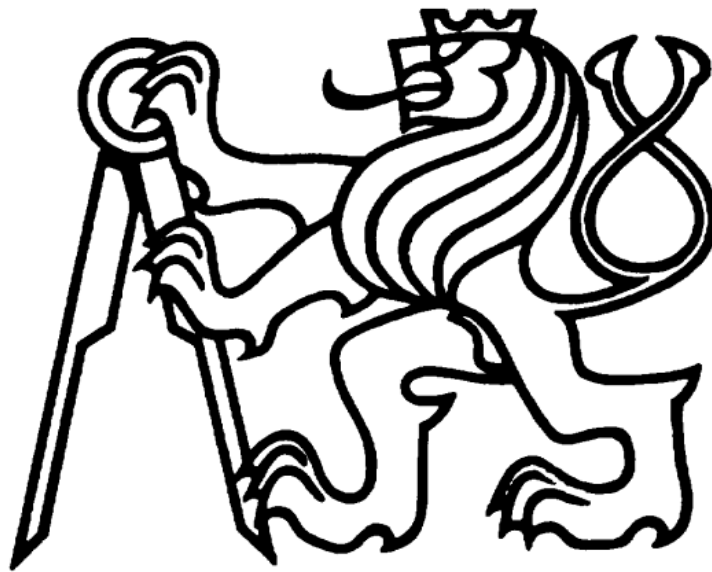


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

KOMPOZITNÍ POVLAK ZN-NI

ZN-NI COMPOSITE COATING

Autor: Sofia Kšiňanová

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Petr Drašnar, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jiří Kuchař, IWE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kšiňanová** Jméno: **Sofia** Osobní číslo: **453621**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Kompozitní povlak ZnNi

Název bakalářské práce anglicky:

ZnNi composite coating

Pokyny pro vypracování:

1. Technologie slitinového povlakování ZnNi
2. Způsob vytvoření kompozitního slitinového povlaku na bázi ZnNi
3. Ověření funkčních vlastností vyloučeného kompozitního slitinového povlaku na bázi ZnNi

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Ing. Jiří Kuchař, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2018**


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

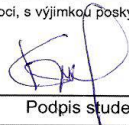

doc. Ing. Ladislav Kolářík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

10.5.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studentky

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jsem podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití toho školního díla ve smyslu § 60 Zákona č121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Praze dne

.....

Kšiňanová Sofia

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala za vedení a cenné rady vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Drašnarovi, Ph.D., konzultantovi Ing. Jiřímu Kuchařovi, IWE a celému kolektivu Ústavu strojírenské technologie.

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

Děkuji také mému příteli, rodině a dalším přátelům za podporu a pomoc během studia a tvorby bakalářské práce.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

Obor:	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
Název práce:	Kompozitní povlak ZnNi
Autor práce:	Sofia Kšiňanová
Vedoucí práce:	Ing. Petr Drašnar, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jiří Kuchař, IWE
Rozsah bakalářské práce:	Počet stran: 62 Počet obrázků: 23 Počet tabulek: 5

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou povrchových úprav galvanickým kompozitním pokovením. Zaměřuje se na vývoj nového kompozitního povlaku se slitinovou maticí a na jeho funkční vlastnosti.

Teoretická část je věnována současnému poznání v oblasti povrchových úprav na bázi zinku a niklu a také současným kompozitním povlakům.

Experimentální část se věnuje přípravě nového galvanicky vyloučeného kompozitního povlaku. Použita je slitinová matrice na bázi ZnNi s obsahem polymerních částic. Takto připravené kompozitní povlaky jsou následně hodnoceny zejména z hlediska jejich tribologických vlastností.

Klíčová slova: kompozitní povlak, galvanické pokovení, zinek, nikl, ZnNi

Annotation:

This bachelor thesis deals with the issue of surface treatment by galvanic composite coating. It focuses on the development of a new composite coating with an alloy matrix and its functional properties.

The theoretical part is devoted to the contemporary knowledge in the field of zinc and nickel surface treatment as well as contemporary composite coatings.

The experimental part deals with the preparation of a new electroplated composite coating. A ZnNi-based matrix with polymer particles is used. Composite coatings prepared in this way are evaluated in particular in the view of their tribological properties.

Keywords: composite coating, galvanic coating, zinc, nickel, ZnNi

Obsah

1	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
2	ÚVOD.....	12
	TEORETICKÁ ČÁST.....	13
3	GALVANICKÉ POKOVOVÁNÍ.....	13
3.1	PRINCIP GALVANICKY VYLOUČENÝCH POVLAKŮ	13
3.2	TECHNOLOGICKÝ POSTUP GALVANICKÉHO POKOVENÍ	14
3.2.1	<i>Předúprava povrchu</i>	<i>15</i>
3.2.2	<i>Dokončovací operace.....</i>	<i>16</i>
3.2.3	<i>Vysvětlení pojmů.....</i>	<i>17</i>
4	POVLAKY NA BÁZI ZINKU.....	19
4.1	POVRCHOVÁ ÚPRAVA ZINKEM	19
4.1.1	<i>Technologie vyloučení Zn povlaků.....</i>	<i>19</i>
4.1.1.1	<i>Lázně pro galvanické zinkování</i>	<i>21</i>
5	POVLAKY NA BÁZI NIKLU.....	22
5.1	POVRCHOVÁ ÚPRAVA NIKLEM	22
5.1.1	<i>Elektrolytické pokovování.....</i>	<i>22</i>
5.1.2	<i>Chemické pokovování</i>	<i>23</i>
6	SLITINA ZINEK – NIKL.....	23
6.1	VLASTNOSTI	24
6.2	VYTVOŘENÍ SLITINOVÉHO POVLAKU ZNŇI	25
6.2.1	<i>Slabě kyselá slitinová lázeň</i>	<i>25</i>
6.2.2	<i>Alkalická slitinová lázeň</i>	<i>26</i>
7	KOMPOZITNÍ GALVANICKÉ POVLAKY.....	27
7.1	CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	27
7.2	CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH GALVANICKÝCH POVLAKŮ	27

7.3	PRINCIP VYLUČOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH GALVANICKÝCH POVLAKŮ	28
7.4	SLOŽENÍ KOMPOZITNÍCH POVLAKŮ	28
7.4.1	<i>Matrice</i>	28
7.4.2	<i>Disperzní částice</i>	29
7.5	KOMPOZITNÍ POVLAKY NIKLU	31
7.6	KOMPOZITNÍ POVLAKY ZINKU	32
8	TRIBOLOGIE	32
8.1	TŘENÍ	33
8.2	OPOTŘEBENÍ	33
9	ZÁVITOVÁ DVOJICE	34
9.1	SELHÁNÍ ŠROUBOVÉHO SPOJE	34
10	HYPOTÉZY A CÍLE PRÁCE	36
	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	37
11	EXPERIMENTÁLNÍ SCHÉMA	37
12	PŘÍPRAVA POKOVOVÁNÍ	38
12.1	TECHNOLOGICKÝ POSTUP	38
12.2	STANOVENÍ PROUDOVÉ HUSTOTY	38
12.3	STANOVENÍ TEPLoty LÁZNĚ	39
12.4	ELEKTROLYZÉR PRO VYLOUČENÍ ZN ₂ Ni KOMPOZITNÍHO POVLAKU	39
12.5	POKOVOVANÉ VZORKY – SHRUTÍ	40
13	VÝSLEDKY	40
13.1	ANALÝZA POMOCÍ OPTICKÉ MIKROSKOPIE	40
13.2	VYLUČOVACÍ RYCHLOST KOMPOZITNÍHO POVLAKU	41
13.3	VIZUÁLNÍ HODNOCENÍ POVLAKŮ	43
13.4	VÝSLEDKY TRIBOLOGICKÝCH TESTŮ	45
13.4.1	<i>Tribometr TOP 3</i>	45
13.4.2	<i>Zařízení společnosti Rtec Instruments - MFT-5000 Multi functional Tribometer</i>	48

13.4.3	<i>Lineární test</i>	50
13.4.4	<i>Rotační test – pin on disc</i>	52
13.5	DISKUZE VÝSLEDKŮ	53
14	ZÁVĚR	55
15	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	56
16	SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	57
17	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:	58

1 Seznam použitých symbolů a zkratek

K	elektrochemický ekvivalent
ε	teoretické množství vyloučeného kovu dle Faradayova zákona
m	množství vyloučeného kovu
I	intenzita procházejícího proudu
t	čas
r	účinnost (proudový výtěžek)
α	elektrochemický ekvivalent
h	tloušťka povlaku
ρ	hustota vylučovaného kovu
S	plocha předmětu
μ	činitel tření
F_n	normálová síla
M_A	utahovací moment šroubu
F_M	napínací síla šroubu
p	stoupání závitu
d_2	střední průměr šroubovice závitu
μ_G	součinitel tření v závitu
$\frac{D}{2}$	účinný třecí radius hlavy
μ_k	součinitel tření dosednutí hlavy
T	teplota lázně
Tt	teplota tavení kovu
M	molární hmotnost vylučovaného kovu
n	počet elektronů vystupujících v katodové reakci
F	Faradayova konstanta
U	napětí na elektrolyzéro
G	váha vyloučeného kovu
s	specifická hmotnost vylučovaného kovu
Ae	elektrochemický ekvivalent
Ra	střední aritmetická úchylka profilu

Zn	zinek
Ni	nikl
Cd	kadmium
W	wolfram
Si	křemík
C	uhlík
B	bor
H	vodík
Co	kobalt
Fe	železo
K	draslík
Al	hliník
Pb	olovo
Cu	měď
Cr	chrom
P	fosfor
Zr	zirkon
O	kyslík
PTFE	polytetrafluorethen
CNT	karbonová nanotrubiice
XLS	syntetický vrstvený křemičitan
tzv.	takzvané
např.	například
PČ	polymerní částice
Komp.	kompozitní

2 Úvod

Zvyšování životnosti, technické úrovně, kvality a spolehlivosti výrobků je hlavní prioritou technického vývoje. Čím dál víc se moderní technologie přizpůsobují nejenom zákazníkům, ale i životnímu prostředí a ekonomice. Důležitým odvětvím, které má významný podíl na životnosti a funkčnosti technického zařízení, jsou povrchové úpravy.

Cílem povrchových úprav je zajištění požadovaných vlastností výrobků pro jejich dlouhodobé používání bez vad a problémů. To je možné provést vytvořením vrstvy či povlaku, který tyto vlastnosti splňuje. Mnohé z povlaků, které jsou momentálně k dostání na trhu, vyhovují podmínkám jen částečně, případně je nutné je kombinovat. Proto je důležité se věnovat vývoji kompozitních povlaků. Ty umožňují kombinaci vlastností kovové matrice s vlastnostmi dispergovaných částic.

Teoretická část popisuje dosavadní znalosti a trendy v oblasti povrchových úprav. Hlavní pozornost je věnována technologii galvanického pokovování se zaměřením na slitinové pokovení.

Praktická část postupně řeší stanovené cíle práce. Nežádoucí změny materiálů, jako je třeba koroze, vedou k technickým i ekonomickým problémům. Jedním z nich je například šroubové spojení, které se vlivem koroze stává časem nerozebíratelným. To bylo podnětem pro vývoj nového kompozitního povlaku na bázi slitinové matrice, v níž jsou jemně dispergovány polymerní mikročástice. Povlak byl vytvořen při určitých podmínkách stanovených z předchozích zkušeností s vytvářením kompozitních povlaků. Následně byl povlak zkoumán hlavně z tribologického hlediska.

TEORETICKÁ ČÁST

3 Galvanické pokovování

Cílem elektrolytického pokovování je vylučování kovových povlaků na převážně kovových materiálech. Povrchová úprava má značný vliv na konečné vlastnosti výrobků. Ovlivňuje vzhled, funkční vlastnosti povrchu a slouží jako protikorozní ochrana.

Díky praktičnosti, jednoduchosti a skvělým výsledkům je tato metoda jednou z nejčastěji používaných povrchových úprav. [2, 3]

3.1 Princip galvanicky vyloučených povlaků

Principem galvanických povlaků je elektrolýza vodních roztoků kovových solí. Elektrolýza funguje jako uzavřená soustava, a proto v ní musí platit zákon o zachování energie. Je nutné, aby lázeň obsahovala volně pohybující se ionty. V lázni se rozpouštějí kovové soli, a tak dochází k disociaci.

Po zavedení stejnosměrného elektrického proudu se na kladné elektrodě začnou vylučovat záporně nabití ionty a naopak: na záporně nabité elektrodě se vylučují kladně nabití ionty. Jedna elektroda tedy oxiduje - nazývá se anoda a na druhé dochází k redukci - ta se nazývá katoda. Tento děj graficky popisuje obrázek č. 1.

Elektrody mohou být rozpustné či nerozpustné. U rozpustných (například zinkové či niklové) bude elektroda sama doplňovat obsah kovových iontů. Pokud ale použijeme elektrodu nerozpustnou, bude se postupně koncentrace roztoku snižovat až do doby, kdy lázeň své složky nevyčerpá, lázeň se stane nevodivou a elektrolýza se zastaví. [1]

Proces se řídí Faradayovy zákony.

První Faradayův zákon říká, že množství změněné látky je úměrné náboji, který prošel elektrolytem a popisuje ho vzorec

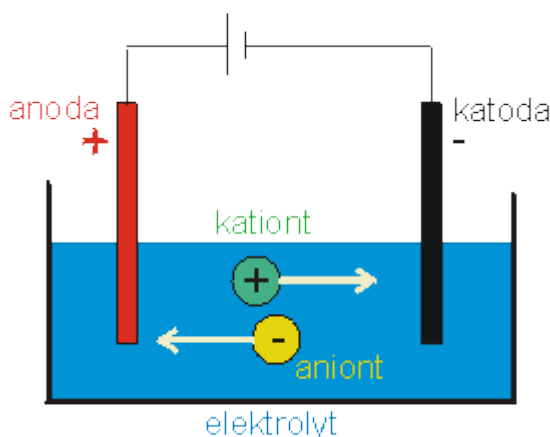
$$m = K \cdot I \cdot t, \quad (1)$$

kde K je elektrochemický ekvivalent, m je množství vyloučeného kovu, I je proud v ampérech a t je doba [s], po kterou elektrolytem prochází proud.

Ve druhém zákonu je uvedeno, že látková množství vyloučena stejným nábojem v různých elektrolytech, jsou chemicky ekvivalentní. To znamená, že elektrochemický ekvivalent je přímo úměrný molární hmotnosti látky.

$$m = \frac{M}{n \cdot F} \cdot I \cdot t, \quad (2)$$

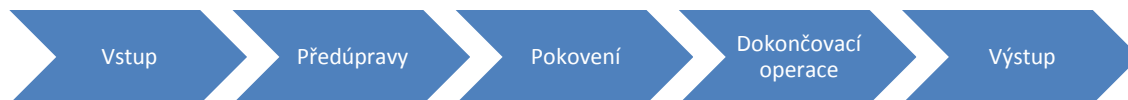
Kde M je molární hmotnost látky, kterou proměňujeme, n je počet elektronů vyměněných při reakci a F je Faradayův náboj, jehož hodnota je 96 488 C. [10]



Obr. 1: Schéma elektrolýzy [4]

3.2 Technologický postup galvanického pokovení

Základní technologický postup galvanického pokovení je zobrazen na obrázku č. 2.

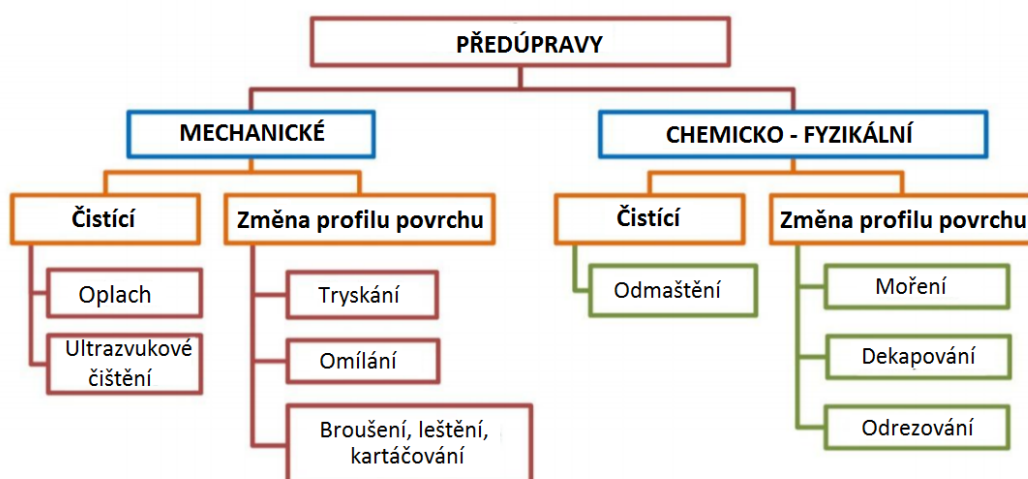


Obr. 2: Schéma technologického postupu [22]

3.2.1 Předúprava povrchu

Předúprava povrchu je nevyhnutní a velmi důležitou etapou povrchových úprav. Cílem předúpravy je vyčistit a kvalitativně připravit povrch tak, aby použita povrchová úprava dosáhla požadovaných vlastností a dostatečně plnila svou funkci.

Na povrchu materiálů se nachází různé druhy nečistot. Jsou to nečistoty vlastní – k povrchu vázané chemicky. Nebo cizí – nečistoty, které jsou k povrchu vázané adhezními silami. Volba nejvhodnějšího způsobu, jak odstranit vlastní i cizí nečistoty, závisí od stavu podkladu, rozsahu korozního napadení a od korozní agresivity prostředí. Rozdělení způsobů předúprav popisuje obrázek č. 3. [34]



Obr. 3: Způsoby předúprav povrchu [34]

Ultrazvukové čištění je kombinací mechanického působení čisticí kapaliny s frekvencí ultrazvukové energie a chemického odmašťovacího účinku

Tryskání je produktivní způsob čištění, odstranění okují a korozních produktů za současného zpevnění povrchu.

Omílání je hromadná předúprava. Dávka výrobků, nejčastěji odlitků či vylisků, se vzájemně omílá v bubnu. Ten vykonává rotační, vibrační nebo kombinovaný pohyb. V případě potřeby je možné přidat omílací tělíska z různých materiálů a různých tvarů.

Broušení, kartáčování či leštění se realizují ručně nebo strojově.

Odmašťování je odstranění cizích nečistot, jako jsou například tuky, oleje, vosky, chladicí kapaliny či vazelíny. Probíhá pomocí vodních či organických prostředků, elektrochemicky či párou.

Moření odstraňuje oxidy z povrchu rozpouštěním v kyselinách.

Dekapování (aktivace) slouží k odstranění tenkých oxidických vrstev a k aktivaci povrchu před samotnou povrchovou úpravou.

Odrezování je k čištění předmětů, které zkorodovali při používání či skladování. Odrezovače jsou nejčastěji na bázi H_3PO_4 . [34]

3.2.2 Dokončovací operace

Pasivace

Pasivace slouží jako bariérová ochrana slitinového povlaku ZnNi. Dosahuje tloušťek 80 – 300 nm. Vytváří se ponořením součástí do pasivační lázně. Ta obsahuje sloučeniny trojmocného chromu, fluoridy, sloučeniny kobaltu a také rozpuštěný zinek a nikl.

Pasivace může mít různé barevné provedení. Je možné vytvořit barvy jako je modrá, černá, iridizující a nepoužívanější je transparentní (90 - 95% vyrobených dílů). Ostatní barvy se používají výjimečně při specifických požadavcích na vzhled či korozní odolnost.

Pasivaci provádíme při teplotách 20 – 50 °C v závislosti od druhu pasivační lázně. Čas ponoru se pohybuje v rozmezí 30 – 120 s.

Při hodnotě pH 3,5 můžeme vytvořit pasivační vrstvu barvy modré či transparentní o tloušťce 80 – 100 nm. V oblasti pH 2,0 je možné vytvořit povlaky tlusté (iridizující) a černé o tloušťce 200 – 300 nm. Pro vytvoření temné černé barvy je nutné po pasivaci provést následné utěsnění.

Pro vytvoření pasivační vrstvy se správnými vlastnostmi je důležitý rovnoměrný pohyb lázně kolem součásti. [16]

Vyjasnění

Před použitím některých pasivačních lázní je nutné aplikovat takzvané vyjasnění. Vyjasnění je krátká aktivace slitinového povlaku ZnNi ve zředěné kyselině za teploty okolí. Pro tyto účely můžeme použít kyselinu sírovou, dusičnou či metansulfonovou. [16]

Utěsnění

Tato operace může následovat po pasivaci slitinových povlaků ZnNi. Vytváří se ponorem do utěšňovací lázně, čímž se na povrchu součástí tvoří transparentní film, který slouží v zvýšení korozní ochrany, sjednocuje vzhled pasivační vrstvy, podporuje odolnost vůči otěru a snižuje tření. Předpokladem pro správné vytvoření utěšňovací vrstvy je kvalitní oplach po kyselých pasivačních lázních. Používá se po transparentní či černé pasivaci.

Pro utěsnění je možné použít lázně na organické, anorganické či směsné bázi. [16]

3.2.3 Vysvětlení pojmů

Vylučovací rychlost

K vyloučení určité tloušťky povlaku je potřeba určitého proudu a času pokovení. Vylučovací rychlost tedy značí, jak rychle se při určité hodnotě proudu, vyloučí určitá tloušťka povlaku. Z toho je možné usoudit, že rychlost vylučování je přímo úměrná intenzitě proudu, který elektrolyzérem protéká. Vzorec číslo tři vyjadřuje vztah mezi dobou pokovení a tloušťkou vyloučeného povlaku. Vzorec číslo 4, který se používá zejména v případě dekorativního pokovení, vyjadřuje vztah mezi dobou pokovení a hmotností vyloučeného kovu na povrchu. [35]

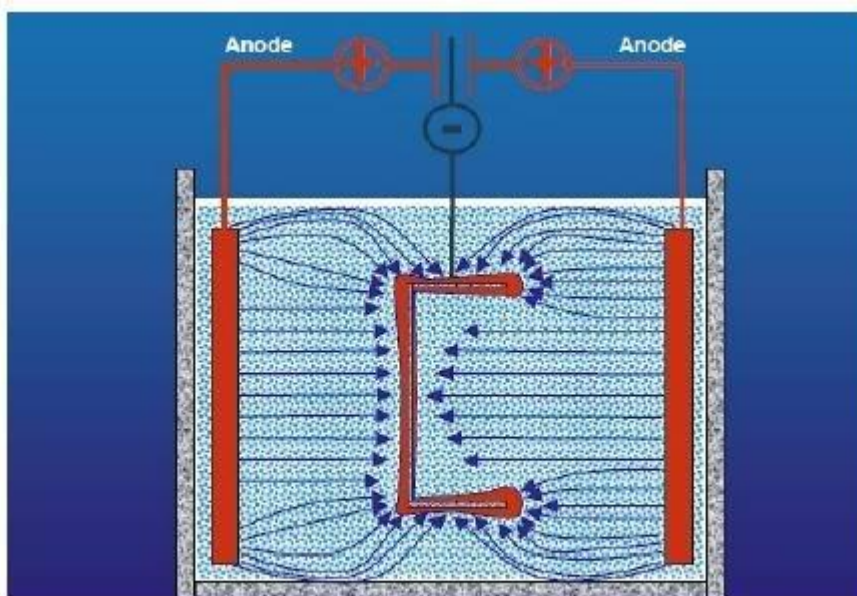
$$t = (h \cdot s \cdot S \cdot 1\,000) / (Ae \cdot I \cdot r), \quad (3)$$

$$t = (G \cdot S \cdot 1000) / (Ae \cdot I \cdot r), \quad (4)$$

Kde t je čas pokovení v hodinách, S je plocha pokoveného předmětu v $[\text{dm}^2]$, r značí katodický proudový výtěžek v [%], G je váha vyloučeného kovu v [g], s je specifická hmotnost vylučovaného kovu v $[\text{g}/\text{cm}^3]$, Ae je elektrochemický ekvivalent v $[\text{g}/\text{A}\cdot\text{hod}]$, h značí tloušťku povlaku a i je pro proudovou hustotu v [A]. [35]

Hloubková účinnost

Hloubková účinnost je charakteristikou rozdílné tloušťky vyloučeného povlaku. Katodická proudová hustota v jednotlivých místech pokovovaného zboží může být rozdílná dle tvaru zboží a elektrostatického pole. Rovnoměrnost tohoto pole je možné ovlivnit vhodným rozložením anod či stínících prvků. Platí, že na vyvýšených místech je intenzita vyšší a naopak – v prohloubeninách či otvorech nižší, než je průměrná proudová hustota. Princip hloubkové účinnosti je zobrazen na obrázku č. 4. [35]



Obr. 4: Princip hloubkové účinnosti při galvanickém pokovení [35]

Krycí schopnost

Krycí schopnost je schopnost lázně vytvořit rovnoměrný povlak i v obtížných místech součásti bez ohledu na tloušťku povlaku. [36]

4 Pvlaky na bázi zinku

Zinek se nejčastěji vyrábí ze sulfidických rud. Nejznámější rudou je ruda sulfidu zinečnatého ZnS, která se taky nazývá sfalerit či zinkové blejno. Je to bílý lesklý kov s modrošedým nádechem. Ve vlhkém prostředí se na povrchu vytvoří hydroxid a uhličitán zinečnatý. Rozpouštíme ho v nečisté formě v kyselinách. Je méně ušlechtilý než železo. Teplota tání je 419,53 ° C. [5, 32]

4.1 Povrchová úprava zinkem

Zinek je vhodnou ochranou železa proti korozi. Funguje jako bariérová i katodická ochrana železa. Jelikož zinek má menší potenciál jako železo, přednostně se rozpouští, a tak je základní materiál převeden do stavu imunity. [8, 9]

Použití je velmi různorodé. Pro své ochranné vlastnosti je povrchová úprava zinkem oblíbená zejména ve strojírenství. Používá se ve velké míře na zinkování spojovacího materiálu, v automobilovém průmyslu, spotřební materiál, montážní nářadí, motocykly, kola a jiné. [10]

4.1.1 Technologie vyloučení Zn povlaků

Žárový nástřik

Jinak se také nazývá jako metalizace či „šopování“. Jedná se o mechanické pokovování, při kterém se částičky nataveného zinku pomocí pistole nanášejí na povrch pokoveného přemetu. [6]

Žárové zinkování

Výrobek je pokovený ponorem do taveniny zinku, čímž se na povrchu vytvoří intermetalická fáze železa a zinku. Mezi hlavní přednosti takto vytvořených povlaků

patří jednoduchost zařízení, dlouhá životnost pokovovaného zboží, nízké vstupní náklady a rovnoměrná tloušťka povlaku i na těžce přístupných plochách. Proto je často používaný v hromadné výrobě. [7, 33]

Galvanické zinkování

Zinek je na povrchu vylučován elektrolyticky. Princip je popsán detailně v kapitole 1.2.

Životnost tohoto povlaku je možné zvýšit pasivací v chromovacích roztocích, čímž vznikne povlak složený z iontů zinku, trojmocného chromu. Barva povlaku je závislá na složení lázně a může být modrá, hnědá, žlutá, černá, bronzová či olivová. [10]

Další způsoby zinkování

Mezi další způsoby zinkování patří například studené zinkování. Je to způsob povrchové úpravy, kdy je zinek nanášen formou nátěrové hmoty. Skládá se ze zinkového prachu, polyesterové pryskyřice, pigmentů a ředidel. Je možné ho nanášet štětcem, válečkem či nízkotlakým stříkáním pomocí stlačeného vzduchu. [8]

Při difuzním zinkování (sherardování) se na povrchu kovových předmětů pomocí difuze tvoří souvislá vrstva zinku. Ta je tvořena asi 80 % zinku a 20 % železa ze základního materiálu. To však může být i jinak – podle zvolených parametrů. Vzhled tohoto povlaku je šedý a matný. Výhodou difuzního zinkování oproti např. galvanickému zinkování či zinkování ponorem je to, že poměrně přesně zachovává geometrické tvary a vrstva je rovnoměrná. [37]

Moderní povrchovou úpravou zinkem jsou systémy s mikrolamelami a mikrovločkami zinku. Základem pojiv jsou komplexní titanáty nebo zirkonáty na rozpouštědlové bázi nižších alkoholů či komplexní silikáty na bázi vody. Povlaky se nanášejí máčením, stříkáním či technologií dip spin coating (namáčením, ostříkáváním a odstředěním v bubnu). Následně jsou součásti vysušené a vytvrzené. [38]

4.1.1.1 Lázně pro galvanické zinkování

Alkalické lázně

Nositelem kovu je zinečnatonový komplex. Alkalický hydroxid zajišťuje dobrou vodivost roztoku a jeho stabilitu. Bez leskutvorných přísad nelze vylučovat kvalitní povlaky. Na rozdíl od kyanidových lázní neobsahují žádné jedy, což je velmi výhodné kvůli odpadním vodám a ekologii. Mezi nevýhody patří nízká vylučovací rychlost, hloubková účinnost a krycí schopnost. Používají se hlavně pro velkovýrobu a hromadné pokovování. [10]

Slabě kyselé lázně s amonnými ionty

Slabě kyselé lázně jsou dnes nejběžněji používané lázně. Nositelem jsou amokomplexy zinku a komplexní anionty chlorozinočnaté. V tomto případě je vodící solí chlorid amonný. Spolu s přísadami pro tvorbu lesku se vytvářejí velmi kvalitní, jemně krystalické a lesklé povrchy, vhodné i pro dekorativní účely. Hloubková účinnost je jen o něco málo nižší než u kyanidových lázní a schopnost krýt je vynikající. Vzhledem k tomu, že se při reakci nevylučuje vodík, je možné tuto lázeň používat i při vysoce pevných ocelích, šedé a temperované litině. Nevýhodou je citlivost na kovové nečistoty a vysoké nároky na předúpravu povrchu. [10]

Slabě kyselé lázně bez amonných iontů

Nositelem zinku je chlorid sodný nebo chlorid draselný. Vlastnostmi je jinak velmi podobný lázni s amonnými ionty. [10]

Kyanidová lázeň

Nositelem kovu je komplexní kyanid zinečnatý. Dále se do lázně přidává volný kyanid, alkalický hydroxid a uhličitan. Často se přidává sirník sodný pro zjemnění zrna a zároveň částečně působí jako přísada pro tvorbu lesku. Jako další látky potlačující tvorbu zákalu se používají makromolekulární povrchově aktivní látky - například želatina. Mezi výhody patří, že se spolu s ionty těžkých kovů vytvářejí nerozpustné sirníky, a tak má lázeň schopnost se sám čistit. Upravovaný povrch je

jemně krystalický a velmi kvalitní. Nevýhodou této lázně je měď, kterou musíme odstranit filtrací přes zinkový prach a vzhled výrobku. Dnes už se z ekologických důvodů tento typ lázní nepoužívá. Kyanid sodný je silný jed, což komplikuje likvidaci odpadních vod. [10]

5 Povlaky na bázi niklu

Nikl jako chemický prvek je stříbrno-bílý, lesklý, kujný a tažný kov s feromagnetickými vlastnostmi. Na atmosféře se na povrchu vytváří mléčné zabarvený povlak oxidů. Zředěný v kyselinách se pomalu rozpouští za vzniku vodíku a nikelnaté soli. V přírodě se vyskytuje jako ryzí kov často doprovázen kobaltem. Jeho teplota tavení je 1453 ° C. [10, 11]

5.1 Povrchová úprava niklem

Z elektrochemického hlediska je nikl proti oceli poměrně ušlechtilý kov. Z toho důvodu chrání kov bariérově. Proto je důležitým parametrem množství pórů, ve kterých se soustředí korozní proud. [10]

Povlak Ni je odolný proti opotřebení a přiměřená tloušťka povlaku odolává vlivům koroze. Dnes je možné vytvořit lesklé i matné povlaky niklu. Pro lesklé povlaky, které mohou vytvořit i povlak na principu katodické ochrany jsou používané povlaky v kombinaci Cu-Ni-Cr nebo jen Ni-Cr. [12, 39]

5.1.1 Elektrolytické pokovování

Niklu je na povrchu vylučovaný galvanicky, což je přesně popsáno v kapitole 1.2. Používáme ho hlavně u výrobků, kde je nutná vyšší ošetrivost, jelikož je proti jiným běžně používaným materiálům v tomto ohledu výrazně napřed. Protože je nikl také magnetický, používáme ho tam, kde je nutné magnetizovat.

Jeho vlastností využívá hlavně automobilový průmysl například na výfuky, nárazníky a výplně. Další použití nachází i v leteckém průmyslu, motocyklech,

jízdnicích kolech či na ručním nářadí. V domácnosti se nikl používá na svítidla, spotřebiče a výrobky z drátů (například stojany). [13]

5.1.2 Chemické pokovování

Chemické pokovování niklem je autokatalytická metoda, při níž může být redukce kovových iontů v roztoku a nanášení filmu provedeno oxidací chemické sloučeniny přítomné v samotném roztoku, takzvaným redukčním činidlem, které dodává vnitřní proud. Kromě niklu takhle jde vylučovat i mnoho jiných kovů.

Mezi výhody patří jeho fyzikální i mechanické vlastnosti, také schopnost pokovit i dutiny součástí. Zařízení pro výrobu je jednoduché, avšak vylučovací rychlost je nízká a mezi nevýhody patří také regenerace lázně po vyčerpání. Požadované vlastnosti se mohou měnit volbou různých pH, teploty a složení lázně.

Tento způsob pokovení má již dlouhou historii a z hlediska budoucnosti se zdá velmi perspektivním. [14]

6 Slitina zinek – nikl

S vývojem vylučování slitinového povlaku zinek – nikl vědci začali už v osmdesátých letech dvacátého století. Již v roce 1980 byla vytvořena první slabě kyselá lázeň s amonnými ionty. Následně byl proveden test, který prokázal, že díly ošetřené tímto povlakem měli výrazně nižší korozní napadení základního materiálu než díly ošetřené samotným zinkem.

V roce 1991 se začala používat lázeň se 6-8% niklu, pak byl obsah niklu zvýšen na 12-15%. Po zvýšení obsahu niklu totiž dojde k vyloučení tzv. γ fáze, která je korozně vysoko odolná. [15]

S rokem 2002 byla vyvinuta membránová technologie, která má za cíl snížit množství rozkladných produktů v lázni a zvýšit její účinnost. Tato technologie našla uplatnění hlavně v hromadném pokovování. Membránová technologie slouží k separaci látek s využitím polopropustných membrán. Proces je závislý na schopnosti

látek procházet vnitřními póry membrány na druhou stranu. Látky jsou na membránu tlačeny, čímž jsou nuceny přecházet na druhou stranu membrány. Ta je pórovitá, což má za následek, že skrz ni projdou pouze látky s průměrem menším, než je průměr pórů. Látky, které mají průměr větší, zůstávají na membráně zadrženy. [15, 40]

V roce 2005 byla vyvinuta lázeň bez amonných iontů. Z důvodu nařízení Evropské unie byl v roce 2007 nahrazen šestimocný chrom trojmocným. Tím vznikli transparentní, duhové či černě zbarvené povlaky. [15]

6.1 Vlastnosti

Slitinový povlak zinek – nikl má proti použití samotného zinku či niklu výrazně lepší vlastnosti, jako například korozní odolnost či odolnost proti otěru. Patří mezi ně zejména snížení tvorby korozních produktů, což umožňuje ucpávání trhlin korozními zplodinami a tím pádem dochází ke zvýšení bariérové ochrany základního materiálu. Literatura uvádí, že tento povlak má několikanásobně větší protikorozní ochranu než čistě zinkový povlak. [15]

Zinkové povlaky mají při kontaktu s hliníkem výrazně menší potenciál. Při použití slitinového povlaku ZnNi jsou však potenciálové rozdíly značně menší, což ve vodivém prostředí umožňuje kombinaci těchto dvou materiálů.

Další z důležitých výhod tohoto povlaku je možnost využití v prostředí se zvýšenou teplotou. Jak už bylo napsáno v kapitole o zinku, jeho teplota tání za normálního tlaku je cca 419 °C, kdežto slitina niklu se zinkem (12-15%) taje při teplotách nad 700 °C. Díky tomu je používána například na díly motorů. [15]

Tvrдость zinkových povlaků je 40 – 150 HV. Slitinovým povlak zinek – nikl, který má tvrдость v závislosti na obsahu niklu přibližně 410 – 450 HV je tím pádem i mnohem víc odolný vůči otěru. [15]

V povlacích ze zinkovacích alkalických lázní se po několika dnech až týdnech od pokovení tvoří tzv. whiskery. Jsou to monokrystaly, které porušují strukturu zinkového povlaku a tím pádem negativně ovlivňují drsnost a odolnost proti korozi. Ve slitinovém povlaku zinek – nikl se whiskery vůbec netvoří. [15]

6.2 Vytvoření slitinového povlaku ZnNi

Pro vytvoření slitinového povlaku ZnNi využíváme galvanického pokovení. Povlak je možné vytvořit ze dvou typů lázní. Oba typy lázní vytvoří povlak se stejnou tepelnou a protikorozní ochranou, liší se v rozložení tlouštěk, vylučovací rychlosti, proudovém výtěžku, vhodnosti použití, následné pasivaci či v náročnosti technologického vybavení pro vytvoření tohoto slitinového povlaku. [16]

6.2.1 Slabě kyselá slitinová lázeň

Hlavní výhodou této lázně je přímé pokovení slitinových dílů a vyšší vylučovací rychlost. Toho se využívá zejména u hromadného pokovení tvarově jednoduchých dílů. Mezi nevýhody však patří nehomogenita výsledného povlaku. [16,17]

Obsah obou látek je v rozmezí 28 – 35 g/l a jejich poměr je 1 – 1,2 : 1 ve prospěch zinku. Lázeň je na bázi chloridu draselného, kde je koncentrace chloridů 160 – 180 g/l.

Organické látky jsou rozděleny do tzv. galvanických přísad, kterých úkolem je zajišťovat rovnoměrné rozložení slitiny v širokém rozsahu proudových hustot, udržovat stabilní chod lázně, zjemňovat velikost zrna, zlepšovat zabíhavost a krycí schopnost, umožňovat vylučování lesklých slitinových povlaků a jejich dobrou pasivovatelnost.

Pro správné vylučování slitiny je důležité dodržovat teplotu v přesném rozmezí od 28 do 32°C. Při teplotě vyšší se zvýší obsah niklu a při teplotě pod 25°C dojde k vysrážení solí. Tento děj je sice vratný, avšak zpětné zvýšení teploty je nákladné.

Střední katodická proudová hodnota je 0,5 – 2,0 A/dm². Při nižší hodnotě se zvyšuje obsah niklu a vylučují se kovové nečistoty. Vyšší hodnoty způsobují napalování slitinového povlaku a doporučuje se nepřekročit hraniční hodnotu pro pasivaci což je 4 A/dm².

Nejčastěji se používají zinkové a niklové anody, každá s vlastním proudovým okruhem v poměru proudů 4:1. Nikl však někdy bývá doplňován rozpouštěním síranu či chloridu nikelnatého. [16]

6.2.2 Alkalická slitinová lázeň

Tato lázeň vylučuje slitinový povlak ZnNi se stejnými 12 – 15% Ni. Proti slabě kyselé lázni má však mnohem lepší homogenitu. Toho se využívá hlavně při pokovení tvarově složitých součástí. Další z výhod je možnost využití pomocných anod, které ještě víc zlepšují rozložení tlouštěk a zvyšují tak hospodárnost procesu. [16,17]

Obsah zinku i niklu je podstatně nižší: u zinku je to 6 – 10 g/l, niklu 0,6 – 1,5 g/l. Lázeň je formulovaná na bázi hydroxidu sodného, jehož koncentrace je 90 – 130 g/l. Stárnutím roste obsah uhličitanu sodného a snižuje se tak obsah hydroxidu sodného. Koncentrace sody by však neměla překročit obsah 60g/l, jelikož pak může dojít k vysrážení organických látek. Ty obsahují komplexotvorné látky, které udržují zinek a nikl v alkalické lázni a tak jako u slabě kyselé lázně: zajišťují rovnoměrné rozložení slitiny, zjemňují zrno, zabraňují napalování povlaku v oblasti vyšších proudových hustot, zlepšují zabíhavost a krycí schopnost ve stíněných místech i dobrou pasivovatelnost.

Nikl je do lázně přidán jako tekutý roztok s 50 – 100 g/l síranu nikelnatého ve větším objemu než ostatní přísady. Pro přesné vylučování je nutné dodržet teploty 25 – 35 °C s odchylkou maximálně ± 2 °C. Vyšší teplota má za následek vyšší obsah niklu a naopak: nižší teplota způsobuje jeho nedostatečné množství.

Proudová hustota na katodě nabývá hodnot mezi 0,5 – 3,5 A/dm². Tak jako u slabě kyselé lázně, vyšší hodnoty způsobují napalování slitinového povlaku a u nižších se spoluvylučují kovové nečistoty. [16]

7 Kompozitní galvanické povlaky

Za vývojem kompozitních povlaků stála tak, jako i za jinými technologiemi, válka. Po druhé světové válce je začali vyvíjet zejména v USA i v dalších zemích s vidinou zlepšení korozní odolnosti. Později byly zjištěny i další pozitivní vlastnosti jako je odolnost proti otěru, zlepšení životnosti povrchů strojních součástí a nástrojů. Kromě toho je cílem vývoje kompozitních povlaků také náhrada klasických povlaků, jako například chromu, jelikož jsou náročné na vylučování a mají výrazný dopad na životní prostředí. V angličtině je možné tyto povlaky najít pod názvem Electrodeposited Composite Coating (ECC). Kompozitní povlaky je možné nanášet výbuchem, mechanicky či plazmou ale zatím nejpoužívanější a nejefektivnější způsob je galvanické a chemické pokovování. [18, 21, 22]

7.1 Charakteristika kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jsou tvořeny minimálně ze dvou či více chemicky odlišných složek, tzv. fází. První se nazývá výztuž, což je fáze tvrdší, tužší a pevnější a nespojitá. Druhou fází je poddanější matrice, která plní úlohu pojiva.

Vyztužující fáze mohou být o různých rozměrech, ve strojírenství jsou pro nás nejdůležitější mikrokompozity. Jejich největší rozměry příčné výztuže jsou od 10^0 do 10^2 μm . Dále známe makrokompozity používané hlavně ve stavebnictví, či nanokompozity jejichž největší částice se velikostně pohybují v řádech nm. [19]

7.2 Charakteristika kompozitních galvanických povlaků

Možnost použití kovových či nekovových částic jemně dispergovaných do kovové matrice přinesla úplně nový druh kompozitního materiálu. To představuje povlaky se zajímavými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Tyto vlastnosti jsou závislé na různých proměnných, jako je například velikost a tvar částic v elektrolytické lázni, či jejich rozložení uvnitř kompozitu. Mezi další proměnné patří také povaha lázně, povrchový náboj částic, proudová hustota, teplota, hodnota pH, a zejména stupeň míchaní lázně. [20]

Mezi výhody kompozitních galvanických povlaků patří hlavně možnost kombinovat širokou škálu kovových či slitinových matic s různými částicemi. Mezi další kladné vlastnosti patří snadné regulování tloušťky povlaku. Ten je následně možné ještě tepelně zpracovat a tím víc zlepšit jeho vlastnosti. [18, 21]

7.3 Princip vylučování kompozitních galvanických povlaků

Proces vzniku těchto povlaků lze rozdělit do tří stupňů:

1. Transport částic k povrchu katody – důležitým faktorem pro transport částic je rovnoměrnost koncentrace nosného elektrolytu, velikost částic a katodická proudová hustota.

2. Ulpění částic na povrchu katody – probíhá v dvoustupňovém absorpčním mechanismu. První stupeň, taky nazývaný jako volná absorpce. A druhý stupeň, takzvaná pevná absorpce je již pevné ulpění. To je rozhodující pro rychlost vylučování.

3. Obrůstání částic materiálem matrice – důležité jsou parametry elektrolytu matrice, jeho hloubková účinnost a vyrovnávací schopnost. Také je silně ovlivněno vodivostí disperzních částic. Vodivé částice se okamžitě obalují kovem matrice a tím vzniká značné riziko vzniku pórů a dutin. [21]

7.4 Složení kompozitních povlaků

7.4.1 Matrice

Niklové matrice

Niklové matrice jsou při vylučování kompozitních povlaků používané nejčastěji. Niklový povlak má totiž výborné vlastnosti, mezi které patří vysoká pevnost a tvrdost, korozivzdornost či tepelná odolnost.

Měděná matrice

Jelikož má měděná matrice horší mechanické vlastnosti než niklová, její využití je značně menší. Používá se pro samomazné materiály a součásti, kde je potřeba dobré tepelné vodivosti.

Železná matrice

Výhodou povlaků na bázi železa je, že mají dobrou přilnavost a možnost vytváření slitin s dalšími prvky. Elektrolytické lázně mají dobrou hloubkovou účinnost a vysokou rychlost vylučování, čímž je možné vylučovat železo i na součástech komplikovaného tvaru v relativně krátkém čase.

Matrice ze slitin kovů

Tyto matrice tvoří základ speciálních povlaků. Rozdělujeme je do dvou skupin. Jedna skupina jsou povlaky tvořené ze dvou nebo více kovů, které jsou si chemicky blízké (Ni-Fe, Ni-Co, Co-Fe). Druhou skupinou jsou povlaky tvořené slitinou jednoho kovu (případně dvou) a minimálně jednoho nekovu (Ni-P, Co-P). [21, 22]

Matrice na bázi jiných kovů

V praxi se tyto povlaky používají málo. Tak, jako u měděné matrice i matrice na bázi chromu či stříbra se používají pro samomazné materiály nebo tam, kde je potřeba dobré tepelné vodivosti. Pro dobré tribologické vlastnosti při vyšších teplotách se používá kobaltová matrice. [22]

7.4.2 Disperzní částice

Disperzní částice jsou druhou složkou kompozitního povlaku a výrazně ovlivňují výsledné vlastnosti. Jejich koncentrace se pohybuje v rozmezí 5 – 100 g.l⁻¹. Částice se dělí na ty, které jsou tvořeny prvky a ty, které jsou tvořeny sloučeninami a nekovy.

Disperzní částice tvořeny prvky

Nejčastěji používané prvky jsou Cu, Ni, Co, W, Si, Al, C, B, Cr. Jsou v podobě prášku jemně rozptýlené v matrici.

Disperzní částice tvořené sloučeninami a nekovy

Tyto částice mohou mít tvar vláken – lze takto vytvořit povlaky s vysokou pevností a žarupevností, vysokou odolností proti únavě a s vysokým poměrem

pevnost/hmotnost. Materiály vhodné k použití ve tvaru vláken jsou bór, uhlík a bór s karbidem křemíku.

Taky mohou mít tvar prášku. Ten se vyrábí z různých nekovových materiálů a sloučenin. Takto vytvořené povlaky mají dobré kluzné vlastnosti a vysokou odolnost proti opotřebení.

Boridy

Bór a boridy celkově se vyznačují vynikajícími technickými vlastnostmi. Jsou odolné za vysokých teplot, jsou těžce tavitelné, chemicky inertní a tvrdé. Bór je možné přímo zabudovat do matrice jako disperzní prášek. Vytvořený povlak je možné dále tepelně zpracovat.

Karbidy

Pod slovem karbidy rozumíme sloučeniny uhlíku s kovy. Ty mají dobré technické vlastnosti, jako například tvrdost, těžkotavitelnost či chemická odolnost. Nejčastěji používaným karbidem je SiC, který je zároveň i nejlevnější.

Nitridy

Jak je známo, při nitridaci nastává výrazné zlepšení pevnosti ocelí a slitin. Nejširší užití mají Si_3N_4 , TiN, ZrN, BN.

Silicidy

Nejdůležitějšími vlastnostmi silicidů jsou tepelná a chemická odolnost. Co se však týče použití v kompozitních povlacích, jsou zatím málo prozkoumané. Klasické sloučeniny křemíku jsou např. FeSi_2 , MnSi_2 , TiSi_2 , WSi_2

Oxidy

V oblasti kompozitních povlaků mají za cíl zvyšovat ořezuvzdornost, pevnost, tvrdost či žáruvzdornost. Nejčastěji používanými oxidy jsou Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 , Cr_2O_3 . [21, 22]

Diamant

Diamant má dobrou tepelnou vodivost a tepelnou odolnost až do 860°C. Můžeme ho najít v přírodní formě nebo ho také připravit syntézou za vysokých teplot a tlaků. Přírodní diamant je známý hlavně pro svůj vzhled, každopádně má svoje využití i v průmyslu. Používají se v brusných kotoučích nebo jako doteky a měřicí hroty. Vlastnosti syntetického diamantu jsou závislé na termodynamických podmínkách syntézy a chemickém složení komponent. Používá se na broušení tvrdých a křehkým materiálů jako např. slinuté karbidy, sklo, keramika či kámen. [22]

Tuhá maziva

Tuhé maziva jsou ve výrobě kompozitních povlaků velmi rozšířenou skupinou. Jsou to látky se samomaznými vlastnostmi. Patří mezi ně např. sulfidy, selenidy, halogenidy, grafit a PTFE a další. Mezi výhody těchto povlaků pak patří zejména vysoká odolnost proti opotřebení, dobré kluzné vlastnosti a jsou antiadhezní. [21]

7.5 Kompozitní povlaky niklu

Tvrдость je jednou z nejžádanějších vlastností povlaků. Kompozitní povlaky, které využívají matrice slitinového povlaku Ni-P jsou proto často využívány pro zvýšení tvrdosti. Pro ještě lepší tvrdost se tyto povlaky ještě tepelně vytvrzují, tím ale dojde ke snížení odolnosti proti opotřebení.

Když je v takové matici rozptýlené navíc určité množství diamantových částic, vzniká velmi tvrdý povlak, který nachází uplatnění v širokém spektru strojírenství.

Kompozitní povlak Ni-P-CNT má opět slitinový základ Ni-P, do něhož je rozptýlena disperze uhlíkových nanotrubic. Tento povlak má výrazně lepší tribologické vlastnosti, hlavně nižší tření díky samomaznosti uhlíku.

Dále mezi používané kompozitní povlaky niklu patří Ni-P-XLS. Disperzní částí je syntetický jíl – syntetický vrstvený křemičitan. Získáváme tím výraznou změnu mechanických vlastností, a to hlavně otěruvzdornosti.

Pro nárůst tvrdosti a pevnosti povlaku je vhodná kombinace Ni-P-Al₂O₃. Pokud tento povlak chceme ještě víc zefektivnit, můžeme povlak dále tepelně zpracovat. [23]

7.6 Kompozitní povlaky zinku

Mezi známé kompozitní povlaky zinku patří Zn-TiO₂. Bylo zjištěno, že TiO₂ hrálo významnou roli při snižování rychlosti koroze. [24]

Novou a progresivní povrchovou úpravou je povlak Zn – PTFE. Tento povlak spojuje potřebné tribologické vlastnosti s protikorozní ochranou, přičemž dbá i na ekologii dle typu lázně. Na oceli působí bariérovým i katodickým způsobem ochrany. [22]

8 Tribologie

Tribologie je obecně považována za vědu 21. století. Je to interdisciplinární věda, která se zabývá stavem a procesy v přirozených i umělých tribologických systémech, vzájemným působením povrchů při jejich relativním pohybu a s tím související technologií. Jelikož podstata problému je složitá a mnohostranná, není možné jednoduchými vztahy obecně a jednoznačně definovat oblast a předmět tribologie. Je nutný metodický přístup, který podchycuje všechny veličiny a vzájemné vazby. Popsat a řešit tribotechnické a tribologické systémy lze metodou systémové analýzy.

Úkolem tribologie z pohledu vědy je objasnění a zkoumání disipací energie podmíněných třením a objasnění procesů poškozování materiálů podmíněných opotřebením.

Technickým úkolem je optimalizace výrobních a materiálových technologií s cílem minimalizace ztrát třením a opotřebením.

Ekonomický význam tribologie spočívá především ve snaze zabránit materiálovým a energetickým ztrátám a škodám nebo je alespoň snížit. [25]

8.1 Tření

Tření můžeme definovat jako odpor proti pohybu, který vzniká mezi dvěma tělesy. Směr působení třecí síly je vždy proti směru pohybu těles.

Tření vzniká v důsledku nerovností dotýkajících se ploch a mezimolekulárních adhezních sil. Velikost smykového tření je závislá od různých veličin, jako například materiál obou těles, jakost povrchu funkčních ploch, teplota, technologie předešlého zpracování, rychlosti tření, okolní prostředí a mezivrstva mezi tělesy. [26]

Vztah pro velikost třecí síly můžeme napsat ve tvaru:

$$F_t = \mu \cdot F_n, \quad (2)$$

Symbol μ označuje činitel tření, který udává, jaká je vzájemná přilnavost molekul a jak hrubý je povrch styčných ploch. F_n je označení pro normálovou sílu. [27]

Valivé tření vzniká vždy, když se těleso kruhového průřezu valí po pevné podložce. Třecí síla je u valivého tření výrazně nižší než u tření smykového. Proto se v praxi často smýkání nahrazuje valením, například u valivých ložisek.

Díky vrtnému tření vzniká opotřebení funkčních ploch. Ovlivňuje ho rotace kolem osy a navíc i normálová síla. Na velikost třecího momentu má vliv velikost vzájemného dotyku obou ploch. V praxi se používá například u ložisek hodinek a gyroskopů. [22, 28]

8.2 Opotřebení

Opotřebení je definováno jako nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles. Je způsobeno buď vzájemným působením funkčních ploch, nebo působením funkční plochy a nějakého média, které opotřebení vyvolává. Projevuje se jako

odstraňování nebo přemísťování částic hmoty opotřebovávaného povrchu mechanickými účinky.

Opotřebením může mít různý charakter či průběh. Podle toho ho dělíme na šest základních druhů: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové, vibrační. [29]

Schopnost materiálů a konstrukcí odolat otěru se nazývá otěruvzdornost. Tato schopnost umožňuje materiálu, aby si zachoval svoji integritu a tvar. To může být důležité, když je forma materiálu rozhodující pro jeho funkci. [30]

9 Závitová dvojice

Závitová dvojice, jinak řečeno šroubový spoj, je důležitou součástí ve strojírenství. Optimalizaci takového spoje ovlivňují parametry konstrukční, materiálové, technologické a taky parametry povrchu.

Šroubový spoj, jako spojení rozebíratelné, by měl být rozebíratelný po celou dobu jeho životnosti. Nesmí dojít ke koroznímu poškození, a proto materiál, resp. jeho povrchová úprava, musí mít dostatečnou korozní odolnost pro dané prostředí.

Je důležité, aby byla zajištěna především bezpečnost spoje, která není závislá jen od výše uvedených parametrů, ale taky od přesně definovaných parametrů montáže. Především od osově předepínací síly šroubu. Tato síla je závislá na stavu a předchozí úpravě povrchu, hlavně taky na hodnotě činitele tření. Povrch šroubu proto musí mít nízké a opakovatelné hodnoty činitele tření.

Nejpoužívanější povrchová úprava pro šroubové spojení jsou povlaky na bázi zinku a jeho slitin. Hlavním důvodem je, že zinek poskytuje kovům katodickou ochranu proti korozi. Princip katodické ochrany je již vysvětlen v kapitole 3.2. [31]

9.1 Selhání šroubového spoje

Dle analýz je jasné, že základem pro selhání šroubového spoje je ve většině případů nedostatečné předepnutí šroubu nebo zadření šroubu. Obě tyto příčiny je možné ovlivnit použitím vhodné povrchové úpravy, případně mazáním. To, že je

napínací síla ve velké míře závislá právě na kvalitě povrchu či na mazání, ukazuje tato rovnice:

$$M_A = F_M \cdot \left(0,16 \cdot p + 0,58 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D}{2} \cdot \mu_k \right), \quad (3)$$

Kde M_A je utahovací moment šroubu, F_M je napínací síla šroubu, p značí stoupání závitu, d_2 je střední průměr šroubovice závitu, μ_G označuje součinitel tření v závitu, $\frac{D}{2}$ je účinný třecí rádius hlavy a μ_k je součinitel tření dosednutí hlavy.

Pokud bude utahovací moment konstantní a μ_G i μ_k budou mít hodnoty nízké, napínací síla bude vysoká a zase naopak. Bylo také zjištěno, že ze síly, která byla vynaložena u utahování, se až 50% ztrácí jako tření hlavy a 40% jako tření v závitech. Takže jen 10% zůstává pro vytvoření požadované napínací síly.

Další příčinou škod na šroubových spojích je tzv. zadření šroubu. To je nejčastěji způsobeno nedostatečným mazáním či v důsledku koroze materiálu.

Vhodnou povrchovou úpravu by měla být zvolena nejen z hlediska ochrany proti korozi. Důležitá je taky jistá a bezpečná montáž. Vysoká hodnota utahovacího momentu ještě nezajišťuje potřebné předepnutí šroubového spoje. Správným výběrem povrchové úpravy zajišťujeme taky optimální montáž či demontáž a zvyšujeme životnost šroubových spojů. Vhodným funkčním povlakem lze zlepšit i kluzné vlastnosti součástí. Zde nebývá význam použití či vývoj povlaků, které mají vhodné či specifické funkční a tribologické vlastnosti. [31]

10 Hypotézy a cíle práce

Na základě poznatků zmíněných v teoretické části byly vyvozeny následující hypotézy:

- Galvanickým slitinovým ZnNi povlakováním lze vytvořit kompozitní povlak, který by obsahoval polymerní částice.
- Polymerní částice ovlivní funkční vlastnosti povlaku, zejména tribologické.

Proto, aby bylo možné tyto hypotézy ověřit, byly stanoveny následující cíle bakalářské práce:

- Vytvořit kompozitní slitinový povlak s kovovou maticí na bázi ZnNi
- Ověřit funkční vlastnosti nově vyloučeného kompozitního povlaku, zejména z hlediska tribologického.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

11 Experimentální schéma

Experimentální skupinu tvoří vzorky pokovené kompozitním povlakem ZnNi, do elektrolytu byly přidány polymerní mikročástice. Kontrolní skupinou pro porovnání byly vzorky pokovené slitinovým povlakem ZnNi.

Připravené vzorky byly následně hodnoceny dle dále uvedených analýz. Patří mezi ně optická mikroskopie metalografických výbrusů povlaků, vizuální hodnocení povlaků, měření vylučovací rychlosti a tribologické zkoušky.

Pro tribologické zkoušky byly použity 2 tribometry a celkově 3 různé testy. Na tribometru TOP 3 byl proveden test lineární - s plošným stykem funkční dvojice, kterou tvořila deska/tableta. Na tribometru Rtec Industries byly provedeny dva testy s bodovým stykem funkční dvojice, a to rotační – funkční dvojice kulička/disk a lineární – funkční dvojice kulička/destička.

12 Příprava pokovování

Pro experiment byla použita alkalická slitinová lázeň Reflectalloy ZNA XL společnosti ATOTECH, která slouží k vylučování povlaků zinek – nikl s použitím technologie membránových anod. Tím se dosahuje vyšší proudové účinnosti, snížené spotřeby přísad a lepší provozní stability. Obsah niklu je 12 – 16%. Je vhodná pro závěsové i hromadné pokovení. Proti slabě kyselému lázni má lepší homogenitu, čehož je možné využít i u tvarově složitějších součástí.

Z důvodu dostupného technického vybavení byla použita zjednodušená aparatura. Nebyla použita technologie membránových anod ale anody z ocelového plechu, který substituoval běžně průmyslově používané membránové anody.

12.1 Technologický postup

Pro přípravu vzorků byl zvolen technologický postup a jeho parametry, který je shrnutý v tabulce č. 1.

Tab. 1: Technologický postup

Operace	Přípravek	Teplota [°C]	Doba [min]	Stupeň
Ultrazvukové odmaštění KRAINTEK	Star 75 PN	60 ± 5	3	9
Oplach dvoustupňový	Voda	20 ± 3	0,5	2
Aktivace	10% HCl	20 ± 2	1,5	-
Oplach dvoustupňový	Voda	20 ± 3	0,5	2
Povlakování	ZnNi / ZnNi kompozitní	-	-	-
Oplach dvoustupňový	Voda	20 ± 3	1	2
Sušení	Horký vzduch	50 ± 5	2	-

12.2 Stanovení proudové hustoty

Dle doporučení dodavatele lázně má proudová hustota nabývat hodnot v rozmezí 0,5 – 3 A. dm⁻². Vyšší hodnoty způsobují napálení kovového povlaku a u

hodnot nižších než $0,5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ se vylučují také kovové nečistoty. Proto byla zvolena jako optimální katodová proudová hustota $2,5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$.

S přihlédnutím na předchozí experimenty s kompozitním povlakem a doporučení dodavatele, byl zvolen čas pokovení 50 minut. Při kratším čase nebyla vyloučena požadovaná tloušťka povlaku.

12.3 Stanovení teploty lázně

Jako nejvyšší možnou teplotu lázně uvádí výrobce $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Překročení této teploty by mohlo negativně ovlivnit homogenitu lázně.

Teplota povlakování odpovídala teplotě okolí. Ta nepřekročila u žádného vzorku 26°C .

12.4 Elektrolyzér pro vyloučení ZnNi kompozitního povlaku

V rámci výzkumu byl použit experimentální elektrolyzér (obr. 5) pro laboratorní použití. Elektrolyzér funguje jako stavebnice, což z něho dělá univerzální pomůcku. Díky použitému materiálu – sklo – je možné provádět i případný ohřev lázně a zároveň provádět míchání lázně buď elektromagnetickým či hřídelovým míchadlem. Jelikož polymerní částice měly tendenci rychle sedimentovat v hustou usazeninu, bylo zvoleno hřídelové míchadlo WERKON: WiseStir HS – 100D. To na rozdíl od magnetického míchadla zajistilo homogenizaci suspenze. Použitý zdroj byl značky Manson - SPS 9600.



Obr. 5: Experimentální elektrolyzér s hřídelovým míchadlem

12.5 Pokovované vzorky – shrnutí

Cílem experimentu bylo vyloučit kompozitní povlak ZnNi, do jehož lázně byly přidány polymerní částice a ověřit jeho vlastnosti. Kontrolní skupinou byl slitinový povlak ZnNi bez přidání polymerních částic. Pro prováděné analýzy bylo nutné připravit specifické vzorky, které jsou dále uvedené.

Pro metalografický výbrus byly použity výstřížky z Q-panelů R-46 o rozměrech 30 x 152 mm a tloušťce $t = 0,81$ mm, materiál dle specifikace SAE 1008/1010.

Pro měření na tribometru TOP 3 byly pokoveny 3 tablety čistým povlakem ZnNi a 3 tablety kompozitním povlakem ZnNi. Tablety byly o průměru $d = 20$ mm a výšce $h = 8$ mm. Rozměry a vzhled tablety je na obrázku 13. Další specifikace jsou uvedeny v kapitole 11.5.1.

Na tribometru od společnosti Rtec byly prováděny dva testy. Test lineární a rotační. Každý test vyžaduje specifický tvar a rozměry vzorku. Pro lineární zkoušku byl pokoven jeden zkušební vzorek povlakem ZnNi a druhý zkušební vzorek povlakem ZnNi komp., které jsou zobrazeny na obrázku 16. Pro rotační test byl pokoven opět jeden vzorek povlakem ZnNi a druhý povlakem ZnNi komp., ukázka na obrázku 17. Oba druhy vzorků jsou také blíže popsány v kapitole 11.5.2.

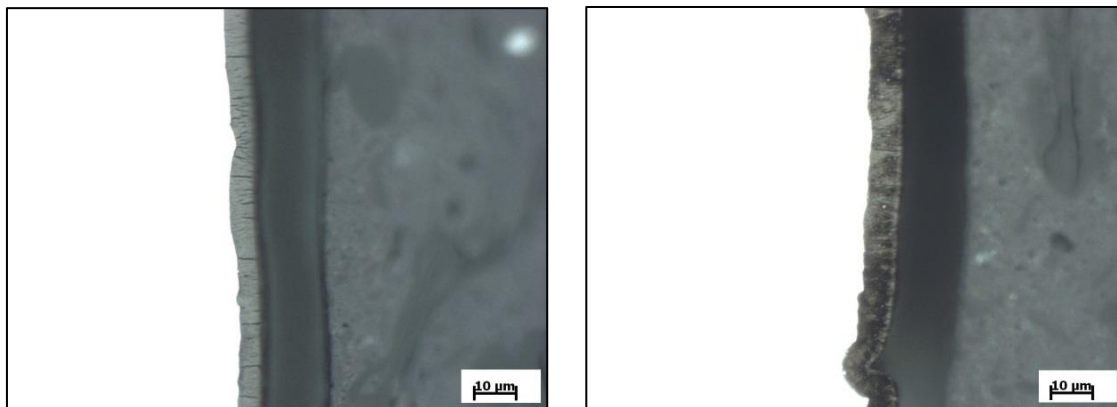
13 Výsledky

13.1 Analýza pomocí optické mikroskopie

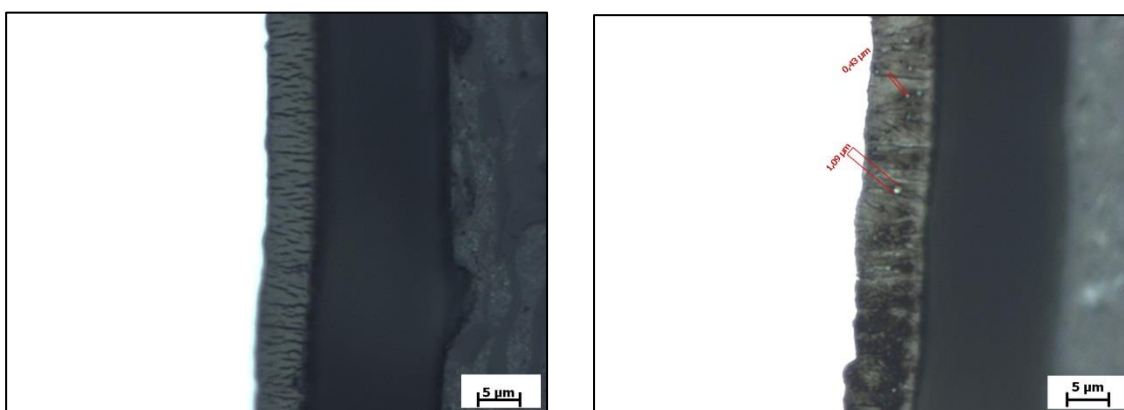
Na metalografickém výbrusu je možné nahlédnout do struktury povlaku řezu vzorku a pozorovat formu polymerních částic.

Pro porovnání byly použity ocelové vzorky pokovené čistým slitinovým povlakem ZnNi a ocelové vzorky pokovené kompozitním povlakem s kovovou slitinovou maticí na bázi ZnNi. Vzorky byly pozorovány na mikroskopu Axio Observer od firmy Zeiss.

K analýze bylo nutné vzorky předem naleptat. Z metalografických výbrusů byly následně pořízené snímky (obr. 6, obr. 7).



Obr. 6: Vlevo povlak ZnNi, vpravo ZnNi + polymerní částice zvětšeno 500x



Obr. 7: Vlevo povlak ZnNi, vpravo ZnNi + polymerní částice zvětšeno 1000x

13.2 Vylučovací rychlost kompozitního povlaku

K měření tloušťky povlaku byl použit digitální tloušťkoměr Electrometer 456 (obr. 8). Pracuje na principu vířivých proudů. Pracovní rozsah přístroje je 0 – 1500 μm , přesnost $\pm 2 \mu\text{m}$ a rozlišení $0,1 \mu\text{m}$ (při měření tlouštěk do $100 \mu\text{m}$).



Obr. 8: Digitální tloušťkoměr Electrometr 456 [41]

Ocelové vzorky byly měřeny z každé strany po 6 bodech tak, aby byla zmapovaná celá plocha vyloučeného povlaku na vzorku. Z těchto hodnot byla vypočítána průměrná tloušťka vyloučeného povlaku. V následujících tabulkách (tab. 2, tab. 3) jsou zaznamenány průměrné hodnoty tloušťky povlaku měřené v daném čase. Pro měření vylučovací rychlosti byl na rozdíl od pokovení ostatních vzorků zvolený celkový čas až 60 minut, měřeno vždy po pěti minutách pokovení.

Povlak ZnNi:

$$T = 23,8 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$J = 1,5 \text{ A (} 2,5 \text{ A. dm}^{-2}\text{)}$$

$$\text{pH} = 9,98$$

Tab. 2: Průměrná naměřená tloušťka povlaku ZnNi v daný čas pokovení

t [min]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
h[μm]	3,66	5,58	7,31	8,82	10,18	11,58	13,23	15,00	15,90	17,67	18,11	18,58

Povlak ZnNi kompozitní

$$T = 22,5 \pm 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$J = 1,5 \text{ A (} 2,5 \text{ A. dm}^{-2}\text{)}$$

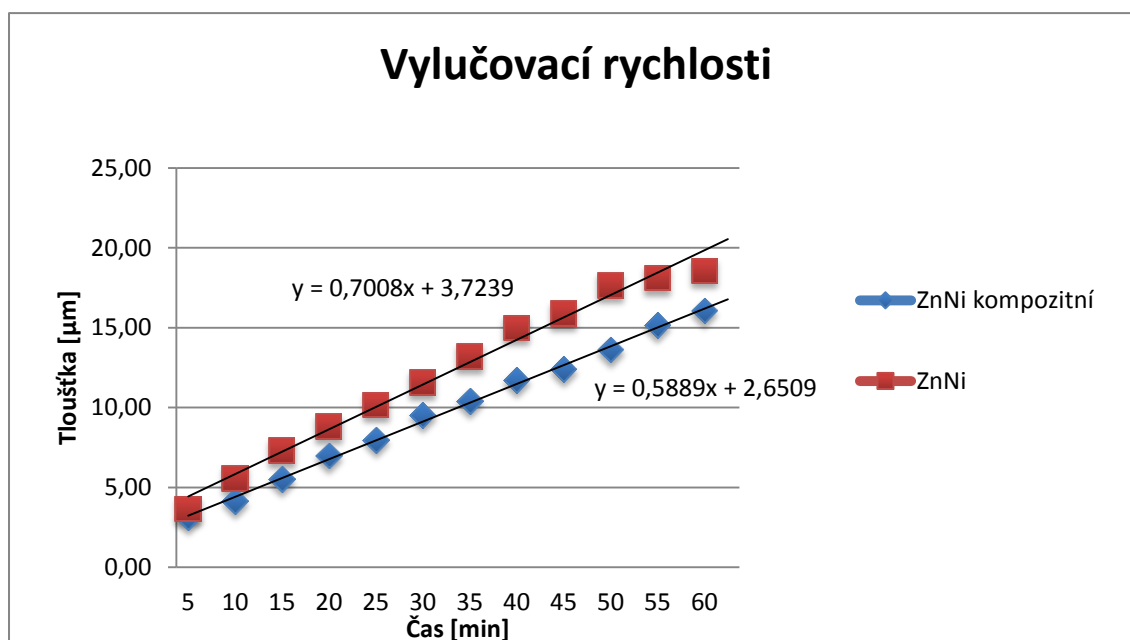
$$\text{pH} = 9,24$$

Tab. 3: Průměrná naměřená tloušťka kompozitního povlaku ZnNi v daný čas pokovení

t [min]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
h[μm]	3,15	4,15	5,50	6,99	7,97	9,53	10,41	11,72	12,38	13,62	15,14	16,07

Grafická závislost

Pro porovnání vylučovacích rychlostí byly hodnoty vyneseny do grafu (obr. 9). Vylučovací rychlosti obou povlaků mají lineární průběh.



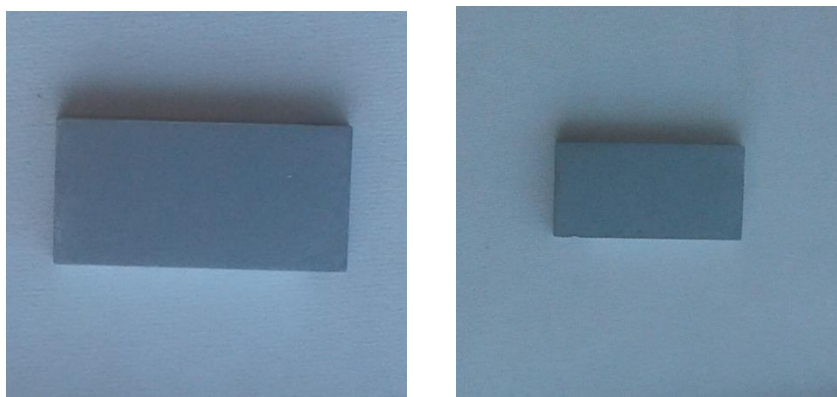
Obr. 9: Grafická závislost tloušťky na čase povlaků ZnNi a ZnNi komp.

13.3 Vizuální hodnocení povlaků

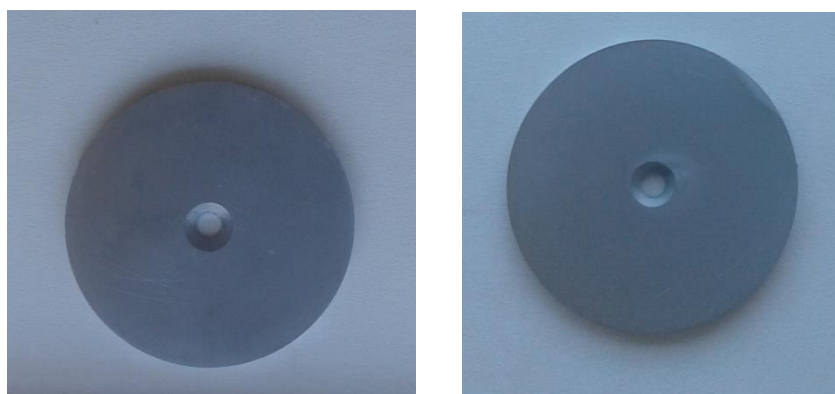
Po vizuální stránce jsou oba povlaky, slitinový ZnNi i kompozitní ZnNi, stejné. Vykazují shodnou barvu i lesk (obr. 10, 11, 12).



Obr. 10: Vzorky pro tribometr TOP 3: Vlevo povlak ZnNi, vpravo kompozitní povlak ZnNi



*Obr. 11: Vzorky pro lineární test na tribometru MFT-5000 Multi functional Tribometer:
Vlevo povlak ZnNi, vpravo kompozitní povlak ZnNi*



*Obr. 12: Vzorky pro rotační test na tribometru MFT-5000 Multi functional Tribometer:
Vlevo povlak ZnNi, vpravo kompozitní povlak ZnNi*

13.4 Výsledky tribologických testů

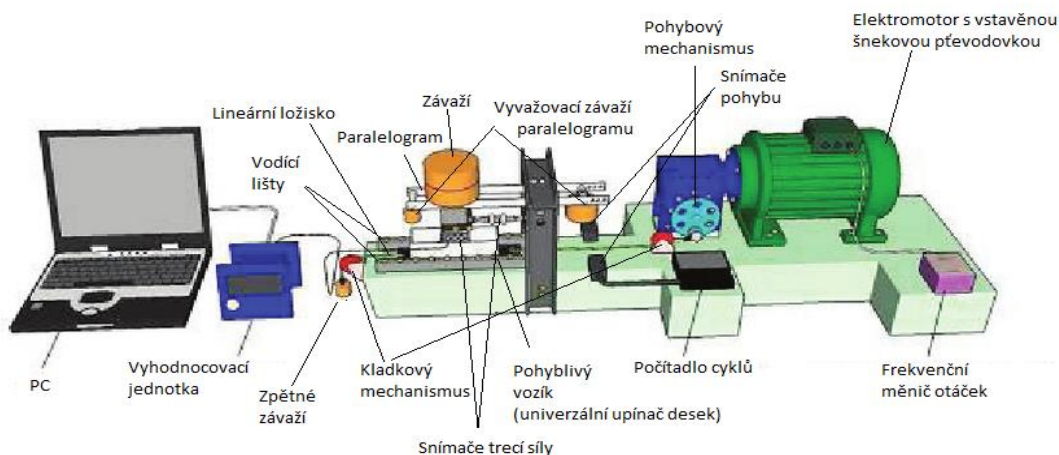
Pro vyhodnocení tribologických vlastností povlaků byly zvoleny dva druhy měřicích zařízení. Tím je zvýšena pravděpodobnost správnosti měření.

13.4.1 Tribometr TOP 3

Tribometr TOP 3 (obr. 13, obr. 14) je zařízení, které slouží k měření adhezivního tření a opotřebení povrchových vrstev. Mezi funkčními dvojicemi dochází k translačně oscilačnímu pohybu (TOP). S každým měřením byla použita vždy nová funkční dvojice. Počet cyklů, které jsou vykonány za určitý časový úsek, je regulován frekvenčním měničem. Pákový mechanismus paralelogramu vyvíjí normálové zatížení, které na tabletu působí silou v rozmezí 0-250 N, čímž ji přitlačuje na zkušební desku. Zkušební deska vykonává translační pohyb. V zatěžovacím sloupku je umístěn piezokrystalický snímač Kistler 9251, který určuje velikost třecí síly. Vlivem třecí síly vzniká deformace sloupku se senzorem, ve kterém se generuje elektrický náboj. Elektrický signál je pak předán jednotce Kistler 5015, kde je signál převedený na sílu v jednotkách [N]. Naměřená data tribologického testu jsou zaznamenávána pomocí PC softwaru Charge Meter 5015A a následně vyhodnocována pomocí počítačového programu Matlab.

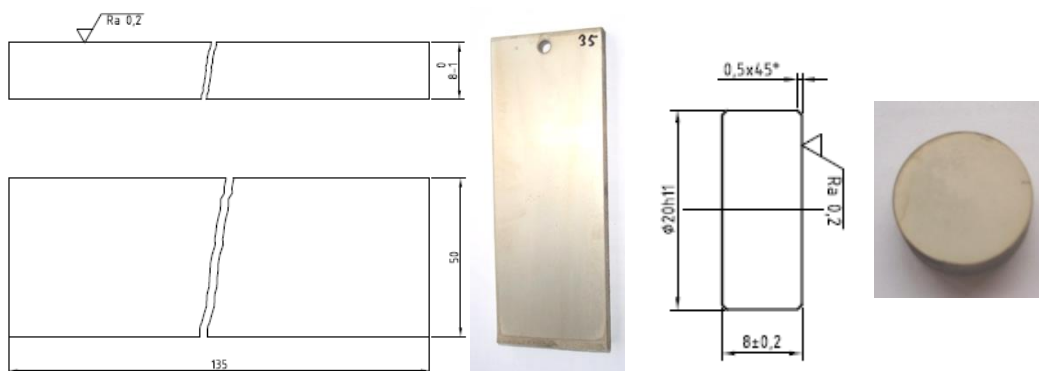


Obr. 13: Tribometr TOP 3



Obr. 14: Podrobný popis tribometru TOP 3 [43]

Na obrázku 15 je zobrazena funkční dvojice, kterou tvoří zkušební deska o rozměrech 135 x 50 x 8 mm s průměrnou drsností $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ a zkušební tableta rozměrech $d = 20 \text{ h}11 \text{ mm}$ a $h = 8 \text{ mm}$. Zkosení hran je $0,5 \times 45^\circ$.



Obr.15: Skica a fotografie funkční dvojice pro tribometr TOP 3 [22]

Před samotným tribologickým testem je důležité zkušební tablety zvážit s přesností na 0,01 mg na digitální váze Explorer Pro od značky OHAUS (obr. 16). Dalším vážením po vytvoření otěrové stopy na vzorku zjistíme hmotnostní úbytek.



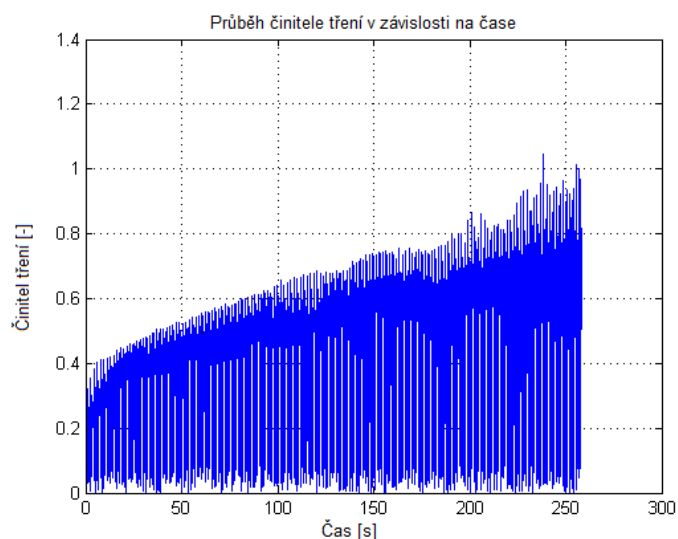
Obr. 16: Digitální váha zn. OHAUS: Explorer Pro [43]

Měření tloušťek povlaků bylo provedeno tloušťkoměrem Elcometer 456 a průměrná tloušťka slitinového ZnNi povlaku je přibližně $22 \pm 4,598 \mu\text{m}$ a kompozitního povlaku ZnNi + polymerní mikročástice je přibližně $16 \pm 1,637 \mu\text{m}$ po 50 minutách pokovování.

Zatížení bylo stanoveno na 1 kg, počet cyklů za minutu 35, suché tření, kinematická dvojice tableta – deska, doba 4 minuty. U každé funkční dvojice byla zkoumána velikost činitele tření funkční dvojice, změna činitele tření v čase, změna hmotnostního úbytku v čase.

Software umístění v počítači sbírá a zapisuje data. Tato data jsou pak následně vyhodnocena dle algoritmu vytvořeného v programu Matlab, pomocí grafu (obr. 17), kde se vyhodnocuje statický a dynamický činitel tření v závislosti na čase.

Následně byly vypočítané průměrné činitele tření, statické i dynamické. Výsledky jsou vyobrazeny v tabulce č. 4 a 5.



Obr. 17: Ukázkový graf závislosti činitele tření na čase pro povlak ZnNi

Tab. 4: Průměrné statické a dynamické činitele tření povlaku ZnNi

ZnNi	μ_{stat}	μ_{dyn}
1	0,7419	0,5420
2	0,7730	0,5668
3	0,6595	0,4973
Průměr	0,7248	0,535367

Tab. 5: Průměrné statické a dynamické činitele tření povlaku ZnNi komp.

ZnNi + PČ	μ_{stat}	μ_{dyn}
1	0,8340	0,6060
2	0,7590	0,6205
3	0,7435	0,5597
Průměr	0,778833	0,5954

Průměrný hmotnostní úbytek ze slitinového povlaku ZnNi byl 0,00043 g a z kompozitního povlaku ZnNi polymerních částic 0,000467 g.

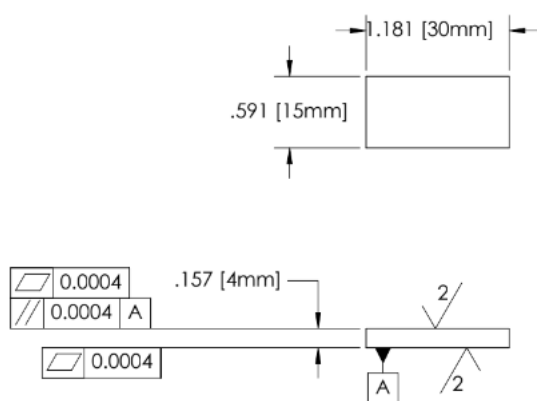
13.4.2 Zařízení společnosti Rtec Instruments - MFT-5000 Multi functional Tribometer

Tribometr společnosti Rtec Instruments (obr. 18) je novým zařízením provozovaným na Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT v Praze. Jeho předností je, že je to vysoce modulární typ tribometru, a je tedy možné měnit konfiguraci zařízení. Tím je možné provádět různé druhy tribologických testů se zátěží až do 200N. Jeho technické parametry umožňují rotační i lineární pohyb funkčních dvojic, měření kombinovaných procesů tření a koroze, měření v kapalinném prostředí, snímání normálové a třecí síly či teploty a další.



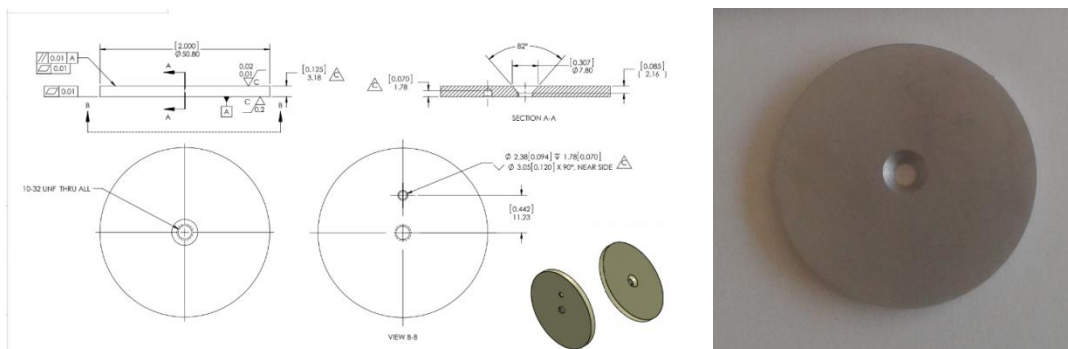
Obr. 18: Zařízení MFT-5000 Multi functional Tribometer

Na obrázku č. 19 je zobrazen vzorek pro lineární test o rozměrech 15 x 30 x 4 mm vyroben z takzvané ložiskové oceli 52100.



Obr. 19: Vzorek pro lineární pohyb tribometru [interní materiály ústavu, foto autora]

Vzorek pro rotující pohyb tribometru je na obrázku č. 20. Má průměr $d = 50,8$ mm a výšku $h = 3,18$ mm. Základní materiál je stejný jako u vzorku pro pohyb lineární.



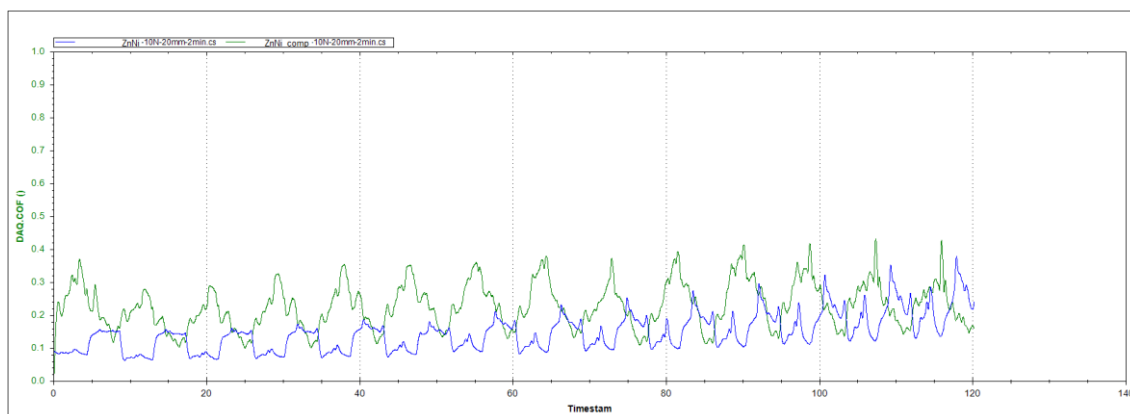
Obr. 20: Vzorek pro rotující pohyb tribometru [interní materiály ústavu, foto autora]

13.4.3 Lineární test

Pro lineární test byly pokoveny pouze dva zkušební vzorky. Jeden povlakem ZnNi a druhý s přidavkem polymerních částic. Síla zatížení byla 10N, test probíhal po dobu dvou minut, rychlost 5mm/s. Funkční dvojice byla destička/nerezová kulička o průměru $d = 6,35$ mm.

Průměrná tloušťka slitinového povlaku ZnNi na vzorku pro lineární test byla $4,455 \pm 1,130$ μm . Na druhém vzorku s kompozitním povlakem ZnNi byla vyloučena průměrná tloušťka $3,745 \pm 0,605$ μm .

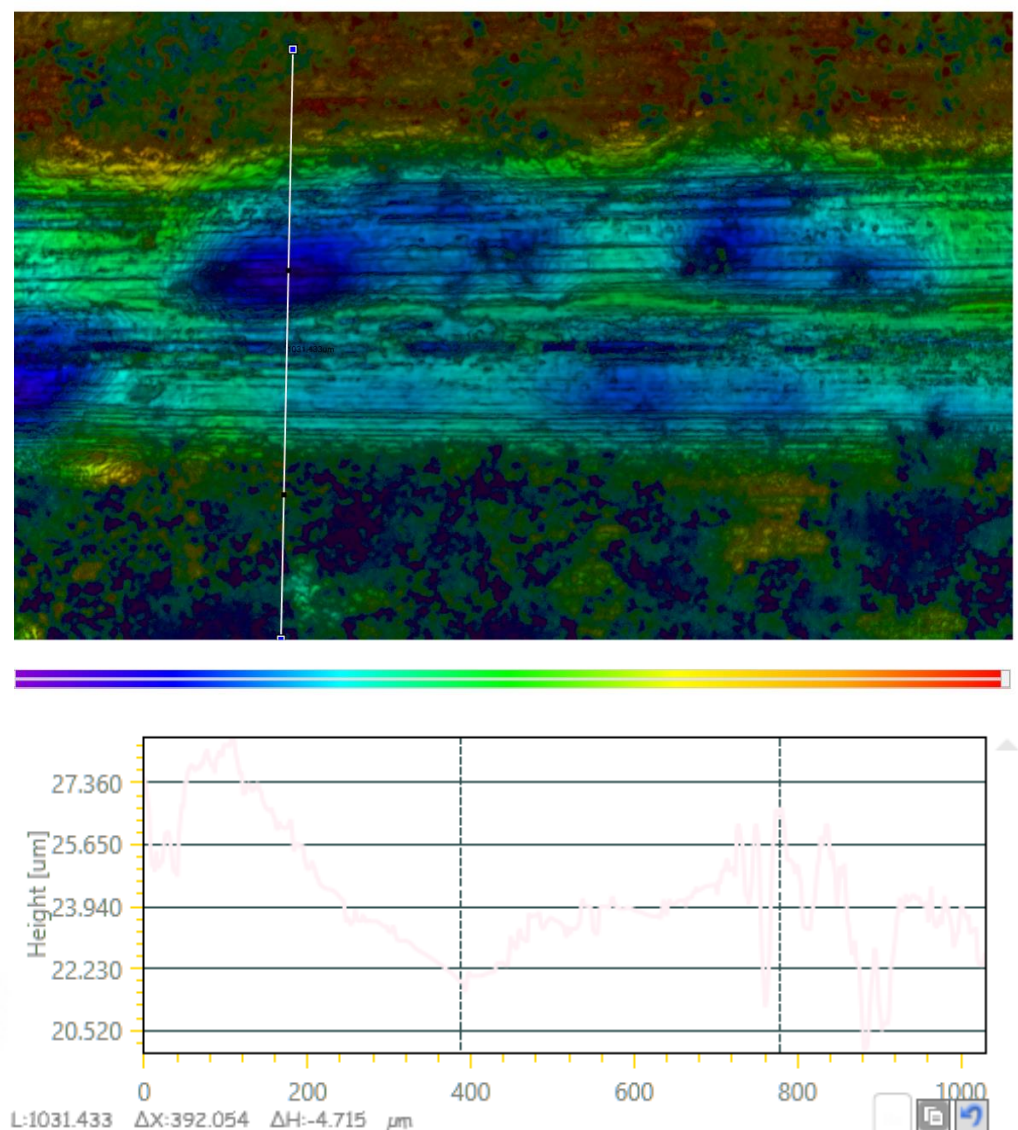
Porovnání trendů činitelů tření slitinového a kompozitního povlaku jsou zaznamenané v grafu na obrázku 21.



Obr. 21: Grafická závislost činitelů tření čase z lineárního testu povlaků ZnNi a ZnNi komp.

Průměrný činitel tření povlaků byl vyhodnocován automaticky počítačovým programem MFT společnosti Rtec. Pro slitinový povlak ZnNi byl pro tento test vyhodnocen činitel 0,1469 a pro kompozitní povlak ZnNi byl 0,2282.

Výsledek z měření profilometrem je zobrazen na obrázku 22.

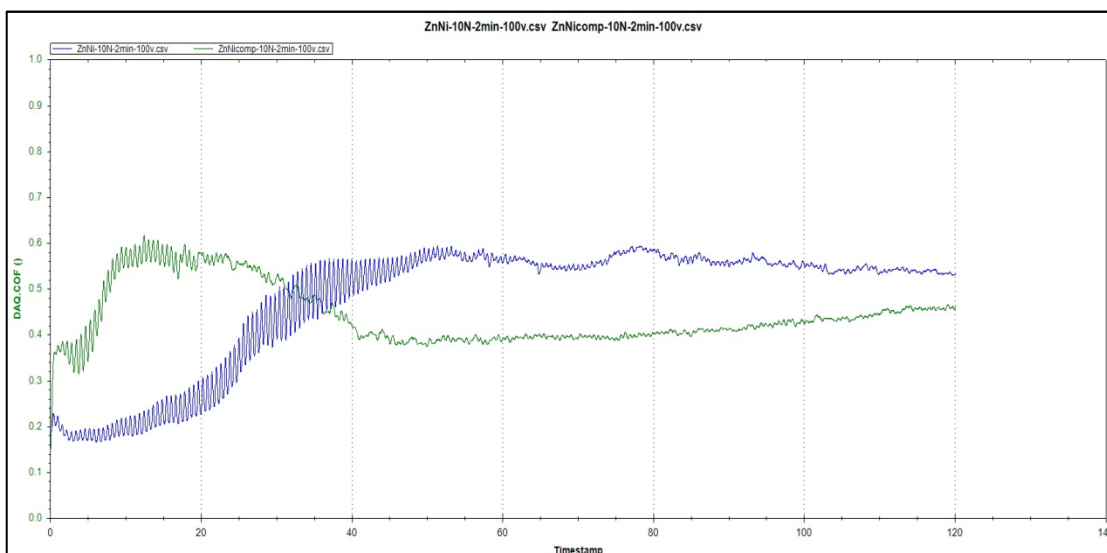


Obr. 22: Výstup 2D profilometru lineárního testu

13.4.4 Rotační test – pin on disc

Pro rotační test byly pokoveny pouze dva zkušební vzorky. Jeden povlakem ZnNi a druhý s přidavkem polymerních částic. Síla zatížení byla 10N, test probíhal po dobu dvou minut, rychlost 100 ot/min. Funkční dvojice byla disk/kulička z korozivzdorné oceli o průměru $d = 6,35$ mm.

Vyloučený povlak ZnNi měl průměrnou tloušťku $2,47 \pm 0,560$ μm . Povlaku ZnNi komp. se na povrchu vyloučilo průměrně $3,42 \pm 0,936$ μm . Grafická závislost činitele tření na čase obou vzorků je zobrazena pro porovnání na obrázku 23. Povlak ZnNi je zaznamenán barvou modrou a kompozitní povlak ZnNi komp. barvou zelenou.



Obr. 23: Grafická závislost činitele tření čase z rotačního testu povlaků ZnNi a ZnNi komp.

Průměrný činitel tření povlaků byl vyhodnocen automaticky počítačovým programem MFT od společnosti Rtec. Pro slitinový povlak ZnNi byl pro tento test vyhodnocen činitel 0,4750 a pro kompozitní povlak ZnNi byl 0,4426.

13.5 Diskuze výsledků

Byl vyloučen nový typ kompozitního povlaku, který je složený ze slitinové matrice ZnNi, v níž byly dispergovány polymerní částice.

Povlak ZnNi komp. byl připravován v alkalické lázni, do které byla přidána disperze. Tato směs galvanické lázně a dispergovaných částic tvoří suspenzi.

Během pokovení bylo nutné zajistit kontinuální míchání v celém objemu lázně. To je nutné z důvodu usazování disperzních částic na dně lázně a také kvůli distribuci těchto částic k pokovenému zboží. Jelikož magnetické míchadlo nebylo schopné sedimentaci rozmíchat, bylo zvoleno hřídelové míchadlo, kterým se povedlo zajistit stálé míchání bez sedimentace.

Proudová hustota byla zvolena $2,5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$. Volili jsme na základě doporučení technického listu a ze zkušeností z minulých experimentů. Jelikož se u některých vzorků objevili napálené stopy, je možné zvažovat, že by bylo vhodné zkusit pokovení při různých proudových hustotách v rozmezí $0,5 - 3,5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$.

Dle porovnání výsledků vylučovacích rychlostí použitých lázní lze konstatovat, že disperze má prokazatelný vliv na vylučovací rychlost. V průměru se tloušťka povlaku v daném čase liší o 20,2%. Průměrná vylučovací rychlost čisté slitinové lázně ZnNi je $0,426 \mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$. Lázeň s přidanou disperzí má průměrnou vylučovací rychlost $0,340 \mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Slitinový povlak ZnNi je vizuálně shodný s kompozitním povlakem.

Dle metalografických výbrusů je možné konstatovat přítomnost disperzních částic. Pro návazní experimenty by bylo vhodné testovat vzorky také na materiálové složení povlaku, například infračervenou spektroskopií, která by umožnila identifikaci polymerní složky v kompozitním povlaku.

Z výsledků měření na tribometru TOP 3 není zřejmý žádný výrazný rozdíl v hodnotách činitele tření. Lze konstatovat, že hodnoty činitele tření jsou v případě kompozitního povlaku spíše vyšší, než u slitinového povlaku ZnNi. Lze předpokládat, že to bylo způsobeno nevhodným nastavením parametrů testu, zejména z důvodu příliš krátkého trvání testu, tedy také příliš krátkou dráhou pohybu funkční dvojice. Tím se nejspíš nestihl vytvořit tzv. tuhý mazací film, který by činitel tření

mohl kladně ovlivnit. Také byl test do určité míry ovlivněn vysokými teplotami okolí, které dosahovaly 30 – 35 °C ve dnech měření.

Tloušťka povlaku na vzorcích pro MFT-5000 Multi functional Tribometer, byla vyloučená i přes 50 minut pokovování malá, kvůli nevhodně zvolené předúpravě povrchu. Kvůli tomuto faktu byla do předúprav povrchu zařazena ještě mechanická předúprava – broušení. Takto připravené vzorky však již nebylo možné testovat z důvodu technických komplikací při experimentu. Proto byly použity výsledky testů zkušebních vzorků i přes malou tloušťku vyloučeného povlaku.

Výsledky ze snímku profilometru ukazují, že výškový rozdíl po testu byl 4,715 μm , což znamená, že povlak byl v průběhu dvou minut úplně otřen z povrchu vzorku. Výsledkem jsou tedy neprůkazné hodnoty činitele tření, kdy za dané tloušťky povlaku nebylo možné vytvořit mazací film.

Dosažené výsledky tribologického testu, které potvrzují hypotézu, že kompozitní povlak bude vykazovat nižší činitel tření, byly zaznamenány testem na zařízení MFT-5000 Multi functional Tribometer,. Graf na obrázku 23 ukazuje, že po záběhu testu (po cca 40 sekundách), je činitel tření kompozitního povlaku menší než u povlaku slitinového. Proto je vhodné, aby byly provedeny další testy, s vyšší tloušťkou povlaku a v delším časovém rozmezí.

Další experimenty by tedy měli být zaměřené nejen na rozšíření tribologických testů. Bylo by vhodné provést i zkoušky korozní odolnosti, diagnostikovat složení a ověřit přítomnost polymerních částic či zkoumat vlastnosti povlaků s různými koncentracemi polymerních částic při různých teplotách, stupních míchání a dalších parametrech. Zajímavé výsledky by mohla přinést i změna z alkalické lázně na slabě kyselou slitinovou lázeň.

14 Závěr

Galvanické pokovení zinkem a jeho slitinami je díky jeho kvalitě a vlastnostem nejrozšířenějším v praxi používaným způsobem protikorozi ochrany. Jejich vlastnosti jsou však závislé na celé řadě technologických podmínek a na konstrukčním provedení výrobku.

Základem pro výběr povrchové úpravy je, aby plnila své funkční vlastnosti např. protikorozi ochranu, otěruvzdornost či požadovaný vzhled, po celou dobu životnosti součásti. Z toho důvodu jsou vyvíjeny nové povlaky, které jsou schopné tyto podmínky splnit.

Novou možností, jak tyto podmínky splnit, by mohl být kompozitní povlak se slitinovou maticí na bázi ZnNi. Zinek tvoří katodickou ochranu materiálu, nikl má kromě bariérové protikorozi ochrany i přívětivou otěruvzdornost. Tyto přednosti mohou být podpořeny přidáním polymerních částic, které mají taky za úkol vytvořit lepší kluzní vlastnosti.

Výsledky měření této bakalářské práce ukazují, že kompozitní povlak se slitinovou maticí na bázi ZnNi má potenciál. Proto je důležité provést další měření, které jeho výhody mohou potvrdit.

Nově vytvořený kompozitní povlak má předpoklad využití pro pokovení šroubových spojů – závitových dvojic. Povrchová úprava šroubů je důležitá nejen z hlediska protikorozi ochrany, ale zejména taky kvůli jisté a bezpečné montáži či zpětné demontáži šroubového spoje. Proto si tato technologie může najít své uplatnění i přes možné budoucí omezení z hlediska ekologie.

15 Seznam použitých obrázků

- Obr. 1: Schéma elektrolýzy [4]
Obr. 2: Schéma technologického postupu [22]
Obr. 3: Způsoby předúprav povrchu [34]
Obr. 4: Princip hloubkové účinnosti při galvanickém pokovení [35]
Obr. 5: Experimentální elektrolyzér s hřídelovým míchadlem
Obr. 6: Vlevo povlak ZnNi, vpravo ZnNi + polymerní částice zvětšeno 500x
Obr. 7: Vlevo povlak ZnNi, vpravo ZnNi + polymerní částice zvětšeno 1000x
Obr. 8: Digitální tloušťkoměr Electrometr 456 [41]
Obr. 9: Grafická závislost tloušťky na čase povlaků ZnNi a ZnNi komp.
Obr. 10: Vzorky pro tribometr TOP 3: Vlevo povlak ZnNi, vpravo kompozitní povlak ZnNi
Obr. 11: Vzorky pro lineární test na tribometru Rtec-Pin on Disc: Vlevo povlak ZnNi, vpravo kompozitní povlak ZnNi
Obr. 12: Vzorky pro rotační test na tribometru Rtec-Pin on Disc: Vlevo povlak ZnNi, vpravo povlak ZnNi komp.
Obr. 13: Tribometr TOP 3
Obr. 14: Podrobný popis tribometru TOP 3 [43]
Obr. 15: Skica a fotografie funkční dvojice pro tribometr TOP 3 [22]
Obr. 16: Digitální váha zn. OHAUS: Explorer Pro [43]
Obr. 17: Ukázkový graf závislosti činitele tření na času pro povlak ZnNi
Obr. 18: Zařízení MFT-5000 Multi functional Tribometer
Obr. 19: Vzorek pro lineární pohyb tribometru [interní materiály ústavu, foto autora]
Obr. 20: Vzorek pro rotující pohyb tribometru [interní materiály ústavu, foto autora]
Obr. 21: Grafická závislost činitele tření čase z lineárního testu povlaků ZnNi a ZnNi komp.
Obr. 22: Výstup 2D profilometru lineárního testu
Obr. 23: Grafická závislost činitele tření čase z rotačního testu povlaků ZnNi a ZnNi komp.

16 Seznam použitých tabulek

Tab. 1: Technologický postup

Tab. 2: Průměrná naměřená tloušťka povlaku ZnNi v daný čas pokovení

Tab. 3: Průměrná naměřená tloušťka povlaku ZnNi komp. v daný čas pokovení

Tab. 4: Průměrné statické a dynamické činitele tření povlaku ZnNi

Tab. 5: Průměrné statické a dynamické činitele tření povlaku ZnNi komp.

17 Seznam použité literatury:

- [1] TULKA, Jaromír. Povrchové úpravy materiálů. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemické, 2005. 13
- [2] *Galvanické pokovovanie* [online]. 2014. [cit. 2018-3-3] Dostupné z: <http://chromovanie.com/sluzby/galvanickepokovenie>
- [3] BENEŠOVÁ, Ing. Dana a doc. Ing. Viktor KREIBICH, CSC. *Povrcháři: Kompozitní povlaky - základy elektrochemie*. Povrcháři. 2015, (6), 19. Dostupné také z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/201506_povrchari.pdf
- [4] KEKULE, Jaromír. Vedení elektrického proudu v kapalinách - elektrolýza. In: *Elektrina a magnetismus* [online]. [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: http://elektross.gjn.cz/elektrina/el_proud/vedeni_proudu/kapaliny/kapaliny.html
- [5] HALKO, Radoslav. *Zinok* [online]. 2011 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://kvalitan.analytika.sk/sk/teoria/kationy/kationy-3-triedy/vlastnosti/zinok/>
- [6] *Žiarové striekanie kovov* [online]. 22. júl 2015 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/%C5%BDiarov%C3%A9_striekanie_kovov
- [7] *Žiarové a odstredivé zinkovanie: Ako prebieha zinkovanie* [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.signumcz.com/sk/ziarove-a-odstredive-ziarove-zinkovanie/>
- [8] JAŠ, CSC., Ing. František. *ZINGA – unikátny systém studeného zinkovania ocelových výrobkov* [online]. 2008 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/technika-62009/zinga-unikatny-system-studeneho-zinkovania-ocelovych-vyrobkov.html>
- [9] ŠULC, Radek. *VIII. Koroze* [online]. 2008 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/predmety/1rocnik/chemie1r/prednes/Ch_pr edn13-Ko.pdf

[10] KREIBICH Viktor; HOCH Karel. *Koroze a technologie povrchových úprav*. Praha; ČVUT 1984

[11] *Periodická tabulka: Nikl*. In: *Prvky* [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/28.html>

[12] Galvanic nickel coating. *Massag EN* [online]. 2009 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.massag.com/products/surface-treatment/galvanic-nickel-coating/>

[13] DR. SNYDER, DONALD. Nickel Electroplating. *PRODUCTS FINISHING* [online]. 9/29/2011 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/nickel-electroplating>

[14] SUDAGAR, Jothi, Jianshe LIAN a Wei SHA. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – A critical review. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 15 September 2013 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.107>

[15] GOLIÁŠ, Ing. Petr. Slitinový povlak ZINEK NIKL - 1. část. *Tribológia* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32014/slitinovy-povlak-zinek-nikl-1-cast.html>

[16] GOLIÁŠ, Ing. Petr. Slitinový povlak ZINEK NIKL - 2. část. *Tribológia* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42014/slitinovy-povlak-zinek-nikl-2-cast.html>

[17] ŽABKA, Vojtěch a Pavel MÁČKA. *Technologická řešení Atotech pro slitiny ZnNi: Technologická řešení Atotech pro pokov slitin ZnNi* [online]. 2016, 5 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/423006-Technologicka-reseni-atotech-pro-pokov-slitin-zn-ni.html>

[18] BENEŠOVÁ, Dana. MM Průmyslové spektrum: Kompozitní galvanické povlaky. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013, 04.06.2013, (6) [cit. 2018-05-31].

Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kompozitni-galvanicke-povlaky.html>

[19] MACEK, K. a kol. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze, 2003

[20] Bercot, P., Pena-Munoz, E., Pagetti, J., *Electrolytic composite Ni-PTFE coatings: an adaptation of Guglielmi's model for the phenomena of incorporation*. Received 20 February 2002; accepted in revised form 18 April 2002. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00180-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00180-9)

[21] BENEŠOVÁ, Dana a Viktor KREIBICH. Kompozitní galvanické povlaky – vlastnosti povlaků. *Povrcháři* [online]. 2015, listopad 2015, (7. číslo), 8-9 [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/201507_povrchari.pdf

[22] DRAŠNAR, Petr. *Výzkum a vývoj galvanických povlaků Zn-PTFE*. 2015. Disertační práce. FS - ČVUT.

[23] CHVOJKA, Martin. *NÁHRADA TVRDÉHO CHROMOVÁNÍ ZA POVLAKY NA BÁZI NIKLU*. ČVUT - FS, 2015. Diplomová práce. ČVUT.

[24] PRAVEEN, B.M. a T.V. VENKATESHA. Electrodeposition and properties of Zn-nanosized TiO₂ composite coatings. *Applied Surface Science* [online]. 15.2.2008, , Volume 254, Issue 8, pages 2418-2424 [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.09.047>

[25] DZIMKO, Marián. *Tribológia: Úlohy a význam tribológie v technických systémoch*. 2013, 15 s. Dostupné také z: http://www.spla.sk/uploads/TRIBOTECHNIKA/Prednasky_2013/Dzimko,%20M._U_niverzita%20Zilina.pdf. Přednáška. Žilinská univerzita v Žiline

[26] Arnell, R.D., Davies, P.B., Halling, J., Whomes, T.L.: *Tribology - Principles and Design Applications*, London: MACMILLAN, 1991. Pages 1-65

- [27] STOHWASSER, Petr. *Třecí síla — smykové tření* [online]. In: . [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: <http://www.nabla.cz/obsah/fyzika/mechanika/treci-sila-smykove-treni.php>
- [28] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky. *Fyzika :: MEF* [online]. [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [29] OPOTREBENIE A MATERIÁLY ODOLNÉ PROTI OPOTREBENIU. In: *Stránka študentov 4. ročníka Materiálovotechnologickej fakulty STU v Trnave* [online]. [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <http://www.mtfda.szm.com/subory/opotrebenie.pdf>
- [30] Abrasion Resistance. *CORROSIONPEDIA* [online]. [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <https://www.corrosionpedia.com/definition/2512/abrasion-resistance>
- [31] Povrchové úpravy závitových dvojic. *MM Spektrum* [online]. 2010, 14.12.2010, (2010/12), s. 64 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-zavitovych-dvojic.html>
- [32] Zinek. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Zinek>
- [33] NEUMANN, Martin. ROZDÍL MEZI ŽÁROVÝM A GALVANICKÝM ZINKOVÁNÍM. *Eurometal* [online]. 27.01.2016 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <http://www.eurometal.cz/magazin/rozdil-mezi-zarovym-a-galvanickym-zinkovanim-detail-60>
- [34] PREDÚPRAVA POVRCHU. In: *Fakulta chemicko - technologická* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <https://fcht.upce.cz/sites/default/files/public/luva3059/mater-vstrojar-vyrobe.pdf>
- [35] OBR, Ladislav. Vstup do technologie povrchových úprav. *Tribológia* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62015/vstup-do-technologie-povrchovych-uprav.html>

[36] POOR THROWING POWER & COVERAGE. *TECHNOLOGY* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z:

<http://www.plating.com/platingtechnical/poorthrowingpower.htm>

[37] CIMR, Aleš. *DIFUZNÍ ZINKOVÁNÍ*. České vysoké učení technické, 2017. Bakalářská práce. Fakulta strojní.

[38] *Ekologičtější a efektivnější technologie zinkování* [online]. [cit. 2018-07-29]. Kód článku: 020514 Vyšlo v MM : 2002 / 5, 16.05.2002 v rubrice Trendy / Povrchové úpravy, Strana 26. Dostupné z:

<https://www.mmspektrum.com/clanek/ekologictejsi-a-efektivnejsi-technologie-zinkovani.html>

[39] FALTÝNKOVÁ, Alena. Vady při funkčním chromování. *Tribológi*a [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12015/vady-pri-funkcnim-chromovani.html>

[40] Membránové procesy. *KOVOFINIŠ* [online]. Ledec nad Sázavou [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://kovofinis.cz/membranove-procesy>

[41] Digitální tloušťkoměr Elcometer 456. In: *Electrometer.cz* [online]. Ostrava: Gamin [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.elcometer.cz/elcometer-456/>

[42] PAZDEROV, M., M. BRADAC a M. VALES. Tribological Behaviour of Composite Coatings. *Procedia Engineering*. 2011, **10**, 472-477. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.080. ISSN 18777058. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705811002682>

[43] Ohaus EP213 Explorer Pro Precision Balance, 210 g x 0.001 g With Draftshild. In: *ScaleGalore - Scales, Balances and Force Gauges* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: https://www.scalesgalore.com/product/index.cfm?product_id=4676