

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2022**

**TOMÁŠ  
NOVÁK**



**ČVUT**  
ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**Tampónování aneb lokální pokovování povrchu**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Tomáš Novák

**VEDOUcí PRÁCE:** Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE

**STUDIJNÍ PROGRAM:** B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

**STUDIJNÍ OBOR:** 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

**Praha 2022**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novák** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **492490**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající 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:

**Tampónování aneb lokální pokovování povrchu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Brush plating or local surface plating**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozbor problematiky lokálního pokovování (princip, popis, využití)
- 2) Typy povlaků využívané touto technologií
- 3) Zhotovení a vyhodnocení vzorků
- 4) Technicko-ekonomické zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

- 1) KUCHAR, J.; KREIBICH, V.; BENEŠOVÁ, D. Possibilities of brush plating process. Technological forum 2015. Kouty. Czech Republic. ISBN 978-80-87583-13-5
- 2) VANEK, D. Selective brush plating for localized areas. 2016. Dostupné z: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/selective-brush-plating-for-localized-areas/>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**

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

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen 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.

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta

## **Prohlášení**

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Kuchaře, Ph.D., IWE, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE za jeho užitečné rady a pomoc při realizaci experimentu. Dále bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni, kteří mě po celou dobu tvorby této práce motivovali a zajistili mi vhodné podmínky.

## Anotace

<b>Název diplomové práce:</b>	Tampónování aneb lokální pokovování povrchu
<b>Autor práce:</b>	Tomáš Novák
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE
<b>Akademický rok:</b>	2021/2022
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	12133 – Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D., IWE
<b>Rozsah práce:</b>	73 stránek, 11 tabulek, 31 obrázků
<b>Klíčová slova:</b>	<b>Lokální galvanické pokovení, elektrolytické pokovení, tampónové pokovení</b>

Bakalářská práce se zabývá technologií lokálního galvanického pokovení. Práce je rozdělena na část teoretickou a experimentální. V teoretické části je vysvětlen princip fungování této technologie a její využití. Dále jsou popsány povlaky využívané touto technologií a jejich specifické vlastnosti. Experimentální část se zabývá nanesením povlaku pomocí tampónování na několik vzorků. Pokovené vzorky byly dále testovány tribologickým testem na tribometru TOP 3 a MFT 5000. Výsledky testů jsou vzájemně porovnány.

# Annotation

<b>Title of the final thesis:</b>	Brush plating or local surface plating
<b>Author:</b>	Tomáš Novák
<b>Supervisor:</b>	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE
<b>Academic year:</b>	2021/2022
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D., IWE
<b>Extent:</b>	73 pages, 11 tables, 31 pictures
<b>Keywords:</b>	brush plating, electroplating, selective anodizing

This bachelor thesis deals with the technology of brush plating method. It is divided into two parts – theoretical and experimental. The theoretical part explains the principle of operation of this technology and its application. The coatings used in this technology and their specific properties are described in the next section. The experimental part focuses on the application of the coating using the brush plating method on several samples. Coated samples were further tested by a tribological test on a TOP 3 tribometer and an MFT 5000. The test results are compared with each other.

## Seznam zkratek a použité symboliky

%	procento
°C	stupeň Celsia
£	britská libra
<	menší než
µm	mikrometr
A	ampér
Ag	stříbro
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid hlinitý
apod.	a podobně
Au	zlato
B	bor
Co	kobalt
Cu	měď
g	gram
GPa	gigapascal
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kyselina sírová
HCl	kyselina chlorovodíková
HRC	tvrdost dle Rockwella
HV	tvrdost dle Vickerse
Kč	korun českých
kg	kilogram
kHz	kilohertz
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid lanthanitý



LED	elektroluminiscenční dioda
mm	milimetr
např.	například
Ni	nikl
Nm/s	nanometr za sekundu
∅	průměr
Pt	platina
Ra	střední aritmetická hodnota drsnosti Ra
RPM	počet otáček za minutu
Rq	střední kvadratická hodnota drsnosti Rq
Rz	průměrná hloubka drsnosti Rz
V	volt
W	wolfram
Zn	zinek
Ω	Ohm

# Obsah

Úvod.....	13
1. Rozbor problematiky pokovování povrchu.....	14
1.1 Galvanické pokovení.....	14
1.1.1 Technický popis galvanického pokovení.....	14
1.1.2 Druhy elektrolytů.....	15
1.1.3 Výhody a nevýhody.....	16
1.2 Technologie lokálního galvanického pokovení (Tampónování).....	17
1.2.1 Technický popis tampónování.....	18
1.2.2 Druhy elektrolytů.....	18
1.2.3 Výhody a nevýhody.....	19
2. Předúpravy povrchu.....	20
2.1 Mechanické předúpravy.....	20
2.1.1 Broušení.....	20
2.1.2 Kartáčování.....	20
2.1.3 Leštění.....	21
2.1.4 Omílání.....	21
2.2 Chemické předúpravy.....	22
2.2.1 Odmaštění.....	22
2.2.2 Moření.....	23
2.2.3 Odrezování.....	24
2.2.4 Dekapování.....	24
3. Tribologie.....	25
3.1 Tření.....	25
3.2 Opotřebení.....	27
3.2.1 Adhezivní opotřebení.....	27

3.2.2	Abrazivní opotřebení .....	28
3.2.3	Erozivní opotřebení.....	28
3.2.4	Kavitační opotřebení.....	29
3.2.5	Únavové opotřebení .....	29
3.2.6	Vibrační opotřebení.....	29
3.3	Mazání.....	29
3.4	Testovací metody .....	30
3.4.1	Pin on disc .....	30
4.	Typy povlaků využívané technologií elektrolytického pokovení.....	32
4.1	Antikorozní povlaky .....	32
4.2	Otěruvzdorné povlaky a tvrdé vrstvy.....	36
4.3	Povlaky se speciálními vlastnostmi .....	36
5.	Experimentální část .....	38
5.1	Použitá zařízení pro pokovení.....	38
5.2	Pokovené vzorky .....	40
5.3	Předúprava vzorků .....	41
5.4	Měření povrchu.....	42
5.4.1	Měření drsnosti povrchu .....	42
5.4.2	Měření hmotnosti .....	45
5.4.3	Měření tloušťky povlaku.....	47
5.4.4	Měření pórovitosti povlaku .....	50
5.4.5	Měření rezistivity povlaku .....	51
5.5	Zkoumání vylučovací rychlosti při 7V a 0,2A s vysokorychlostním elektrolytem.....	52
5.6	Měření a vyhodnocení na tribometru MFT 5000.....	53
5.7	Měření a vyhodnocení na tribometru TOP 3 .....	56
5.8	Diskuze výsledků tribologického testování .....	60

6. Technicko-ekonomické zhodnocení.....	63
7. Závěr .....	64
8. Zdroje.....	65
9. Seznam obrázků .....	68
10. Seznam tabulek.....	70
11. Seznam grafů .....	71
12. Seznam příloh.....	72

## Úvod

Tampónování je speciálním druhem galvanického pokovení. Tento druh pokovení je často označován jako lokální galvanické pokovení, jelikož je ho možné aplikovat lokálně, na konkrétní část dílu, v porovnání s klasickým ponorovým pokovením, u něhož je celá součást ponořena v lázni. Největší uplatnění nachází při renovaci a opravě poškozených předmětů. Pokovení je možné provádět i na těžce přístupných místech bez nutnosti rozebírání celé součásti. Zejména díky zmíněným faktorům je tato metoda galvanického pokovení v posledních letech stále více využívána. Firma SIFCO Applied Surface Cocepts poskytuje již dlouhou dobu služby týkající se tampónového pokovení. [12,14]

Teoretická část je zaměřena na seznámení s problematikou tampónového pokovení. V další části jsou vysvětleny důležité faktory týkající se tribologie. Dále jsou popsány různé typy povlaků využívaných touto technologií a jejich specifické vlastnosti.

Experimentální část se zabývá nanesením niklového povlaku na několik vzorků, u kterých je následně provedeno tribologické testování doplněné o další měřené hodnoty před a po testu. Testováním jsou získány hodnoty koeficientu tření na dvou různých tribometrech a jejich vzájemné porovnání. Na závěr jsou srovnány cenové nároky na použití vysokorychlostního elektrolytu v porovnání s klasickým Wattsovým elektrolytem.

# 1. Rozbor problematiky pokovování povrchu

Pokovování je řazeno mezi povrchové úpravy primárně kovů nebo jiných materiálů. Podle druhu využití se dělí na chemické, galvanické neboli elektrolytické a vakuové. Každý druh má specifické provedení pro různé využití. Mezi největší pozitiva patří zlepšení korozivzdornosti, úprava vzhledu, či je využíváno pro požadované navýšení tvrdosti. Pokovování spočívá v usazování drobných částic kovu na povrchu materiálu, který je vložen do roztoku obsahující požadovaný kov. [2]

## 2. Galvanické pokovení

Při technologii galvanického pokovování dochází k pokovení základního materiálu tenkou vrstvou povlaku jiného kovu za pomoci elektrické energie. Je využíváno zejména pro dekorativní účely nebo pro zlepšení korozivzdornosti. Galvanické pokovení umožňuje používat pro výrobu levnější kovy a následně na ně aplikovat ušlechtlejší kovy a docílit tak požadovaného vzhledu i delší životnosti výrobku. Vývoj této technologie byl započnut v první polovině 19. století a postupně byl zdokonalován až do dnešní podoby. [3,4]

### 2.1.1 Technický popis galvanického pokovení

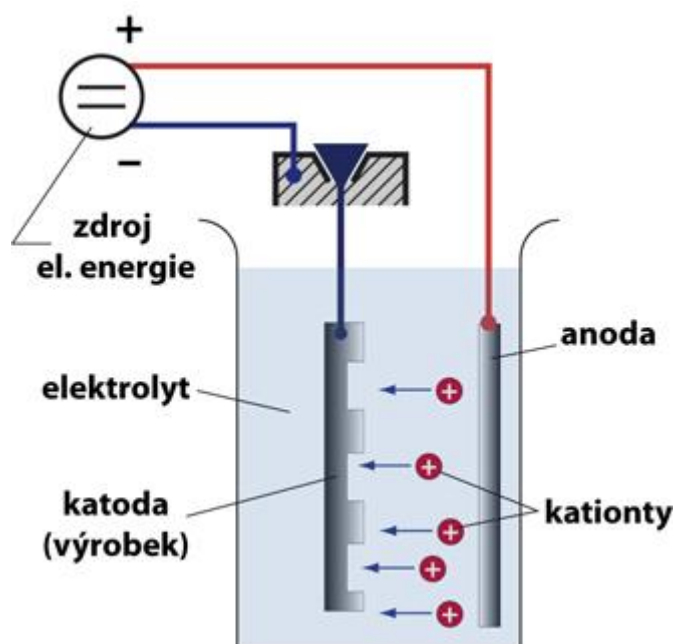
Galvanické pokovení, neboli elektrolytické pokovení, funguje na principu elektrolýzy, během které dochází k přeměně elektrické energie na energii chemickou. Zařízení je tvořeno pomocí kladně a záporně nabitých elektrody. Obě elektrody jsou ponořeny v elektrolytu, jehož úkolem je zajištění přenosu kationtů z kovu, kterým se pokovuje. Předmět, který se má pokovit, je zapojen jako katoda a kov, kterým se pokovuje, je zapojen jako anoda, která je při procesu rozpouštěna, čímž jsou doplňovány úbytky kovu v roztoku. Průchod elektrické energie je zajišťován zdrojem stejnosměrného napětí.

Na počátku je potřeba zvolit správné elektrody a elektrolyt, aby byly uskutečněny při průchodu elektrického proudu požadované chemické reakce. Elektrolytické pokovení je extrémně citlivé na jakékoliv nečistoty, proto je důležité provést důkladnou předúpravu povrchu, aby byl zajištěn správný přestup kovového iontu na povrch pokovovaného materiálu, který je připojen jako katoda. Je potřeba zbavit

povrch veškerých mastnot a nečistot vhodným odmaštěním, popř. mořením a povrch řádně aktivovat. [1,4,5,6]

### Vzorový technologický postup při galvanickém pokovení

Odmaštění → oplach → moření → oplach → elektrolytické odmaštění → aktivace povrchu → oplach → galvanické pokovení → pasivace → redukční oplach → sušení



Obrázek 1 Schéma principu galvanického pokovení [4]

### 2.1.2 Druhy elektrolytů

Pro realizaci galvanického pokovení existuje velké množství kovů, které lze využít. Proto je potřeba zvolit optimální elektrolyt podle požadavků na korozivzdornost, tvrdost, tažnost, odolnost proti opotřebení a podle dalších aspektů. Nejčastěji bývají jako elektrolyt používány roztoky na bázi vody, jako jsou kyseliny, zásady nebo kovové soli. Kromě základní složky, kterou je kov, jímž se pokovuje, bývají elektrolyty obohaceny ještě dalšími přísadami, jako jsou organické přísady, vyjasňovací roztoky, či vodivé soli. Těmi bývají rovněž ovlivněny výsledné vlastnosti galvanických povlaků. [3,7]

### 2.1.3 Výhody a nevýhody

Galvanické pokovování přináší řadu výhod a široké spektrum využití. Ochrana vůči škodlivému prostředí, kterému je pokovený díl vystaven, je zajištěna kovovými povlaky. Na povrchu je vytvořena ochranná bariéra, kterou může být zpomalena koroze. Nejdříve dochází k rozpadu pokovené vrstvy povlaku, a až následně k rozpadu základního materiálu, čímž bývá prodloužena životnost. Vzhledem k vlastnostem vybraných kovů může dojít ke zlepšení korozivzdornosti, snížení tření, či k přípravě povrchu pro lepší přilnavost barvy. Různými kovy jsou zajištěny různé vlastnosti, kromě společného znaku, čímž je ochrana proti korozi. Další výhodou je samozřejmě variabilita úpravy vzhledu předmětu podle požadavků zákazníka. Díky tomu je možné pokovit součást tenkým povlakem dražších kovů pro získání lesklého a atraktivnějšího vzhledu za mnohem menší náklady na výrobek. Použitím stříbrných či měděných povlaků je zlepšována elektrická vodivost opět za mnohonásobně nižší cenu v porovnání s výrobou celé součásti ze zmíněných kovů. Dílům, které jsou vystaveny drsnějším podmínkám, lze pomocí galvanického pokovení zvýšit tvrdost. Tento způsob povrchové úpravy je využíván v téměř každém průmyslovém odvětví. Nejvíce je rozšířen v automobilovém, elektronickém, lékařském, či leteckém průmyslu, ale i v dalších odvětvích. Mezi nevýhody bezpochyby patří množství odpadu vznikající při realizaci jednotlivých operací a jeho následná likvidace. Jelikož se jedná o velice náročný proces, celková pořizovací cena všech potřebných komponentů je velmi vysoká, a proto se využívá zejména u větších sérií. Při nanášení více vrstev povlaku, jde o časově složitý proces. [8,11]



Obrázek 2 Příklad využití galvanického zinkování [9]



Obrázek 3 Galvanicky poniklované kolo [10]



## 2.2 Technologie lokálního galvanického pokovení (Tampónování)

Technologie tampónového pokovení je speciálním druhem galvanického pokovení. Tato metoda byla vyvíjena paralelně s vývojem galvanického pokovení a první zmínky o komerčním využití v evropských zemích jsou datovány k roku 1947. Z počátku byly pomocí tampónování prováděny pouze drobné opravy vad a postupným vývojem byl vynalezen způsob, jak vylučovat kovové povlaky i na větších plochách. Díky tomu se lokální galvanické pokovení začalo aplikovat i v jiných průmyslových odvětvích, kde je potřeba pokovit větší součásti. Postup provedení je obdobný jako u galvanického pokovení. Pokovovaný díl je zde rovněž připojen jako katoda, zatímco anoda je tvořena pevnou součástí obalenou savým tampónem, který je nasátý speciálním druhem elektrolytu (obsahující drobné částičky kovu) určeným pro pokovení. Po vyčerpání je nutné tampón opětovně smáčet do elektrolytu. Pro realizaci je nutné uzavřít elektrický obvod, což je prováděno dotykem anody obalené tampónem s pokovovaným dílem. Aby byla vytvořena homogenní struktura povlaku, elektroda s tampónem se rovnoměrně pohybuje po celé ploše určené k pokovení. Při tomto pohybu dochází k přenosu iontů kovu z anody na katodu a k vytvoření požadované tloušťky povlaku na povrchu. Největší výhodou oproti klasickému galvanickému pokovení je zde možnost přenosnosti zařízení, což umožní pokovovat na těžce přístupných místech bez nutnosti demontáže zařízení. Proto je uplatňováno zejména při renovaci dílů, které jsou již zkompletovány. [12,13,14]

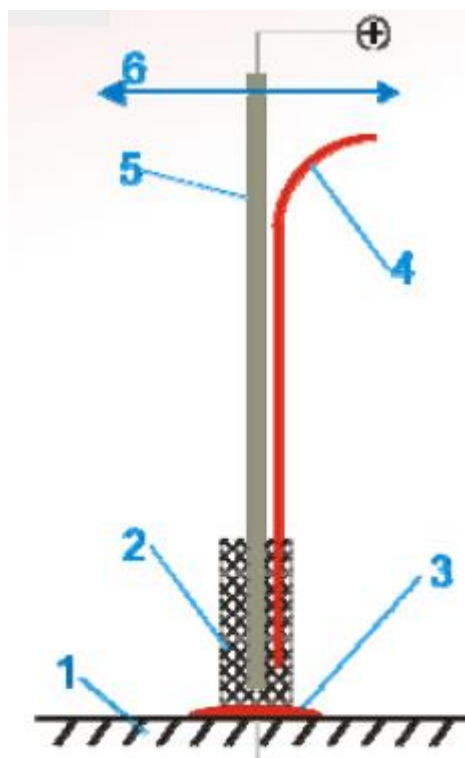


Obrázek 4 Příklad využití tampónování [16]

## 2.2.1 Technický popis tampónování

K nanesení kovové vrstvy dochází usměrněným pohybem tampónu, který je napuštěný elektrolytem. [14]

- 1 - Pokovovaná součást (katoda)
- 2 - Tampón (savý materiál)
- 3 - Elektrolyt
- 4 - Přívod elektrolytu do tampónu (není podmínkou)
- 5 - Pracovní nástroj (anoda)
- 6 - Směr pohybu anody



Obrázek 5 Schéma zařízení pro tampónování [14]

## 2.2.2 Druhy elektrolytů

Při výběru elektrolytu je potřeba brát ohled na požadované vlastnosti a typ povlaku. Existuje celá řada elektrolytů, pomocí kterých je možné vyloučit více než 50 různých povlaků. Primárně se dělí na gely a roztoky, ovšem výsledná kvalita je u obou druhů téměř totožná.

Použití gelu má oproti roztoku výhodu menšího rizika zatečení do okolních míst, které nejsou určeny k pokovení. Pro metodu tampónového pokovení není využíváno kyanidových elektrolytů, u kterých by musely být zajištěny speciální bezpečnostní opatření. Jelikož je elektrolyt obsažen pouze v samotném tampónu, zatímco u pokovování ponorem je přítomen v celé vaně, dochází k rapidnímu snížení spotřeby elektrolytu, což se pozitivně odráží na snížení provozních nákladů, ale také na jednodušší likvidaci vzniklých chemických odpadů. Při pokovování dochází ke vzniku škodlivých výparů zejména kvůli velkým proudovým hustotám. Proto

je nutné zajistit, aby obsluha byla vybavena vhodnými ochrannými prostředky dýchacích cest a zaručit dostatečné odvětrávání pracoviště.[14]

### **2.2.3 Výhody a nevýhody**

Tampónování má oproti pokovování ponorem řadu výhod. Mezi největší pozitiva se řadí vysoká flexibilita využití. Zařízení jsou mobilnější a umožňují provádět pokovení na těžce přístupných místech bez nutnosti rozebírat a přepravovat celé konstrukce. Z toho důvodu je využíváno pro rychlý servis, opravu či renovaci dílů. Při samotném provedení je spotřebováno mnohem menší množství elektrolytu, čímž se celý proces stává ekonomicky výhodnějším (při zajištění minimálně stejné kvality). Jelikož se tampónování provádí lokálně, odpadá tak potřeba předúpravy celého dílu. Jelikož je proces v porovnání s ponorem snadno proveditelný, není potřeba příliš dlouhý čas na proškolení obsluhy. Touto metodou lze dosáhnout požadované tloušťky pokovení s danou přesností. V porovnání s ostatními postupy má kladný vztah i k životnímu prostředí, protože kromě zbylého elektrolytu už nezůstávají další chemické zbytky k likvidaci. Spotřeba elektrické energie je také nižší. Lokální galvanické pokovení slouží jako ochrana proti korozi, nanesený povlak zastává funkci ochranné bariéry. Mezi možné nevýhody lze řadit omezení na pokovení pouze jednoho dílu v jeden čas, avšak to není primárním cílem. Při tampónování je obtížnější zajistit rovnoměrnou tloušťku vyloučeného kovu po celé ploše. [8,17,18]

## **3. Předúpravy povrchu**

Provedení adekvátní předúpravy povrchu je základní operací v každém technologickém postupu. Cílem předúpravy je povrch dostatečně vyčistit a připravit na následující povrchovou úpravu. Správně provedená povrchová předúprava s sebou přináší řadu pozitiv ve formě zlepšení vlastností, docílení požadovaného vzhledu a výrazně se podílí na schopnosti materiálu odolávat korozi.

Podle způsobu provedení je možné je rozdělit na předúpravy chemické a mechanické. [1]

### **3.1 Mechanické předúpravy**

Primárním úkolem mechanických předúprav povrchu je odstranit z povrchu výraznější nedokonalosti. Dochází k odstranění rzi, okují apod. Zlepšují přilnavost povrchu pro nanášení dalších povlaků a vrstev. Podle požadavků lze vytvořit odpovídající vzhled. Jejich cílem je vytvořit povrch, který odolává mechanickému zatížení. [1]

#### **3.1.1 Broušení**

Broušení je proces abrazivního obrábění. Tyto procesy se provádí mechanicky nebo ručně pomocí vhodných brusiv za účelem dosažení požadované struktury povrchu. Opracovávaný předmět se postupně vybrušuje až na požadovanou drsnost. Podle zrnitosti brusiva je broušení možné dělit na hrubé a jemné. Hrubé broušení se používá jako operace pro odstranění původních nerovností neupraveného povrchu, a proto dochází k největšímu úběru materiálu. Jemné broušení se provádí pomocí brusiva s menší zrnitostí a figuruje již jako finální operace pro dosažení požadované drsnosti. [1,19,20]

#### **3.1.2 Kartáčování**

Kartáčování je do technologického postupu zařazováno obvykle po broušení a využívá se zejména jako čistící operace ke zbavení zbylých nečistot a oxidů, které se mohly vytvořit při předchozí operaci broušení. Používají se drátěné kartáče. Hlavním hodnotícím kritériem je délka, průměr jednotlivých drátů kartáče a kinetická energie,

kteřá jim je dodávána. Pro finální dočištění lze využít kartáče tvořené umělými vlákny.  
[1]

### **3.1.3 Leštění**

Pro získání požadovaného vzhledu je tato metoda jedním z nejlepších způsobů předúpravy. Následuje obvykle po předchozím broušení, či kartáčování. Hlavním účelem je odstranění nejmenších stop nečistot a získání požadovaného lesku. Kovové povrchy jsou náchylné ke znečištění následkem užívání a kontaktu s agresivními prvky (jako je například kyslík přítomný v ovzduší). Leštěný díl je chráněn před nežádoucí oxidací a současně chrání povrch před korozi. Proces leštění se provádí pomocí speciální leštící pasty a textilního kotouče, které bývají dostupné v různých stupních tvrdosti. Kotouč obvykle vykonává rotační pohyb, čímž v kombinaci s leštícím účinkem pasty dochází k plastickým deformacím na povrchu leštěného dílu. Pro správné provedení je zásadní znát složení materiálu, který má být leštěn, a poté je potřeba zvolit adekvátní pastu i materiál kotouče. Podle požadavků na lesk se volí obvodová rychlost kotouče. Leštění probíhá automaticky, avšak pro měkčí materiály se volí ruční leštění. Efektivnějšího výsledku po procesu lze dosáhnout použitím leštících materiálů vyrobených z mikrovláken. [1,21]

### **3.1.4 Omílání**

Omílání nachází největší uplatnění při úpravě většího množství menších výrobků. Využívá se zejména při vyhlazování povrchu před samostatnými povrchovými úpravami, při zaoblování hran, pro odstranění okují či zpevňování. Základním principem je tření a nárazy omílacích prostředků o povrch omílaných dílů. Omílací zařízení se skládá z otáčivého, nebo vibračního bubnu s pohonem. Podle způsobu použití se dělí omílání na rotační, vibrační a odstředivé. Omílací prostředky jsou tvořeny z přírodních materiálů, nejčastěji se jedná o drcenou žulu, případně umělé materiály s přísávkou dalších prvků (například karbidu křemíku). Dále je možné využít i kalené ocelové kuličky. Často se využívají omílací tělíska z keramiky, či mohou být i plastová tělíska. Za účelem odmaštění, odstranění ostrých hran a lepší korozivzdornosti se přidává chemická aditiva. Díky vhodně zvolenému prostředku, chemické látce a času omílání nabízí tato metoda dosahování i nízkých drsností povrchu. [1,22]

## 3.2 Chemické předúpravy

V této kapitole bude uveden přehled chemických předúprav. Jejich hlavní význam spočívá v odstraňování nečistot z povrchu před následnou aplikací povrchových úprav. Využívají chemických činidel, která reagují s nečistotami na povrchu. Následně dochází k odstranění nežádoucích nečistot. Podle požadavků na finální vlastnosti se vybírá vhodná metoda před každou další povrchovou úpravou, např. pro elektrolytické pokovení niklem se využije ultrazvukové a elektrolytické odmaštění a následně i dekapování. [1]

### 3.2.1 Odmaštění

Odmaštění se používá k odstranění mastných nečistot jako jsou oleje, vosky nebo tuky, které není možné rozpustit ve vodě. Výhodou odmaštění je schopnost odstranit tyto nečistoty bez zásahu do struktury kovového povrchu. Úkolem odmašťovacích prostředků je přemístění nečistot do roztoku či emulze a zamezení jejich zpětného vytvoření na povrchu. Správně provedené odmaštění je zásadní pro budoucí přilnavost následného povlaku. Podle způsobu provedení jej dělíme do skupin: [1]

- **Odmaštění v organických rozpouštědlech**

Odmaštění za použití organických rozpouštědel je nejjednodušším způsobem pro odstranění nečistot mastného charakteru povrchu. Jednoduchost provedení se zachováním vysoké výsledné čistoty je primárním ukazatelem pro výběr tohoto způsobu. Tento způsob odmaštění není možné aplikovat na vlhké povrchy a neumožňuje odstranit heteropolární nečistoty (jako je pot a otisky prstů). Rozpouštěcími prostředky pro hrubé čištění bývá petrolej, zatímco pro detailnější čištění se používá benzín. Jejich složení vykazuje přítomnost karcinogenních prvků a obvyklá je také vysoká hořlavost, což jejich využití výrazně limituje. [29]

- **Odmaštění v alkalických roztocích**

Nejvíce rozšířeným způsobem je odmaštění pomocí alkalických roztoků. Princip této metody spočívá v chemických pochodech, během kterých probíhá emulgace a dispergace nečistot z povrchu. Současně jsou rozpouštěny i ve vodě rozpustné nečistoty. Odmašťování probíhá v odmašťovacích lázních, jež jsou vyplněny alkalickým roztokem. Nejčastěji jsou složeny z hydroxidu sodného nebo fosforečnanu draselného. Účinnost lázní se hodnotí zejména podle schopnosti emulgace a dispergace

povrchových nečistot. Důležité je sledovat množství emulgovaného tuku v lázni. Pokud je obsah tuku v lázni příliš vysoký, je nutné roztok nahradit novým, aby byla zajištěna správná funkce. [29]

- **Elektrolytické odmaštění**

Díky elektrolytickému odmaštění je možné dosahovat dokonale čistého povrchu, který je vyžadován před galvanickým pokovením. Obvykle se provádí jako finální odmaštění. Využívá elektrické energie v kombinaci s alkalickými roztoky. Kromě míry koncentrace, teploty, složení a délky odmašťovacího procesu má zásadní roli i polarita a proudová hustota. V běžných případech platí, že se zvyšující se proudovou hustotou narůstá odmašťovací efekt. [1,29]

- **Ultrazvukové odmaštění**

Odmaštění za použití ultrazvuku se používá zejména pro čištění drobných dílů. Dochází k odstranění organických i neorganických volně vázaných nečistot z povrchu. Využití nachází zejména u dílů s malými otvory s těžce přístupnými místy, u nichž je těžké docílit požadovaného odmaštění pomocí běžných čistících prostředků a postupů. Pro zmíněné díly je vhodné použít ultrazvukové odmaštění, při kterém nastává jev zvaný kavitace. Díky kavitaci dochází k uvolnění nečistot z vnitřních i vnějších prostorů a jejich následné rozptýlení v čistícím médiu. Předměty určené k odmaštění jsou vloženy do odmašťovací vany vyplněné čistícím roztokem. Pomocí ultrazvukových budičů je do vany dodáváno ultrazvukové vlnění, které se dále šíří a dochází k zahuštění a zředění prostředí s vysokými rozdíly tlaku. Střídáním vakua a tlaku vzniká kavitace. Kavitace způsobí nárazy mikroskopických částic o povrch dílů. Typická pracovní frekvence je 20–150 kHz a optimální intenzita by měla být v rozmezí 2–5 W.cm<sup>-2</sup>. Pro odmašťovací lázně se nejčastěji využívají alkalické vodné roztoky. [1,38]

### **3.2.2 Moření**

Moření se primárně využívá pro odstranění rzi, která vznikla na povrchu kovů v důsledku předchozího tepelného zpracování či následkem vystavení atmosféře. Proces spočívá v ponoru součásti do mořící lázně, jež je naplněna mořidlem. Mořícím prostředkem bývají nejčastěji roztoky kyselin, ve kterých probíhá řada chemických a elektrochemických pochodů. Výběr mořidla je závislý na druhu materiálu dílu, který

je čištěn. Ocele třídy 1 nevyžadují příliš silné mořidlo a postačí kratší intervaly odmaštění. Oproti tomu pro ocele třídy 3 a třídy 4 je nutné použít více agresivní mořidla, či aplikovat vyšší teploty lázně, které ale nesmí přesahovat teplotu 65 °C. Zejména pro své nízké pořizovací náklady je nejvíce využívána 25% kyselina sírová. Dražší alternativou je 10-20% kyselina chlorovodíková, jejíž vyšší cena je kompenzována kratšími časy pro dosažení finálního stavu. Doba setrvání v lázni ovlivňuje úbytek materiálu. Čím déle je předmět ponořen v lázni, tím větší úbytky nastávají. Úbytek lze snížit za použití vhodných inhibitorů. V důsledku vzniklých odpadů z celého procesu se moření řadí mezi méně ekologické, neboť následná likvidace odpadu bývá složitá a musí splňovat předepsaná kritéria. [29]

### 3.2.3 Odrezování

Při této technologii dochází k odstranění korozních zplodin z povrchu kovu. Nejčastějšími odrezovači jsou téměř všechny kyseliny, ovšem primárně jsou používány kyseliny na bázi kyseliny fosforečné. Odrezování je možné provádět ponořením do lázně nebo nátěrem. Stupeň koroze předmětu a budoucí provedení následující povrchové úpravy, jsou hlavními činiteli při výběru vhodného odrezovače. Existují oplachové odrezovače, což jsou přípravky tvořené silnými anorganickými kyselinami s inhibitory a dalšími látkami podporující penetraci. Při použití metody ponoru může být teplota lázně navýšena až na 30-50 °C. Následně musí být proveden oplach vodou, případně pro kvalitnější výsledek lze použít neutralizační roztok. Druhou variantou je bezoplachová aplikace, během které vzniká na povrchu inertní vrstva, jež vytváří anodickou ochranu. Ideální je pro využití jako podklad před následnou aplikací nátěrových hmot. [1]

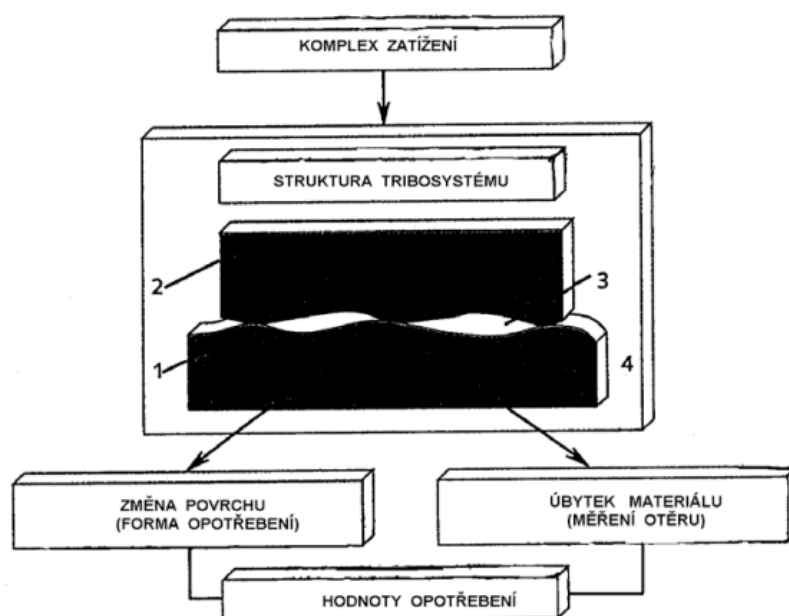
### 3.2.4 Dekapování

Dekapování je speciálním druhem moření. Typické je před elektrolytickým pokovením, kdy je potřeba zbavit povrch před samotnou povrchovou úpravou oxidických vrstev, které se na povrchu mohly vytvořit při předcházejících operacích v technologickém postupu. Tím bývá zajištěn co nejvíce čistý povrch. Pro dekapování je typické použití kyseliny chlorovodíkové  $HCl$  nebo kyseliny sírové  $H_2SO_4$ . [37,38]



## 4. Tribologie

Jedná se o vědecký obor, který se začal vyvíjet po roce 1966. Pojem tribologie vychází z řeckých slov *tribos* (tření) a *logos* (věda). Zkoumá chování dotýkajících se povrchů, které jsou ve vzájemném pohybu, jenž může být kluzný, valivý, rotační, nárazový nebo kmitavý. Je možné provádět více druhů pohybu ve stejnou dobu. V důsledku opotřebení dochází k úbytku materiálu, který se projeví při vzájemném pohybu dvou a více materiálů. Tento jev se snaží tribologie co nejvíce minimalizovat a prodloužit tak životnost zatěžovaných součástí. Nejvíce tření ovlivní materiál, drsnost povrchu, zátěž, ale i správně zvolená povrchová úprava a vhodné mazání, což minimalizuje hodnotu opotřebení. Uplatnění nachází zejména ve strojním průmyslu při návrhu ložisek, převodů a dalších strojů, ale zasahuje i do lékařství nebo při výrobě kosmetiky. [26]

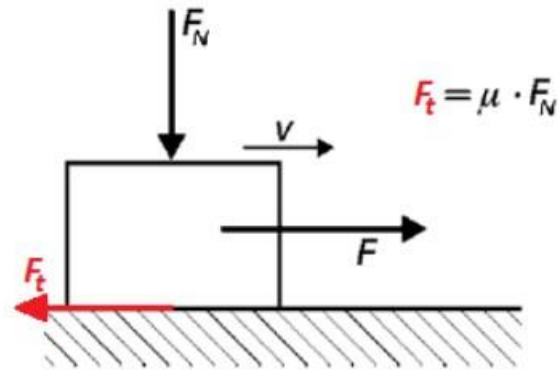


Obrázek 6 Tribologický systém [27]

### 4.1 Tření

Tření vzniká následkem vzájemného relativního pohybu dvou a více dotýkajících se členů v tribologickém systému. Jedná se o síly vykazující odpor v pohybu těles při jejich vzájemném styku. V určitých případech je potřeba tyto síly co nejvíce zmenšit, jako je tomu u ložisek. V některých případech je vyžadováno navýšení třecích sil pro vyšší účinnost (například u kotoučových brzd). Tření je úzce spjato

s opotřebením jednotlivých ploch. Koeficient tření je možné interpretovat také jako poměr energie, jež je nutná k vyrovnání třecích ztrát, a energie přiváděné do systému. [27,28,33]



Obrázek 7 Působící síly při tření [33]

### Rozdělení tření

Tření lze rozdělit do skupin dle různých kritérií. Nejběžnější je rozdělení **podle místa vzniku**: [28,33]

- vnější tření – je charakterizováno stykem dvou třecích ploch;
- vnitřní tření – nastává ve vrstvách materiálu jednotlivého třecího tělesa.

Velmi časté je také rozdělení **podle skupenství** (dle stavu třecích ploch): [28,33]

- tření pevných těles;
- tření kapalinové;
- tření plynové;
- tření smíšené.

Dále je možné tření dělit **podle způsobu pohybu třecích ploch**: [28,33]

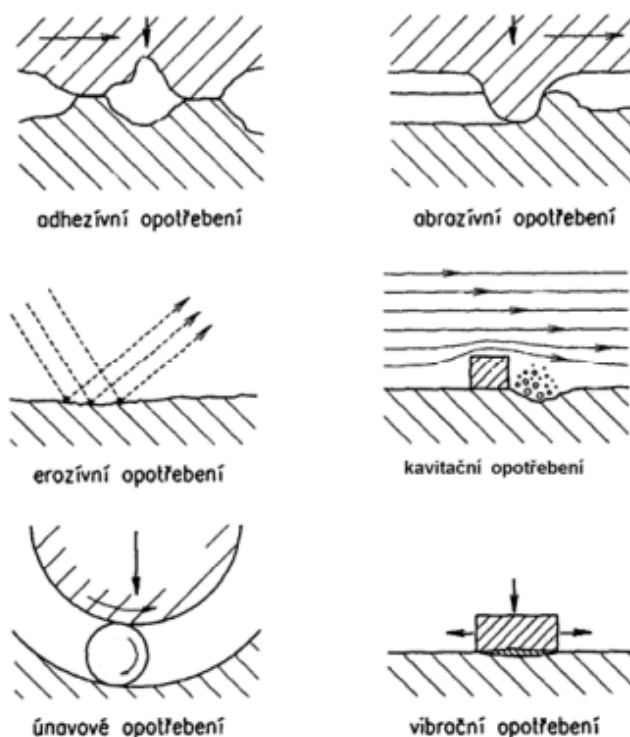
- tření smykové – tento druh tření vzniká mezi třecími tělesy, mezi nimiž dochází k posuvnému pohybu, je popisováno pomocí součinitele tření, jež vyjadřuje poměr třecí tangenciální síly vůči zatěžovací normálové síle;
- tření valivé – vzniká při rotačním pohybu tělesa, které má zpravidla kruhový průřez po rovinné ploše, či po jinak zakřiveném tělese v kombinaci současného posunu osy rovnoběžně s rovinou.

Tření je děleno **podle typu mezivrstvy mezi třecími plochami**: [28,33]

- tření suché – není přítomno mazivo, doprovázeno vysokým opotřebením;
- tření kapalinové – kapalně mazivo mezi třecími plochami;
- tření smíšené – kombinace více druhů.

## 4.2 Opotřebení

Jedná se o jev, ke kterému dochází v tribologickém systému. Příčinou je řada tribologických vlastností. Opotřebení je definováno jako nevratný úbytek povrchu materiálu v pevném stavu. Úbytek nastává, pokud jsou díly (plochy) ve vzájemném pohybu nebo pokud dochází ke kontaktu ploch za přítomnosti média. Opotřebení je možné rozdělit na několik základních podskupin z hlediska mechanismu opotřebení. [27,28]



Obrázek 8 Druhy opotřebení [27]

### 4.2.1 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení nastává při dotyku funkčních povrchů. Díly, které jsou ve vzájemném pohybu, mají nedokonalý povrch s určitou drsností. Pokud se lokálně dotýkají v místech výčnělků, jež jsou dány nerovnostmi povrchů, dochází

k poruchám povrchových vrstev. V těchto místech je typický vznik mikrospojů, které bývají dalšími pohyby porušeny a uvolňovány. To má za následek přenos uvolněného materiálu z povrchu jedné součásti na druhou. Tento jev je nazýván jako adhezivní opotřebení. Pokud je forma adhezivního opotřebení vysoká, je charakterizována jako zadírání. Přítomností maziva lze ve velké míře ovlivňovat intenzitu opotřebení. [27,28]



*Obrázek 9 Adhezivní opotřebení na čepu [41]*

## **4.2.2 Abrazivní opotřebení**

Abrazivní opotřebení je způsobováno rozrýváním povrchu měkčího materiálu interakcí s předmětem tvrdšího charakteru. Tento jev bývá doprovázen plastickou deformací. Dochází ke vzniku rýh, ale nedochází zde k přenosu materiálu. Příčinou mohou být volné částice, jimiž jsou nejčastěji vnesené nečistoty mezi nedostatečně utěsněná tělesa, případně částice vázané, které jsou soudržné díky pojivu. Abrazivní opotřebení je možné snížit správnou volbou maziva, ovšem tím nelze dokonale zabránit vniknutí nečistot do systému. Proto je velmi důležité zaručit dostatečnou těsnost, použití kvalitních filtrů a pravidelnou výměnu maziva. [27,33,39]

## **4.2.3 Erozivní opotřebení**

Degradace materiálu je způsobována drobnými částicemi nesenými kapalinou, či plynem. Velikost opotřebení je ovlivněna širokou škálou faktorů a rychlostí pohybu částic. Obvyklé je nerovnoměrné porušení povrchu doprovázené výrazným zvlněním. Při dopadu částice a následném kontaktu s povrchem dochází ke smýkání a přitlačování částice na povrch (díky vznikajícím silám). Měkčí a pružnější materiály

jsou více odolné vůči erozivnímu opotřebení než materiály tvrdší. Typicky se toto opotřebení vyskytuje na lopatkách spalovacích nebo vodních turbín. [27,33]

#### **4.2.4 Kavitační opotřebení**

U kavitačního opotřebení je kritická oblast opotřebení povrchu v místě zanikání kavitačních bublin v kapalině. Při zanikání bublin jsou vytvořeny hydrodynamické rázy, které působí na povrch materiálu, a dochází tak k povrchové únavě materiálu a následnému vytrhávání částic z povrchu. K vytvoření kavitačních bublin dochází v oblastech, kde je snižován tlak nasycených par kapaliny při odpovídající teplotě. [27,40]

#### **4.2.5 Únavové opotřebení**

Výskyt únavového opotřebení je zapříčiněn opakujícím se namáháním povrchové vrstvy. Typický je vznik trhlin na povrchu, ale i v podpovrchových vrstvách. Rozšířením a spojováním trhlin dochází až k odtržení částic z povrchu pryč. Na poškozených místech jsou vytvořeny důlky, které jsou náchylné ke vzniku důlkové koroze. Nejčastěji je únavová koroze spjata se součástmi, u kterých dochází k nepřetržitému kontaktu třecích ploch s vysokými lokálními tlaky. Klasickým případem mohou být ložiska, v nichž dochází k velkému cyklickému namáhání doprovázenému nežádoucím únavovým opotřebením. [27,33]

#### **4.2.6 Vibrační opotřebení**

Pro vibrační opotřebení je typické oddělování částic materiálu v důsledku vibrací o malých amplitudách. Vyskytuje se v místech kmitavých tangenciálních posuvů funkčních ploch, jež jsou zatěžovány normálovými silami. Prvním projevem je adhezivní opotřebení, které je pozvolna přeměněno na abrazivní opotřebení. Vibrační opotřebení postihuje i tvrdé materiály, a to i za použití maziva. Častý je výskyt v různých pohyblivých uloženích. [28,42]

### **4.3 Mazání**

Mazivo je používáno primárně k minimalizaci tření vzájemně pohybujících se ploch při jejich přímém kontaktu. Kromě toho mají maziva také další funkce, například přenos tepla a nečistot. Nejčastěji jsou v kapalném stavu, zejména se jedná

o oleje s dalšími přísadami, existují ale i maziva ve formě plynů, či pevných látek. Jejich využití je velmi přínosné při snižování opotřebení, čímž zabraňují i korozi. Přenášejí výkon a plní také těsnící funkci. Před výběrem vhodného maziva je potřeba zanalyzovat tribologický systém a identifikovat parametry, zejména typ pohybu, rychlost, zatížení, teplotu a provozní prostředí. Pokud je vybrán typ maziva v kapalném stavu, je viskózní odpor mnohonásobně menší v porovnání s třecím odporem při tření za sucha. Viskozita je hlavním ukazatelem při určování tloušťky filmu maziva a je měřena pomocí přístroje zvaného reometr. Maziva jsou vytvářena tak, aby byla použitelná v širokém spektru aplikací. Kapalná maziva jsou složena ze základových olejů doplněných o další chemické přísady neboli, aditiva. Aditiva představují 0,1–30 % z celkového objemu maziva a modifikují vlastnosti základového oleje. Ve speciálních případech je výhodnější použít maziva ve formě plynů – zejména tam, kde je vyžadována nízká hmotnost. Jako další alternativy mohou být užívána maziva v pevném stavu, která poskytují nízké tření z důvodu nízkého třecího odporu použitého materiálu. Jako tuhé mazivo připadá v úvahu použití grafitu nebo měkkých ušlechtilých kovů. Díky pokrokům v tribologii v posledních letech se využití pevných maziv rapidně zvyšuje. [27,34,35,36]

## 4.4 Testovací metody

Zkoumání tribologických vlastností materiálů je prováděno řadou specializovaných testů. Nejrozšířenější je metoda zvaná *pin on disc*. Tribologické testování je velmi složitý proces, u kterého je nutné detailní posouzení všech potřebných faktorů a parametrů. Za pomoci výsledků testů je možné předcházet brzkému opotřebení a selhání mechanicky zatěžovaných součástí. [33,34]

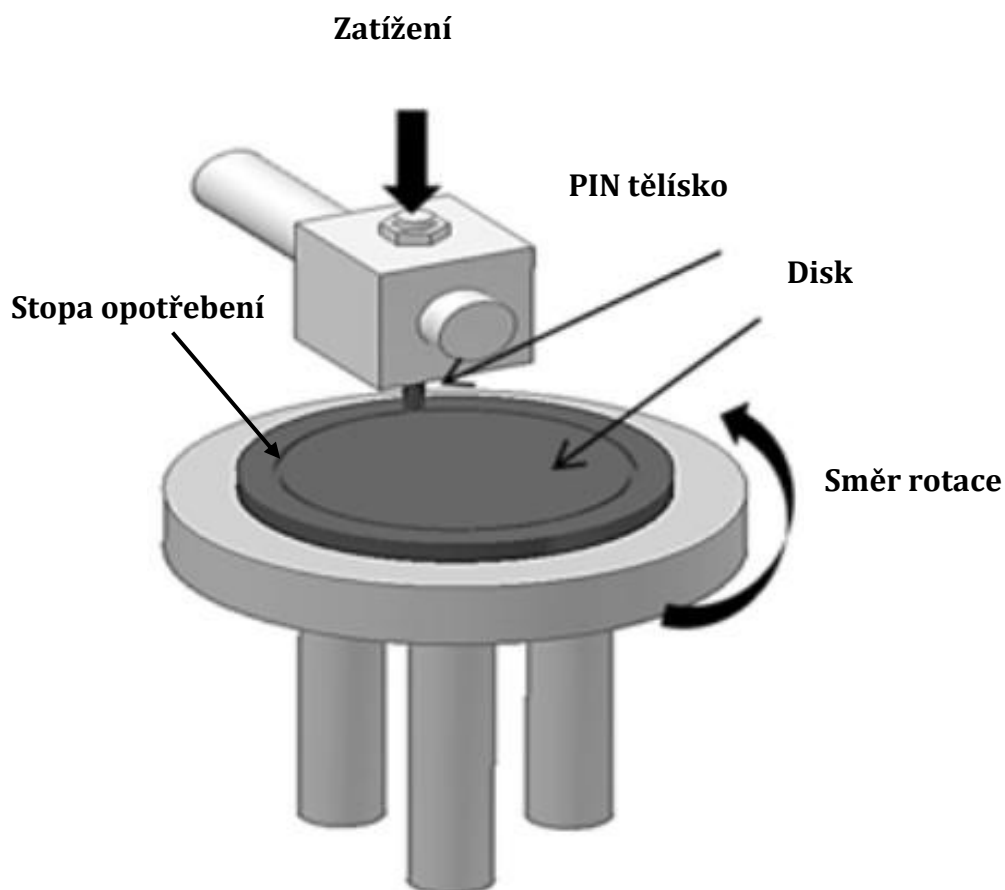
### 4.4.1 Pin on disc

Princip této metody je založen na přikládání tělíska (*PIN*) na povrch zkoumaného předmětu ve tvaru disku. Nejčastěji bývají tělíska ve formě nerotující kuličky nebo válečku, jež jsou v ramenu tribometru napevno uchycena a fixována proti rotaci. Jediným pohybem *PINU* je kolmý pohyb směrem ke vzorku. Primární rotační pohyb koná rotační stůl nesoucí zkoumaný vzorek. *PIN* je zatížen konkrétní silou a umístěn do pozice mající zvolený průměr. Disk je uveden do pohybu s předem určenými otáčkami. Dotykem *PINU* s diskem při nastavených počátečních podmínkách dochází

k vytvoření dráhy na povrchu disku v důsledku vzniklé normálové síly na tělísko. Po dokončení procesu je dráha (stopa) na disku následně zanalyzována z různých hledisek (tvar, hloubka, okolí a další).

Hlavní parametry ovlivňující testování metodou *pin on disc* [28,33,44]:

- zatěžující síla (normálová);
- velikost plochy tělíska (pinu);
- počet otáček za minutu (RPM);
- teplota (vzorku, okolí);
- použití maziva;
- délka testování (počet cyklů);
- dráha stopy;
- materiál tělíska a vzorku.



Obrázek 10 Schéma zkoušky pin on disc [43]

## 5. Typy povlaků využívané technologií elektrolytického pokovení

Při technologii lokálního galvanického pokovení lze použít řadu různých kovů a jejich slitin. Volba je závislá na požadavcích pro mechanické a fyzikální vlastnosti. V současné době je možné galvanicky vyloučit více než 50 typů různých povlaků. [14] Skupiny povlaků vyloučené touto technologií:

- antikorozi povlaky (Ni, Ni-Zn, Ni - nano  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Cu);
- otěruvzdorné povlaky a tvrdé vrstvy (Ni-W, Ni-W-Co, Ni-Co, Co-W);
- povlaky se speciálními vlastnostmi (Au, Ag, Pt, Pd).

### 5.1 Antikorozi povlaky

Povlaky mající antikorozi vlastnosti zajišťují kovovým dílům delší životnost. Chrání materiál před nežádoucí degradací v důsledku vlhkosti, oxidace a před dalšími agresivními chemikáliemi v řadě průmyslových odvětvích. Obecně jako všechny vytváří na povrchu ochrannou bariéru, která zabraňuje přímému kontaktu s nepříznivými podmínkami. Existuje široká škála antikorozi povlaků, které by splňovaly požadavky pro konkrétní aplikace, jsou jimi převážně zinkové a niklové povlaky, které jsou hojně využívány. [23]

#### Niklové povlaky

Tyto povlaky kombinují vynikající odolnost proti korozi a opotřebení. Často jsou využívány jako podkladová vrstva pro jiné povlaky. Niklové povlaky jsou schopné upravit fyzikální vlastnosti pokovovaných předmětů, například jejich elektrickou vodivost. Významně se také podílí na odolnosti v kombinaci s atraktivním vzhledem povlaku. V současnosti jsou tyto povlaky celosvětově důležité a lze je nalézt téměř v každém průmyslovém odvětví. Aplikují se při ražbě mincí, jelikož je možné docílit atraktivního vzhledu při zachování nižší ceny než při výrobě mincí ze stříbra. Zároveň jsou zachovány detaily, které vydrží desítky let. Nikl nachází zásadní uplatnění i v automobilovém a leteckém průmyslu, kde splňuje požadavky na bezpečnost a spolehlivost. Jelikož je těžké zajistit požadavky na vlastnosti funkčních galvanických povlaků pouze vylučováním samotných kovů, rozšířilo se vylučování vícesložkových povlaků. [24]





Obrázek 11 Niklový povlak na kovové minci [24]

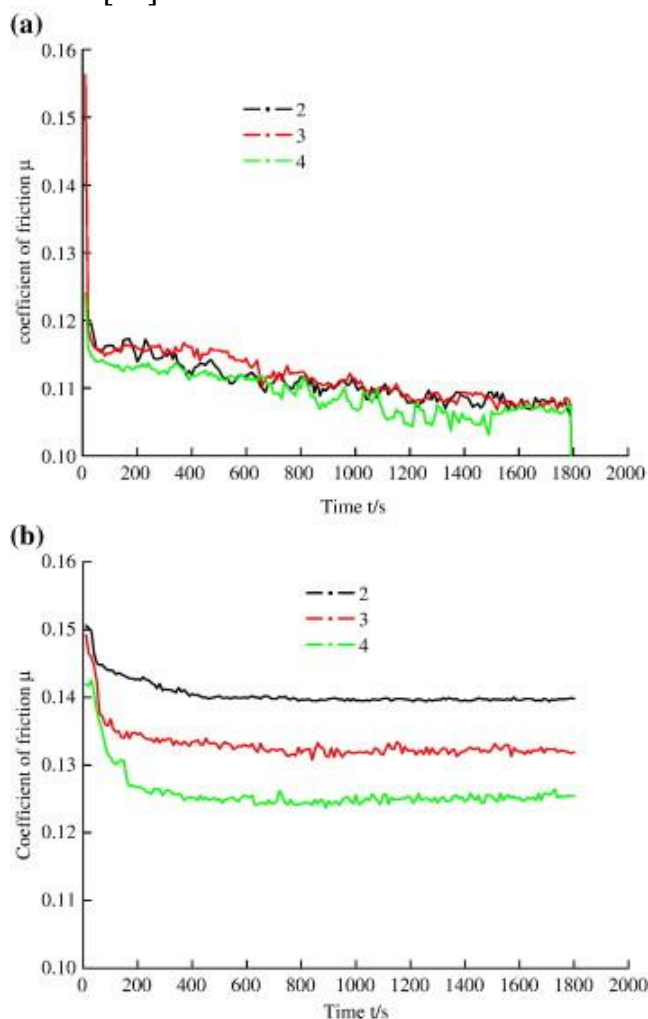
### **Využití slitinového povlaku Ni-Zn**

Nikl-zinkové povlaky mohou být více ekologickou alternativou kadmia v některých použitých aplikacích. Kombinují vlastnosti zinku s odolností niklu proti korozi. Finální výsledek je mnohdy lepší než zmiňované kadmium, které se využívalo dříve. Složení slitiny je okolo 9–14 % niklu a zbytek tvoří zinek. Nejvíce prospektivní je v posledních letech využití v leteckém průmyslu, primárně kvůli ekologickým důvodům. Lze jej využít k opravě poškozených vrstev kadmia. Nejčastěji se aplikuje na vysokopevnostní oceli, kde je také zajištěna velmi nízká vodíková křehkost. Obvyklé tloušťky povlaku se pohybují v rozmezí od 10 do 18  $\mu\text{m}$ . V testech korozivzdornosti i otěruvzdornosti vykazuje tento povlak velmi dobré hodnoty. [25]

### **Odolnost proti opotřebení nanokompozitního povlaku Ni-nano $\text{Al}_2\text{O}_3$**

Slitiny niklu s dalšími prvky nachází v posledních letech uplatnění zejména ve strojírenství, hlavně z důvodu zlepšení mechanických vlastností a schopnosti odolávat korozi. Ve specifických testech byla zkoumána odolnost proti opotřebení testovacím strojem MM200 na 3 prstencových vzorcích vyrobených z oceli s tvrdostí HRC 53-55 a pokovených pomocí automatického lokálního galvanického pokovení. Pro porovnání bylo provedeno pokovení ručně na dalších 3 vzorcích. Byla nanášena povlaková vrstva o tloušťce 50  $\mu\text{m}$  při pokojové teplotě a ve stejný čas, aby bylo zajištěno co nejvíce relevantní vyhodnocení. Testy probíhaly při zatížení 20 kg po dobu 30 minut. Při tribologickém testování bylo použito mazivo. Z měření bylo patrné, že vzorky pokovené automatickým způsobem, mají téměř stejný koeficient tření, zatímco ručně pokovené tablety vykazovaly mírně rozdílné koeficienty tření a také rozdílné hmotnostní úbytky, jelikož je obtížné vytvořit jednotný povlak na více

vzorcích. Koeficient tření pro ručně nanosený povlak byl 0,13 a pro automaticky nanosený povlak 0,11. Hmotnostní úbytky pro ručně pokovené vzorky byly téměř dvojnásobné v porovnání s automaticky pokovenými vzorky. Z výsledků bylo zjištěno, že přesné řízení důležitých faktorů je zásadní pro zajištění požadovaných vlastností. Technika automatického lokálního galvanického pokovení je schopná vyloučit povlak s lepšími tribologickými vlastnostmi a vyšší přesností v porovnání s ručním lokálním galvanickým pokovením. [31]



Obrázek 12 Výsledky tribologických zkoušek povlaku Ni-nano  $Al_2O_3$  pomocí automatického (a) a ručního nanášení [31]

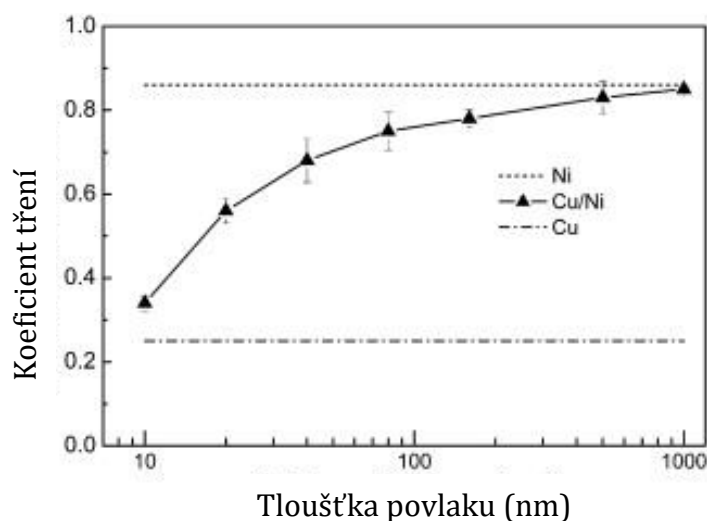
### Amorfní/nanokrystalický kompozitní povlak Ni-B/ $La_2O_3$

Metastabilní materiály jsou využívány zejména díky svým vynikajícím mechanickým a fyzikálně-chemickým vlastnostem (vysoká pevnost, houževnatost, odolnost proti korozi). Pokud jsou metastabilní materiály vystavovány vnějším vlivům, například vysoké teplotě, jejich mikrostruktura začíná být více hrubozrnná a ztrácí své jedinečné

vlastnosti. *Ni-B* povlaky jsou v současné době aplikovány kvůli jejich vysoké tvrdosti, schopnosti odolávat korozi a opotřebení. Mikrotvrdość těchto povlaků lze ještě zvýšit žíháním. Pro zjemnění zrn a zvýšení tvrdosti jsou využívány částice vzácných zemin jako je  $La_2O_3$ . Povlaky na bázi niklu s přídavkem  $La_2O_3$  snižují tvorbu a šíření trhlin a mají velmi dobrou odolnost proti oxidaci při vysokých teplotách. Optimální obsah  $La_2O_3$  by měl být <10 g/l. Pomocí řady testů bylo zjištěno, že pokud je žíhání prováděno při teplotě 305 °C dochází ke zjevnému zpevnění. Přidáním  $La_2O_3$  se zlepšuje tepelná stabilita *Ni-B* povlaků žíhaných nad teplotou 355 °C. [45]

### Vlastnosti vícevrstvých filmů Cu-Ni nanesených pomocí lokálního galvanického pokovení

Pokovování mědi je v posledních letech velmi rozšířené. Je to zejména díky cenové dostupnosti a vysoké elektrické vodivosti mědi. Elektrolyticky nanesený vícevrstvý povlak Cu-Ni je již poměrně dlouhou dobu používán pro vyšší tvrdost a pevnost oproti jednovrstvým povlakům. Vícevrstvé filmy Cu-Ni nanesené elektrolytickým pokovením vykazují lepší odolnost v porovnání se samotnými povlakými Cu a Ni. Pro zjištění specifických vlastností byly pokoveny vzorky tvaru kotouče s rozměry  $\varnothing$  25 mm x 6 mm z oceli ANSI 1045. Proces byl realizován dle daného technologického postupu, přičemž vždy zůstala horní vrstva tvořena povlakem Ni. Celková tloušťka všech vrstev byla přibližně 20  $\mu$ m. Při nastaveném napětí 8 V byla vylučovací rychlost 45 nm/s pro nanášení každé vrstvy. Průměrná tvrdost vícevrstvých povlaků byla v rozmezí 3,0-3,7 GPa. Koeficient tření bývá nižší u vícevrstvých filmů než u Ni povlaku (0,85), ovšem vyšší v porovnání s povlakem Cu (0,25). [8,46]



Graf 1 Závislosti koeficientu tření na tloušťce povlaku u vícevrstvých povlaků Cu-Ni [46]

## 5.2 Otěruvzdorné povlaky a tvrdé vrstvy

Tyto povlaky a vrstvy výrazně snižují velikost plastické deformace při styku jednotlivých nedokonalostí. Díky jejich specifickým vlastnostem mohou snižovat koeficient tření, ale hlavně snižují opotřebení a zvyšují tím tak životnost součástí. [47]

### Testování slitinových povlaků Ni-W

Zlepšování odolnosti proti opotřebení je ve strojírenství velice žádaná technologie. Slitiny niklu a wolframu jsou vhodnou variantou pro zlepšení odolnosti. Optimální složení slitiny je mezi 35-45 % wolframu a zbytek niklu. Pokud jsou v roztoku pro pokovení Ni-W přítomny halogeny, bývá teplota vhodná pro pokovení 75–85 °C. Pro roztoky bez přítomnosti halogenů je optimální teplota nižší než 60 °C. Pro testování vlastností byly zhotoveny vzorky za pomoci systému tampónového pokovení od firmy *SIFCO*. Pokoveno bylo několik vzorků o různé ploše a tvaru. Tvrdost pokoveného povlaku byla 670 HV. Při zkoumání bylo zjištěno, že tvrdost se zvyšuje s přibývajícím obsahem wolframu a také po provedení tepelného zpracování. Pokovené vzorky měly lesklý a hladký vzhled. Povlaky tvořené niklem a wolframem neochrání pokovený předmět příliš dobře před korozi. Provedením testu v solné mlze bylo zjištěno, že koroze se začíná projevovat již po několika hodinách vystavení agresivnímu prostředí. Pro součásti vyžadující lepší korozivzdornost se nejdříve provádí pokovení mědí a následně slitinou niklu a wolframu. Testování vodíkové křehkosti bylo prováděno na pokovených tyčích. Při stálém zatížení po dobu 200 hodin nedocházelo k vodíkovému křehnutí. [48]

## 5.3 Povlaky se speciálními vlastnostmi

Mezi povlaky se speciálními vlastnostmi se obvykle řadí povlaky tvořené vzácnými kovy jako je zlato nebo stříbro. Nejvíce v oblibě jsou kvůli svému atraktivnímu vzhledu v kombinaci s výbornými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Kvůli vysoké pořizovací ceně jsou tyto povlaky využívány pro menší součásti.

### Vysokorychlostní lokální galvanické pokovení zlatem

Zlato je využíváno zejména díky své vysoké schopnosti odolávat korozi a zároveň díky dobré elektrické vodivosti. Dalším významným aspektem pro pokovení zlatem může být jeho esteticky přitažlivý vzhled. Z tohoto důvodu se často využívá k pozlacení

šperků. Nevýhodou může být vyšší cena v porovnání s mědí, která má obdobné vlastnosti. Použití tampónového pokovení zlatem je vhodnou metodou pro pokovení menších dílů i jejich těžce přístupných míst. Oproti pokovení ponorem je nižší spotřeba elektrolytu. Vysokorychlostní elektrolyty jsou také schopny vyloučit požadovaný povlak za mnohem kratší čas v potřebné tloušťce. Národní úřad pro letectví a vesmír využívá pokovení zlatem ve velké míře a metoda lokálního galvanického pokovení jim nabízí možnost ušetřit tisíce dolarů za rok, protože ubývá nutnost rozebírat celé součásti. Nanesením tenké vrstvy zlepšují možnost pájitelnosti. Povlaky zlata jsou aplikovány jako podkladová vrstva před následným pokovením stříbrem, rhodiem a dalšími kovy. I přes vyšší náklady na vysokorychlostní pokovení zlatem lze při konkrétních aplikacích výrazně snížit náklady, ušetřit čas a zajistit výborné vlastnosti povlaku. [8,49]

## 6. Experimentální část

V experimentální části této práce bylo provedeno nanesení niklového povlaku pomocí lokálního galvanického pokovení a vyhodnocení tribologických vlastností vzorků. Pokoveno bylo celkem 6 vzorků (3 tablety a 3 disky) vždy z jedné strany. Byla zkoumána vylučovací rychlost v závislosti na čase, změny hmotnosti, drsnosti před a po pokovení, pórovitost povlaku a rezistivita. V další části experimentu byly pokovené tablety testovány pomocí tribologických zkoušek na tribometru *TOP 3 a MFT 5000*. Následně bylo provedeno vyhodnocení testů a rozbor naměřených hodnot.

### 6.1 Použitá zařízení pro pokovení

#### Laboratorní zdroj

Zdrojem napětí byl stejnosměrný laboratorní zdroj značky *MANSON* model *SPS 9602*. Zařízení bylo zvoleno z důvodu možnosti postupné regulace hodnot napětí a proudu, jež jsou pro danou metodu pokovení potřebné. Na přední straně přístroje se nachází tlačítkový spínač, konektory pro kabely a 2 LED displeje pro zjištění aktuálně nastavené hodnoty proudu a napětí.



Obrázek 13 Laboratorní zdroj Manson SPS 9602 [30]

## Nástroj pro pokovení

Nástroj pro pokovení byl vytvořen pomocí trubičky z korozi-vzdorné oceli. Na jedné straně byl upevněn savý materiál. Jako savý materiál byla zvolena kuchyňská houbička, která byla rozměrově uzpůsobena velikosti pokovované plochy. Pro zajištění jednodušší manipulace byl na trubičku nasazen obal z fixu. Dodávání elektrolytu bylo řešeno manuálně, a to smáčením houbičky do nádoby s elektrolytem.



Obrázek 14 Nástroj pro nanesení povlaku

## Elektrolyt

Při pokovení byl použit vysokorychlostní niklový elektrolyt přímo určený k lokálnímu galvanickému pokovení. Elektrolyt je možné zakoupit ve Velké Británii u firmy *Gasteros Plating* pod označením *Bright nickel solution*. Pro daný elektrolyt je stanovené pracovní napětí v rozsahu 4,5–9,5 V. Při pokovení byla použita hodnota napětí 7 V a proud o hodnotě 0,2 A. Délka pokovení tablet a disků byla 3 minuty.



Obrázek 15 Vysokorychlostní niklový elektrolyt [52]

## 6.2 Pokovené vzorky

Celkem bylo pomocí lokálního galvanického pokovení při použití vysokorychlostního niklového elektrolytu pokoveno 6 vzorků. Povlak byl nanesený na 3 tablety o průměru 20 mm a 3 disky o průměru 50,8 mm. Tablety byly z materiálu používaného na vysokopevnostní šrouby třídy 10.9 a to 34Cr4 a 41Cr4. Disky byly vyrobeny z legované oceli E52100. Pokovování probíhalo při napětí 7 V a 0,2 A, vždy po dobu 3 minut. Pro zjištění vylučovací rychlosti byl ještě pokoven v daných časových úsecích ocelový plech. Disky byly stejných průměrů a stejné výšky, zatímco tablety měly stejný průměr, ale rozdílnou výšku. Tableta a disk č.1 před a po pokovení jsou na obrázcích č. 16-19.



Obrázek 16 Tableta před pokovením



Obrázek 17 Tableta po pokovení



Obrázek 18 Disk před pokovením



Obrázek 19 Disk po pokovení



## 6.3 Předúprava vzorků

Předúprava byla provedena ve stejném rozsahu na všech vzorcích v daném pořadí:

- upravení drsnosti povrchu;
- elektrolytické odmaštění;
- oplach v demineralizované vodě;
- aktivace v kyselině chlorovodíkové (3 min);
- oplach v demineralizované vodě;
- tampónové pokovení;
- oplach v demineralizované vodě;
- sušení.

### Ultrazvuková vana pro elektrolytické odmaštění

Pro elektrolytické odmaštění byla použita ultrazvuková vana K-2LE. Tento přístroj je z korozi-vzdorné oceli a disponuje elektronickým ovládáním. Pomocí digitálního panelu je možné nastavovat délku procesu v rozmezí 0–90 min, teplotu 20–90 °C a intenzitu ultrazvuku v deseti různých stupních.

Odmaštění probíhalo po dobu 5 minut při teplotě 60 °C u každého vzorku.



Obrázek 20 Laboratorní ultrazvuková vana K-2LE [32]

## 6.4 Měření povrchu

### 6.4.1 Měření drsnosti povrchu

Drsnost byla měřena pomocí přístroje Surfptest SJ 210 a to před i po pokovení. Měřeny byly parametry drsnosti Ra, Rq a Rz. Drsnost byla naměřena na deseti náhodných místech povrchu každého vzorku (3 tablety a 3 disky). Povrchy vzorků byly před provedením měření očištěny. V tabulce č.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty disků a tablet před a po pokovení.



Obrázek 21 Drsnoměr Surfptest SJ 210 [50]

Tabulka 1 Naměřené hodnoty drsnosti disků a tablet

DISK PŘED POKOVENÍM									
měření	vzorek č. 1			vzorek č. 2			vzorek č. 3		
	parametr			parametr			parametr		
	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
1.	0,627	0,839	0,4226	0,432	0,616	3,096	0,399	0,541	3,049
2.	0,456	0,635	3,607	0,527	0,687	3,395	0,443	0,545	2,709
3.	0,53	0,73	3,542	0,427	0,559	2,948	0,403	0,525	2,798
4.	0,444	0,598	3,108	0,439	0,591	2,977	0,506	0,649	3,232
5.	0,571	0,763	3,943	0,423	0,567	3,217	0,513	0,641	3,151
6.	0,538	0,729	3,773	0,502	0,634	3,072	0,375	0,484	2,827
7.	0,652	0,866	4,287	0,637	0,786	3,407	0,403	0,513	2,777
8.	0,51	0,651	3,019	0,446	0,57	3,033	0,526	0,692	3,666
9.	0,491	0,631	3,081	0,447	0,585	2,925	0,531	0,707	3,657
10.	0,531	0,719	3,524	0,507	0,716	3,648	0,432	0,601	3,176
∅	0,535	0,7161	3,231	0,4787	0,6311	3,1718	0,4531	0,5898	3,1042
DISKY PO POKOVENÍ									
měření	vzorek č. 1			vzorek č. 2			vzorek č. 3		
	parametr			parametr			parametr		
	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
1.	0,534	0,684	3,723	1,002	1,237	6,117	0,763	0,995	4,915
2.	0,496	0,691	4,098	0,992	1,225	5,906	0,512	0,682	3,558
3.	0,470	0,591	3,075	0,441	0,581	3,658	0,418	0,512	2,549
4.	0,583	0,777	4,739	0,509	0,661	3,975	0,507	0,678	3,993
5.	0,658	0,887	4,907	0,454	0,613	4,019	0,517	0,677	3,198
6.	0,579	0,782	4,936	0,633	0,807	4,541	0,640	0,887	4,464
7.	0,427	0,531	2,728	0,382	0,533	3,416	0,609	0,756	3,804
8.	0,634	0,787	4,561	0,815	1,048	5,827	0,6	0,791	3,859
9.	0,463	0,566	2,736	0,534	0,720	4,298	0,558	0,776	4,415
10.	0,404	0,532	2,903	0,490	0,655	4,139	0,601	0,775	3,695
∅	0,5248	0,6828	3,8406	0,6252	0,808	4,5896	0,5725	0,7529	3,845

TABLETY PŘED POKOVENÍM									
měření	vzorek č. 1			vzorek č. 2			vzorek č. 3		
	parametr			parametr			parametr		
	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
1.	0,062	0,08	0,464	0,095	0,130	0,698	0,078	0,097	0,596
2.	0,073	0,092	0,536	0,088	0,115	0,607	0,108	0,084	0,523
3.	0,07	0,087	0,551	0,107	0,075	0,452	0,092	0,115	0,605
4.	0,108	0,079	0,863	0,094	0,126	0,610	0,105	0,081	0,577
5.	0,065	0,145	0,478	0,076	0,090	0,522	0,134	0,152	0,685
6.	0,077	0,095	0,521	0,135	0,156	0,723	0,12	0,149	0,712
7.	0,12	0,147	0,7	0,066	0,144	0,635	0,097	0,112	0,624
8.	0,12	0,144	0,631	0,105	0,139	0,476	0,074	0,089	0,521
9.	0,109	0,148	0,466	0,12	0,141	0,492	0,101	0,136	0,498
10.	0,094	0,126	0,605	0,098	0,128	0,659	0,089	0,113	0,645
∅	0,0898	0,1143	0,5815	0,0984	0,1244	0,5874	0,0998	0,113	0,5986
TABLETY PO POKOVENÍ									
měření	vzorek č. 1			vzorek č. 2			vzorek č. 3		
	parametr			parametr			parametr		
	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
1.	0,268	0,345	1,894	0,182	0,233	1,374	0,277	0,431	3,124
2.	0,453	0,568	2,698	0,144	0,212	1,325	0,236	0,322	2,13
3.	0,343	0,448	2,292	0,203	0,255	1,4	0,253	0,329	2,01
4.	0,138	0,188	1,333	0,263	0,325	1,738	0,221	0,317	2,13
5.	0,243	0,3	1,544	0,283	0,365	2,039	0,205	0,298	2,185
6.	0,216	0,277	1,622	0,343	0,429	2,302	0,259	0,35	2,475
7.	0,273	0,375	2,618	0,228	0,312	1,896	0,177	0,247	1,982
8.	0,341	0,41	1,987	0,25	0,308	1,602	0,173	0,217	1,397
9.	0,368	0,452	2,28	0,384	0,487	2,723	0,21	0,303	2,213
10.	0,251	0,31	1,797	0,328	0,432	2,371	0,168	0,224	1,654
∅	0,2894	0,3673	2,0065	0,2608	0,3358	1,877	0,2179	0,304	2,13

## 6.4.2 Měření hmotnosti

Ke změření váhy každého vzorku před a po pokovení byla použita digitální váha Explorer Pro. Přístroj byl před každým vážením zkalibrován pro zajištění přesných výsledků. Hmotnost byla také měřena po provedení tribologického testu tablet na tribometru *TOP 3* kvůli zjištění hmotnostních úbytků.



Obrázek 22 Digitální váha Explorer Pro [51]

Tabulka 2 Hmotnost disků před pokovením

HMOTNOST DISKŮ (v gramech)			
před pokovením			
vážení	vzorek		
	1	2	3
1.	44,9171	44,8104	44,7046
2.	44,9166	44,8098	44,7043
3.	44,9173	44,8095	44,7045
∅	44,917	44,8099	44,7045

Tabulka 3 Hmotnost disků po pokovení

<b>HMOTNOST DISKŮ (v gramech)</b>			
<b>po pokovení</b>			
<b>vážení</b>	<i>Vzorek</i>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>1.</b>	44,9115	44,8022	44,6877
<b>2.</b>	44,9112	44,8021	44,6875
<b>3.</b>	44,9114	44,8018	44,6876
<b>∅</b>	44,9114	44,8020	44,6876

Tabulka 4 Hmotnost tablet před pokovením

<b>HMOTNOST TABLET (v gramech)</b>			
<b>před pokovením</b>			
<b>vážení</b>	<i>vzorek</i>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>1.</b>	13,3087	11,6855	21,6511
<b>2.</b>	13,3085	11,6853	21,6510
<b>3.</b>	13,3086	11,6853	21,6508
<b>∅</b>	13,3086	11,6854	21,6510

Tabulka 5 Hmotnost tablet po pokovení

<b>HMOTNOST TABLET (v gramech)</b>			
<b>po pokovení</b>			
<b>vážení</b>	<i>vzorek</i>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>1.</b>	13,3118	11,6885	21,6515
<b>2.</b>	13,3117	11,6884	21,6518
<b>3.</b>	13,3117	11,6885	21,6516
<b>∅</b>	13,3117	11,6885	21,6516

Tabulka 6 Hmotnost tablet po provedení tribologického testu

HMOTNOST TABLET (v gramech)			
po provedení tribologického testu na zařízení TOP 3			
vážení	vzorek		
	1	2	3
1.	13,2971	11,6702	21,6375
2.	13,2973	11,6701	21,6378
3.	13,2972	11,6701	21,6376
∅	13,2972	11,6701	21,6376

### 6.4.3 Měření tloušťky povlaku

Pro všechny vzorky byla měřena tloušťka naneseného povlaku. Tloušťka povlaku tablet byla měřena i po následném podrobení tribologickému testu na tribometru TOP 3. K měření byl použit digitální tloušťkoměr Defelsko Positector 6000 se sondou na kabelu, jehož využití je vhodné pro všechny kovové podklady. Přístroj automaticky rozpozná podklad a provede měření. Přístroj je vybaven LCD displejem, na němž je vyobrazena aktuální naměřená hodnota.



Obrázek 23 Digitální tloušťkoměr Defelsko Positector 6000

Tabulka 7 Tloušťka povlaku disků a tablet po pokovení

<b>TLOUŠŤKA POVLAKU TABLET (v mikrometrech)</b>			
<b>po pokovení</b>			
<b>měření</b>	<i>vzorek</i>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>1.</b>	39	40	37
<b>2.</b>	38	40	37
<b>3.</b>	39	40	38
<b>4.</b>	39	39	38
<b>5.</b>	38	40	38
<b>6.</b>	39	39	41
<b>7.</b>	39	39	38
<b>8.</b>	39	39	37
<b>9.</b>	39	39	39
<b>10.</b>	38	41	38
<b>∅</b>	38,7	39,6	38,1
<b>TLOUŠŤKA POVLAKU DISKŮ (v mikrometrech)</b>			
<b>po pokovení</b>			
<b>měření</b>	<i>vzorek</i>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>1.</b>	17	12	16
<b>2.</b>	11	14	10
<b>3.</b>	10	13	9
<b>4.</b>	8	7	6
<b>5.</b>	12	19	10
<b>6.</b>	17	11	12
<b>7.</b>	10	16	10
<b>8.</b>	16	10	14
<b>9.</b>	11	12	7
<b>10.</b>	12	9	14
<b>∅</b>	12,4	12,3	10,8



Tabulka 8 Tloušťka povlaku tablet po provedení tribologického testu

<b>TLOUŠŤKA POVLAKU TABLET (v mikrometrech)</b>			
<b>po provedení tribologického testu na zařízení TOP 3</b>			
<b>měření</b>	<i>vzorek</i>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>1.</b>	39	39	37
<b>2.</b>	38	40	38
<b>3.</b>	37	39	40
<b>4.</b>	39	39	38
<b>5.</b>	38	40	37
<b>6.</b>	39	40	39
<b>7.</b>	39	39	37
<b>8.</b>	38	39	38
<b>9.</b>	38	39	39
<b>10.</b>	37	38	37
<b>∅</b>	38,2	39,2	38

#### 6.4.4 Měření pórovitosti povlaku

Pórovitost povlaku je současně s tloušťkou jedním z hlavních hodnotících kritérií povlaku. Pórovitost ukazuje stupeň účinnosti vůči vnějším vlivům prostředí. Určována je, jako množství nepokrytých (nejčastěji mikroskopických) míst na základním materiálu. Pórovitost byla měřena pomocí nízkonapěťového porozimetru TQC LD8105. Zařízení bývá využíváno pro testování nedostatků ochranných nátěrů na kovovém podkladu. Porozimetr pracuje na technologii „mokré houby“. Zemní svorka je připojena k části materiálu bez povrchové úpravy. Pokud přístroj indikuje výskyt defektu, je poskytnuta uživateli zpětná vazba dle zvoleného nastavení. Testovány byly 3 pokovené vzorky. Přístrojem bylo zjištěno, že všechny vzorky jsou pórovité. Příčinou bylo nerovnoměrné nanesení povlaku po celé ploše. Pokovené disky nemohly být testovány, protože je nebylo možné uchytit zemní svorkou k části bez povlaku. Zařízení je vyobrazeno na obrázku č. 24 a 25.



Obrázek 24 Porozimetr TQC LD815



Obrázek 25 Testování pórovitosti na vzorcích pokovených vysokorychlostním elektrolytem

## 6.4.5 Měření rezistivity povlaku

Měření rezistivity bylo provedeno u pokovených tablet č.1-3. Měřič slouží ke kontrole vodivých/disipativních materiálů. K měření byl použit povrchový měřič odporu SRM 200. Výsledky jsou zobrazovány na LCD displeji. Přístroj je vybaven nabíjecím akumulátorem a je snadno přenosný. Měřicí rozsah je  $10^3 - 10^{12} \Omega$ . Na zařízení se nachází vestavěná měřicí elektroda s vodivou kontaktní plochou. Měření probíhalo při pokojové teplotě.



Obrázek 26 Povrchový měřič odporu SRM 200

Tabulka 9 Rezistivita tablet po pokovení

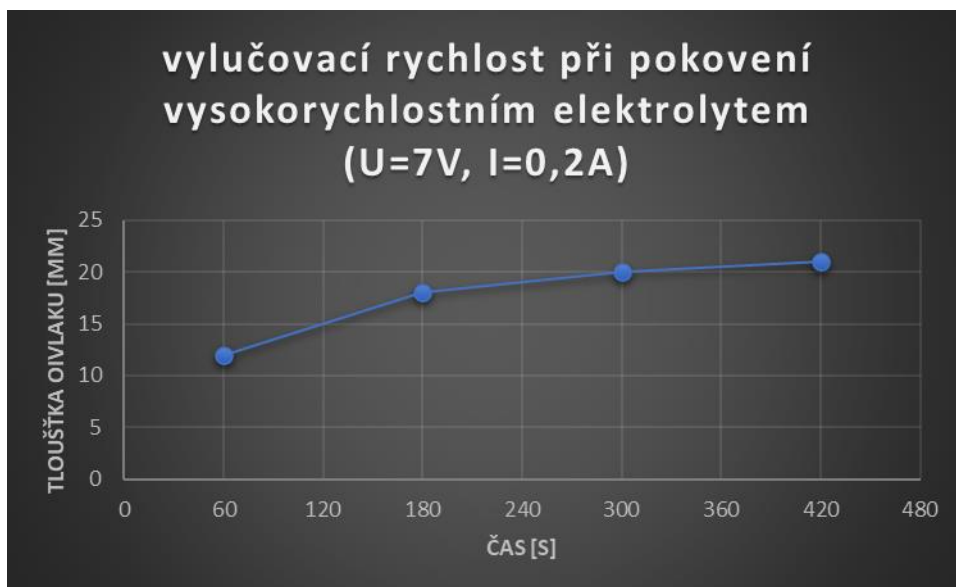
REZISTIVITA TABLET (v ohmech)			
po pokovení			
měření	vzorek		
	1	2	3
1.	$2 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$	$3 \times 10^{10}$
2.	$1 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$
3.	$1 \times 10^{10}$	$3 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$
4.	$2 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$	$3 \times 10^{10}$
5.	$1 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$	$4 \times 10^{10}$
6.	$1 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{10}$	$3 \times 10^{10}$
7.	$1 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$
8.	$2 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{10}$
9.	$1 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$
10.	$2 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$
Ø	$1,4 \times 10^{10}$	$1,9 \times 10^{10}$	$2,4 \times 10^{10}$

## 6.5 Zkoumání vylučovací rychlosti při 7V a 0,2A s vysokorychlostním elektrolytem

Kvůli zjištění vylučovací rychlosti povlaku při hodnotě napětí 7 V a hodnotě proudu 0,2A byl pokoven ocelový plech při použití vysokorychlostního elektrolytu. Časy pokovení byly v pravidelných úsecích, a to 60, 180, 300 a, 420 s. Následně bylo možné sestavit graf vyloučeného povlaku v závislosti na čase. Vylučovací rychlost měla vysoký nárůst zejména prvních 180 s. Vyloučené povlaky v závislosti na čase jsou uvedeny v tabulce č. 10. Foto vyloučeného povlaku po 5 minutách je na obrázku č. 27. Fotky vyloučeného povlaku v ostatních časech jsou k nalezení v příloze.

Tabulka 10 Vylučovací rychlost povlaku v závislosti na čase

<b>VYLUČOVACÍ RYCHLOST POVLAKU V ZÁVISLOSTI NA ČASE (v mikrometrech)</b>				
<b>na ocelovém plechu</b>				
<b>měření</b>	<i>doba pokovení (v sekundách)</i>			
	<b>60</b>	<b>180</b>	<b>300</b>	<b>420</b>
<b>1.</b>	11	19	19	18
<b>2.</b>	12	21	18	21
<b>3.</b>	14	17	19	22
<b>4.</b>	10	15	22	19
<b>5.</b>	9	19	18	21
<b>6.</b>	13	16	18	21
<b>7.</b>	9	15	22	23
<b>8.</b>	10	18	23	19
<b>9.</b>	9	20	17	22
<b>10.</b>	12	19	21	19
<b>∅</b>	12	17,9	19,7	20,5



*Graf 2 Vylučovací rychlost při pokovení vysokorychlostním elektrolytem ( $U=7V, I=0,2A$ )*



*Obrázek 27 Nanesený povlak vysokorychlostním elektrolytem při  $U=7V$  a  $I=0,2A$  za 5 min*

## 6.6 Měření a vyhodnocení na tribometru MFT 5000

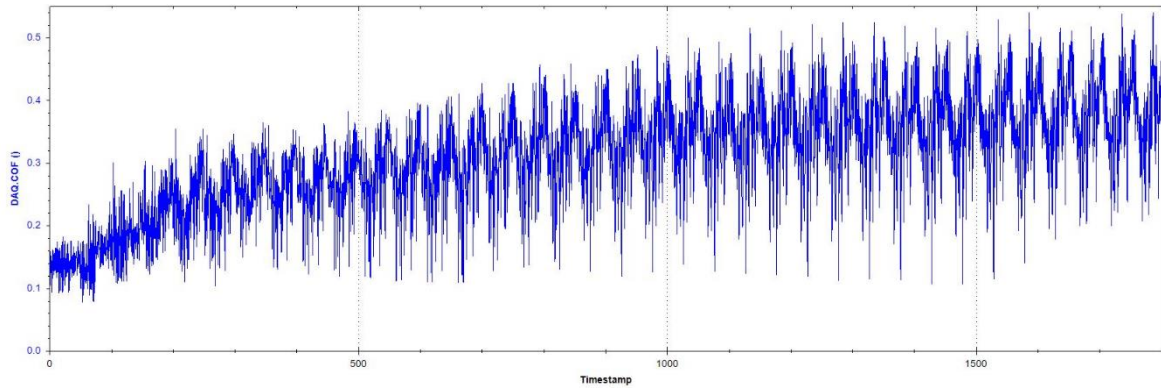
Měřeny byly 3 vzorky. Funkční dvojici zde tvořil disk o průměru 50,8 mm a ocelová kulička o průměru 6,35 mm, materiál byl legovaná ocel E52100.

Test probíhal za sucha a při pokojové teplotě se zatížením funkční dvojice 10 N po dobu 30 minut. Daný tribometr slouží k vyhodnocení průměrného koeficientu tření. Vývoj obou koeficientů tření lze pak následně pozorovat v grafických závislostech. V grafech č. 3–5 je zobrazena závislost koeficientu tření na čase pro disky č. 1–3.

K vyhodnocení tribologických vlastností byl použit tribometr MFT 5000 od firmy Rtec. Toto zařízení je schopné vykonávat řadu tribologických testů (např. pin on disk, ball on disk). Jedná se o modulární tribometr, který nabízí široké rozmezí testovacích teplot a to od -120 °C do 1200 °C. Přístroj nabízí použití vyměnitelných modulů, díky nimž je možné na jednom zařízení provádět různé typy testů. Mezi nadstandardní výbavu patří např. 3D profilometr, který je schopen zanalyzovat vytvořenou stopu a automaticky ji vyhodnotit ve 3D. Další velké pozitivum je rozhodně vyhodnocovací software, který z naměřených dat dokáže získat potřebné hodnoty a grafické závislosti. [53]

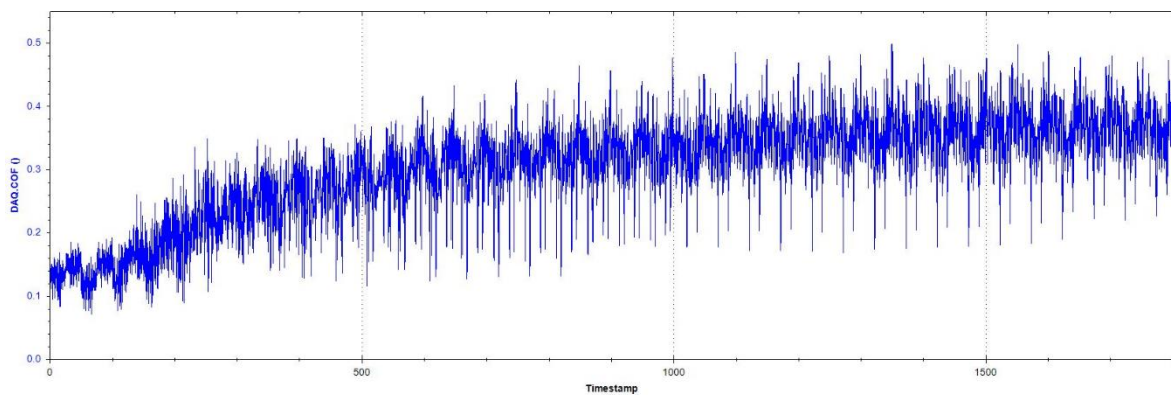


*Obrázek 28 Tribometr MFT 5000 [53]*



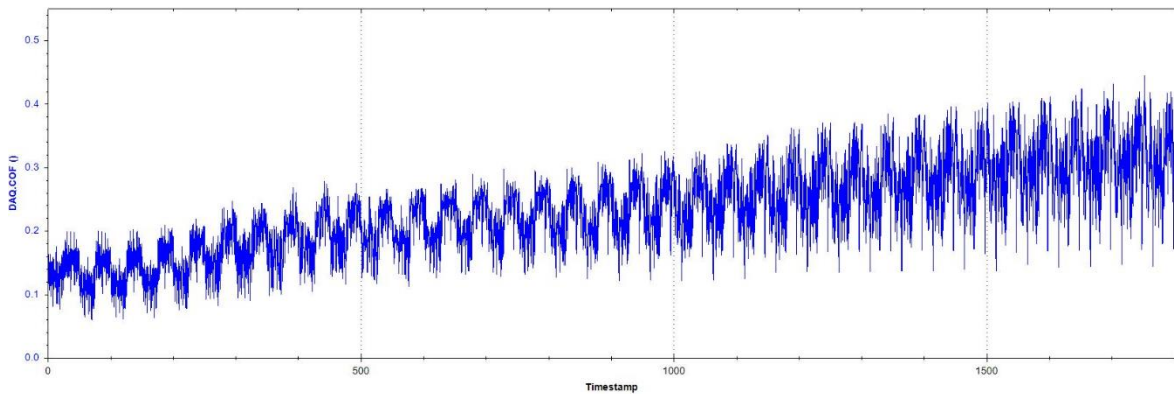
*Graf 3 Závislost koeficientu tření na čase pro vzorek č.1*

- Průměrný koeficient tření byl 0,3711 se směrodatnou odchylkou 0,0759.



*Graf 4 Závislost koeficientu tření na čase pro vzorek č.2*

- Průměrný koeficient tření byl 0,3539 se směrodatnou odchylkou 0,0691.



*Graf 5 Závislost koeficientu tření na čase pro vzorek č.3*

- Průměrný koeficient tření byl 0,3658 se směrodatnou odchylkou 0,1123.

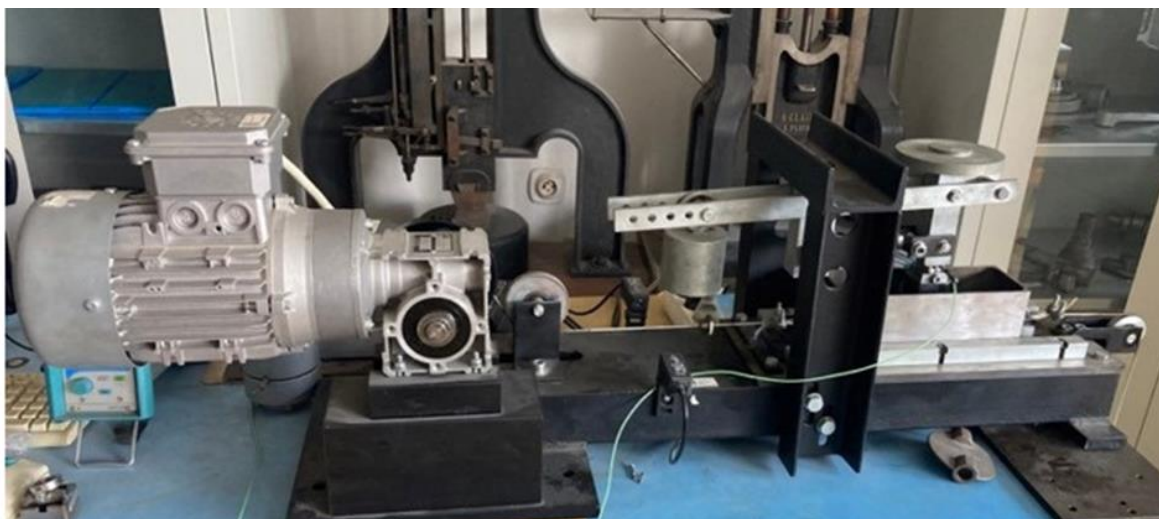
## 6.7 Měření a vyhodnocení na tribometru TOP 3

Měřeny byly opět 3 vzorky. Funkční dvojici zde tvořila pokovená tableta a ocelová destička. Tablety byly o průměru 20 mm a výšce 7–10 mm se zkosením hran 0,5 x 45°. Tablety byly z materiálu používaného na vysokopevnostní šrouby třídy 10.9 a to 34Cr4 a 41Cr4. Protikusem tablety při tribologických testech byla destička vyrobená z konstrukční oceli S235JRG1 o rozměrech 135 x 50 x 8 mm s drsností Ra=0,25.

Test probíhal za sucha při pokojové teplotě, přičemž funkční dvojice byla zatížena 1 kg (9,81 N), jelikož zatížení se na tomto tribometru umísťuje manuálně. Testování každého vzorku trvalo 30 minut.

K vyhodnocení tribologických vlastností byl použit tribometr TOP 3. Nejčastěji je s tímto tribometrem prováděno měření adhezivního tření a opotřebení povlaků, či povrchových vrstev. Pro každé měření byly použity nové připravené členy funkční dvojice. Mezi funkční dvojicí dochází k translačně oscilačnímu pohybu. Ten je přeměňován z rotačního pohybu pomocí klikového mechanismu a elektromotoru disponující šnekovou převodovkou. Nastavení otáček (počtu cyklů za minutu) je realizováno frekvenčním měničem. Destička plní funkci pohyblivého členu, zatímco tableta plní funkci statickou a je přitlačována definovanou silou. Velikost normálového zatížení působícího na destičku je možné regulovat ve velikosti 0–250 N. Určení velikosti třecí síly je zajištěno piezokrystalickým snímačem Kistler 9251 uloženém v zatěžovacím sloupku. Třecí síla vznikající působením normálového zatížení je přenášena do zmíněného snímače. Dle velikosti deformace zatěžovacího sloupku se senzorem je generován elektrický náboj (řádově v jednotkách [pC]). Vyslaný elektrický signál je veden do vyhodnocovací jednotky Kistler 5015, v němž je třecí síla převedena do grafu softwarem Charge Meter 5015A. Naměřené hodnoty třecí síly musí být dále vyhodnoceny v softwaru Matlab. [54]





*Obrázek 29 Tribometr TOP 3*



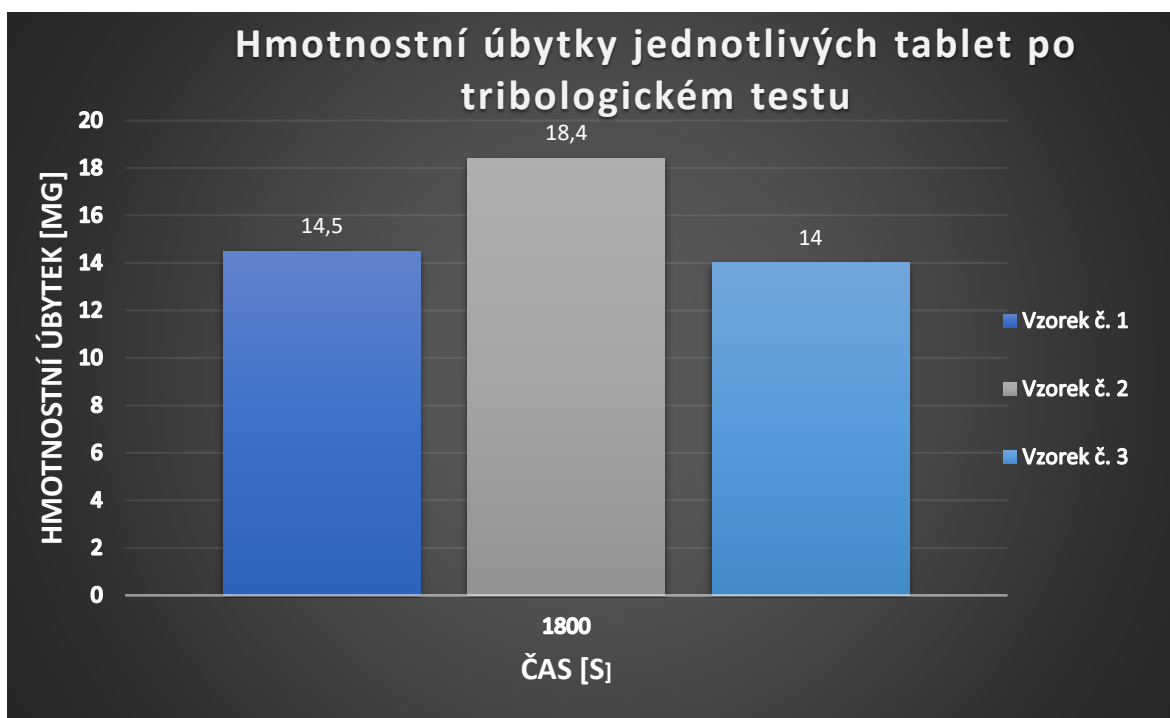
*Obrázek 30 Funkční dvojice (vlevo-ocelová destička, vpravo-pokovená tableta)*



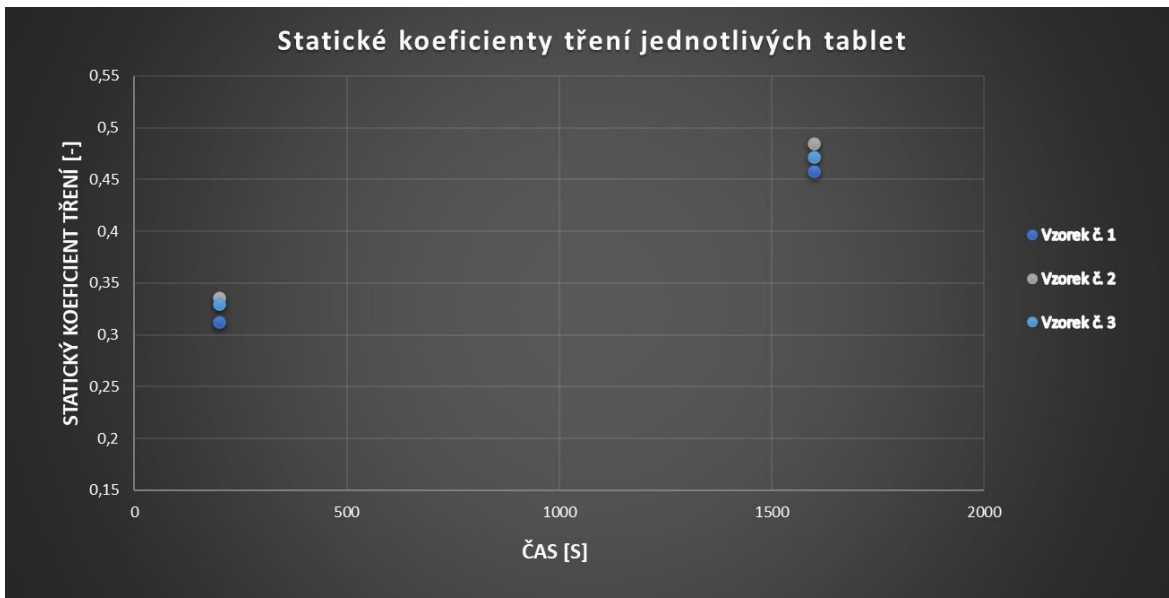
*Obrázek 31 Dráha translačně oscilačního pohybu funkční dvojice po 30 minutách tribologického testování při zatížení 1 kg*

Tabulka 11 Vyhodnocení tribologického testu tablet na tribometru TOP 3

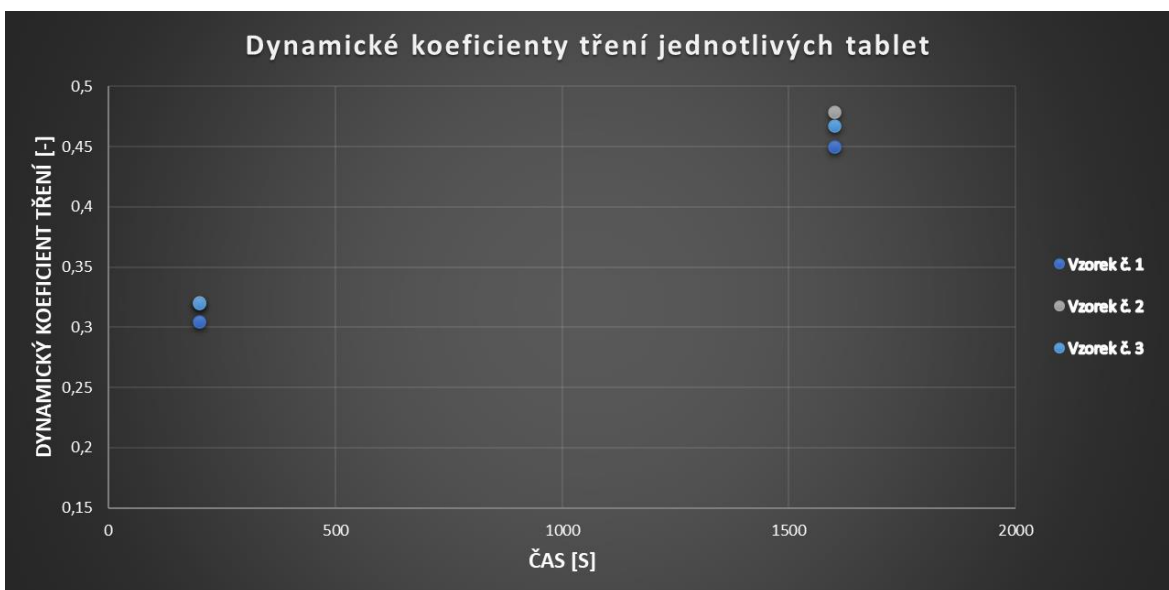
VYHODNOCENÍ TRIBOLOGICKÉHO TESTU							
na tribometru TOP 3							
vzorek	čas [s]	hmotnost po testu [g]	hmotnostní úbytek [mg]	koeficient tření 200 s		koeficient tření 1600 s	
				μ stat [-]	μ dyn [-]	μ stat [-]	μ dyn [-]
1	1800	13,2972	14,5	0,3124	0,3049	0,4582	0,4503
2	1800	11,6701	18,4	0,3356	0,3211	0,4847	0,4791
3	1800	21,6376	14	0,3296	0,3201	0,4715	0,4672



Graf 6 Hmotnostní úbytky jednotlivých tablet po tribologickém testu



Graf 7 Statické koeficienty tření jednotlivých tablet v čase 200 s a 1600 s



Graf 8 Dynamické koeficienty tření jednotlivých tablet v čase 200 s a 1600 s

## 6.8 Diskuze výsledků tribologického testování

Při tribologickém testování disků tribometrem MFT 5000 byl zjištěn průměrný koeficient tření pomocí vyhodnocovacího softwaru tribometru. Hodnoty koeficientu tření zaznamenával software tribometru i graficky (graf č. 3–5).

- Pro disk č.1 byl průměrný koeficient tření 0,3711 se směrodatnou odchylkou 0,0759.
- Pro disk č.2 byl průměrný koeficient tření 0,3539 se směrodatnou odchylkou 0,0691.
- Pro disk č.3 byl průměrný koeficient tření 0,3658 se směrodatnou odchylkou 0,1123.

Koeficienty tření dosahovaly u všech disků podobných hodnot.

Při tribologickém testování tablet tribometrem TOP 3 byl zjištěn statický a dynamický koeficient tření v čase 200 s a 1600 s. Hodnoty statického a dynamického koeficientu tření byly následně rovněž vyneseny do grafů (graf č.7–8). Po dokončení testu byl u všech tablet zkoumán hmotnostní úbytek a změřena tloušťka povlaku.

- Pro tabletu č.1 byl statický koeficient tření v čase 200 s roven hodnotě 0,3124 a dynamický koeficient tření roven hodnotě 0,3049.  
V čase 1600 s byl statický koeficient tření roven hodnotě 0,4582 a dynamický koeficient tření roven 0,4503.
- Pro tabletu č.2 byl statický koeficient tření v čase 200 s roven hodnotě 0,3356 a dynamický koeficient tření roven hodnotě 0,3211.  
V čase 1600 s byl statický koeficient tření roven hodnotě 0,4847 a dynamický koeficient tření roven hodnotě 0,4791.
- Pro tabletu č.3 byl statický koeficient tření v čase 200 s roven hodnotě 0,3296 a dynamický koeficient tření roven hodnotě 0,3201.  
V čase 1600 s byl statický koeficient tření roven hodnotě 0,4715 a dynamický koeficient tření roven 0,4672.

Při porovnání grafických závislostí a vyhodnocených hodnot lze konstatovat, že koeficienty tření dosahovaly též podobných hodnot. Oba koeficienty tření nabývaly

poměrně vysokých hodnot, což mohlo být následkem použití ocelové zkušební destičky o drsnosti  $Ra=0,25 \mu\text{m}$ .

Hmotnostním úbytkem lze charakterizovat odolnost otěru proti opotřebení. Hmotnostní úbytky byly také relativně vysoké. Hmotnost byla měřena po konci testování, čili po 30 minutách. Hmotnostní úbytky byly následně vyneseny do sloupcového grafu. (graf č.6)

- Hmotnostní úbytek tablety č.1 byl 14,5 mg.
- Hmotnostní úbytek tablety č.2 byl 18,4 mg.
- Hmotnostní úbytek tablety č.3 byl 14 mg.

Po skončení testu byly naměřeny tloušťky povlaku, jež jsou uvedeny v tabulce č.8. Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že úbytek tloušťky byl velmi malý.

Z měření na obou tribometrech je možné pozorovat stoupající trend koeficientu tření v závislosti na čase. Koeficient tření při tribologickém testování tablet na tribometru TOP 3 dosahoval vyšších hodnot než při testování disků na tribometru MFT 5000, protože docházelo k většímu bodovému styku. Z těchto výsledků lze konstatovat, že čím větší je třecí plocha, tím větší je odpor (tření).

## 7. Technicko-ekonomické zhodnocení

Vysokorychlostní elektrolyt je schopný vyloučit stejné množství povlaku za mnohem kratší čas, oproti pokovování pomocí Wattsova elektrolytu. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena vysokorychlostního elektrolytu a malá dostupnost v České republice. Z tohoto důvodu byl niklový vysokorychlostní elektrolyt zakoupen u firmy Gasteros Plating z Velké Británie. Cena 1 l elektrolytu je v současné době £150 (při aktuálním kurzu přibližně 4 350 Kč). Cenu niklového Wattsova elektrolytu je s ohledem na momentální proměnlivost cen jednotlivých surovin složité stanovit. Z tohoto důvodu jsou výrobci niklovacích lázní schopni konečnou cenu určit až při samotném prodeji surovin. Niklovací lázeň od firmy Jentnergrouop je v České republice možné zakoupit za cenu přibližně 620 Kč za jeden litr.

- Cena 1 l vysokorychlostního niklového elektrolytu je přibližně 4350 Kč.
- Cena 1 l klasického Wattsova niklového elektrolytu je přibližně 620 Kč.

## 8. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat rozbor problematiky lokálního galvanického pokovení. Vysvětlit princip fungování technologie a její využití v různých průmyslových odvětvích. Dalším dílčím úkolem bylo popsat jednotlivé povlaky využívané touto technologií a jejich specifické vlastnosti.

Experimentální část se zabývala nanesením niklového povlaku pomocí lokálního galvanického pokovení na několik zkušebních vzorků, u kterých byly testovány jejich vlastnosti. Měřena byla drsnost povrchu před a po pokovení, tloušťka povlaku, rezistivita, pórovitost a byla zkoumána změna hmotnosti. Vylučovací rychlost, v závislosti na čase, byla testována na ocelovém plechu. Vzorky byly podrobeny tribologickému testování na Tribometru *MFT 5000* a tribometru *TOP 3*. Testování probíhalo při stejných podmínkách a při stejném zatížení pro všechny vzorky. Z testování na obou tribometrech byl získán koeficient tření doplněný o grafické závislosti. Z výsledků bylo patrné, že koeficient tření má stoupající trend v závislosti na čase. Koeficient tření byl při testování na tribometru *TOP 3* mírně vyšší v porovnání s hodnotami z tribometru *MFT 5000*. Vyšší hodnoty měla za následek větší třecí plocha. Závěrem lze tedy konstatovat, že čím větší je třecí plocha, tím větší je odpor (tření).

Cena vysokorychlostního elektrolytu v porovnání s Wattsovým elektrolytem mnohonásobně vyšší. Vyšší cena je ale vykompenzována kratšími časy potřebnými k pokovení určité tloušťky povlaku.



## 9. Zdroje

- [1] KREIBICH, Viktor a Hoch KAREL. *Koroze a technologie povrchových úprav*. Druhé. Praha: České vysoké technické učení v Praze, 1996.
- [2] Pokovování. *Oneindustry* [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/pokovovani/>
- [3] Electroplating. *CHEMISTRY* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical\\_Chemistry/Supplemental Modules \(Analytical Chemistry\)/Electrochemistry/Electrolytic Cells/Electroplating](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_(Analytical_Chemistry)/Electrochemistry/Electrolytic_Cells/Electroplating)
- [4] Galvanické pokovení. *GALVANOVNA OMEGA* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <http://www.galvanovnaomega.cz/pokov/pokoveni.html>
- [5] Introduction: the galvanic process. *LEGORPEDIA* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.legor.com/en-us/plating-lp/37-introduction-the-galvanic-process>
- [6] JANDA, Tomáš. *Analýza zařízení pro galvanizovny*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.
- [7] BEBEROVÁ, Pavlína. *Galvanické pokovení šperků*. Plzeň, 2022. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.
- [8] WHAT IS ELECTROPLATING?. *SPC* [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.sharrettsplating.com/blog/what-electroplating/#benefits>
- [9] Galvanické zinkování [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.galva.cz/zinkovani/>
- [10] Electroplating. *EXPLAINTHATSTUFF!* [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/electroplating.html>
- [11] Electroplating Process - Overview, Advantage & Disadvantage, Uses, FAQs. *CAREERS 360* [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://school.careers360.com/chemistry/electroplating-process-topic-pge>
- [12] WHAT IS BRUSH PLATING?. *SIFCO ASC* [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.sifcoasc.com/blog/what-is-brush-plating/>
- [13] Technologie tamponování – lokální galvanické pokovování. *Engineering* [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/3161-technologie-tamponovani-lokalni-galvanicke-pokovovani>
- [14] ŽÁK, Vratislav a Jan KUDLÁČEK. *Technologie lokálního galvanického pokovování (Tampónování)*. *Povrcháři.cz* [online]. Praha, Březen 2008, 1-4 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: [http://povrchari.cz/kestazeni/200803\\_povrchari.pdf](http://povrchari.cz/kestazeni/200803_povrchari.pdf)
- [15] KUCHAR, Jiří, Viktor KREIBICH a Zdeněk HAZDRA. Renovování strojních součástí technologií tampónování. *Povrcháři.cz* [online]. Praha, Prosinec 2015, 9-10 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: [http://povrchari.cz/kestazeni/201508\\_povrchari.pdf](http://povrchari.cz/kestazeni/201508_povrchari.pdf)
- [16] An introduction to brush plating. *SPA PLATING* [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.goldn.co.uk/how-to/an-introduction-to-brush-plating/>
- [17] Advantages of Brush Plating. *Continental Superior Plating Inc.* [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://continentalat.com/services/advantages-of-brush-plating/>
- [18] WHAT IS BRUSH PLATING. *Sterling Impreglon Asia* [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.sterling.com.sg/what-is-brush-plating/>
- [19] Mechanical Processes for the Surface Treatment of Components. *RINGFEDER* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://blog.ringfeder.com/surface-treatment-components-1-mechanical-processes>

- [20] MECHANICAL SURFACE TREATMENT. *GRONBACH* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.gronbach.com/en/surface-finishing/mechanical-treatments>
- [21] Polishing Surface Finish for Custom Parts: Everything You Need to Know. *RapidDirect* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.rapiddirect.com/blog/polishing-surface-finish/>
- [22] Omílání. *ELUC* [online]. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1388>
- [23] Corrosion Resistant Coating Application. *METALCOATINGS* [online]. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://www.metcoat.com/corrosion-resistant-coatings.htm>
- [24] Plating: the role of nickel. *NICKLE INSTITUTE* [online]. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/plating/>
- [25] Best Plating Practices for the Application of Brush Plated Zinc-Nickel. *PRODUCT FINISHING* [online]. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/best-plating-practices-for-the-application-of-brush-plated-zinc-nickel>
- [26] TRIBOLOGIE. *Tribotechnika* [online]. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://www.tribotechnika.cz/index.php/obor/tribologie>
- [27] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA A SPOLEHLIVOST I. TRIBODIAGNOSTIKA*. Ostrava, 2000. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava fakulta strojní.
- [28] MARUSIČ, Lukáš. *Tribologické vlastnosti moderních povlaků*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [29] ČEPEK, David. *Chemické předúpravy povrchu pro zvýšení přilnavosti a korozní odolnosti organických povlaků*. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [30] Laboratorní zdroj 1-30V/0-30A SPS-9602. In: *Mobilmarket* [online]. [cit. 2022-06-26]. Dostupné z: <https://www.aamobilmarket.cz/laboratorni-zdroj-1-30v-0-30a-sps-9602/d-15742>
- [31] WU, Bin, Bin-shi XU, Bin ZHANG a Yao-hui LÜ. *Preparation and properties of Ni/nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings by automatic brush plating* [online]. In: . [cit. 2022-06-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897206014848#!>
- [32] Laboratorní ultrazvuková vana K-2LE nerezová [online]. In: . [cit. 2022-06-26]. Dostupné z: <https://www.kraintek.cz/laboratorni-ultrazvukove-vany-s-elektronickym-ovladanim/laboratorni-ultrazvukova-vana-k-2le-nerezova-elektronicke-ovladani-d92>
- [33] REDNL, Mikoláš. *Tribologie pro letecké aplikace*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [34] Tribology Explained. *Machinery Lubrication* [online]. [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/tribology-31340>
- [35] INDUSTRIAL LUBRICATION AND TRIBOLOGY EXPLAINED. *Valvoline* [online]. [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: <https://www.valvoline.com/en-eur/industrial-lubrication-and-tribology-explained/>
- [36] Introduction to Tribology. *Society of Tribologists and Lubrication Engineers* [online]. [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: [https://www.stle.org/files/What is tribology/Tribology Lubrication.aspx](https://www.stle.org/files/What%20is%20tribology/Tribology%20Lubrication.aspx)
- [37] MICHÁLEK, Pavel. *Návrh materiálu oplachové vany chromovací linky*. Plzeň, 2017. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.

- [38] KOPŘIVA, Andreas. *POROVNÁNÍ ÚČINNOSTI ODMAŠŤOVACÍCH PROSTŘEDKŮ*. Praha, 2015. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [39] Jaký je rozdíl mezi druhy opotřebení?. *E-konstrukter* [online]. [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-druhy-opotrebeni>
- [40] *Kavitační opotřebení* [online]. In: . [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=3598&typ=html](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3598&typ=html)
- [41] *Adhezivní opotřebení* [online]. In: . [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=3595&typ=html](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3595&typ=html)
- [42] *Vibrační opotřebení* [online]. In: . [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=3595&typ=html](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3595&typ=html)
- [43] Experiment and Numerical Study of Wear in Cross Roller Thrust Bearings. *ResearchGate* [online]. [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/a-Schematic-of-pin-on-disc-test-b-Pin-on-disc-testing-machine\\_fig1\\_277950975](https://www.researchgate.net/figure/a-Schematic-of-pin-on-disc-test-b-Pin-on-disc-testing-machine_fig1_277950975)
- [44] KŘÍŽ, Antonín. *TRIBOLOGICKÁ ANALÝZA PIN-ON-DISC* [online]. In: . ČZU v Plzni, 2004 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/TRIBOLOGICKA\\_ANALYZA\\_PIN-ON-DISC.pdf](https://www.opi.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf)
- [45] ZHANG, Dan, Xiufang CUI, Guo JIN, Zhaobing CAI a Meiling DONG. *Thermal stability of Ni-B/La2O3 coatings by electro-brush plating technique* [online]. In: . [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897218306571>
- [46] QIAN, Yaochuan, Jun TAN, Qingqing LIU, Helong YU, Ruxin XING a Hongjun YANG. *Preparation, microstructure and sliding-wear characteristics of brush plated copper-nickel multilayer films* [online]. In: . [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S025789721001282X#!>
- [47] Otěruvzdorné povrchové vrstvy a povlaky. *TECHMAGAZÍN* [online]. [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/45782>
- [48] ZHONG, Zhimin a Sidney J. CLOUSER. *Nickel-tungsten alloy brush plating for engineering applications* [online]. In: . [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897213012140?casa\\_token=juxKWhqlQn8AAAAA:h8ZbXPqedz\\_c1Js32\\_cOtWmLIRxdqRSPmGJVkPqyLWvNSbXe376yTknwh3X0T7xnxYCOhRyBLA#!](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897213012140?casa_token=juxKWhqlQn8AAAAA:h8ZbXPqedz_c1Js32_cOtWmLIRxdqRSPmGJVkPqyLWvNSbXe376yTknwh3X0T7xnxYCOhRyBLA#!)
- [49] RUBINSTEIN, Marv. *High Speed Selective Brush Plating of Gold* [online]. In: . [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF03216525.pdf>
- [50] Drsnoměr Surfctest SJ-210. In: *Stools* [online]. [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.stools-shop.cz/drsnomer-surfctest-sj-210--mm-/>
- [51] Ohaus Explorer Pro Laboratory Scales. In: *Scales galore* [online]. [cit. 2022-07-13]. Dostupné z: <https://www.scalesgalore.com/oexpl.htm>
- [52] Bright Nickel Brush Plating Solution. In: *Gateros Plating* [online]. [cit. 2022-07-14]. Dostupné z: <https://www.gaterosplating.co.uk/product-page/bright-nickel-brush-plating-solution>
- [53] MFT-5000 Multi Function Tribomet. *Rtec instruments* [online]. [cit. 2022-07-14]. Dostupné z: <https://rtec-instruments.com/tribometer/universal-tribometer/>
- [54] ROŠKANIN, Petr. *Tribologické vlastnosti galvanicky vyloučených kompozitních povlaků Zn-PTFE* [online]. [cit. 2022-07-15]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2011/sbornik/papers/pdf/1100068-1.pdf>

## 10. Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma principu galvanického pokovení [4]	15
Obrázek 2 Příklad využití galvanického zinkování [9]	16
Obrázek 3 Galvanicky poniklované kolo [10]	16
Obrázek 4 Příklad využití tampónování [16]	17
Obrázek 5 Schéma zařízení pro tampónování [14]	18
Obrázek 6 Tribologický systém [27]	25
Obrázek 7 Působící síly při tření [33]	26
Obrázek 8 Druhy opotřebení [27]	27
Obrázek 9 Adhezivní opotřebení na čepu [41]	28
Obrázek 10 Schéma zkoušky pin on disc [43]	31
Obrázek 11 Niklový povlak na kovové minci [24]	33
Obrázek 12 Výsledky tribologických zkoušek povlaku Ni-nano Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> pomocí automatického (a) a ručního (b) nanášení [31]	34
Obrázek 13 Laboratorní zdroj Manson SPS 9602 [30]	38
Obrázek 14 Nástroj pro nanesení povlaku	39
Obrázek 15 Vysokorychlostní niklový elektrolyt [52]	39
Obrázek 16 Tableta před pokovením	40
Obrázek 17 Tableta po pokovení	40
Obrázek 18 Disk před pokovením	40
Obrázek 19 Disk po pokovení	40
Obrázek 20 Laboratorní ultrazvuková vana K-2LE [32]	41
Obrázek 21 Drsnoměr Surfctest SJ 210 [50]	42
Obrázek 22 Digitální váha Explorer Pro [51]	45
Obrázek 23 Digitální tloušťkoměr Defelsko Positector 6000	47
Obrázek 24 Porozimetr TQC LD815	50
Obrázek 25 Testování pórovitosti na vzorcích pokovených vysokorychlostním elektrolytem	50
Obrázek 26 Povrchový měřič odporu SRM 200	51
Obrázek 27 Nanesený povlak vysokorychlostním elektrolytem při U=7V a I=0,2A za 5 min	53
Obrázek 28 Tribometr MFT 5000 [53]	54

Obrázek 29 Tribometr TOP 3	57
Obrázek 30 Funkční dvojice (vlevo-ocelová destička, vpravo-pokovená tableta)	57
Obrázek 31 Dráha translačně oscilačního pohybu funkční dvojice po 30 minutách tribologického testování při zatížení 1 kg	58

## 11. Seznam tabulek

Tabulka 1 Naměřené hodnoty drsnosti disků a tablet	43
Tabulka 2 Hmotnost disků před pokovením	45
Tabulka 3 Hmotnost disků po pokovení	46
Tabulka 4 Hmotnost tablet před pokovením	46
Tabulka 5 Hmotnost tablet po pokovení	46
Tabulka 6 Hmotnost tablet po provedení tribologického testu	47
Tabulka 7 Tloušťka povlaku disků a tablet po pokovení	48
Tabulka 8 Tloušťka povlaku tablet po provedení tribologického testu	49
Tabulka 9 Rezistivita tablet po pokovení	51
Tabulka 10 Vylučovací rychlost povlaku v závislosti na čase	52
Tabulka 11 Vyhodnocení tribologického testu tablet na tribometru TOP 3	59

## 12. Seznam grafů

Graf 1 Závislosti koeficientu tření na tloušťce povlaku u vícevrstvých povlaků Cu-Ni [46]	35
Graf 2 Vylučovací rychlost při pokovení vysokorychlostním elektrolytem (U=7V,I=0,2A)	53
Graf 3 Závislost koeficientu tření na čase pro vzorek č.1	55
Graf 4 Závislost koeficientu tření na čase pro vzorek č.2	55
Graf 5 Závislost koeficientu tření na čase pro vzorek č.3	55
Graf 6 Hmotnostní úbytky jednotlivých tablet po tribologickém testu	59
Graf 7 Statické koeficienty tření jednotlivých tablet v čase 200 s a 1600 s	60
Graf 8 Dynamické koeficienty tření jednotlivých tablet v čase 200 s a 1600 s	60

## 13. Seznam příloh

Příloha A.1 Nanesený povlak vysokorychlostním elektrolytem při $U=7V$ , $I=0,2A$ za 1min	73
Příloha A.2 Nanesený povlak vysokorychlostním elektrolytem při $U=7V$ , $I=0,2A$ za 3 min	73
Příloha A.3 Nanesený povlak vysokorychlostním elektrolytem při $U=7V$ , $I=0,2A$ za 7 min	73





*Příloha A.1 Nanesený povlak vysokorychlostním elektrolytem při  $U=7V$ ,  $I=0,2A$  za 1min*



*Příloha A.2 Nanesený povlak vysokorychlostním elektrolytem při  $U=7V$ ,  $I=0,2A$  za 3 min*



*Příloha A.3 Nanesený povlak vysokorychlostním elektrolytem při  $U=7V$ ,  $I=0,2A$  za 7 min*