zapotřebí dalších přístrojů k vyhodnocení pokovených vzorků. Ke stanovení tloušťky povlaku u testů vylučovacích rychlostí a k výběru tablet pro tribologické zkoušení na přístroji Tribometr TOP 3 byl za potřebí přístroj pro měření tloušťky povlaku PosiTector 6000.



Obr. 22 a 23. Digitální měřič tloušťky vrstev a dvojice vah (analytické a digitální).

Také pro sledování úbytků hmotnosti jednotlivých povlaků bylo zapotřebí dvojic vah. Nejprve došlo k hrubému zvážení na váhách digitálních a pak k přesnějšímu doměření na váhách analytických Mettler.

3.3 Výroba lázně a její nasazení

Lázeň Nikl - Fosfor je základní součást všech lázní sloužících k vylučování nanokompozitních a mikrokompozitních povlaků v tomto experimentu. Pro experiment byla použita niklovací lázeň, kde výrobce uvádí obsah fosforu cca 12 % a tvrdost výsledného povlaku až 550 HV_{0,05}.

Lázeň byla namíchána postupně ze základních složek podle návodu výrobce:

1.	Destilovaná (demineralizovaná) voda	5 l
2.	Nasazovací koncentrát 1	4 l
3.	Nasazovací koncentrát 2	1 l
4.	Síran nikelnatý (rozpustíme v elektrolytu)	3,8 kg
5.	Leskutvorné přísady	0,1 l

Tab. 7. Postup výroby 10 l niklovací lázně.

Ke smíchání jednotlivých složek koncentrátů a síranu nikelnatého byla použita elektromagnetická míchačka a nádoba o objemu 5 l. Potřebná teplota (slouží ke snazšímu rozpuštění síranu nikelnatého) je okolo 60 °C. Pro větší objemy lázní by bylo vhodnější větší mísící zařízení, popřípadě lázeň vytvářet přímo ve vaně za stálého proudění elektrolytu. Výše uvedený postup je třeba dodržet nebo dojde ke znehodnocení (zgelovatění) elektrolytu. V případě, že se tak stane, lze docílit původního stavu přidáním nasazovacího koncentráту 2 a ohřátím lázně.

Parametry nasazení lázně a její údržba:

Hodnota pH	2,6 (2,5 – 2,7)
Teplota	60 °C (55 – 60 °C)
Proudová hustota	4 A na 1 dm ²
Rychlost vylučování	0,4 μm za 1min při 4 A na 1 dm ²

Tab. 8. Pracovní podmínky niklovací lázně.

Povlak	Ni – P	
Složení:	Nikl	87 - 89 hm. %
	Fosfor	11 - 13 hm. %
Tvrdost	550 – 600 HV _{0,05}	
Otěr	2 mg na 1 000 zdvihů	

Tab. 9. Výrobce lázně udávaná charakteristika povlaku.

Doplňování lázně provádíme pomocí doplňovacího roztoku a leskutvorné přísady. Korekci koncentrace lázně provádíme pomocí síranu nikelnatého (NiSO₄ x 7 H₂O). Pro korekci pH využíváme kyselinu sírovou 94 – 98% (chem. čistá) pro snížení a pro zvýšení pH použijeme NaOH (5% roztok).

Parametry lázně byly nastaveny přesně podle specifikací výrobce. Pokovovací proud byl dle rozměrů pokovovaných tablet vypočítán na I = 0,5 A. Při tomto proudu lze vyloučit povlak o tloušťce cca 10 μm přibližně za dobu 25 min.

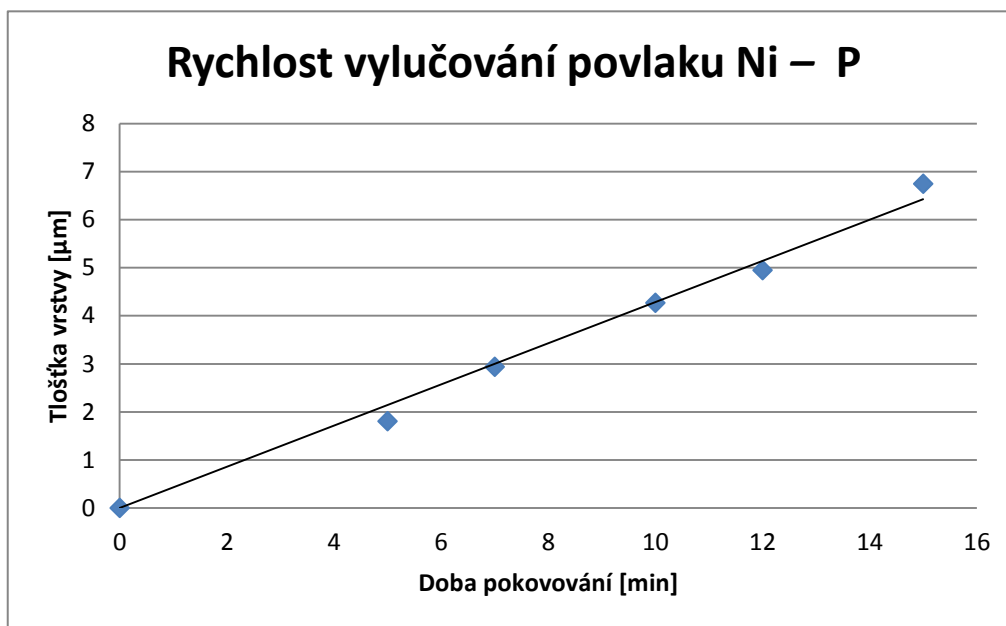
3.4 Slitinový povlak Ni – P

3.4.1 Vylučovací rychlost povlaku

K měření vylučovací rychlosti povlaků Ni – P bylo využito zkušebního zařízení pro tvorbu povlaku (obr. č. 18). Povlakované součásti byly standartní Qpanely, na kterých je měření pomocí přístroje Positector 6000 nejpřesnější. Změřené výsledky odpovídají rozsahu vykazovaným výrobcem.

Čas v lázni [min]	5	7	10	12	15
Tloušťka povlaku [μm]	1,8	2,9	4,3	4,9	6,7

Tab. 10. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P na expoziční době pokovování.



Graf 1. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P na expoziční době pokovování.

3.4.2 Tribologické vlastnosti povlaku Ni – P

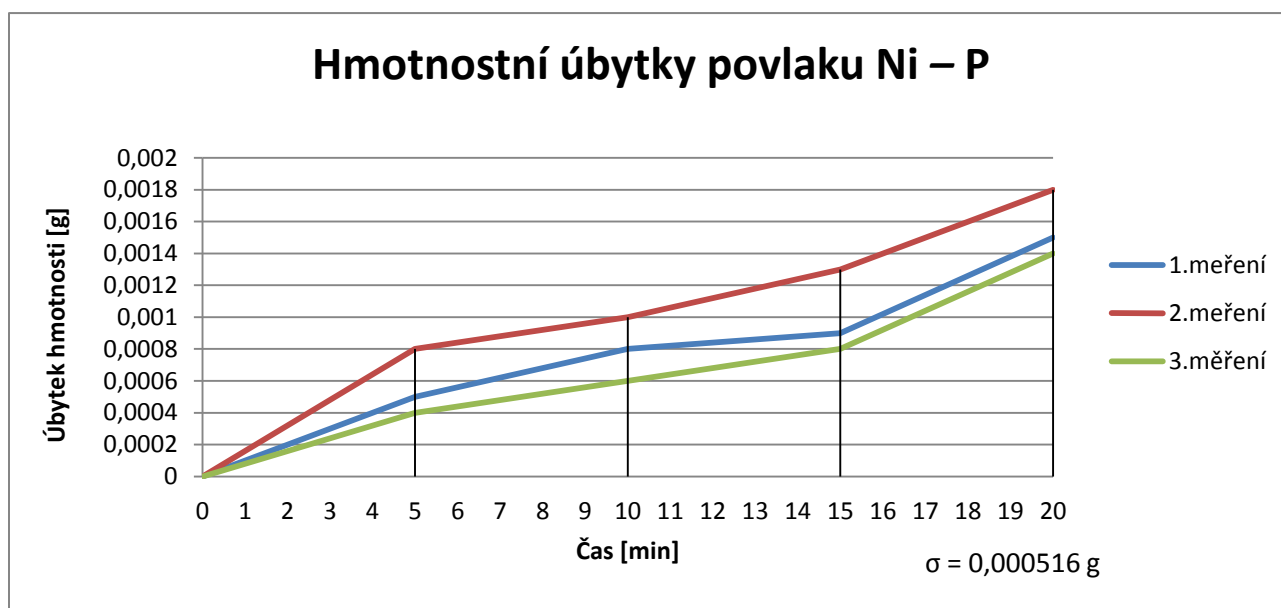
Tribologické vlastnosti byly testovány na přístroji Tribometr TOP 3 s normálovým zatížením 1 kg. Dále mimo koeficientů tření byl sledován i hmotnostní úbytek. Jako časový interval pro všechny měření bylo stanoveno 5 minut. Pro SEM mikroskopii a tribologické měření byly pokoveny 4 tablety z toho vybrány 2 tablety s optimální tloušťkou povlaku. Směrodatná odchylka měření úbytku hmotnosti byla 0,000516 g.

Tableta č.	t [min]	Teplota [°C]	J [A.dm ⁻²]	I [A]	pH	Ra [μm]	m ₀	hp [μm]
1.	25	56	4	0,4	2,55	0,20	18,883	10,2
2.	25	55	4	0,4	2,56	0,22	18,890	11,0

Tab. 11. Vybrané tablety Ni – P a jejich parametry.

Tableta č.	m ₀ [g]	m ₅ [g]	m ₁₀ [g]	m ₁₅ [g]	m ₂₀ [g]	úbytek po 5 min [g]	úbytek po 10 min [g]	úbytek po 15 min [g]	úbytek po 20 min [g]
1.	18,883	18,8825	18,8822	18,8821	18,8815	0,0005	0,0008	0,0009	0,0015
2.	18,8825	18,8817	18,8815	18,8812	18,8807	0,0008	0,0010	0,0013	0,0018
3.	18,89	18,8896	18,8894	18,8892	18,8886	0,0004	0,0006	0,0008	0,0014

Tab. 12. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P v čase na Tribometru TOP 3.

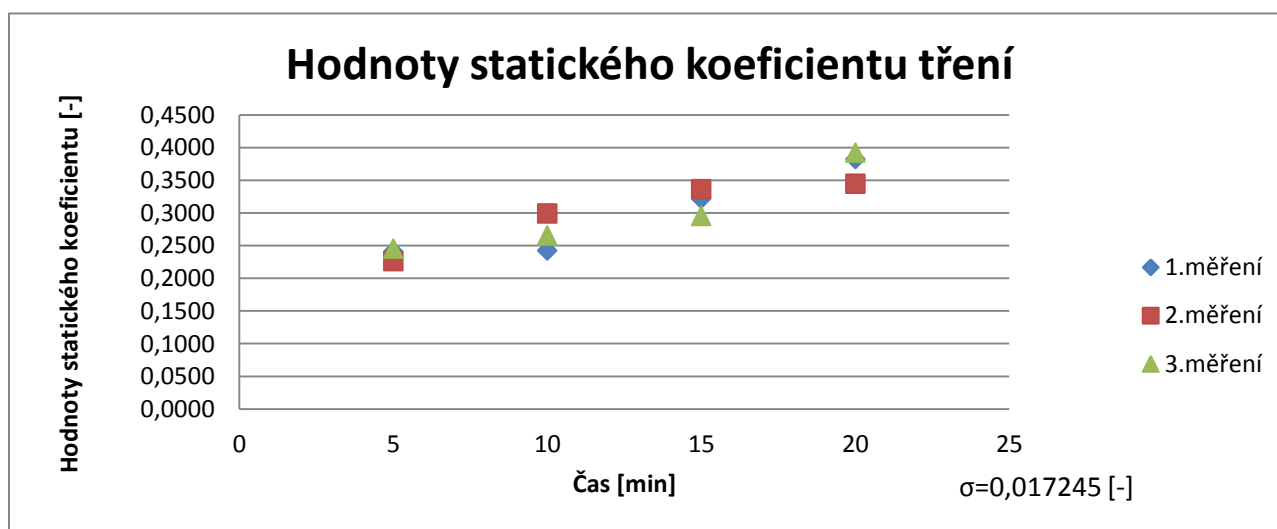


Graf 2. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P v závislosti na čase testování.

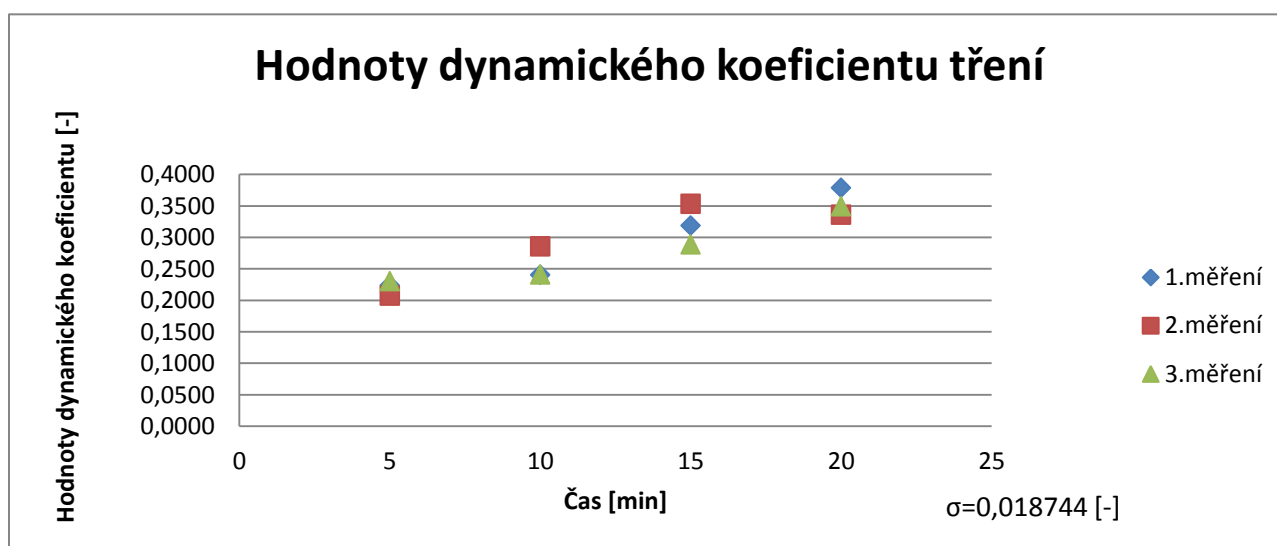
Pro získání statického a dynamického koeficientu tření bylo použito tribometru TOP 3. Směrodatná odchylka měření statického koeficientu tření je 0,017245 a dynamického 0,018744.

Měření	Koeficient tření 5 min		Koeficient tření 10 min		Koeficient tření 15 min		Koeficient tření 20 min	
	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]
1.	0,2408	0,2235	0,2423	0,2405	0,3219	0,3185	0,3824	0,3786
2.	0,2261	0,2073	0,2991	0,2856	0,3364	0,3530	0,3446	0,3359
3.	0,2453	0,2301	0,2655	0,2410	0,2954	0,2884	0,3921	0,3490

Tab. 13. Koeficienty tření u povlaku Ni – P v čase.



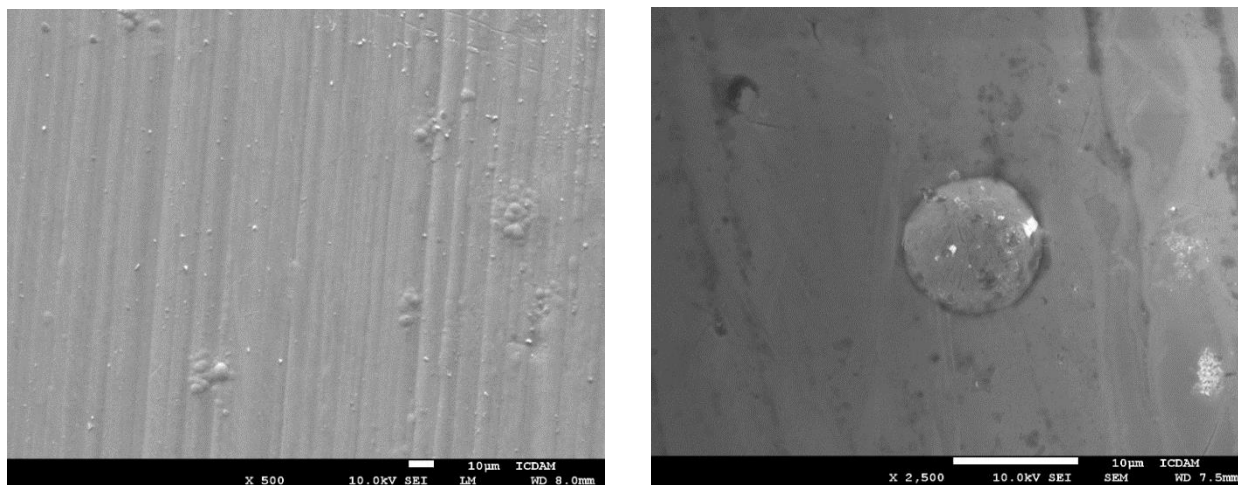
Graf 3. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Ni – P.



Graf 4. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Ni – P.

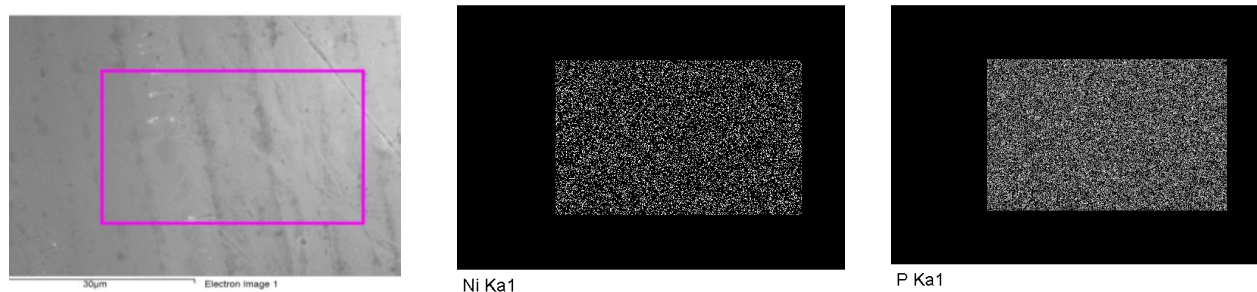
3.4.3 SEM mikroskopie povlaku Ni – P

Pro ověření povlaku bylo použito technologie SEM mikroskopie. Tato technologie umožňuje také zjištění chemického složení povlaku, což je příhodné u slitinových a kompozitních povlaků. Pro toto ověření byl použit přístroj JEOL JSM-7610F s rozlišovací schopností až 0,8 nm a zvětšením 1 000 000 ×, vybavený energo – disperzním spektrometrem s detektorem X-Man 20 mm².

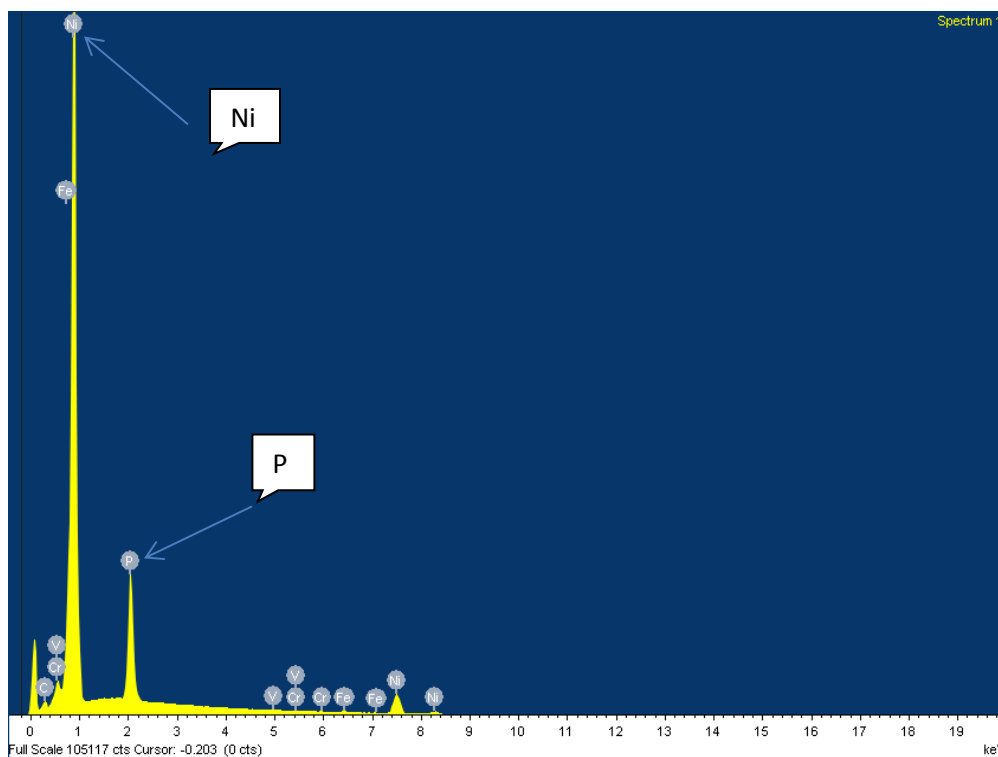


Obr. č 24 a 25. SEM snímky povlaku Ni – P s viditelným Fosforem v povlaku.

Na vybrané obdélníkové oblasti je pomocí energo – disperzního spektrometru zkoumáno zastoupení jednotlivými prvky.



Obr. č. 26, 27, 28. SEM snímky chemického složení oblasti povlaku Ni – P.



Obr. č. 29. SEM spektrogram chemického složení oblasti povlaku Ni – P.

Na obrázcích je jasně patrná přítomnost povlaku Ni – P. Niklová matrice plošného charakteru s kruhovými výstupky fosforu byla potvrzena pomocí spektrometrie, kdy byl její výskyt potvrzen na obdélníkové vybrané oblasti a dále byla přítomnost fosforu prokázána oblastí v spektrogramu chemického složení povlaku.

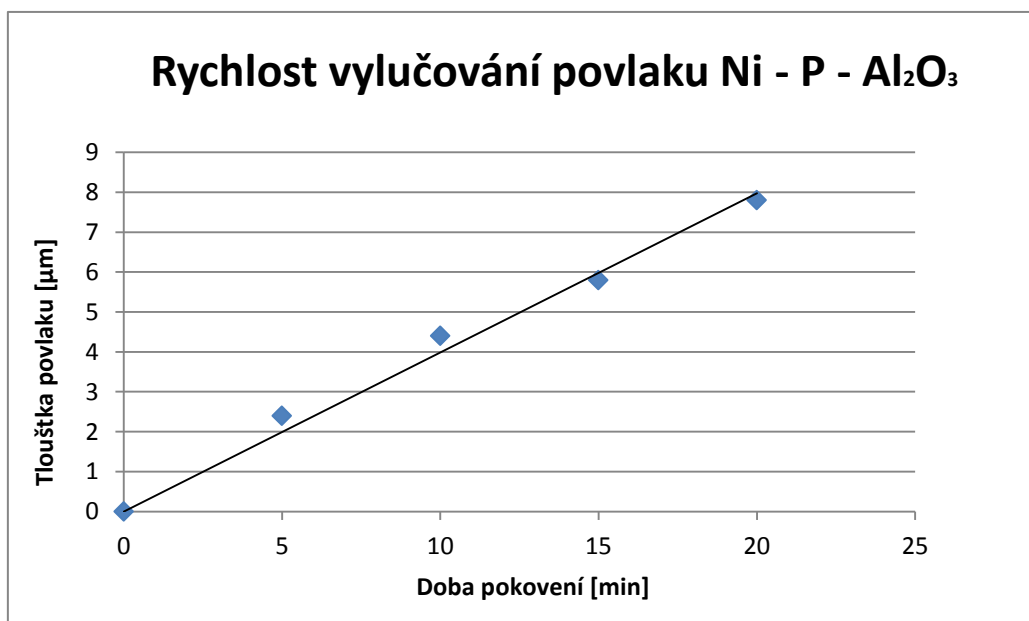
3.5 Kompozitní povlak Ni – P – Al₂O₃

3.5.1 Vylučovací rychlost povlaku

K měření vylučovací rychlosti povlaků Ni – P – Al₂O₃ bylo opět využito stejné zařízení pro tvorbu povlaku se stejným postupem vyhodnocení za pomoci stejných přístrojů. Byla použita standartní vyrobená niklovací lázeň a do ní bylo rozdispergováno množství mikročástic Al₂O₃ tak, aby byla dodržena koncentrace 10 gl⁻¹, která je pro srovnání výsledků a pro všechny další vytvořené povlaky stejná. Pro všechny následující kompozitní povlaky bylo stanoveno měření tloušťky povlaků po 5 minutách.

Plech č.	Doba [min]	Tloušťka povlaku[μm]
1.	5	2,4
2.	10	4,4
3.	15	5,8
4.	20	7,8

Tab. 14. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – Al₂O₃ na expoziční době pokovování.



Graf 5. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – Al₂O₃ na expoziční době pokovování.

3.5.2 Tribologické vlastnosti povlaku Ni – P – Al₂O₃

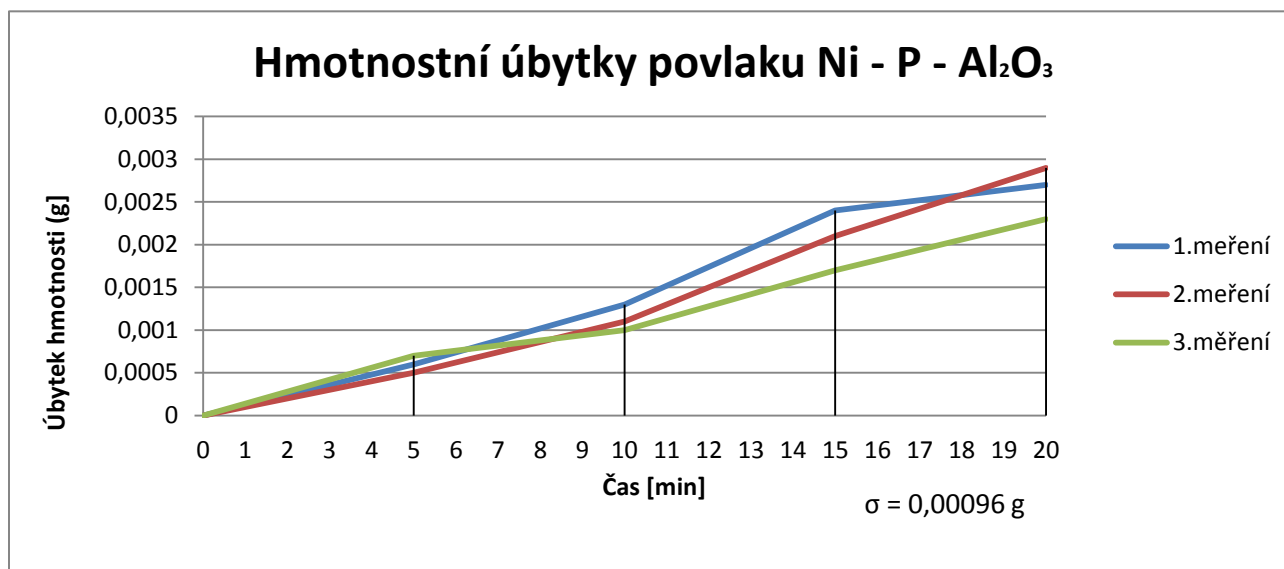
Tribologické vlastnosti byly testovány opět na přístroji Tribometr TOP 3 s normálovým zatížením 1 kg a se stejnými časovými a dalšími parametry. Směrodatná odchylka měření úbytku hmotnosti byla 0,00096 g.

Tableta č.	t [min]	Teplota [°C]	J [A.dm ⁻²]	I [A]	pH	Ra [μm]	m ₀	hp [μm]
1.	25	55	4	0,4	2,7	0,20	18,8945	10,8
2.	25	57	4	0,4	2,65	0,21	18,8477	10,4

Tab. 15. Vybrané tablety Ni – P – Al₂O₃ a jejich parametry.

Meření č.	m ₀ [g]	m ₅ [g]	m ₁₀ [g]	m ₁₅ [g]	m ₂₀ [g]	úbytek po 5 min [g]	úbytek po 10 min [g]	úbytek po 15 min [g]	úbytek po 20 min [g]
1.	18,8945	18,8939	18,8932	18,8921	18,8918	0,0006	0,0013	0,0024	0,0027
2.	18,892	18,8915	18,8909	18,8899	18,8891	0,0005	0,0011	0,0021	0,0029
3.	18,8477	18,847	18,8467	18,846	18,8454	0,0007	0,0010	0,0017	0,0023

Tab. 16. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – Al₂O₃ v čase na Tribometru TOP 3.

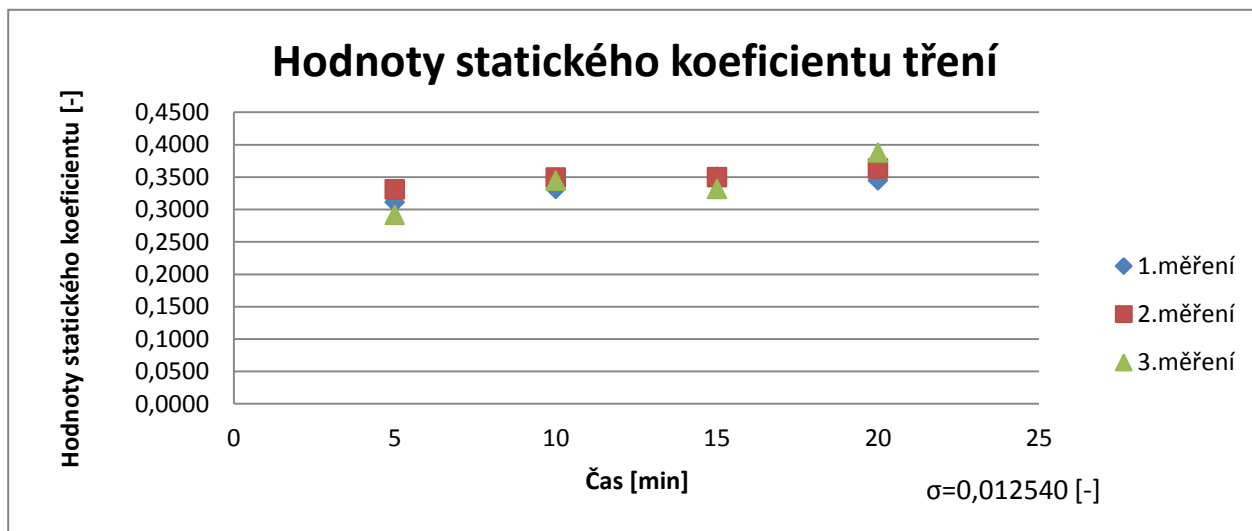


Graf 6. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – Al₂O₃ v závislosti na čase testování.

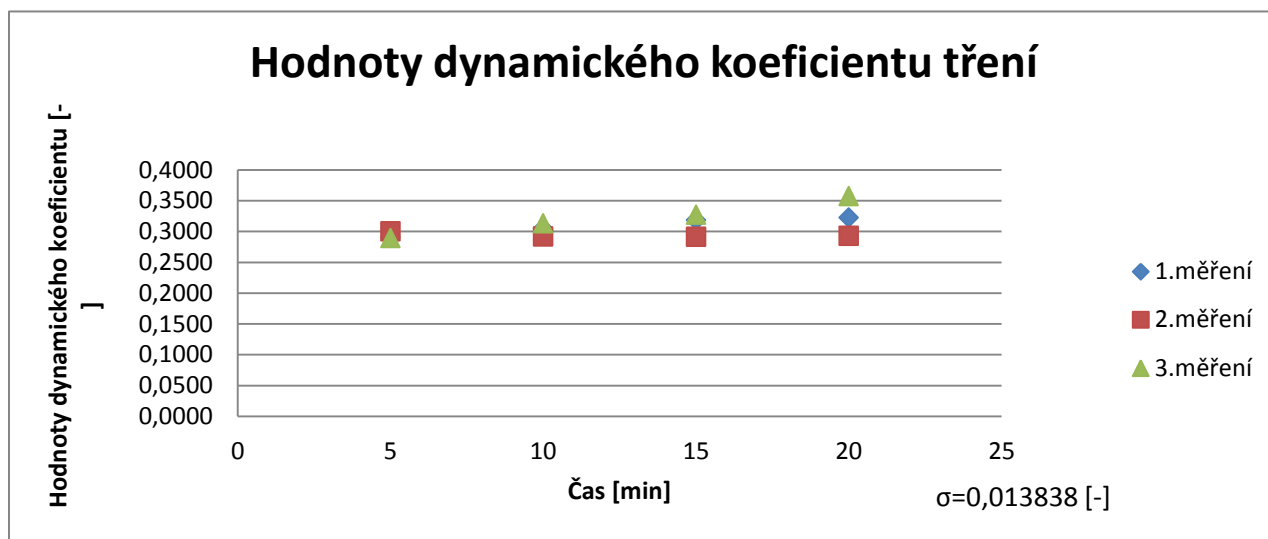
Pro získání statického a dynamického koeficientu tření bylo opět použito tribometru TOP 3. Směrodatná odchylka měření statického koeficientu tření je 0,012540 a dynamického 0,013838.

Měření č.	Koeficient tření 5 min		Koeficient tření 10 min		Koeficient tření 15 min		Koeficient tření 20 min	
	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]
1.	0,3112	0,2901	0,3316	0,3046	0,3501	0,3180	0,3445	0,3221
2.	0,3311	0,3001	0,3494	0,2917	0,3499	0,2912	0,3628	0,2925
3.	0,2914	0,2889	0,3443	0,3129	0,3315	0,3270	0,3878	0,3571

Tab. 17. Koeficienty tření u povlaku Ni – P – Al₂O₃ v čase.



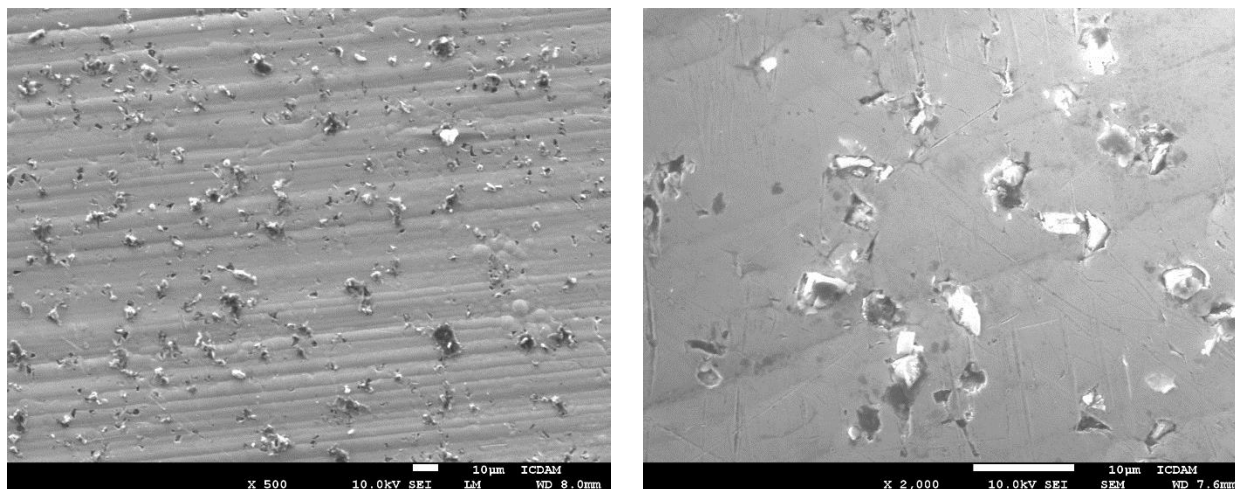
Graf 7. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Ni – P – Al₂O₃.



Graf 8. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Ni – P – Al₂O₃.

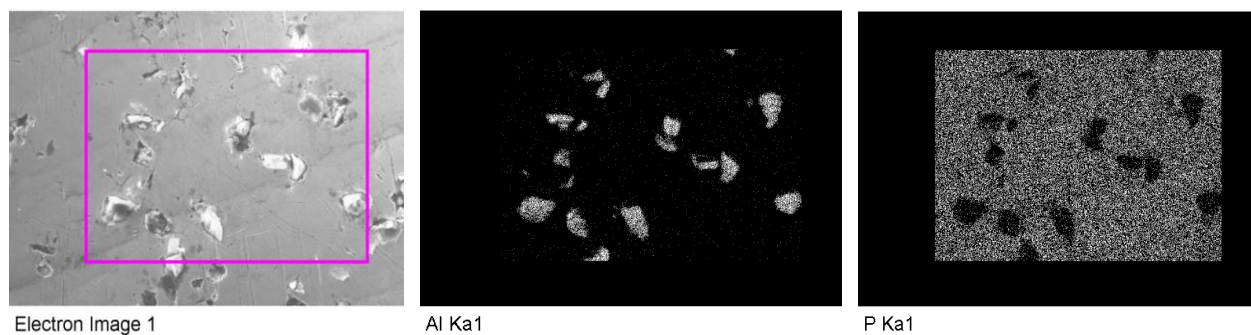
3.5.3 SEM mikroskopie povlaku $Ni - P - Al_2O_3$

Pro ověření povlaku bylo opět použito stejné technologie SEM mikroskopie. Cílem je u tohoto povlaku prokázat přítomnost prvku hliníku, neboť je nedílnou součástí částic korundu (Al_2O_3).

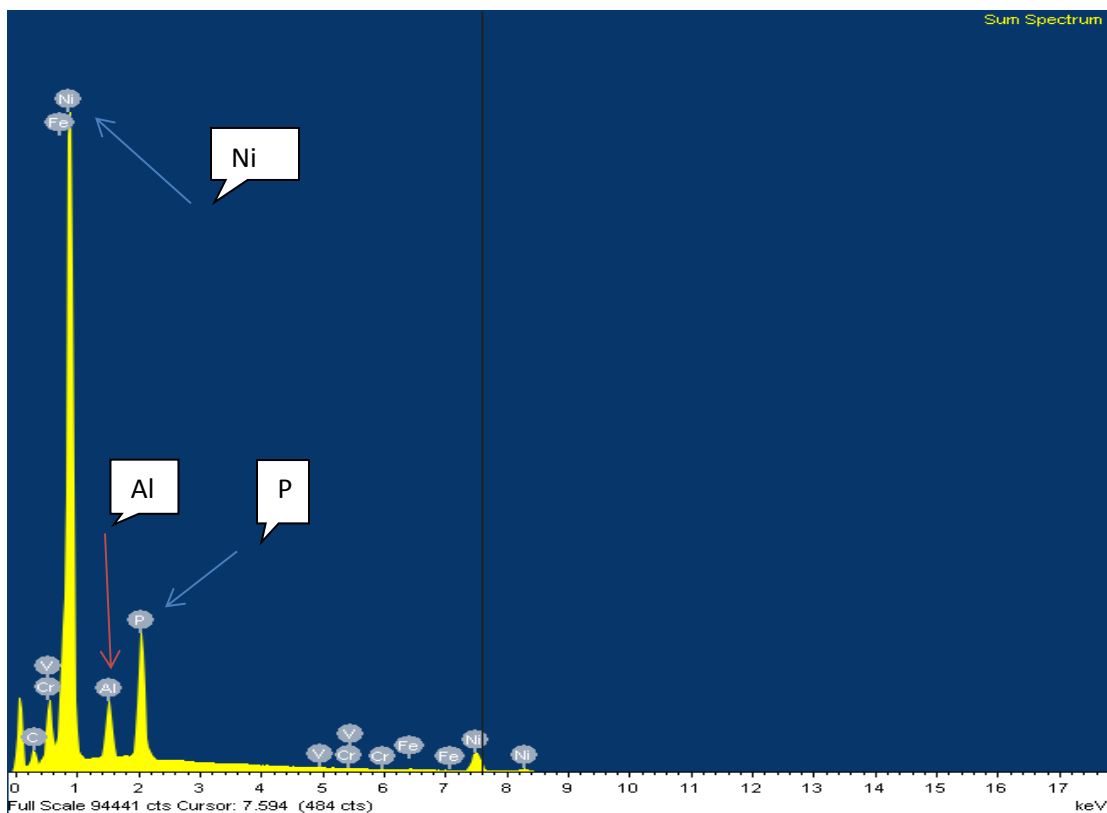


Obr. č. 30 a 31. SEM snímky povlaku $Ni - P - Al_2O_3$ s viditelným korundem v povlaku.

Na vybrané obdélníkové oblasti je pomocí energo – disperzního spektrometru zkoumáno zastoupení jednotlivými charakteristickými prvky.



Obr. č 32, 33, 34. SEM snímky chemického složení oblasti povlaku $Ni - P - Al_2O_3$.



Obr. č. 35. SEM spektrogram chemického složení oblasti povlaku Ni – P – Al₂O₃.

Na obrázcích vytvořených pomocí SEM mikroskopu je jasně patrná přítomnost povlaku Ni – P – Al₂O₃. Niklová matrice obsahuje fosfor a dále byla potvrzena přítomnost částic korundu (Al₂O₃), kde byl jeho výskyt potvrzen na obdélníkové vybrané oblasti přítomností prvku hliníku v útvarech (částicích) korundu.

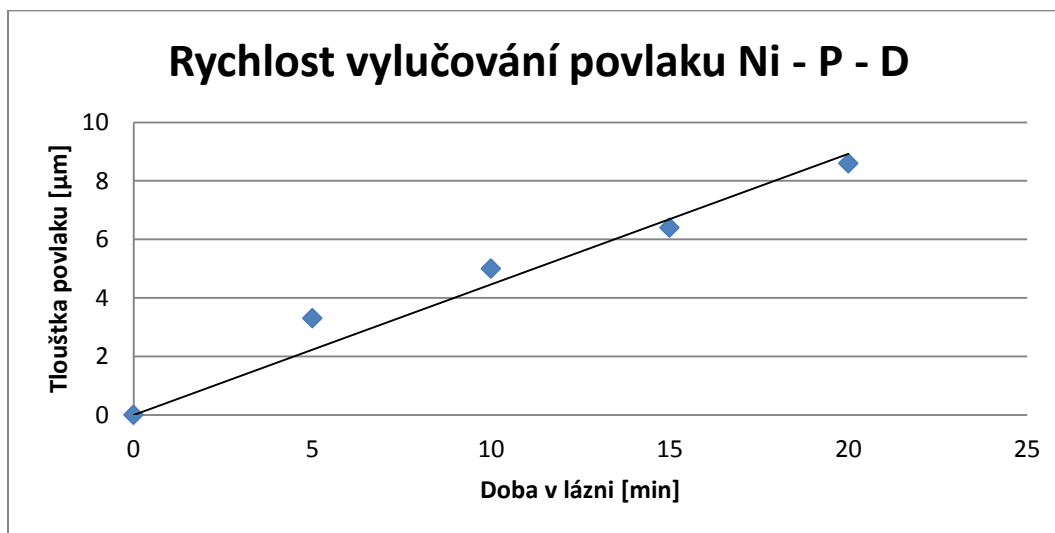
3.6 Kompozitní povlak Ni – P – D

3.6.1 Vylučovací rychlost povlaku

Měření vylučovací rychlosti povlaků Ni – P – D bylo provedeno a vyhodnoceno za pomoci stejných přístrojů. Byla použita standartní otestovaná niklovací lázeň a do ní bylo rozdispergováno množství mikročástic syntetického diamantu tak, aby byla dodržena koncentrace 10 g l^{-1} . Dispergace probíhala ručně, ultrazvukového homogenizátoru nebylo zapotřebí.

Plech č.	Doba [min]	Tloušťka vrstvy [μm]
1.	5	4,4
2.	10	5
3.	15	6,4
4.	20	8,6

Tab. 18. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – D na expoziční době pokovování.



Graf 9. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – D na expoziční době pokovování.

3.6.2 Tribologické vlastnosti povlaku Ni – P – D

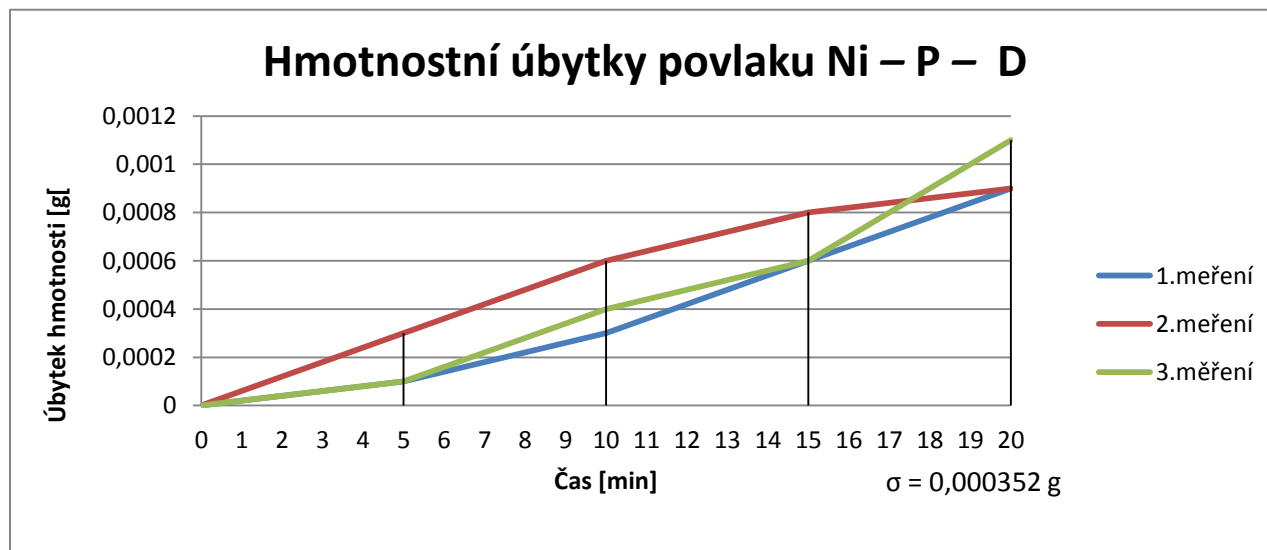
Tribologické vlastnosti byly testovány opět na přístroji Tribometr TOP 3 s normálovým zatížením 1 kg a se stejnými časovými a dalšími parametry. Směrodatná odchylka měření úbytku hmotnosti u povlaku obsahujícím diamantové částice byla 0,000352 g.

Tableta č.	t [min]	Teplota [°C]	J [A.dm ⁻²]	I [A]	pH	Ra [μm]	m ₀	hp [μm]
1.	25	54	4	0,4	2,55	0,21	18,8537	11,2
2.	25	57	4	0,4	2,59	0,19	18,8479	10,9

Tab. 19. Vybrané tablety Ni – P – D a jejich parametry.

Měření č.	m0 [g]	m5 [g]	m10 [g]	m15 [g]	m20 [g]	úbytek po 5 min [g]	úbytek po 10 min [g]	úbytek po 15 min [g]	úbytek po 20 min [g]
1.	18,8537	18,8536	18,8534	18,8531	18,8528	0,0001	0,0003	0,0006	0,0009
2.	18,8479	18,8476	18,8473	18,8471	18,847	0,0003	0,0006	0,0008	0,0009
3.	18,8461	18,846	18,8457	18,8455	18,845	0,0001	0,0004	0,0006	0,0011

Tab. 20. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – D v čase na Tribometru TOP 3.

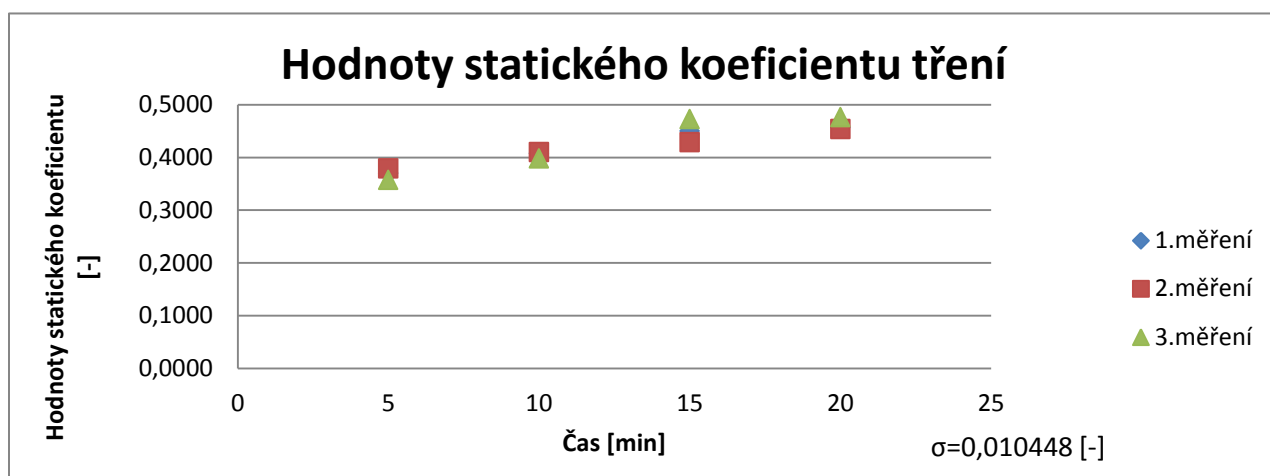


Graf 10. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – D v závislosti na čase testování.

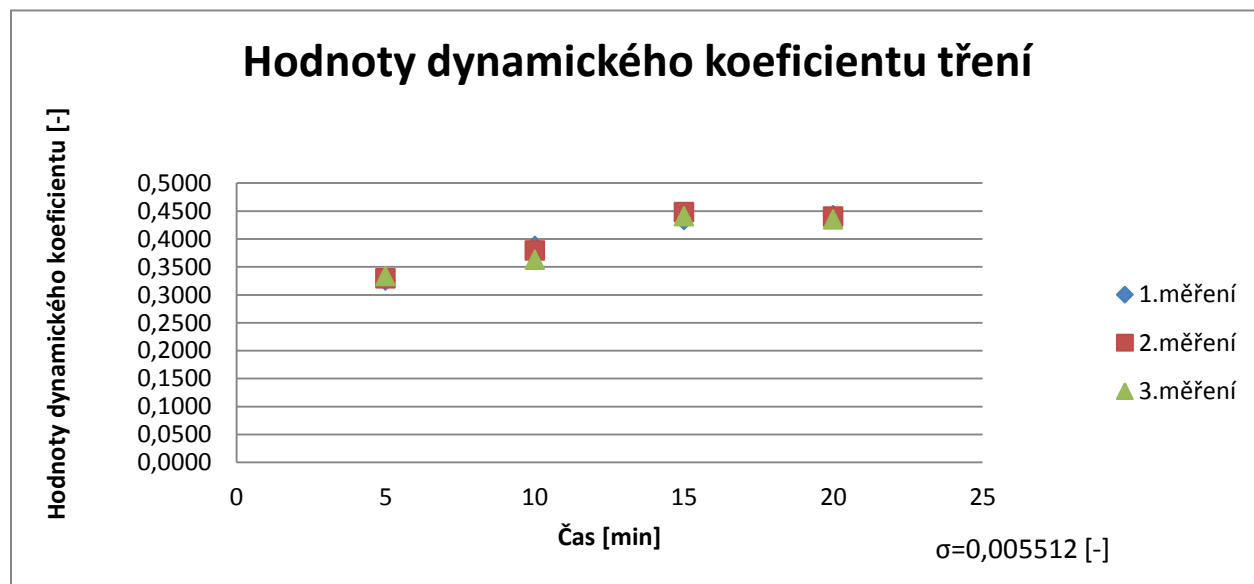
Pro získání statického a dynamického koeficientu tření bylo opět použito tribometru TOP 3. Směrodatná odchylka měření statického koeficientu tření je 0,010448 a dynamického 0,005512.

Měření č.	Koeficient tření 5 min		Koeficient tření 10 min		Koeficient tření 15 min		Koeficient tření 20 min	
	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]
1.	0,3695	0,3255	0,4075	0,3869	0,4499	0,4335	0,4568	0,4422
2.	0,3788	0,3291	0,4096	0,3788	0,4288	0,4476	0,4535	0,4399
3.	0,3572	0,3333	0,3978	0,3627	0,4726	0,4405	0,4760	0,4349

Tab. 21. Koeficienty tření u povlaku Ni – P – D v čase.



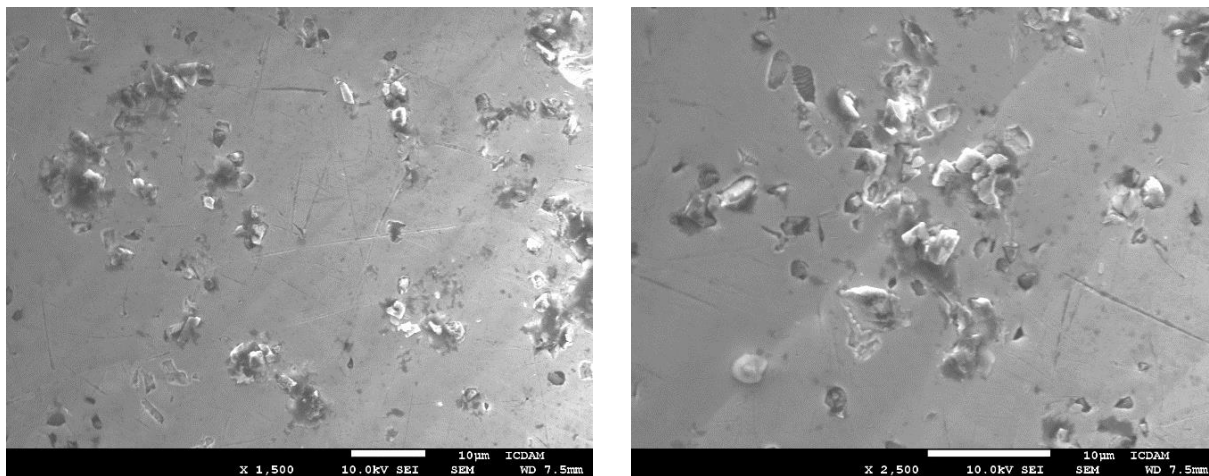
Graf 11. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Ni – P – D.



Graf 12. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Ni – P – D.

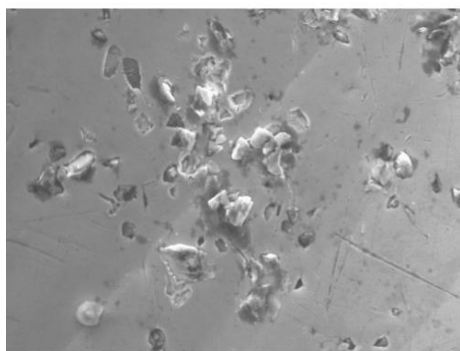
3.6.3 SEM mikroskopie povlaku Ni – P - D

Pro ověření povlaku bylo použito stejné technologie SEM mikroskopie. Cílem je u tohoto povlaku prokázat přítomnost uhlíku, jakožto stavebního prvku u diamantu.

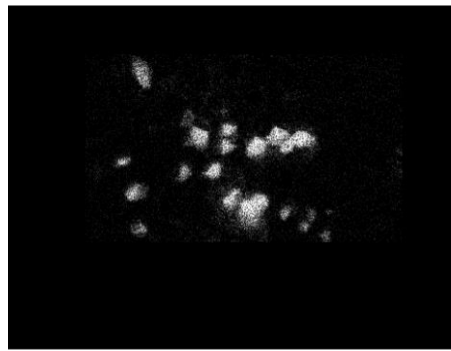


Obr. č. 36 a 37. SEM snímky povlaku Ni – P – D s viditelnými částicemi diamantu v povlaku.

Na vybrané obdélníkové oblasti je pomocí energo – disperzního spektrometru zkoumáno zastoupení jednotlivými charakteristickými prvky.

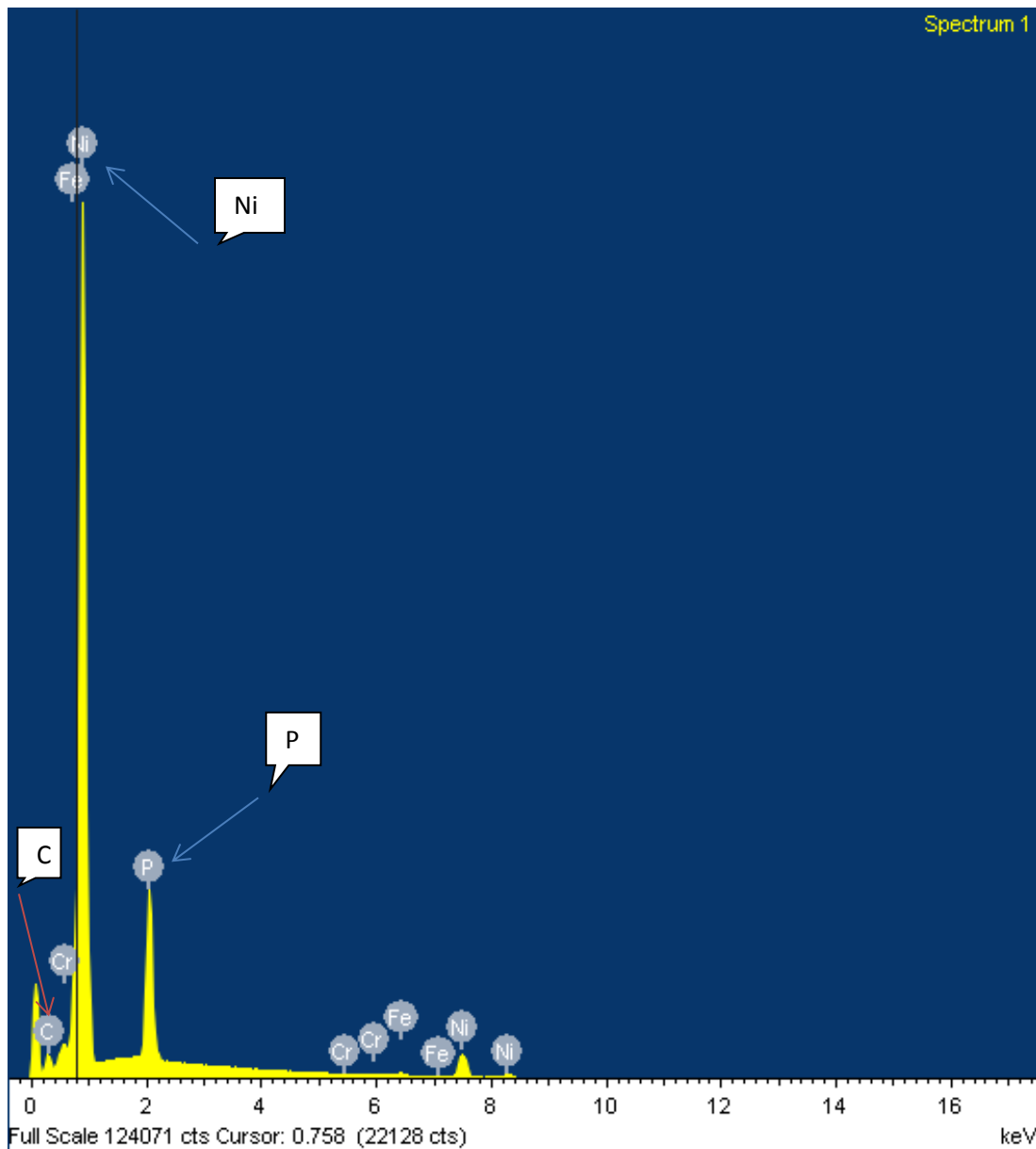


Electron Image 1



C Ka1_2

Obr. č. 38 a 39. SEM snímky chemického složení oblasti povlaku Ni – P – D s důrazem na přítomnost uhlíku.



Obr. č. 40. SEM spektrogram chemického složení oblasti povlaku Ni – P – D

Na snímcích vytvořených pomocí SEM mikroskopu je jasně patrná přítomnost povlaku Ni – P – D. Niklová matrice obsahuje fosfor a dále byla potvrzena přítomnost prvku uhlíku. Což potvrzuje přítomnost diamantových částic v povlaku.

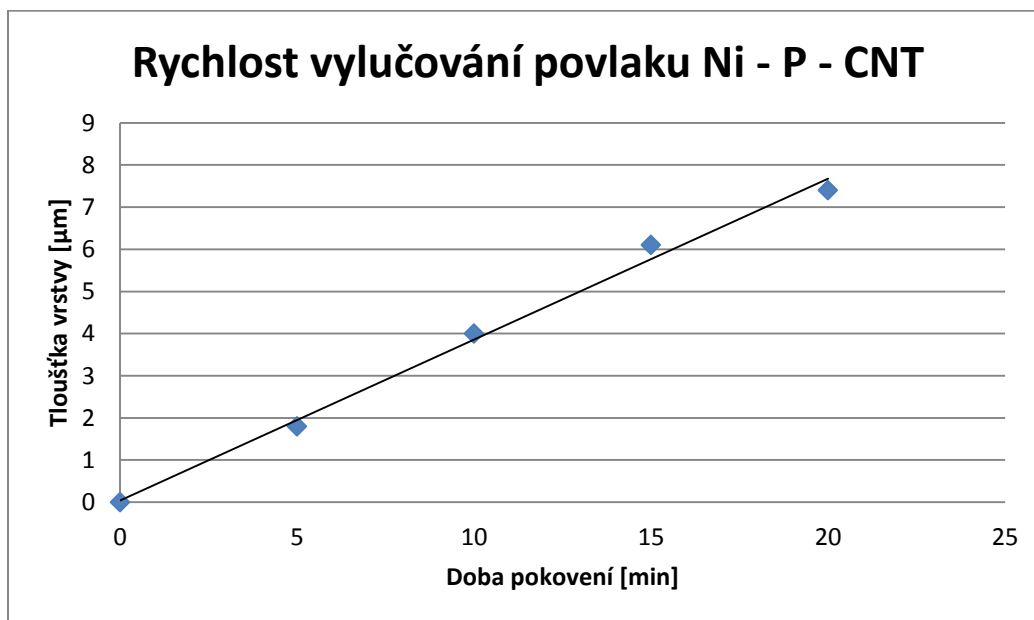
3.7 Kompozitní povlak Ni – P – CNT

3.7.1 Vylučovací rychlost povlaku

Vylučovací rychlost povlaků Ni – P – CNT byla změřena za pomoci stejných přístrojů a podmínek jako předchozí povlaky. Byla použita standartní zavedená niklovací lázeň a do ní bylo rozdispergováno množství částic nanotrubic uhlíku, tak, aby byla dodržena koncentrace 10 g l^{-1} . Dispergace probíhala pomocí ultrazvukové sondy.

Plech č.	Doba [min]	Tloušťka vrstvy [μm]
1.	5	1,8
2.	10	4
3.	15	6,1
4.	20	7,4

Tab. 22. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – CNT na expoziční době pokovování.



Graf 13. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – CNT na expoziční době pokovování.

3.7.2 Tribologické vlastnosti povlaku Ni – P – CNT

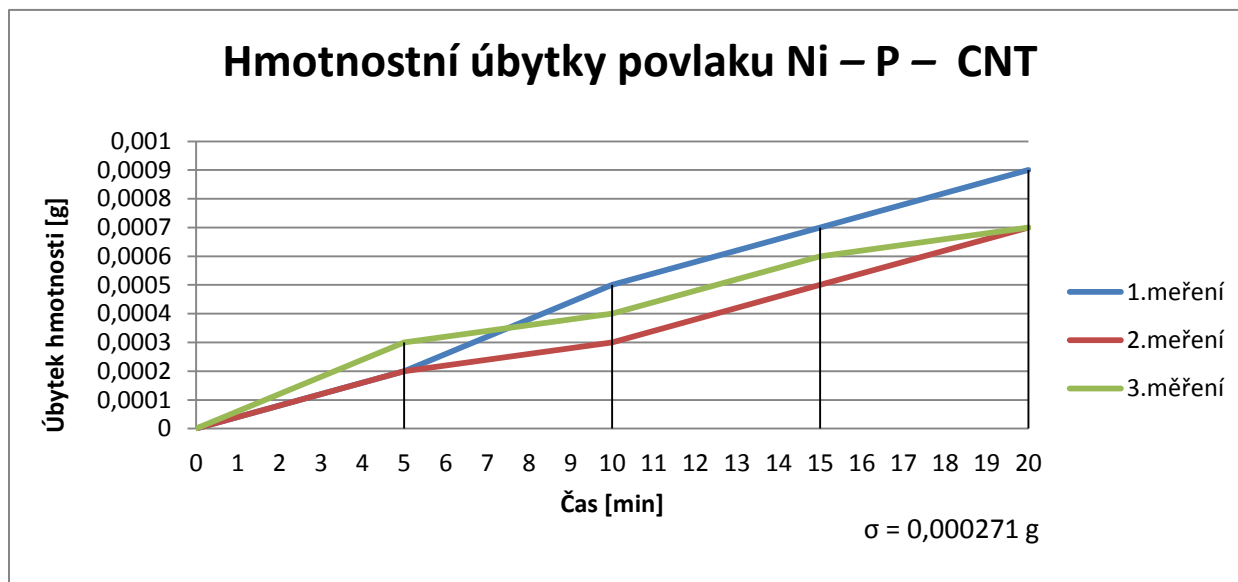
Tribologické hodnoty byly získány opět na přístroji Tribometr TOP 3 s normálovým zatížením 1 kg a se stejnými časovými parametry. Směrodatná odchylka měření úbytku hmotnosti u povlaku obsahujícím uhlíkové nanotrubičky byla 0,000271 g.

Tableta č.	t [min]	Teplota [°C]	J [A.dm ⁻²]	I [A]	pH	Ra [μm]	m ₀	hp [μm]
1.	25	55	4	0,4	2,52	0,20	18,4635	11,2
2.	25	55	4	0,4	2,59	0,20	18,4485	10,9

Tab. 23. Vybrané tablety Ni – P – CNT a jejich parametry.

Meření č.	m0 [g]	m5 [g]	m10 [g]	m15 [g]	m20 [g]	úbytek po 5 min [g]	úbytek po 10 min [g]	úbytek po 15 min [g]	úbytek po 20 min [g]
1.	18,4635	18,4633	18,463	18,4628	18,4626	0,0002	0,0005	0,0007	0,0009
2	18,4487	18,4485	18,4484	18,4482	18,448	0,0002	0,0003	0,0005	0,0007
3	18,4485	18,4482	18,4481	18,4479	18,4478	0,0003	0,0004	0,0006	0,0007

Tab. 24. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – CNT v čase na Tribometru TOP 3.

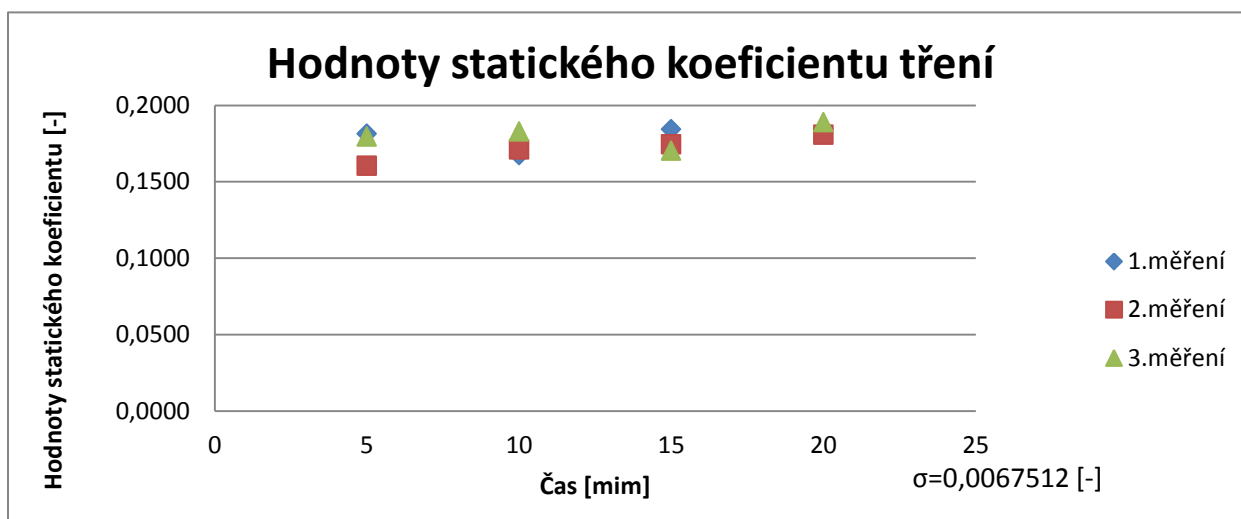


Graf 14. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – CNT v závislosti na čase testování.

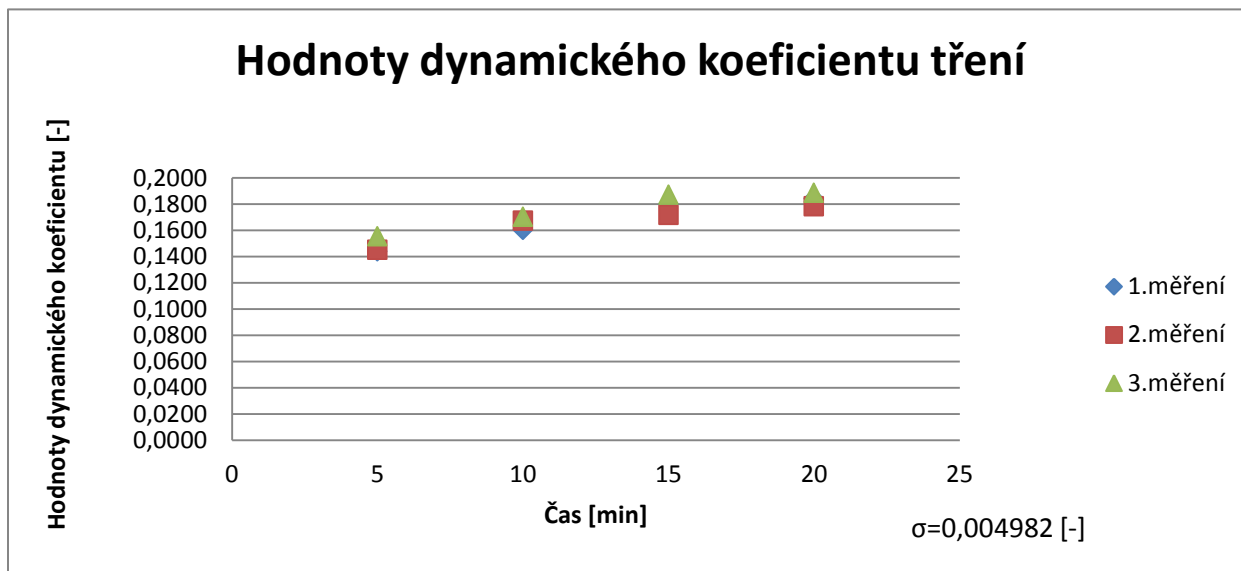
Pro získání koeficientů tření bylo použito tribometru TOP 3. Směrodatná odchylka měření statického koeficientu tření je 0,00067512 a dynamického 0,004982.

Měření	Koeficient tření 5 min		Koeficient tření 10 min		Koeficient tření 15 min		Koeficient tření 20 min	
	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]
1.	0,1814	0,1437	0,1674	0,1602	0,1844	0,1799	0,1845	0,1841
2.	0,1604	0,1451	0,1711	0,1673	0,1744	0,1716	0,1808	0,1782
3.	0,1794	0,1554	0,1828	0,1702	0,1890	0,1870	0,1925	0,1885

Tab. 25. Koeficienty tření u povlaku Ni – P – CNT v čase.



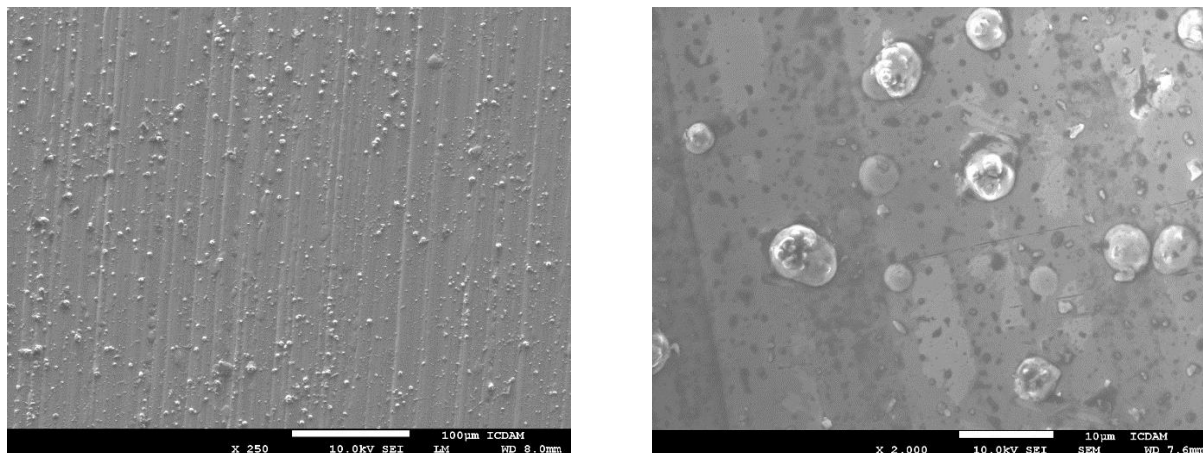
Graf 15. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Ni – P – CNT.



Graf 16. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Ni – P – CNT.

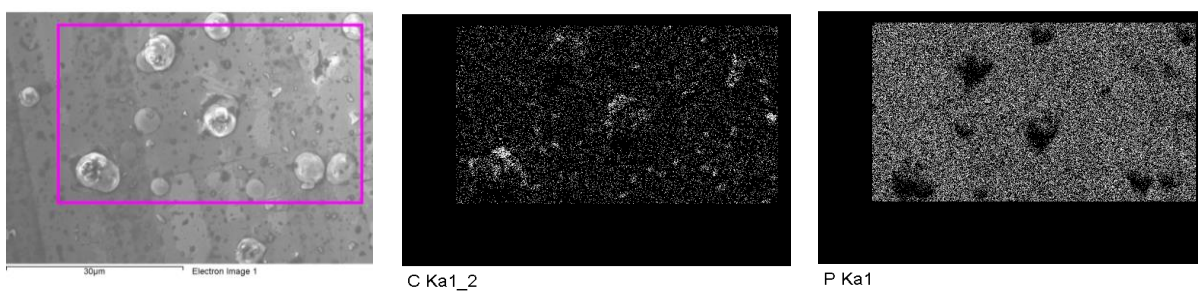
3.7.3 SEM mikroskopie povlaku Ni – P – CNT

Pro ověření existence kompozitního povlaku bylo opět použito stejné technologie SEM mikroskopie. Cílem je u tohoto povlaku prokázat přítomnost uhlíku, jakožto jediného prvku u CNT („Carbon nanotubes – uhlíkové nanotrubičky“).

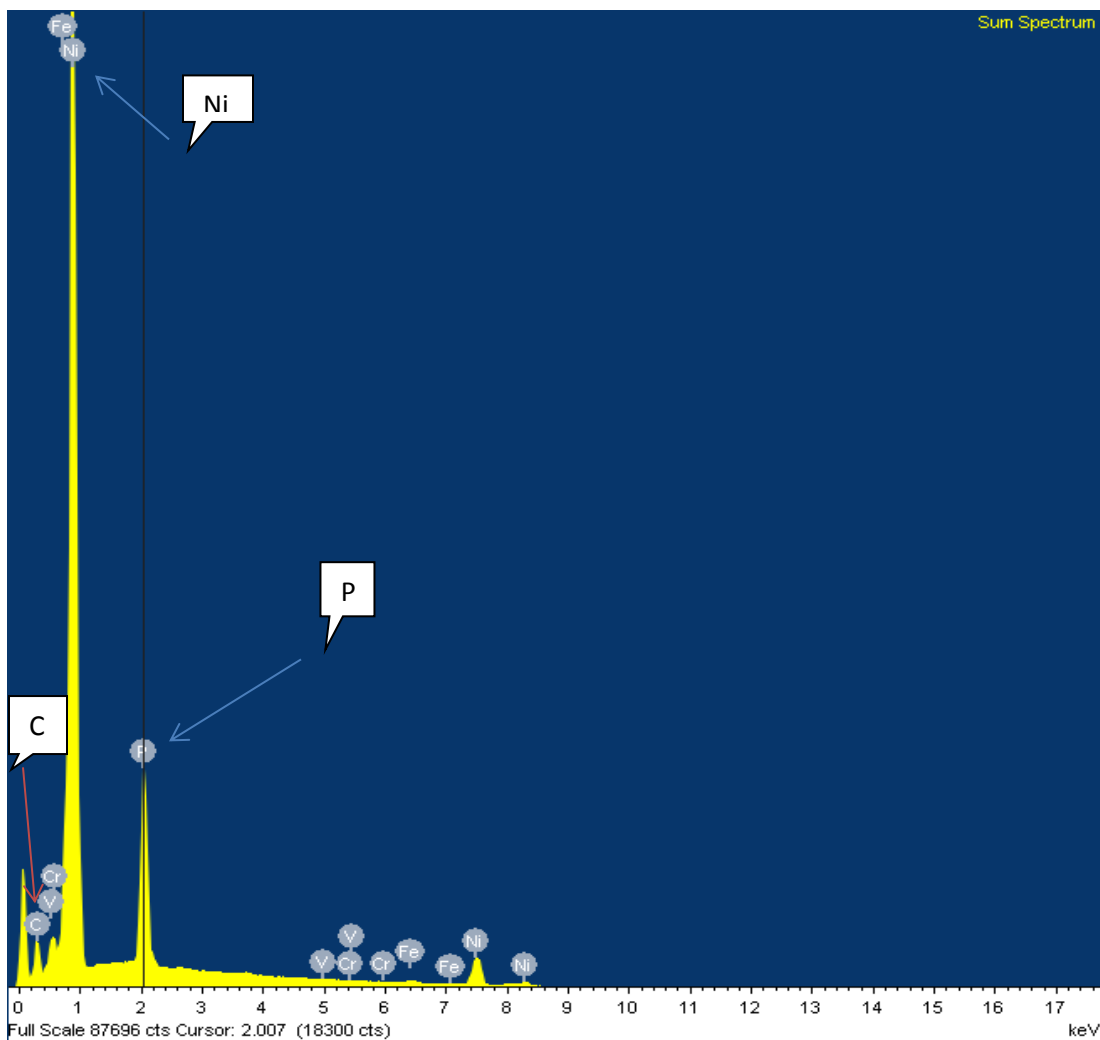


Obr. č. 41 a 42. SEM snímky povlaku Ni – P – CNT s viditelnými dutinami nanotrubic.

Na vybrané obdélníkové oblasti je pomocí energo – disperzního spektrometru zkoumáno zastoupení jednotlivými charakteristickými prvky pro uhlíkové nanotrubičky (CNT).



Obr. č. 41, 42, 43. SEM snímky chemického složení oblasti povlaku Ni – P – CNT s důrazem na přítomnost uhlíku.



Obr. č. 44. SEM spektrogram chemického složení oblasti povlaku Ni – P – CNT.

Na snímcích vytvořených pomocí SEM mikroskopu je jasně patrná přítomnost povlaku Ni – P – CNT. Niklová matrice obsahuje uhlíkové nanotrubičky. Jejich tvar je dokázán ve snímcích povlaku. Jejich složení bylo prokázáno pomocí spektrometrie, kde je to dobře patrné na vybrané oblasti v zobrazení četnosti uhlíku a fosforu. Což potvrzuje přítomnost uhlíkových nanotrubic v povlaku.

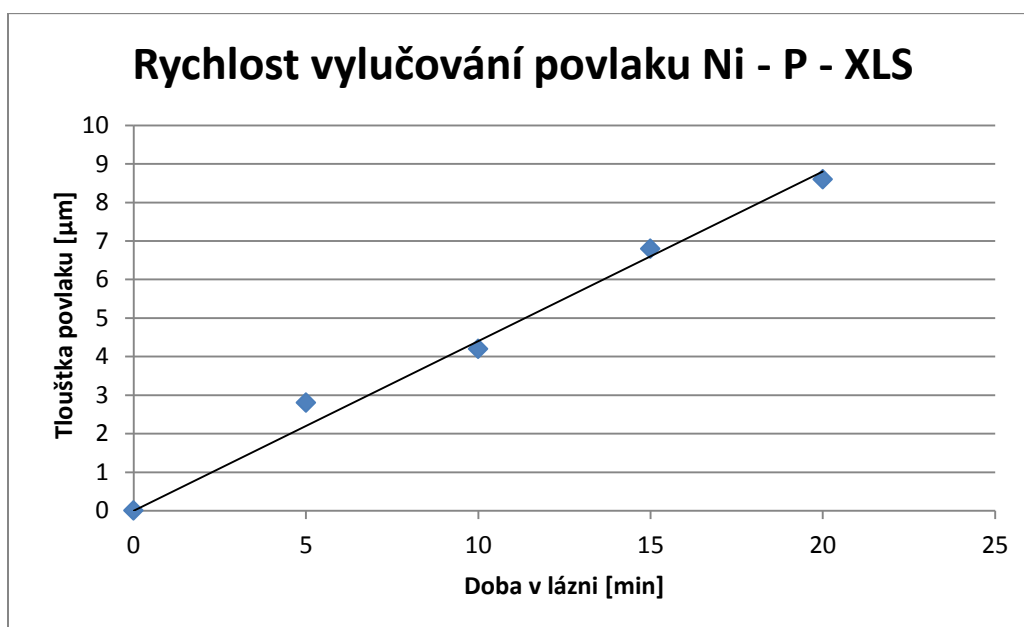
3.8 Kompozitní povlak Ni – P – XLS

3.8.1 Vylučovací rychlost povlaku

Vylučovací rychlost povlaků Ni – P – XLS byla změřena za pomoci stejných přístrojů a podmínek jako předchozí povlaky. Byla použita standartní zavedená niklovací lázeň a do ní bylo rozdispergováno množství nanočástic syntetického jílu XLS laponitu tak, aby byla dodržena koncentrace 10 g l^{-1} . Dispergace probíhala pomocí ultrazvukové sondy.

Plech č.	Doba [min]	Tloušťka vrstvy [μm]
1.	5	2,8
2.	10	4,2
3.	15	6,8
4.	20	8,6

Tab. 26. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – XLS na expoziční době pokovování.



Graf 17. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – XLS na expoziční době pokovování.

3.8.2 Tribologické vlastnosti povlaku Ni – P – XLS

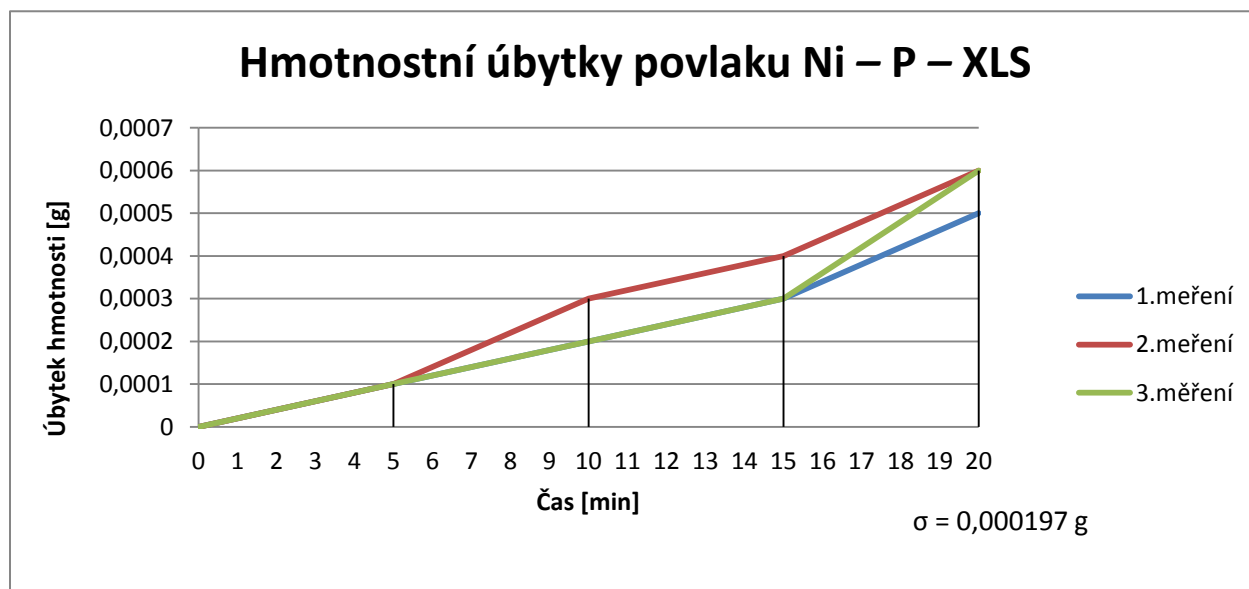
K měření tribologických vlastností opět sloužil Tribometr TOP 3 s normálovým zatížením 1 kg a se stejnými časovými a dalšími parametry. Směrodatná odchylka měření úbytku hmotnosti u povlaku obsahujícím částice XLS byla 0,000197 g.

Tableta č.	t [min]	Teplota [°C]	J [A.dm ⁻²]	I [A]	pH	Ra [μm]	m ₀	hp [μm]
1.	25	53	4	0,4	2,49	0,25	18,8939	11,2
2.	25	55	4	0,4	2,21	0,21	18,7651	10,9

Tab. 27. Vybrané tablety Ni – P – XLS a jejich parametry.

	m0 [g]	m5 [g]	m10 [g]	m15 [g]	m20 [g]	úbytek po 5 min [g]	úbytek po 10 min [g]	úbytek po 15 min [g]	úbytek po 20 min [g]
1.	18,8439	18,8438	18,8437	18,8436	18,8434	0,0001	0,0002	0,0003	0,0005
2	18,8437	18,8436	18,8434	18,8433	18,8431	0,0001	0,0003	0,0004	0,0006
3	18,7651	18,765	18,7649	18,7648	18,7645	0,0001	0,0002	0,0003	0,0006

Tab. 28. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – XLS v čase na Tribometru TOP 3.

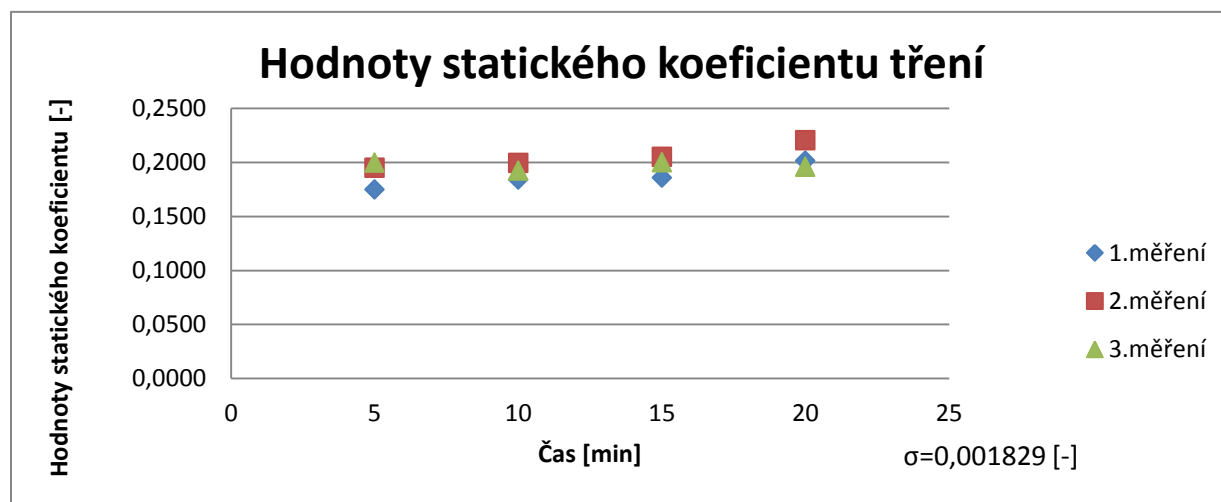


Graf 18. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – XLS v závislosti na čase testování.

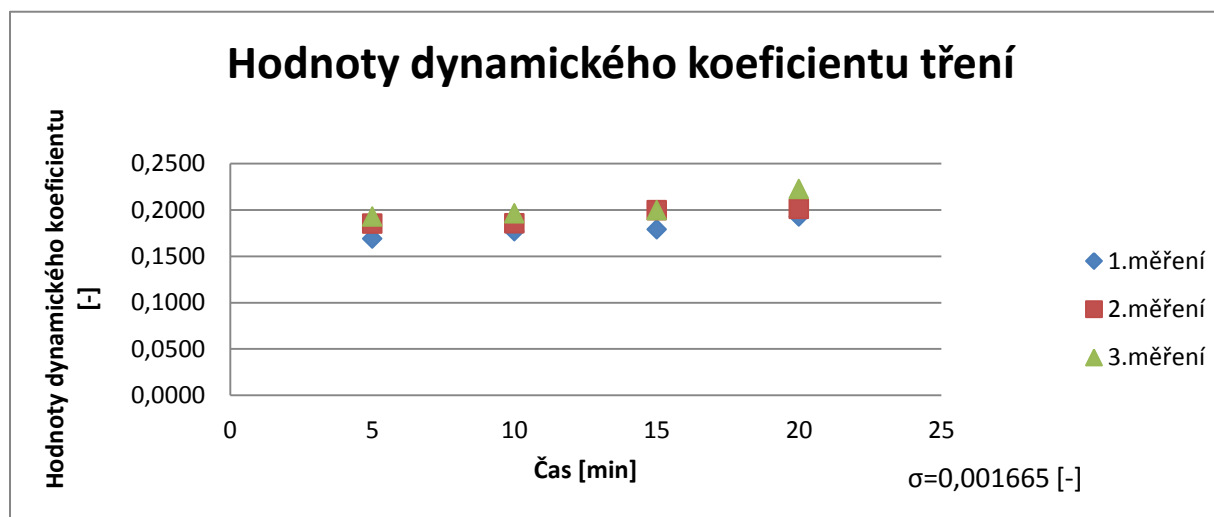
Pro získání koeficientů tření bylo použito tribometru TOP 3. Směrodatná odchylka měření statického koeficientu tření je 0,001829 a dynamického 0,001665.

Měření	Koeficient tření 5 min		Koeficient tření 10 min		Koeficient tření 15 min		Koeficient tření 20 min	
	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]
1.	0,1750	0,1689	0,1841	0,1768	0,1858	0,1788	0,2015	0,1925
2.	0,1952	0,1852	0,1995	0,1855	0,2051	0,1996	0,2206	0,2010
3.	0,1999	0,1925	0,2001	0,1960	0,2155	0,1997	0,2281	0,2223

Tab. 29. Koeficienty tření u povlaku Ni – P – XLS v čase.



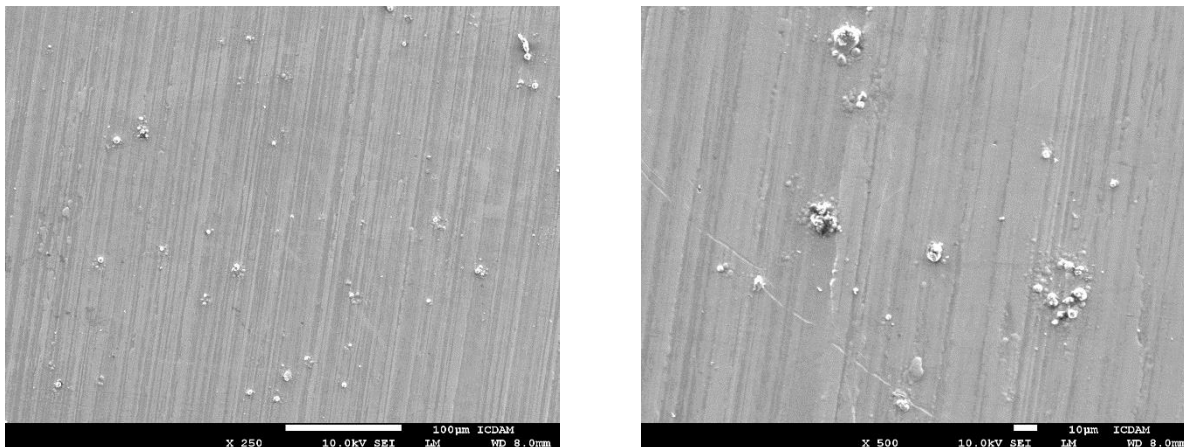
Graf 19. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Ni – P – XLS.



Graf 20. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Ni – P – XLS.

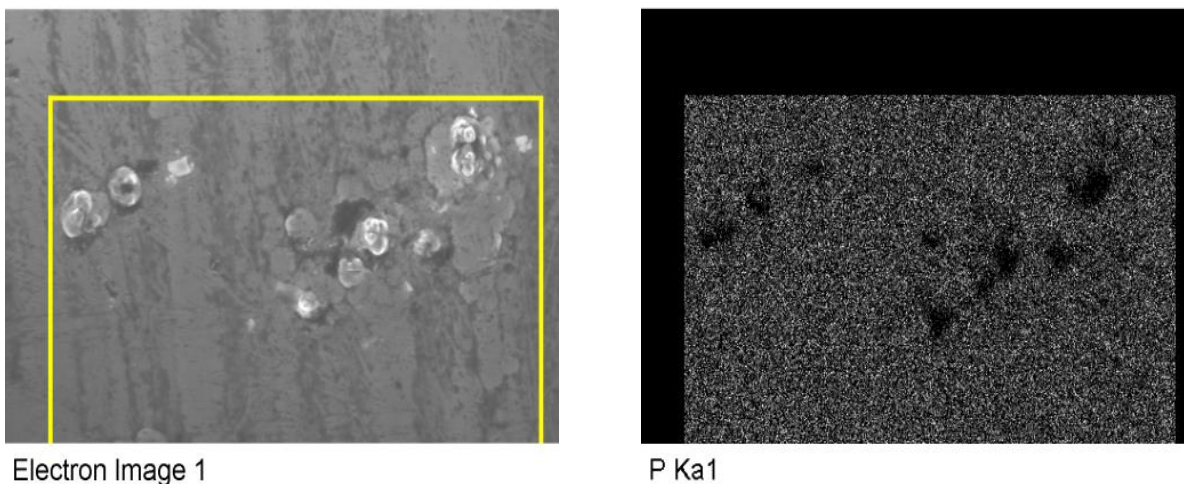
3.8.3 SEM mikroskopie povlaku Ni – P – XLS

Pro ověření existence kompozitního povlaku bylo opět použito stejné technologie SEM mikroskopie. Cílem je u tohoto povlaku prokázat přítomnost základních prvků, ze kterých se syntetický jíl XLS laponite skládá. Jedná se zejména o prvky Si, Mg, Na.



Obr. č. 45 a 46: SEM snímky povlaku Ni – P – XLS s viditelnými aglomeracemi jílu.

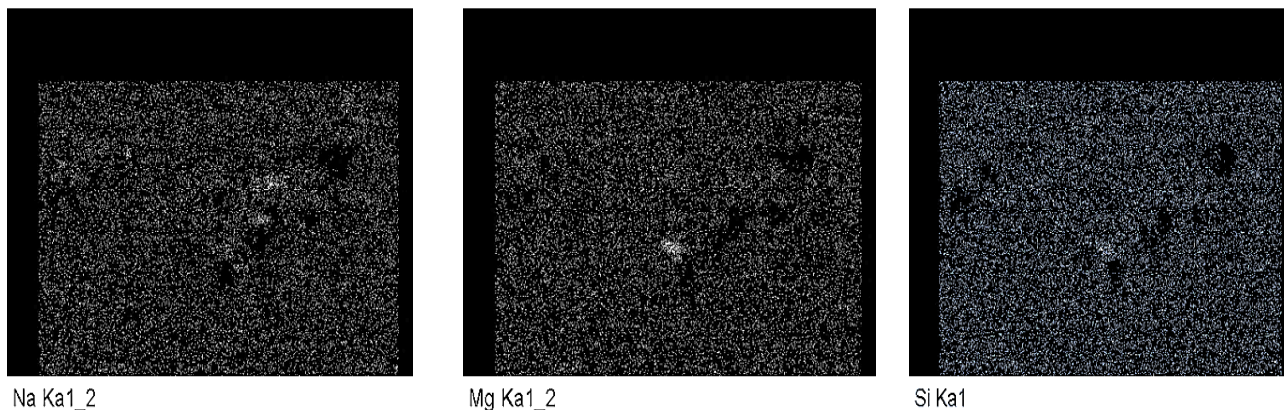
Na vybrané obdélníkové oblasti je pomocí energo – disperzního spektrometru zkoumáno zastoupení jednotlivými charakteristickými prvky pro XLS laponite.



Electron Image 1

P Ka1

Obr. č. 47 a 48 : SEM spektrogram chemického složení povlaku Ni – P – XLS se zobrazením fosforu.



Obr. č. 49, 50, 51: SEM snímky chemického složení oblasti povlaku Ni – P – XLS s důrazem na přítomnost Mg, Na, Si.

Na snímcích vytvořených pomocí SEM mikroskopu je patrná přítomnost povlaku Ni – P – XLS. Nikl – Fosforová matrice obsahuje v SEM snímcích jemnou disperzi a aglomerace výskytu prvků Al, Mg, Si. Jejich přítomnost je dokázána ve snímcích jednotlivých prvků a také ve snímku prvku fosforu, kde obsazují prázdná místa.

3.9 Chemicky vyloučený Ni – P

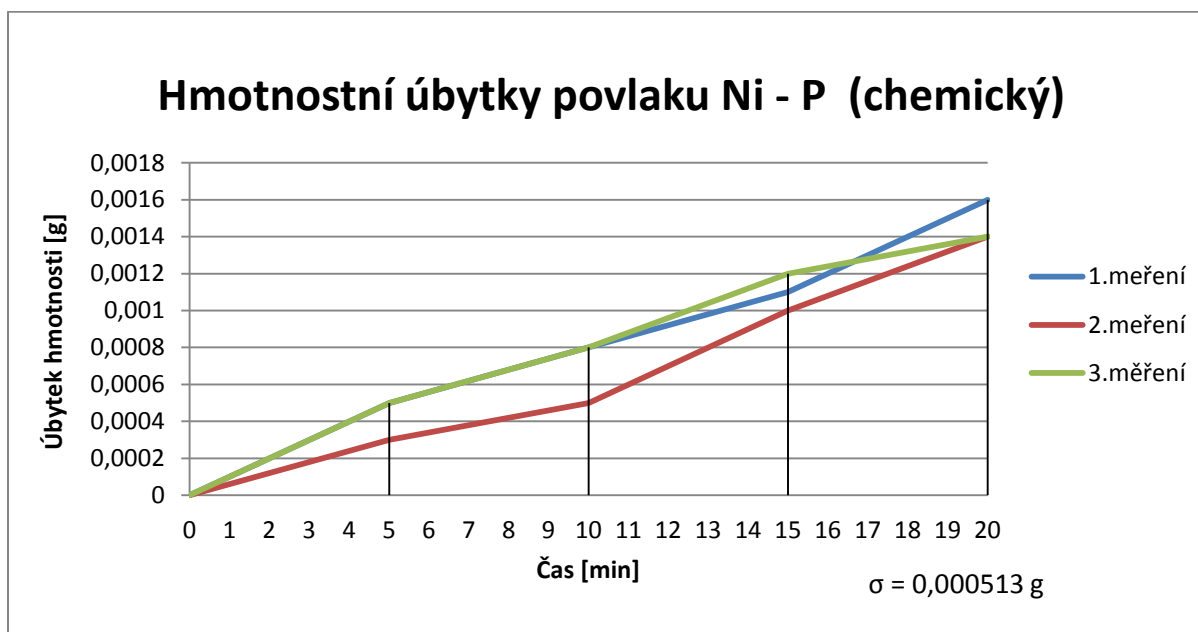
Pro porovnání tribologických vlastností povlaků vyrobených elektrochemickou, galvanickou cestou byly externě pokoveny tablety povlakem Ni – P (Chemický) chemickou cestou. Jelikož pro tvorbu tohoto povlaku nebylo k dispozici pracoviště, byly povlaky na zkušební tablety nanášeny externí společností Bárta a Cihlár, spol. s.r.o. Slitínový povlak obsahuje 11 až 13 % fosforu.

3.9.1 Tribologické vlastnosti povlaku Ni – P (chemický)

K měření tribologických vlastností opět sloužil Tribometr TOP 3 s normálovým zatížením 1 kg a se stejnými časovými a dalšími parametry. Směrodatná odchylka měření úbytku hmotnosti u povlaku chemicky vyloučeného niklu byla 0,000513 g.

	m0 [g]	m5 [g]	m10 [g]	m15 [g]	m20 [g]	úbytek po 5 min [g]	úbytek po 10 min [g]	úbytek po 15 min [g]	úbytek po 20 min [g]
1.	18,0293	18,0288	18,0285	18,0282	18,0277	0,0005	0,0008	0,0011	0,0016
2	18,0874	18,0871	18,0869	18,0864	18,086	0,0003	0,0005	0,0010	0,0014
3	18,1023	18,1018	18,1015	18,1011	18,1009	0,0005	0,0008	0,0012	0,0014

Tab. 30. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P (chemický) v čase na Tribometru TOP 3.

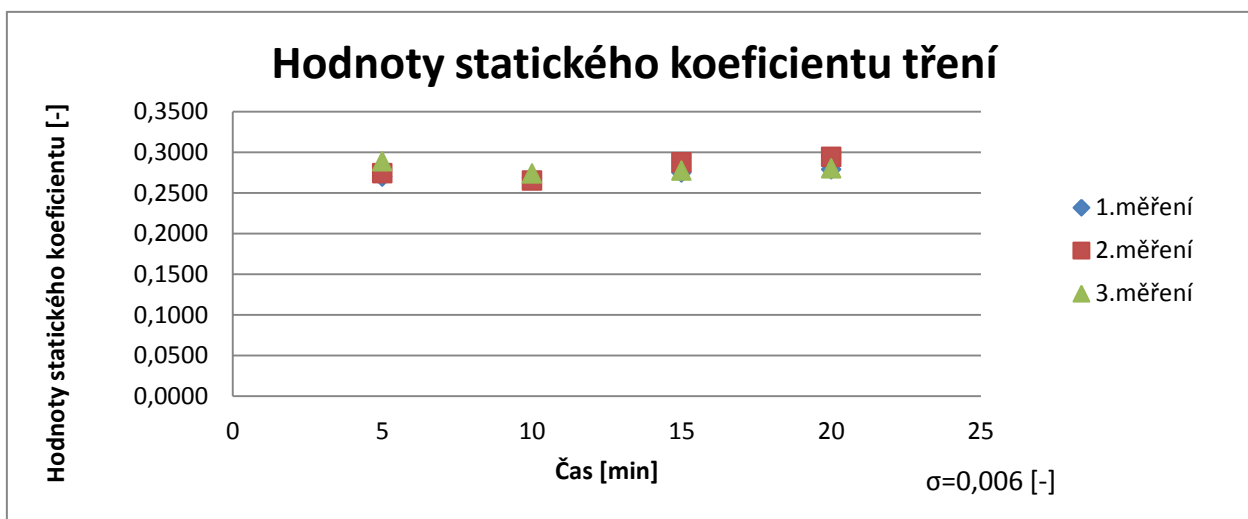


Graf 21. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P (chemický) v závislosti na čase testování.

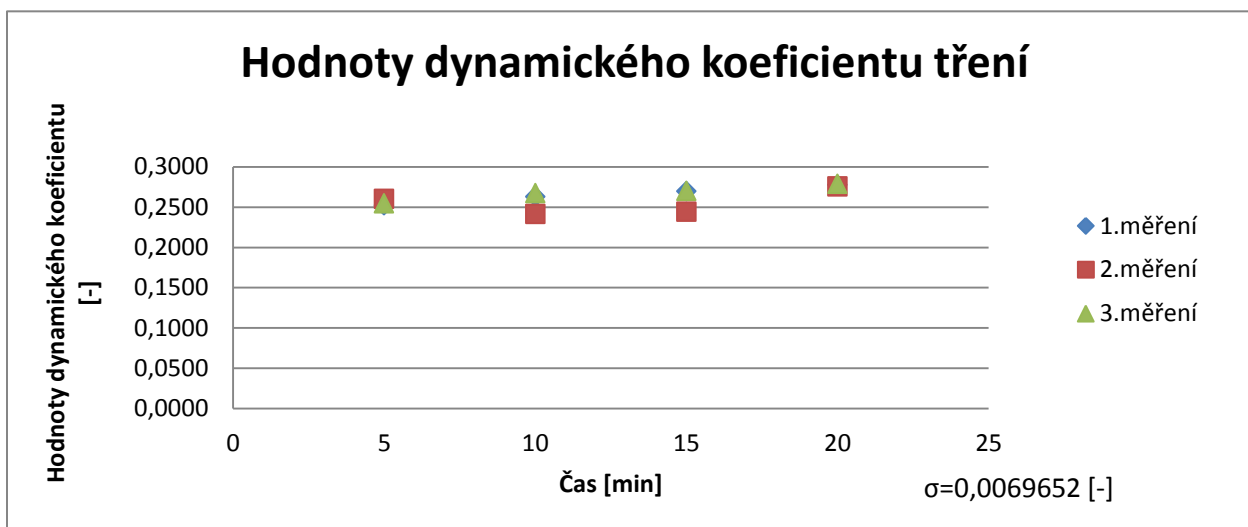
Pro získání koeficientů tření bylo opět použito tribometru TOP 3. Směrodatná odchylka měření statického koeficientu tření je 0,006 a dynamického 0,0069652.

Měření	Koeficient tření 5 min		Koeficient tření 10 min		Koeficient tření 15 min		Koeficient tření 20 min	
	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]
1.	0,2699	0,2522	0,2692	0,2629	0,2750	0,2696	0,2792	0,2773
2.	0,2744	0,2600	0,2654	0,2411	0,2877	0,2441	0,2944	0,2755
3.	0,2888	0,2544	0,2741	0,2669	0,2776	0,2697	0,2804	0,2784

Tab. 31. Koeficienty tření u povlaku Ni – P (chemický) v čase.



Graf 22. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Ni – P (chemický).



Graf 23. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Ni – P (chemický).

3.10 Galvanický tvrdý chrom (Cr)

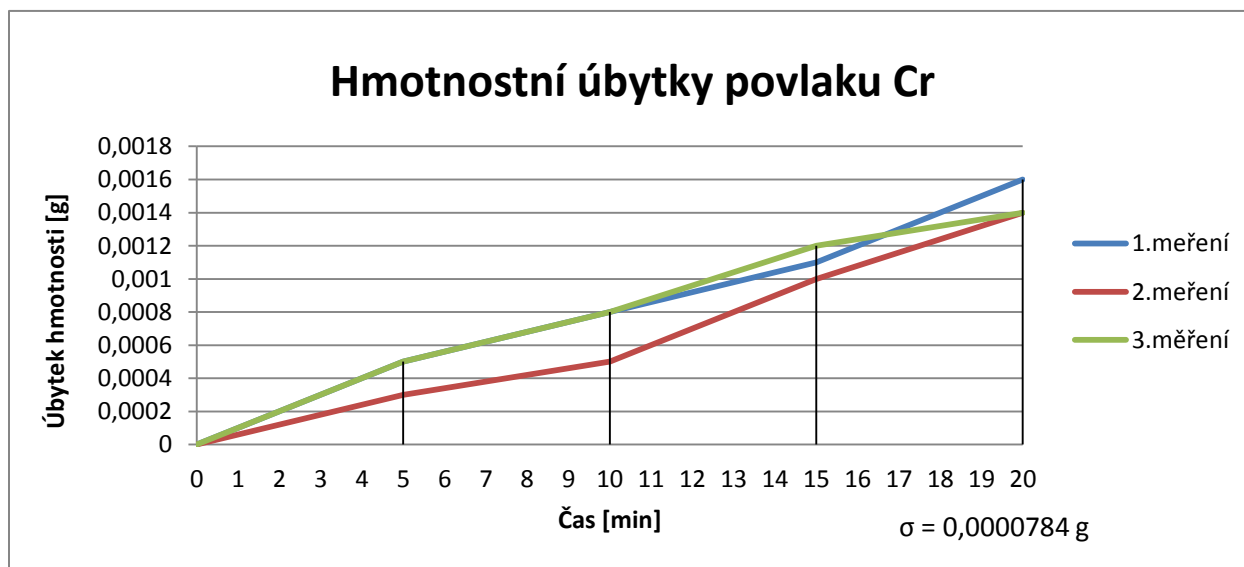
Jelikož se tato práce zabývá vývojem a analýzou tribologických povlaků pro náhradu povrchové úpravy tvrdého funkčního chromování, je důležité vytvořené a zanalyzované povlaky srovnat s povlakem tvrdého chromu. Povlaky byly testovány na stejných přístrojích a za stejných podmínek, aby byla zaručena porovnatelnost. Povlaky byly vytvořeny externí společností.

3.10.1 Tribologické vlastnosti povlaku Cr

K měření tribologických vlastností opět sloužil Tribometr TOP 3 s normálovým zatížením 1 kg a se stejnými časovými a dalšími parametry. Směrodatná odchylka měření úbytku hmotnosti u povlaku tvrdého chromu byla 0,0000784 g.

	m0 [g]	m5 [g]	m10 [g]	m15 [g]	m20 [g]	úbytek po 5 min [g]	úbytek po 10 min [g]	úbytek po 15 min [g]	úbytek po 20 min [g]
1.	18,6212	18,6211	18,6211	18,621	18,6209	0,0001	0,0001	0,0002	0,0003
2	18,621	18,6209	18,6209	18,6208	18,6207	0,0001	0,0001	0,0002	0,0003
3	18,6067	18,6066	18,6066	18,6065	18,6065	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002

Tab. 32. Hmotnostní úbytky povlaku Cr v čase na Tribometru TOP 3.

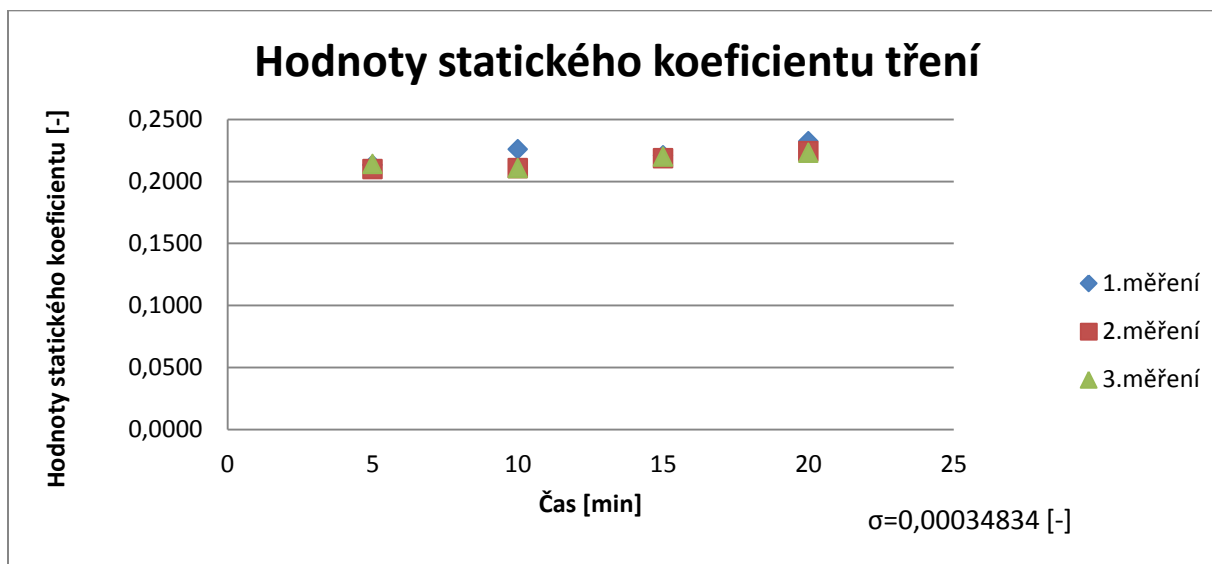


Graf 24. Hmotnostní úbytky povlaku Cr v závislosti na čase testování.

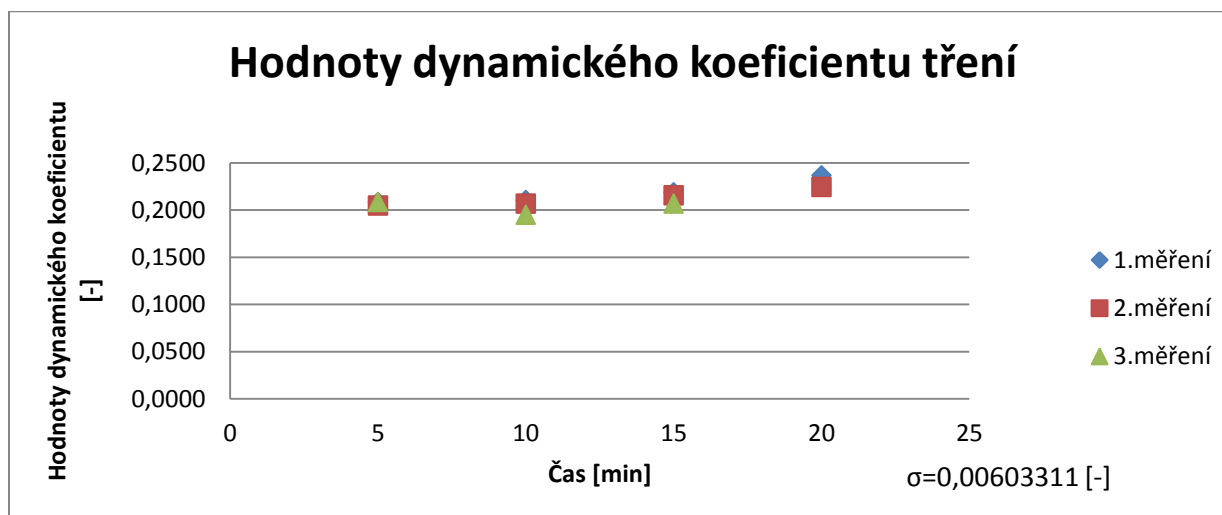
Pro získání koeficientů tření bylo opět použito tribometru TOP 3. Směrodatná odchylka měření statického koeficientu tření je 0,00034834 a dynamického 0,00603311.

Měření	Koeficient tření 5 min		Koeficient tření 10 min		Koeficient tření 15 min		Koeficient tření 20 min	
	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]
1.	0,2133	0,2080	0,2257	0,2103	0,2208	0,2185	0,2322	0,2366
2.	0,2099	0,2045	0,2105	0,2066	0,2185	0,2155	0,2243	0,2243
3.	0,2139	0,2083	0,2105	0,1947	0,2198	0,2067	0,2230	0,2103

Tab. 33. Koeficienty tření u povlaku Cr v čase.



Graf 25. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Cr.



Graf 26. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Cr.

4. Srovnání tribologických vlastností povlaků

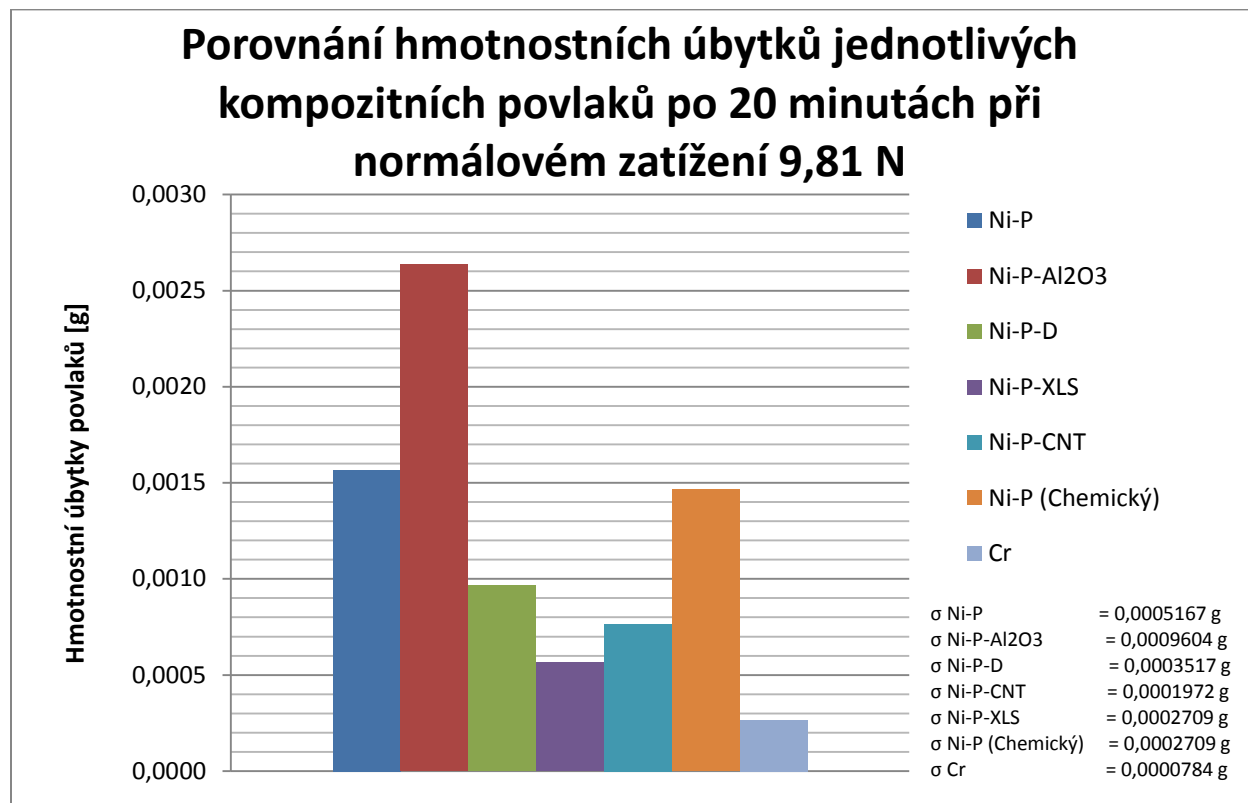
Díky tomu, že byly všechny povlaky vytvářeny za stejných podmínek, je lze vzájemně mezi sebou porovnat a to z hlediska tribologických vlastností. Hmotnostní úbytky byly porovnány ve stanovených intervalech po 5 minutách, statické a dynamické koeficienty při 20 minutách tření na tribometru TOP 3. Díky testování povlaku tvrdého chromu lze posoudit vhodnost jednotlivých povlaků jako náhradu pro povrchovou úpravu tvrdého chromování.

4.1 Srovnání úbytků hmotnosti jednotlivých povlaků

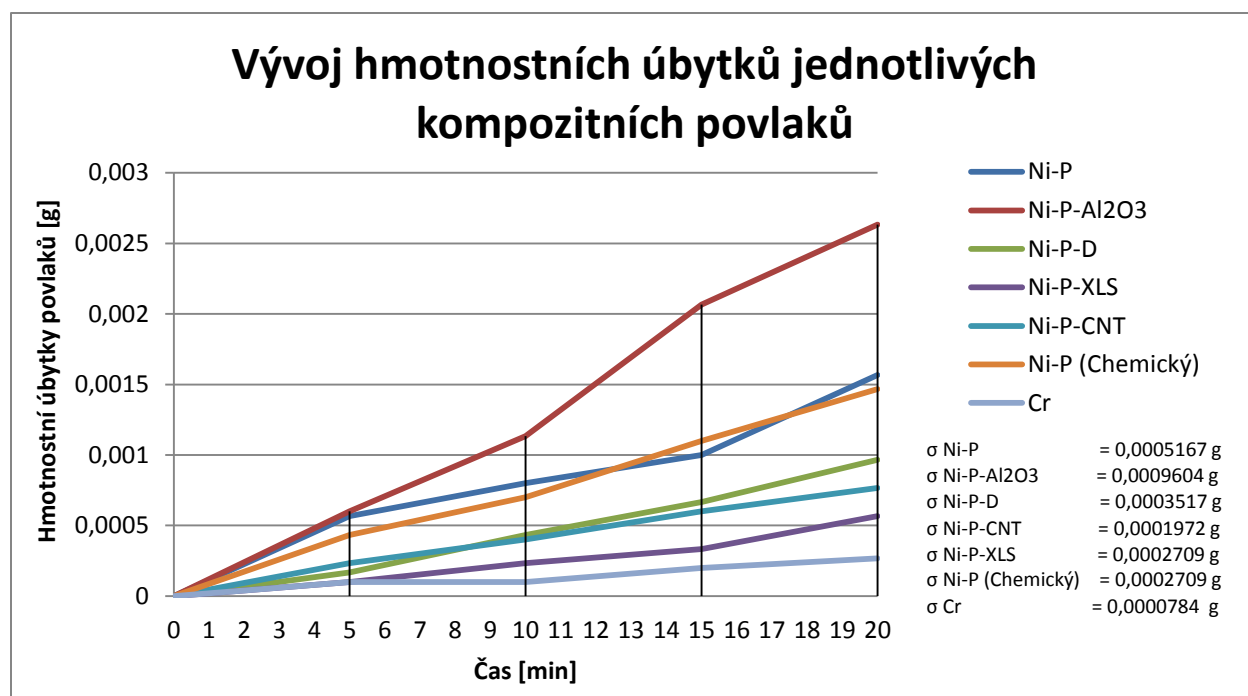
Povlak	úbytek po 5 min [g]	úbytek po 10 min [g]	úbytek po 15 min [g]	úbytek po 20 min [g]
NiP	0,0006	0,0008	0,0010	0,0016
NiP-Al ₂ O ₃	0,0006	0,0011	0,0021	0,0026
NiP-D	0,0002	0,0004	0,0007	0,0010
NiP-XLS	0,0001	0,0002	0,0003	0,0006
NiP-CNT	0,0002	0,0004	0,0006	0,0008
NiP (Chemický)	0,0004	0,0007	0,0011	0,0015
Cr	0,0001	0,0001	0,0002	0,0003

Tab. 34. Srovnání hmotnostních úbytků jednotlivých kompozitních povlaků.

Z výše uvedené tabulky je patrné, že všechny vytvořené povlaky vydržely pracovat 20 minut na tribometru TOP 3. U žádného povlaku nedocházelo k odskokům při translačně-rotaci pohybu tribologické dvojice. Tribologická dvojice nevyužívala žádného maziva. Jednalo se vždy o styk povlak – základní materiál. Nejnižších hmotnostních úbytků dosáhl tvrdochromový povlak, zejména díky jeho vysoké tvrdosti a ořezuvzdornosti. Z povlaků, které byly vytvořeny, měl nejmenší hmotnostní úbytek Ni – P – XLS, ne však o tolik menší než Ni – P – CNT a Ni – P – D, které se mezi sebou liší jen málo. Největšího hmotnostního úbytku dosáhl povlak Ni – P – Al₂O₃, kde je to patrně zapříčiněno částicemi korundu, které zvyšují tvrdost povlaku, avšak při testování tribologické dvojice docházelo k jejich vylamování a vydírání povlaku. Základní povlak Ni – P také není z tribologického hlediska nejvýhodnější. Zde je naprosto patrný přínos nanomateriálů pro výsledné tribologické vlastnosti povlaků.



Graf 27. Srovnání úbytků povlaků v čase 20 minut.



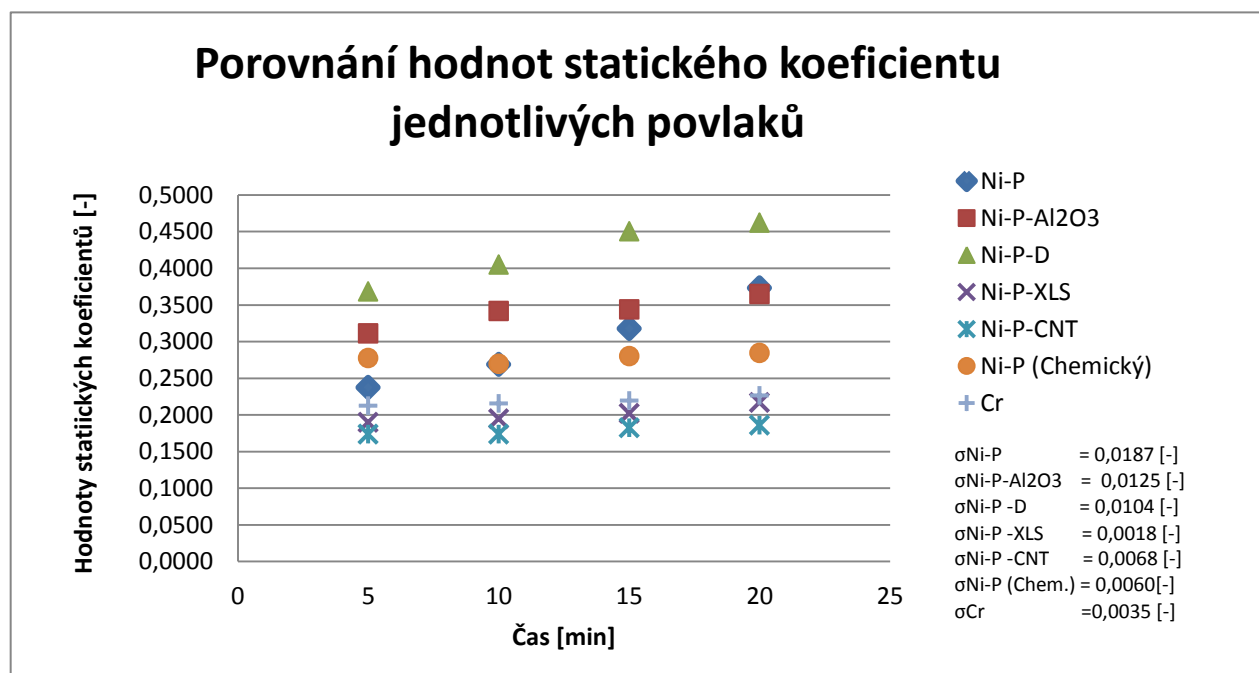
Graf 28. Srovnání hmotnostních úbytků jednotlivých kompozitních povlaků v čase.

4.2 Srovnání koeficientů tření jednotlivých povlaků

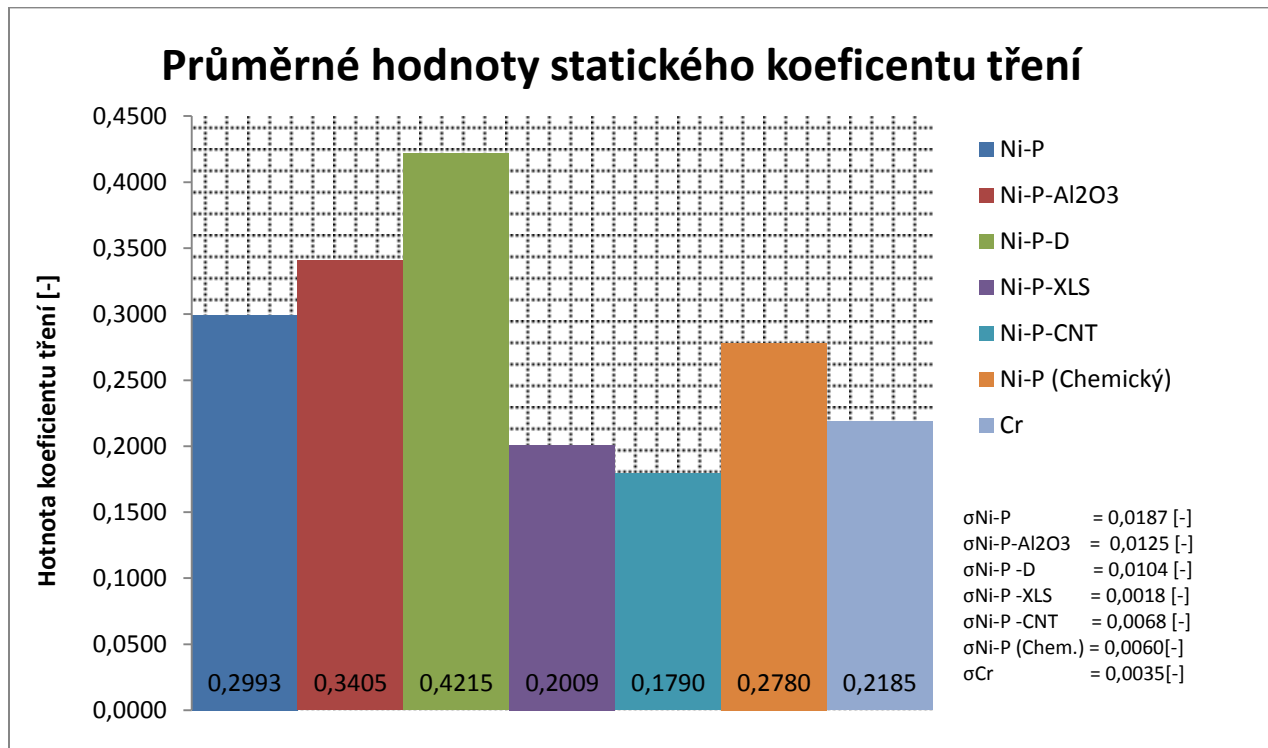
Povlak	Koeficient tření 5 min		Koeficient tření 10 min		Koeficient tření 15 min		Koeficient tření 20 min	
	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]
NiP	0,2374	0,2203	0,2690	0,2557	0,3179	0,3200	0,3730	0,3545
NiP-Al ₂ O ₃	0,3112	0,2930	0,3418	0,3031	0,3438	0,3121	0,3650	0,3239
NiP-D	0,3685	0,3293	0,4050	0,3761	0,4504	0,4405	0,4621	0,4390
NiP-XLS	0,1900	0,1822	0,1946	0,1861	0,2021	0,1927	0,2167	0,2053
NiP-CNT	0,1737	0,1481	0,1738	0,1659	0,1826	0,1795	0,1859	0,1836
NiP (Ch.)	0,2777	0,2555	0,2696	0,2570	0,2801	0,2611	0,2847	0,2771
Cr	0,2124	0,2069	0,2156	0,2039	0,2197	0,2136	0,2265	0,2237

Tab. 35. Srovnání koeficientů tření jednotlivých kompozitních povlaků.

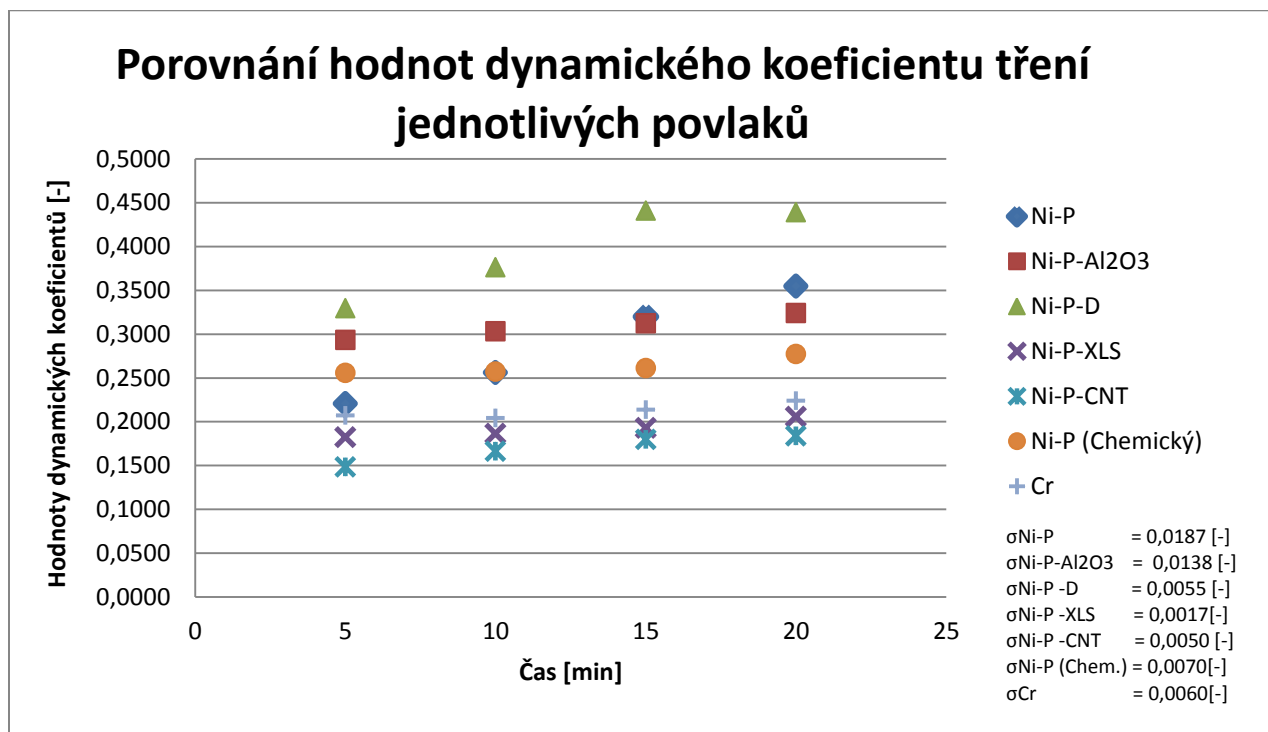
Výše uvedená tabulka shrnuje statické a dynamické koeficienty tření všech vytvořených a testovaných povlaků. Pro jeho kluzné vlastnosti je nejvýhodnější povlak Ni – P – CNT, který je na tom velice podobně jako povlak Ni – P – XLS, jehož koeficienty tření jsou jen o málo vyšší. Tyto povlaky mají nižší hodnoty koeficientů tření než samotný povlak tvrdého chromování, což je zapříčiněno kluznými aditivy v kompozitních povlacích. Růst koeficientu tření těchto povlaků je navíc v porovnání s ostatními výrazně nižší. Porovnání nejlépe vystihují následující grafy statického a dynamického koeficientu tření.



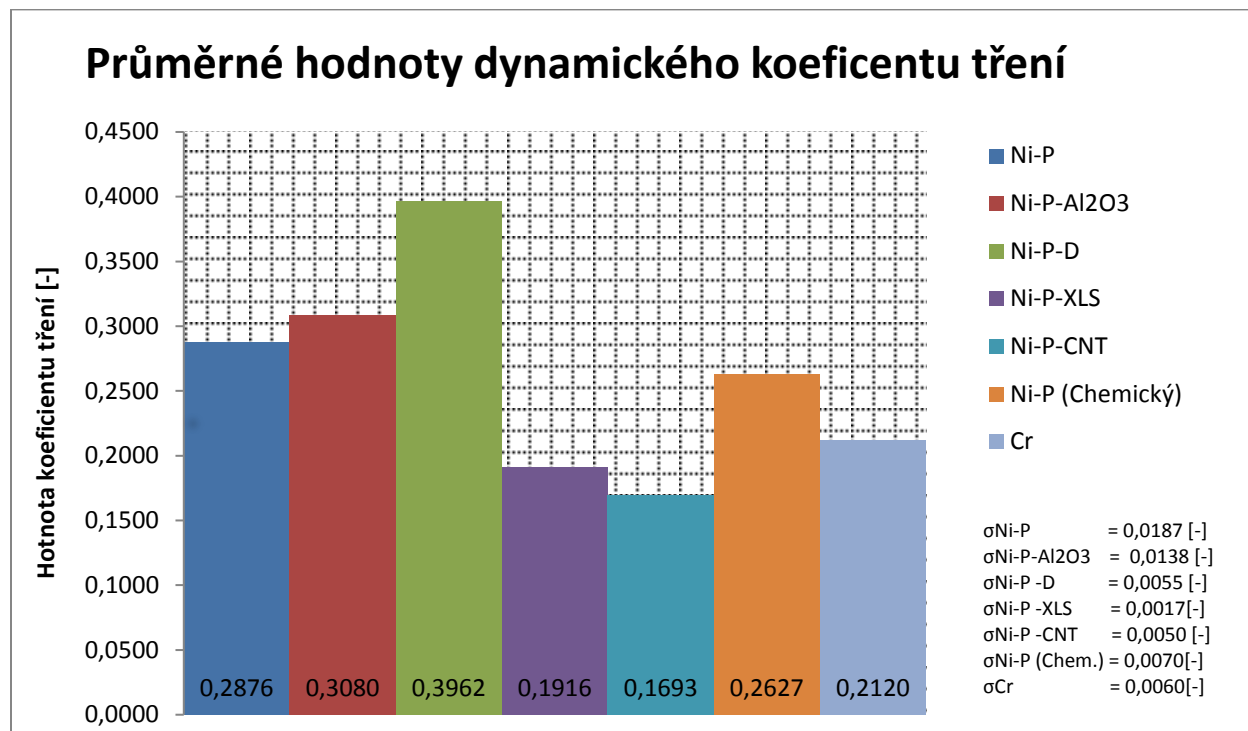
Graf 29. Srovnání statického koeficientu tření jednotlivých kompozitních povlaků.



Graf 30. Srovnání statického koeficientu tření jednotlivých kompozitních povlaků.



Graf 31. Srovnání dynamického koeficientu tření jednotlivých kompozitních povlaků.



Graf 32. Srovnání dynamického koeficientu tření jednotlivých kompozitních povlaků.

5. Ekonomicko – hospodářské zhodnocení

V práci bylo navrženo zařízení pro tvorbu kompozitních povlaků na bázi niklu, které jsou vhodné jako náhrada tvrdého funkčního chromování. Je však také potřeba zhodnocení těchto povlaků z hlediska ekonomie. Komerční cena funkčního chromování se pohybuje okolo 9,5 Kč / 0,01 mm tloušťky povlaku. Pro galvanicky vyloučený lesklý Ni – P se tato cena pohybuje okolo 5 Kč / 0,01 mm tloušťky povlaku. Tyto ceny jsou pro plochu 1 dm². Pro kompozitní povlaky je třeba připočítat náklady na disperzní část (nano / mikro materiál). Jeho cena je odvislá od druhu materiálu. Viz tabulka číslo 36, kde jsou porovnány ceny disperzních materiálů a ceny výroby 10 l lázně pro tvorbu kompozitních povlaků (pro zachování koncentrace disperzních částic 10 gl⁻¹ je třeba 100 g disperze na 10 l niklovací lázně). Tyto náklady budou vysoké při zavedení a nasazení lázně, její údržba již tak náročná nebude. Tato cena je v současnosti vyšší než cena funkčního tvrdého chromování. Cena může lehce kolísat z důvodu pohybu devizového kurzu a změn v celním a daňovém systému. V budoucnu při zjednodušení a zefektivnění výroby disperzních nanomateriálů dojde k výraznému snížení nákladů na vytvoření a údržbu lázní, což povede ke snížení celkových provozních nákladů. Společně s příznivým snížením nákladů, vynikajícími tribologickými a mechanickými vlastnostmi jsou kompozitní povlaky na bázi Ni – P vhodnou budoucí náhradou tvrdého chromování.

<u>Materiál</u>	<u>Výrobce / Distributor</u>	<u>Množství</u>	<u>Cena</u>	<u>Cena 10 l lázně</u>
Niklovací lázeň	SolidGalva s.r.o.	10 l	2 500 Kč	2 500 Kč
DND	NANOArmor	100 g	10 896 Kč	13 396 Kč
CNT	NANOArmor	100 g	14 928 Kč	17 428 Kč
XLS	SIGMA Aldrich	500 g	1 765 Kč	2 853 Kč
Al₂O₃	NANOArmor	100 g	2 451 Kč	4 951 Kč

Tab. 36. Srovnání cen materiálů pro tvorbu lázní (ceny platné k 18.6.2015).

6. Závěr

V této práci byla rozebrána problematika náhrady tvrdochromových povlaků moderními progresivními metodami. Všechny tyto metody mají ekvivalentní nebo i lepší mechanické a tribologické vlastnosti než v současnosti používaný neekologický tvrdý chrom. Pouze hmotnostní úbytky má tvrdý chrom nižší, což je zapříčiněné vysokou tvrdostí povlaku. V tomto experimentu bylo vytvořeno zařízení pro zkušební pokovení vzorků testovanými kompozitními povlaky se slitinovou maticí Ni – P a disperzním materiálem o mikro až nano rozměrech.

Vytvořené povlaky byly testovány z hlediska tribologie a analyzovány pomocí SEM mikroskopie. Byly sledovány hmotnostní úbytky povlaků, statický a dynamický koeficient tření. Z výsledků je patrné, že při použití nanomateriálů dochází k výraznému zlepšení tribologických vlastností. Nejnižší hmotnostní úbytek z vytvořených povlaků měl Ni – P – XLS. Jeho koeficienty tření jsou ale vyšší než u kompozitního povlaku Ni – P – CNT. Tento rozdíl však není markantní, proto bych oba tyto povlaky volil jako nejvýhodnější z vytvořených povlaků. Povlak Ni – P – XLS bych volil pro potřeby otěruvzdornosti. Povlak Ni – P – CNT, díky přítomnosti uhlíku jako samomazného prvku, by byl vhodný jako kluzný. Avšak výroba lázně Ni – P – XLS je v porovnání s lázní Ni – P – CNT výrazně levnější.

Tento experiment prokázal výrazné zlepšení tribologických vlastností slitinového povlaku Ni – P při použití disperzních částic a vytvořením kompozitních povlaků. Tato problematika si jistě заслужuje další výzkum a to hlavně v oblastech druhů disperzního materiálu, jejich koncentraci a také v tepelném vytvrzení, které by mohlo vést ke snížení hmotnostních úbytků na úroveň tvrdochromového povlaku a vytvoření dokonalého substitučního povlaku pro tvrdé chromování.

6. Literatura

- [1] Brožura Tvrdé Chromování – Bomex s.r.o.
Dostupná z: <http://www.bomex.cz/cz/3-technologie/8-tvrde-chromovani.html>
- [2] ENŽL, R., et al. Náhrada tvrdého chromování žárovými nástřiky. *Metal 2014*
Dostupné z: www.metal2014.com/files/proceedings/metal_02/papers/29.pdf
- [3] YANG, Zhenkun. Alternatives to hard chromium plating on piston rods. 2011.
Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A452803&dswid=-8436>
- [4] Eshop „LabelSource“ s ISO značkami pro laboratorní použití
Dostupné z: <http://www.labelsource.co.uk/labels/cr6---chrome--symbol-label-/el930>
- [5] LEGG, K. O., et al. The replacement of electroplating. *Surface and Coatings Technology*, 1996, 81.1: 99-105.
- [6] VZU Plzeň, Technologie žárových nástřiků, HVOF technologie a výzkum povlaků
- [7] YANG, Zhenkun. Alternatives to hard chromium plating on piston rods. 2011.
- [8] ADAMIŠ, P; MOHYLA, M; OSTRAVA-PORUBA, Č. R. VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH POVLAKŮ S KATODICKY VYLUČOVANOU MATRICÍ. *TiC*, 4.9: 3140.
Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2000/sbornik/papers/653.pdf>
- [9] BENEŠOVÁ D. KOMPOZITNÍ GALVANICKÉ POVLAKY, časopis Povrcháři
Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201104_povrchari.pdf
- [10] JEONG, D. H., et al. The relationship between hardness and abrasive wear resistance of electrodeposited nanocrystalline Ni–P coatings. *Scripta Materialia*, 2003, 48.8: 1067-1072.
Dostupné z: <http://144.206.159.178/ft/940/86125/1456226.pdf>
- [11] HOU, Kung-Hsu; JENG, Ming-Chang; GER, Ming-Der. A study on the wear resistance characteristics of pulse electroforming Ni–P alloy coatings as plated. *Wear*, 2007, 262.7: 833-844.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164806003310>
- [12] ŁOSIEWICZ, B., et al. Composite layers in Ni–P system containing TiO₂ and PTFE. *Thin Solid Films*, 1999, 349.1: 43-50.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609099001753>
- [13] Wang, Liping, et al. "Effects of nano-diamond particles on the structure and tribological property of Ni-matrix nanocomposite coatings." *Materials Science and Engineering: A* 390.1 (2012): 313-318.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509304010688>

[14] LEE, E. C.; CHOI, J. W. A study on the mechanism of formation of electrocodeposited Ni–diamond coatings. *Surface and coatings technology*, 2001, 148.2: 234-240
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897201013524>

[15] ZAREBIDAKI, Arman; ALLAHKARAM, Saeed-Reza. Effect of surfactant on the fabrication and characterization of Ni-P-CNT composite coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509.5: 1836-1840.

[16] RABIZADEH, Taher; ALLAHKARAM, Saeed Reza; ZAREBIDAKI, Arman. An investigation on effects of heat treatment on corrosion properties of Ni–P electroless nano-coatings. *Materials & Design*, 2010, 31.7: 3174-3179.

[17] MA, Chunyang, et al. Effect of heat treatment on structures and corrosion characteristics of Ni–P–SiC nanocomposite coatings. *Ceramics International*, 2014, 40.7: 9279-9284.

[18] Brožura Chemického niklování – Bomex s.r.o.
Dostupná z: <http://www.bomex.cz/cz/3-technologie/7-chemicke-niklovani.html>

[19] HAJNYŠ, Jiří. Problematika chemického povlakování niklem. 2013.

Seznam obrázků:

<i>Obr. 1 a 2: Výbrus vrstvy tvrdochromu s mikrotrhlinami</i>	12
<i>Obr. 3: Proces vzniku tvrdochromové vrstvy se vznikem šestimocného chromu</i>	13
<i>Obr. 4: Varovný symbol ve výrobě upozorňující na proces obsahující šestimocný chrom</i>	13
<i>Obr. 5: Součást a její vzhled po PVD pokovení Cr N povlakem</i>	14
<i>Obr. 6: Výsledná tvrdost a chemické složení povlaku v závislosti na parciálním tlaku.</i>	15
<i>Obr. 7: Zařízení pro nástřik HVOF povlaků</i>	17
<i>Obr. 8: Výbrus: vlevo tvrdochrom, vpravo HVOF</i>	17
<i>Obr. 9 : Závislost tvrdosti na obsahu P a závislost opotřebení na obsahu P.</i>	21
<i>Obr. 10. Srovnání tvrdosti povlaku při použití mikro a nano diamantových částic</i>	22
<i>Obr. 11. SEM snímek povlaku Nikl – diamant s různou orientací diamantových zrn.</i>	23
<i>Obr. 12. SEM snímek rozptýlení nanotrubic v povlaku.</i>	24
<i>Obr. 13. SEM snímek částic korundu.</i>	25
<i>Obr. 14. SEM snímek povrchu Ni – P – Al₂O₃ povlaku.</i>	25
<i>Obr. 15. Mikrotvrdost v závislosti teplotě a čas expozice při vytvrzování.</i>	26
<i>Obr. 16. Struktury povlaku Ni – P po tepelném vytvrzení s různým tepelným zpracováním.</i>	27
<i>Obr. 17. Ultrazvukový homogenizátor UP400S.</i>	31
<i>Obr. 18. Soustava pro tvorbu povlaků s dispergovanými částicemi.</i>	32
<i>Obr. 19. Tribometr TOP 3 – model.</i>	33
<i>Obr. 20. Tribometr TOP 3 – funkční dvojice a schéma měření.</i>	33
<i>Obr. 21. Tribometr TOP 3.</i>	34
<i>Obr. 22. a 23. Digitální měřič tloušťky vrstev a dvojice vah (analytické a digitální).</i>	34
<i>Obr. č 24. a 25. SEM snímky povlaku Ni – P s viditelným Fosforem v povlaku</i>	40
<i>Obr. č. 26, 27, 28. SEM snímky chemického složení oblasti povlaku Ni – P.</i>	40
<i>Obr. č. 29. SEM spektrogram chemického složení oblasti povlaku Ni – P.</i>	41
<i>Obr. č. 30 a 31. SEM snímky povlaku Ni – P – Al₂O₃ s viditelným korundem v povlaku.</i>	45
<i>Obr. č 32, 33, 34. SEM snímky chemického složení oblasti povlaku Ni – P – Al₂O₃.</i>	45
<i>Obr. č. 35. SEM spektrogram chemického složení oblasti povlaku Ni – P – Al₂O₃.</i>	46
<i>Obr. č. 36 a 37. SEM snímky povlaku Ni – P – D s viditelnými částicemi diamantu v povlaku.</i>	50
<i>Obr. č. 38 a 39. SEM snímky chemického složení oblasti povlaku Ni – P – D s důrazem na přítomnost uhlíku.</i>	50
<i>Obr. č. 40. SEM spektrogram chemického složení oblasti povlaku Ni – P – D</i>	51
<i>Obr. č. 41 a 42. SEM snímky povlaku Ni – P – CNT s viditelnými dutinami nanotrubic.</i>	55
<i>Obr. č. 41, 42, 43. SEM snímky chemického složení oblasti povlaku Ni – P – CNT s důrazem na přítomnost uhlíku.</i>	55
<i>Obr. č. 44. SEM spektrogram chemického složení oblasti povlaku Ni – P – CNT.</i>	56
<i>Obr. č. 45 a 46. SEM snímky povlaku Ni – P – XLS s viditelnými aglomeracemi jílů.</i>	60
<i>Obr. č. 47 a 48. SEM spektrogram chemického složení povlaku Ni – P – XLS se zobrazením fosforu.</i>	60
<i>Obr. č. 49, 50, 51. SEM snímky chemického složení oblasti povlaku Ni – P – XLS s důrazem na přítomnost Mg, Na, Si.</i>	60

Seznam tabulek:

<i>Tab. 1. Skupiny produktů pro HVOF tvorbu povlaků a jejich složení povlaků</i>	18
<i>Tab. 2. Tabulka srovnání vlastností běžně používaných nanočástic.</i>	20
<i>Tab. 3. Mikrotvrдость povlaků obsahující různý objemový podíl CNT.</i>	23
<i>Tab. 4. Tabulka chemického složení syntetického materiálu XLS laponitu.</i>	24
<i>Tab. 5. Tabulka závislosti mikrotvrlosti na vytvrzovacím procesu.</i>	26
<i>Tab. 6. Technologický postup bezproudého niklování.</i>	29
<i>Tab. 7. Postup výroby 10 l niklovací lázně.</i>	35
<i>Tab. 8. Pracovní podmínky niklovací lázně.</i>	36
<i>Tab. 9. Výrobce lázně udávaná charakteristika povlaku.</i>	36
<i>Tab. 10. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P na expoziční době pokovování.</i>	37
<i>Tab. 11. Vybrané tablety Ni – P a jejich parametry.</i>	38
<i>Tab. 12. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P v čase na Tribometru TOP 3.</i>	38
<i>Tab. 13. Koeficienty tření u povlaku Ni – P v čase.</i>	39
<i>Tab. 14. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – Al₂O₃ na expoziční době pokovování.</i>	42
<i>Tab. 15. Vybrané tablety Ni – P – Al₂O₃ a jejich parametry.</i>	43
<i>Tab. 16. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – Al₂O₃ v čase na Tribometru TOP 3.</i>	43
<i>Tab. 17. Koeficienty tření u povlaku Ni – P – Al₂O₃ v čase.</i>	44
<i>Tab. 18. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – D na expoziční době pokovování.</i>	47
<i>Tab. 19. Vybrané tablety Ni – P – D a jejich parametry.</i>	48
<i>Tab. 20. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – D v čase na Tribometru TOP 3.</i>	48
<i>Tab. 21. Koeficienty tření u povlaku Ni – P – D v čase.</i>	49
<i>Tab. 22. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – CNT na expoziční době pokovování.</i>	52
<i>Tab. 23. Vybrané tablety Ni – P – CNT a jejich parametry.</i>	53
<i>Tab. 24. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – CNT v čase na Tribometru TOP 3.</i>	53
<i>Tab. 25. Koeficienty tření u povlaku Ni – P – CNT v čase.</i>	54
<i>Tab. 26. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – XLS na expoziční době pokovování.</i>	57
<i>Tab. 27. Vybrané tablety Ni – P – XLS a jejich parametry.</i>	58
<i>Tab. 28. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – XLS v čase na Tribometru TOP 3.</i>	58
<i>Tab. 29. Koeficienty tření u povlaku Ni – P – XLS v čase.</i>	59
<i>Tab. 30. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P (chemický) v čase na Tribometru TOP 3.</i>	62
<i>Tab. 31. Koeficienty tření u povlaku Ni – P (chemický) v čase.</i>	63
<i>Tab. 32. Hmotnostní úbytky povlaku Cr v čase na Tribometru TOP 3.</i>	64
<i>Tab. 33. Koeficienty tření u povlaku Cr v čase.</i>	65
<i>Tab. 34. Srovnání hmotnostních úbytků jednotlivých kompozitních povlaků.</i>	66
<i>Tab. 35. Srovnání koeficientů tření jednotlivých kompozitních povlaků.</i>	68
<i>Tab. 36. Srovnání cen materiálů pro tvorbu lázní (ceny platné k 18.6.2015).</i>	71

Seznam grafů:

<i>Graf 1. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P na expoziční době pokovování.</i>	37
<i>Graf 2. Hmotnostní úbytky povlaku v závislosti na čase testování.</i>	38
<i>Graf 3. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Ni – P.</i>	39
<i>Graf 4. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Ni – P.</i>	39
<i>Graf 5. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – Al₂O₃ na expoziční době pokovování.</i>	42
<i>Graf 6. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – Al₂O₃ v závislosti na čase testování</i>	43
<i>Graf 7. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Ni – P – Al₂O₃.</i>	44
<i>Graf 8. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Ni – P – Al₂O₃.</i>	44
<i>Graf 9. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – D na expoziční době pokovování.</i>	47
<i>Graf 10. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – D v závislosti na čase testování.</i>	48
<i>Graf 11. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Ni – P – D</i>	49
<i>Graf 12. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Ni – P – D.</i>	49
<i>Graf 13. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – CNT na expoziční době pokovování.</i>	52
<i>Graf 14. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – CNT v závislosti na čase testování.</i>	53
<i>Graf 15. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Ni – P – CNT.</i>	54
<i>Graf 16. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Ni – P – CNT.</i>	54
<i>Graf 17. Závislost tloušťky vrstvy povlaku Ni – P – XLS na expoziční době pokovování.</i>	57
<i>Graf 18. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P – XLS v závislosti na čase testování.</i>	58
<i>Graf 19. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Ni – P – XLS.</i>	59
<i>Graf 20. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Ni – P – XLS.</i>	59
<i>Graf 21. Hmotnostní úbytky povlaku Ni – P (chemický) v závislosti na čase testování.</i>	62
<i>Graf 22. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Ni – P (chemický).</i>	63
<i>Graf 23. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Ni – P (chemický).</i>	63
<i>Graf 24. Hmotnostní úbytky povlaku Cr v závislosti na čase testování.</i>	64
<i>Graf 25. Hodnoty statického koeficientu tření povlaku Cr.</i>	65
<i>Graf 26. Hodnoty dynamického koeficientu tření povlaku Cr.</i>	65
<i>Graf 27. Srovnání úbytků povlaků v čase 20 minut.</i>	67
<i>Graf 28. Srovnání hmotnostních úbytků jednotlivých kompozitních povlaků v čase.</i>	67
<i>Graf 29. Srovnání statického koeficientu tření jednotlivých kompozitních povlaků.</i>	68
<i>Graf 30. Srovnání statického koeficientu tření jednotlivých kompozitních povlaků.</i>	69
<i>Graf 31. Srovnání dynamického koeficientu tření jednotlivých kompozitních povlaků.</i>	69
<i>Graf 32. Srovnání dynamického koeficientu tření jednotlivých kompozitních povlaků.</i>	70

Seznam zkratk:

TWI	Tooth wear index, koeficient tření
PVD	Physical Vapour Deposition, fyzikální technologie napařování povlaků.
CVD	Chemical Vapour Deposition, chemická technologie napařování povlaků.
UBM	Unbalanced magnetron sputter deposition, Magnetronové napařování PVD
HVOF	High velocity oxygen fuel, technologie vysokorychlostní žárový nástřik.
HCAT	Hard Chromium Alternative Team, Skupina pro náhradu tvrdého chromu.
PLD	Pulsní laserová depozice
ECC	Electrodeposited Composite Coating, Galvanické kompozitní povlaky
PTFE	Polytetrafluorethylen
Ni – P	Slitinový povlak Nikl – Fosfor
DND	Diamond nanodispersion, Diamantové částice, Nanodisperze
Ni – P – D	Kompozitní povlak s matricí Ni – P a diamantovou disperzí
CNT	Carbon Nanotubes, Uhlíkové nanotrubičky
Ni – P – CNT	Kompozitní povlak s matricí Ni – P a CNT disperzí
XLS	Syntetický jíl, Laponit
Ni – P – XLS	Kompozitní povlak s matricí Ni – P a XLS disperzí
Ni – P – Al₂O₃	Kompozitní povlak s matricí Ni – P a korundovou disperzí
Ni – P (Chemický)	Slitinový povlak Ni – P chemický vytvořený
Cr	Tvrdochromový povlak
I	Elektrický proud v Ampérech
T	Teplota ve °C
t	Čas, minuty
J	Proudová hustota v A.dm ⁻²
pH	Vodíkový exponent, bezrozměrný
Ra	Průměrná aritmetická odchylka povrchu (drsnost) ČSN EN 4782
M₀	Počáteční hmotnost tablety s naneseným povlakem v gramech
M₅	Hmotnost tablety po pěti minutách měření na tribometru TOP 3 v gramech
M₁₀	Hmotnost tablety po deseti minutách měření na tribometru TOP 3 v gramech
M₁₅	Hmotnost tablety po patnácti minutách měření na tribometru TOP 3 v gramech
M₂₀	Hmotnost tablety po dvaceti minutách měření na tribometru TOP 3 v gramech
hp	Tloušťka vyloučené vrstvy povlaku na zkušební tabletě v μm
μ stat	Hodnota statického koeficientu tření, bezrozměrná jednotka
μ dyn	Hodnota dynamického koeficientu tření bezrozměrná jednotka