

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**JONÁŠ
RADA**

JONÁŠ
RADA



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Lokální galvanické pokovování

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Jonáš Rada

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Jiří Kuchař, PhD., IWE

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rada** Jméno: **Jonáš** Osobní číslo: **501308**
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:

Lokální galvanické pokovování

Název bakalářské práce anglicky:

Brush plating

Pokyny pro vypracování:

- 1) Historie galvanického pokovování
- 2) Předúprava povrchu před galvanickým pokovováním
- 3) Technologie galvanického pokovování – ponorem a lokálně
- 4) Vybrané druhy galvanických povlaků
- 5) Vybrané zkoušky galvanických povlaků
- 6) Zhotovení vzorků a vylučovací rychlost povlaku
- 7) Zkušebnictví (přilnavost, opotřebení)
- 8) Vyhodnocení a diskuze výsledků

Seznam doporučené literatury:

- 1) KUCHAŘ, 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:

doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc. ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.08.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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. Jiří Kuchař, PhD., 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

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE za užitečné rady a pomoc při experimentu. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a své přítelkyni za motivaci a energii, kterou mi při psaní práce dodávala.

Anotace

Název diplomové práce:	Lokální galvanické pokovování
Autor práce:	Jonáš Rada
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Kuchař, PhD., IWE
Konzultant:	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
Akademický rok:	2022/2023
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D., IWE
Rozsah práce:	77 stránek, 12 tabulek, 38 obrázků a 4 strany příloh
Klíčová slova:	elektrolytické pokovení, tampónování, lokální galvanické pokovení

Tato bakalářská práce se zabývá tématem lokálního galvanického pokovování, známého jako technologie tampónování. Práce je rozdělena do dvou částí, do teoretické a experimentální části. V teoretické části je rozebrána problematika předúprav povrchu, galvanického pokovování a popsán princip tampónování. Dále se v této části popisují vybrané galvanické povlaky a jejich zkoušení na přilnavost, opotřebení a korozní odolnost. Experimentální část se zabývá zhotovením zkušebních vzorků standartní metodou galvanického pokovování a tampónováním. Dále se zhotovené vzorky zkouší na vylučovací rychlost, přilnavost a opotřebení. Z výsledku zkoušek se pak oboje metody pokovování porovnají.

Annotation

Title of the final thesis:	Local electroplating
Author:	Jonáš Rada
Supervisor:	Ing. Jiří Kuchař, PhD., IWE
Consultant:	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D., IWE
Extent:	77 pages, 12 tables, 38 pictures and 4 pages of attachments
Keywords:	electroplating, brush plating, selective anodizing

This bachelor thesis focuses on the topic of local electroplating, specifically the brush plating technology. The thesis is divided into two main parts: theoretical and experimental. In the theoretical part, the problematic aspects of galvanic plating are analyzed, and the principles of brush plating are explained. Additionally, various galvanic coatings are described, and their performance is assessed through testing for adhesion, wear, and corrosion resistance. The experimental part involves the fabrication of test samples using standard galvanic plating and brush plating methods. Subsequently, these samples undergo testing to evaluate exudation rate, adhesion, and wear. Finally, the results from these tests are used to compare and contrast the two plating methods.

Obsah

1. Úvod	16
2. Pokovování povrchu	17
3. Předúpravy povrchů	17
3.1 Mechanické předúpravy povrchů	17
3.1.1 Broušení.....	17
3.1.2 Kartáčování.....	18
3.1.3 Omílání.....	18
3.1.4 Leštění.....	18
3.2 Chemické předúpravy povrchů	18
3.2.1 Odmašťování	19
3.2.2 Moření	20
3.2.3 Dekapování.....	21
3.2.4 Odrezování.....	21
3.2.5 Oplach.....	21
4. Technologie galvanického pokovování	22
4.1 Princip galvanického pokovování.....	22
4.1.1 Postup při galvanickém pokovování.....	23
4.2 Historie galvanického pokovování	24
4.3 Druhy galvanických povlaků	25
4.3.1 Niklové povlaky.....	26
4.3.2 Zinkové povlaky	27
4.3.3 Chromové povlaky	28

4.3.4	Další povlaky	28
5.	Zkoušky galvanických povlaků.....	29
5.1	Zkoušky přilnavosti	29
5.1.1	Zkouška přilnavosti tepelným šokem	29
5.1.2	Vrypová zkouška	30
5.1.3	Zkouška leštěním	30
5.1.4	Zkouška poškrábáním	30
5.1.5	Zkouška odloupenutím v tahu	30
5.1.6	Zkouška pilování	31
5.1.7	Zkouška hloubkovým tahem.....	31
5.1.8	Zkouška podle Rockwell C	31
5.1.9	Zkouška brokováním.....	31
5.1.10	Zkouška vinutím.....	31
5.1.11	Tahová zkouška.....	32
5.1.12	Zkouška ohybem.....	32
5.1.13	Katodová zkouška	32
5.2	Zkoušky opotřebení	33
5.2.1	Fretting test	34
5.2.2	Tribologická analýza PIN on DISC	35
5.3	Korozní zkoušky	35
5.3.1	Korozní zkouška oxidem siřičitým ve vlhké atmosféře.....	35
5.3.2	Korozní zkouška solnou mlhou	36
5.3.3	Korozní zkouška v kondenzační komoře	36
6.	Technologie tamponování.....	36
6.1	Historie tamponování	37
6.2	Princip tamponování.....	37

6.2.1	Zařízení	38
6.2.2	Druhy elektrolytů.....	38
6.2.3	Výhody a nevýhody tamponování.....	39
6.2.4	Vlastnosti vytvořené vrstvy	40
7.	Tribologie.....	41
7.1	Tribologický systém	41
7.2	Význam tribologie	42
8.	Experimentální část.....	43
8.1	Použitá zařízení pro pokovení vzorků	43
8.1.1	Odmašťovací ultrazvuková vana K-2LE.....	43
8.1.2	Laboratorní zdroj Manson SPS9602	44
8.1.3	Stanoviště galvanického pokovování	44
8.1.4	Anoda pro lokální galvanické pokovování	45
8.2	Zhotovení vzorků	46
8.2.1	Ponorem	46
8.2.2	Lokálně.....	48
8.3	Vylučovací rychlost	49
8.3.1	Vylučovací rychlost galvanického pokovování ponorem	50
8.3.2	Vylučovací rychlost lokálního pokovení	51
8.4	Drsnosti povrchu.....	52
8.5	Ohybová zkouška	54
8.6	Zkouška tepelným šokem	55
8.7	Tribologická zkouška	56
9.	Závěr.....	69
	Bibliografie.....	70
	Seznam tabulek	74

Seznam obrázků.....	75
Přílohy.....	78

Seznam zkratek

μm	mikrometr
popř.	popřípadě
apod.	a podobně
H_2SO_4	kyselina sírová
HCl	kyselina chlorovodíková
g	gram
m^2	metr čtvereční
$^{\circ}\text{C}$	stupň Celsia
%	procento
H_3PO_4	kyselina fosforečná
Cr	chrom
Ni	nikl
ZnSO_4	síran zinečnatý
V	volt
NiSO_4	síran nikelnatý
NiCl_2	chlorid nikelnatý
Sb	antimon
Sn	cín
Pb	olovo
Ag	stříbro
Cr^{3+}	trojmocný kationt chromu
CrO_3	oxid chromový
H_2CrO_4	kyselina chromová

h	hodina
Cu	měď
L_{c2}	kritická síla
mm	milimetr
°	stupeň
kp	kilopond
NaOH	hydroxid sodný
MPa	megapascal
SO ₂	oxid siřičitý
l	litr
HV	tvrdost dle Vickerse
min	minuta
A	Ampér
s	sekunda
kVA	kilovoltampér
Ra	průměrná aritmetická hodnota drsnosti
Rq	průměrná kvadratická hodnota drsnosti
Rz	hloubka drsnosti
N	Newton

Seznam použité symboliky

$m[\text{g}]$	hmotnost vyloučeného kovu
$M[\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}]$	molární hmotnost
N	mocenství kovového kationtu v lázni
$F[\text{C}\cdot\text{mol}^{-1}]$	Faradayova konstanta, která činí 96 487
$I[\text{A}]$	elektrický proud
$t[\text{s}]$	čas
$k[\text{g}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}]$	elektronický ekvivalent
$h[\text{mm}]$	tloušťka
$d[\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}]$	měrná hmotnost
$P[\text{mm}^2]$	plocha pokoveného předmětu
$r[\%]$	proudový výtěžek
$J[\text{A}\cdot\text{dm}^{-2}]$	proudová hustota
$S[\text{dm}^2]$	plocha vzorku
$t_{exp}[\text{min}]$	expoziční čas
f	koeficient tření
$F_x[\text{N}]$	třecí síla
$F_z[\text{N}]$	zatěžující síla

1. Úvod

Technologie tamponování je speciálním druhem galvanického pokovování známého jako lokální galvanické pokovování, protože se dá aplikovat lokálně na konkrétní část dílu, který se má pokovit, což není možné u klasického galvanického pokovování ponořením součásti do pokovovací lázně. Tato technologie nachází široké uplatnění při opravě nebo renovaci poškozených povlaků. Dále se dá také použít na těžce dostupných místech, kde by bylo za normálních podmínek nutné díl rozebrat.

Teoretická část této práce se bude zabývat technologií galvanického pokovování a problematikou tamponování včetně předúprav povrchů. Dále se také zabývá druhy galvanických povlaků a jejichmi vlastnostmi i použitím v praxi.

Experimentální část se zabývá nanesením niklového povlaku na zkušební vzorky dvěma metodami galvanického pokovení, ponořením do lázně a lokálně. Zhotovené vzorky se pak testovaly na vylučovací rychlost, přilnavost povlaku k základnímu materiálu a opotřebení povlaku. V závěru jsou zhodnoceny výsledky dosažené experimentem a oboje metody galvanického pokovování se mezi sebou vzájemně porovnají.

2. Pokovování povrchu

Pokovování povrchu je velmi rozšířenou metodou povrchových úprav. Jejich funkce je primárně ochranná, ale v některých případech můžou plnit i funkci ozdobnou. Kovové povlaky dodávají povrchu požadované vlastnosti, jako je protikorozní ochrana, odolnost proti otěru, nebo třeba i požadovaný vzhled.

Vlastnosti těchto povlaků se odvíjejí od druhu povlakového kovu a základního materiálu, na tloušťce vrstvy a použité metody pro vytvoření povlaku. [1]

Tato práce se zabývá technologií galvanického pokovování a příbuzné metodě, tamponováním.

3. Předúpravy povrchů

Předúpravy povrchů jsou základním a nejdůležitějším procesem před samotným nanesením povlaku nebo vrstvy. Cílem předúprav je kvalitně připravit povrch dílu, tak aby neobsahoval žádné nečistoty, jak vlastní, tak i cizí. Díky těmto předúpravám získá povrch přilnavost vrstvy, laku nebo povlaku a protikorozní ochranu. Také se dají použít pro dosažení požadovaného vzhledu materiálu. Kvalitní přípravy povrchů jsou velmi důležité pro následující úpravy povrchů a značně pak ovlivňují kvalitu a životnost povlaků. Podle provedení dělí na mechanické a chemické. [1]

3.1 Mechanické předúpravy povrchů

Mechanické předúpravy povrchu mají za úkol odstranit z povrchu nečistoty a nedokonalosti jako jsou rzi a okuje. Dále také mechanické předúpravy zlepšují přilnavost povrchu pro nanášenou vrstvu nebo povlak. Pomocí některých těchto úprav lze také dosáhnout požadovaného vzhledu povrchu. Cílem těchto úprav je vytvořit povrch, který bude odolávat mechanickému zatížení. [2]

3.1.1 Broušení

Je druh technologie obrábění povrchu nástrojem, který je opatřen brusivem. Účelem této technologie je dosažení požadované drsnosti. Výchozí povrch materiálů se postupně vybrušuje postupně na nižší drsnost, dokud není dosažena předepsaná hodnota. První operace se provádí nástrojem o větší zrnitosti, aby došlo k zarovnání nerovností a odstranění nečistot. Při této operaci dochází k největšímu úběru materiálu a označuje se jako hrubé

broušení. Při dalších operacích se používají nástroje s nižší zrnitostí, dokud není dosažena požadovaná drsnost povrchu. [1]

3.1.2 Kartáčování

Technologie kartáčování je založena na mechanickém účinku odírání povrchu materiálu pomocí konců drátků uchycených na pevném předmětu ve tvaru kotouče nebo pevného drátu. Kartáčování se v technologickém postupu galvanického pokovování provádí po broušení. Slouží jako čistící operace k odstranění nečistot vzniklých při broušení. Účinek kartáčování závisí na průměru, délce a druhu použitých drátků i kinetické energii, která je kartáči dodávána. [2]

3.1.3 Omílání

Technologie omílání slouží převážně při hromadném způsobu úpravy povrchů malých složitých dílů o velkých sériích. Tato technologie je využívána pro odhrotování, zaoblování, broušení, nebo leštění výrobků. Kromě toho, že je omílání předběžná úprava povrchu se dá také využít jako finální úprava. Při omílání dochází k úběru materiálu a jeho vyhlazování pomocí brusiva v omílacích bubnech. Omílání se může rozdělit na rotační, vibrační a odstředivé. Jako brusivo se používá křemenný písek, ocelové broky, korundová tělíška, kamenné oblázky nebo plastová tělíška plněná abrazivem. [2] [3]

3.1.4 Leštění

Leštění se používá pro odstranění těch nejmenších a nejjemnějších nečistot, které vznikly předchozím kartáčováním nebo broušením. Účelem leštění je dosáhnout velmi nízké drsnosti či získání požadovaného vzhledu. Nástrojem používaným při leštění je textilní kotouč a leštící pasta. Při leštění povrchu dochází k vysokým lokálním teplotám mezi materiálem a leštícím kotoučem. Působením těchto teplot a leštící pasty dochází k plastickým deformacím povrchových vrstev a vzniká lesklý povrch s drsností nižší než Ra 0,1 μm . [1]

3.2 Chemické předúpravy povrchů

Hlavní význam chemických předúprav spočívá v odstraňování nečistot z povrchu materiálu před následujícími úpravami. Při těchto úpravách reaguje chemické činidlo s nečistotami na povrchu materiálu, které jsou pak z povrchu odstraněny. Podle požadovaných vlastností povrchu a základního materiálu se pak volí dané chemické

předúpravy. Pro galvanické pokovování se používají níže zmíněné úpravy, kterými jsou odmašťování, moření, dekapování a popř. odrezování. [2]

3.2.1 Odmašťování

Odmašťování je způsob odstraňování nečistot z povrchu kovu, které jsou k němu vázány buď adhezními silami (prach, kovové třísky apod.), nebo jsou k povrchu vázány fyzikální absorpcí (tuky, oleje, vosky). Energie těchto vazeb k povrchu je výrazně menší než u nečistot vázaných chemicky a dají se tedy snadněji odstranit bez změny kovového povrchu. Úkolem odmašťovacích přípravků je odstranění nečistot z povrchu kovu, jejich přenesení do roztoku či emulze a zamezení jejich zpětného uchycení na povrchu. Správně provedené odmaštění je velmi důležité pro adhezi následného povlaku. Odmašťování lze dělit na několik způsobů podle jejich provedení, a to na odmaštění v alkalických roztocích, odmaštění v organických rozpouštědlech, ultrazvukové odmaštění a elektrolytické odmaštění. [2] [4]

Odmaštění v alkalických roztocích

Odmašťování v alkalických roztocích je nejvíce rozšířený způsob čištění kovového povrchu. Účinnost alkalického odmašťovacího prostředku spočívá hlavně v emulgaci a dispergaci nečistot na kovovém povrchu. Působením alkalického odmašťovače dochází také k rozpouštění vodorozpustných nečistot. Proces probíhá v odmašťovacích lázních, které jsou vyplněny alkalickým roztokem. Nejčastěji bývají složeny z hydroxidu sodného nebo fosforečnanu draselného. Účinnost těchto lázní je závislá zejména na schopnosti emulgace a dispergace povrchových nečistot. V průběhu odmašťování je důležité sledovat množství emulgovaného tuku v lázni. Pokud je obsah v lázni příliš vysoký, je nutné ho nahradit novým, tak aby byla zajištěna správná funkce lázně. [1] [4]

Odmaštění v organických rozpouštědlech

Odmaštění v organických rozpouštědlech je nejjednodušším způsobem pro odstranění nečistot mastného charakteru na povrchu. Vzhledem k jednoduchosti provedení si zachovává vysoké výsledné čistoty, což je pro tuto metodu hlavní charakteristika při výběru vhodného způsobu odmašťování. Tento způsob odmaštění nelze aplikovat na vlhké povrchy a neodstraňuje heteropolární nečistoty, jako je pot a otisky prstů. Rozpouštěcími prostředky pro hrubé čištění bývá petrolej, zatímco pro detailnější čištění se používá benzín. Dále se také používá benzen, toluen, trichlorethylen, perchlorethylen a tetrachlormetan. Tyto rozpouštědla vykazují vysokou hořlavost a přítomnost

karcinogenních prvků, což je největší problém této metody, jelikož organická rozpouštědla nevyhovují požadavkům bezpečné a zdravotně nezávadné práce. [1] [4]

Ultrazvukové odmašťování

Ultrazvukové odmaštění se používá především pro čištění drobných dílů s malými otvory a špatně přístupnými plochami. Dochází jak k odstranění organických, tak i neorganických volně vázaných nečistot z povrchu. Při ultrazvukovém odmaštění dochází ke kavitaci, díky které dochází k uvolnění nečistot z povrchu i ve špatně dostupných místech a následnému rozptýlení v čistícím roztoku.

Princip této metody spočívá v to, že se do odmašťovací lázně implementuje ultrazvukové vlnění pomocí ultrazvukových budičů umístěných ve vaně. Šíření tohoto vlnění zhušťuje a zředuje prostředí s velkými rozdíly tlaku. Toto střídání vakua a tlaku vede ke vzniku kavitace. Jako lázně se nejčastěji používají alkalické vodné roztoky nebo chlorované uhlovodíky. [1] [4]

Elektrolytické odmašťování

Elektrolytické odmašťování se využívá jako finální odmašťování před provedením galvanického pokovování. Tato metoda dosahuje velmi vysoké čistoty povrchu, která je pro galvanické pokovování potřeba. Pro elektrolytické odmašťování se používají alkalická odmašťovadla stejně jako při alkalickém odmašťování. Tento účinek se ještě zvyšuje působením elektrického proudu, pomocí kterého lze odstranit i pevně držící nečistoty. Kromě míry koncentrace lázně, její teploty, složení a délky odmašťovacího procesu má velký vliv i polarita a proudová hustota. [2] [4]

3.2.2 Moření

Moření je proces, který slouží k odstraňování oxidického povlaku (rzi a okují) z povrchu materiálu rozpouštěním v kyselině. V běžné praxi se k moření používá kyselina sírová (H_2SO_4) nebo kyselina chlorovodíková (HCl). V průběhu moření se postupně zvedá obsah železa v lázni rozpouštěním oxidů a základního kovu, tím se lázeň vyčerpává a je potřeba ji průběžně obnovovat. [2]

Moření v kyselině sírové

U moření v kyselině sírové se musí počítat s úběrem materiálu 25–40 g na 1 m² povrchu železa. Při moření v kyselině sírové se uvolňuje vodík, který difunduje do kovu a vzniká tak nebezpečí vodíkové křehkosti. Kvůli tomuto problému se do lázně přidávají

inhibitory, které zpomalují rozpouštění oceli a zároveň téměř neovlivňují rozpouštění oxidů. Moření probíhá za teploty 60-80 °C po dobu 5-10 minut a používá se při tom kyselina sírová o koncentraci 8–14 %. [4]

Moření v kyselině chlorovodíkové

K moření se používá kyselina chlorovodíková s koncentrací 10–20 %, při pokojové teplotě. Moření v kyselině chlorovodíkové probíhá rychleji a rovnoměrněji než u kyseliny sírové, je to však vykompenzováno vyšší cenou. Nevýhodou této kyseliny jsou korozní účinky na zařízení a okolí. [4]

3.2.3 Dekapování

Dekapování je speciální metoda moření užívaná před galvanickým pokovením. Pomocí dekapování se odstraňuje tenký, většinou neviditelný oxidový povlak na povrchu materiálu a současně se aktivuje povrch. [5]

3.2.4 Odrezování

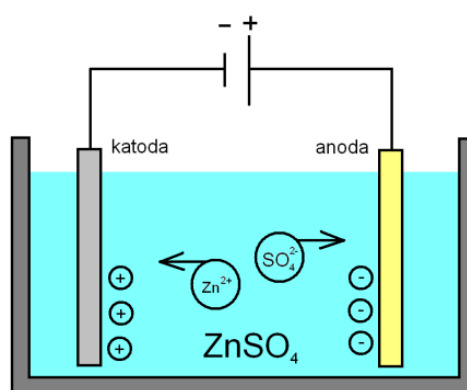
Technologie odrezování slouží k očištění dílu od rzi, která vznikla používáním či skladováním dílu a má být na něm provedena či obnovena povrchová úprava. Jedná se o zvláštní druh moření spočívající v odstranění oxidů z povrchů ocelových předmětů za použití tzv. odrezovačů. Rez je možné odstranit pomocí většiny kyselin, nejčastěji se však používají odrezovače na bázi kyseliny fosforečné (H_3PO_4). Odrezovat lze natíráním nebo ponorem do lázně. [5]

3.2.5 Oplach

Mezi jednotlivými operacemi chemických předúprav povrchů je třeba provádět oplach. Dělá se tak proto, aby z povrchu odstranily nečistoty, které upěly na povrchu při vyjímání dílu z lázně a k odstranění zbytků lázně, které se uchytily v dutinách dílu. Oplach se většinou provádí postřikem nebo ponorem v demineralizované vodě a provádí se proto, aby se nekontaminovaly lázně, které budou v technologickém procesu následovat.

4. Technologie galvanického pokovování

Galvanické (elektrolytické) pokovování je technologie při níž dochází k pokovení základního materiálu tenkou vrstvou povlaku jiného kovu za pomoci elektrické energie. Tato technologie nachází využití převážně pro dekorativní účely, ale také pro zlepšení korozní odolnosti. Galvanické pokovení se používá převážně pro nanášení povlaků zinku, který na ocelové součásti poskytuje katodickou ochranu anebo pro nanášení ušlechtlejších kovů (Cr, Ni), díky kterým součást získává požadovaný vzhled a zvyšuje se také její životnost. [6]



Obrázek 1 Princip kyselého galvanického zinkování v lázni síranu zinečnatého [7]

4.1 Princip galvanického pokovování

Princip galvanického pokovení funguje na principu elektrolýzy, při které dochází k přeměně energie elektrické na chemickou. Při procesu galvanického pokovení se v elektrolytu tvořeného solí povlakovaného materiálu zapojí pokovovaný materiál jako záporná elektroda (katoda) a jako kladná elektroda (anoda) se zapojí povlakovaný materiál. Anoda se bude postupně rozpouštět oxidací atomů a tím bude doplňovat úbytky kovu v elektrolytu. Na katodě bude docházet k redukci kationtů. Průchod elektrické energie bude zajištěn zdrojem stejnosměrného napětí. Tímto způsobem pak na katodě vzniká požadovaný povlak z vybraného kovu. [7]

Množství vyloučeného i rozpuštěného kovu se může určit pomocí Faradayova zákona, který říká, že množství vyloučeného a rozpuštěného kovu je přímo úměrné množství prošlého proudu,

$$m = \left(\frac{M}{n \cdot F} \right) \cdot I \cdot t \quad (1)$$

kde

m je hmotností vyloučeného kovu [g]

M je molární hmotnost kovu [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$]

n je mocenství kovového kationtu v lázni

F je Faradayova konstanta, která činí 96 487 [$\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$]

I je elektrický proud [A]

t je čas [s].

Vzorec se pak dá ještě zjednodušit tak, že $k = M/(n \cdot F)$, kde k je elektronický ekvivalent [$\text{g} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]. [7]

Tloušťka povlaku se pak dokáže určit ze vztahu,

$$h = \frac{t \cdot k \cdot I \cdot r}{d \cdot P} \quad (2)$$

kde se musí dále definovat

h , které je tloušťkou povlaku [mm]

d je měrná hmotnost kovu [$\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$]

P je plocha pokoveného předmětu [mm^2]

r je proudový výtěžek [%]. [7]

Vypočtená tloušťka povlaku je však spíše orientační, jelikož galvanické pokovování se vyznačuje nerovnoměrnou tloušťkou povlaku, která závisí na tvaru pokovovaného dílu.

4.1.1 Postup při galvanickém pokovování

Než se začne galvanicky pokovovat, musí se zvolit správně elektrody a elektrolyt, kterým se bude pokovovat. Volba elektrolytu musí být důkladná, aby se při průchodu elektrického proudu dosáhlo požadovaných chemických reakcí. Před samotným galvanickým pokovováním se musí provést četné a důkladné předúpravy povrchu, jelikož je tato technologie velice citlivá na nečistoty. Aby se dosáhlo správného přestupu kovového iontu

na katodu, musí se provést jak mechanické, tak i chemické předúpravy. Mezi jednotlivými chemickými předúpravami je potřeba provádět oplach v demineralizované vodě, aby odstraněné nečistoty např. v odmašťovacím roztoku znovu neulpěly na povrchu pokovovaného materiálu. [8]

Vzorový postup galvanického pokovování je v krátkých bodech popsán níže zde. Tento postup může obsahovat i šetrné mechanické předúpravy povrchu. Mezi jednotlivými zmíněnými operacemi je prováděn vždy oplach v demineralizované vodě.

Vzorový postup při galvanickém pokovování

- Chemické odmaštění.
- Moření.
- Elektrolytické odmaštění.
- Dekapování.
- Galvanické pokovení.
- Pasivace.
- Redukční oplach (pro pochromátované zinkové povlaky).
- Sušení. [1]

4.2 Historie galvanického pokovování

Počátky galvanického pokovování sahají už do 18. století, kdy se začínalo experimentovat s chemickými reakcemi a elektřinou. K významným průlomům v tomto odvětví došlo však až v počátcích 19. století. V roce 1805 italský chemik Luigi Valentino Brugnatelli objevil možnost nanášet stříbro na jiné kovy pomocí elektrického proudu. Jeho experimenty položily základ pro galvanické pokovování, jak jsou známé dnes. [9]

V roce 1807 anglický chemik Humphry Davy izoloval sodík elektrolytickým rozkladem roztavených solí a později ve 30. letech 19. století Michael Faraday provedl rozsáhlý výzkum principů elektrolýzy a elektrochemické depozice. Založil tak vědecký základ elektrochemie. Nejdůležitějším příspěvkem je pak první Faradayův zákon elektrolýzy, který říká, že množství kovu vyloučeného na elektrodě během elektrolýzy je přímo úměrné množství elektrického náboje prošlého elektrolytem. [9]

V polovině 19. století se elektrolytické pokovování stalo široce využívanou průmyslovou technologií. Používalo se k dosažení potřebného vzhledu, ke zvýšení trvanlivosti

a korozní odolnosti různých předmětů, od domácích potřeb po šperky. Odvětví galvanického pokovování zaznamenalo významný růst zejména díky pokroku ve výrobě elektřiny. [9]

Jednou z významných aplikací galvanického pokovování v počátcích bylo postříbření přístrojů. Galvanizované stříbro se stalo velmi populárním díky své nízké ceně oproti masivnímu stříbru. Proces zahrnoval potažení základního kovu, kterým byla měď nebo nikl, tenkou vrstvou stříbra, čímž pak vznikl vizuálně lesklý, atraktivní a funkční produkt. [10]

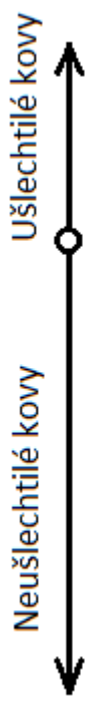
Galvanické pokovování pak hrálo důležitou roli ve vývoji elektrotechniky. Na přelomu 19. a 20. století rychle vzrůstala poptávka po spolehlivých elektrických spojích. Galvanické pokovování nabízelo řešení, a to nanášení tenkých povlaků kovů, jako je zlato či stříbro, na elektrické kontakty a konektory. Tyto povlaky tak zlepšovaly vodivost, zvýšily korozní odolnost a zajistily účinný elektrický přenos. Galvanické pokovování si pak ještě našlo uplatnění v automobilovém průmyslu, kde se využívalo k pokovování dílů kvůli korozní odolnosti a neposlední řadě také pro estetické účely. [10]

V posledních letech vedly spory ohledně obav o životní prostředí, kvůli toxickým chemikáliím používaným při galvanickém pokovování. Vyvíjí se úsilí ke snížení používání těchto chemikálií, vývoji udržitelnějších metod galvanického pokovování a alternativních metod pokovování. [10]

4.3 Druhy galvanických povlaků

Galvanicky vyloučené povlaky mohou sloužit mnoha účelům. Nejčastěji se používají jako dekorativní prvky anebo mají funkci ochranných povlaků. Tyto ochranné povlaky slouží především k ochraně základního kovu proti korozi. Ochranné vlastnosti závisí na elektrodovém potenciálu základního a povlakového kovu. Má-li povlakový materiál nižší elektrodový potenciál než základní kov, jedná se o anodický galvanický povlak. Jako příklad se může uvést zinkový povlak na železu. Zinek má elektrodový potenciál $-0,763$ V, zatímco železo má $-0,44$ V, tudíž to znamená, že zinek tvoří na železe anodický povlak a poskytuje tak železu katodickou ochranu. Anodické galvanické povlaky mají také regenerační schopnosti. Dále také existují katodické povlaky, u kterých má základní kov elektrodový potenciál nižší než materiál povlaku. Příkladem může být třeba nikl na železe, kde nikl má potenciál $-0,25$ V. U těchto povlaků je třeba dbát na větší tloušťky, aby se zajistila jejich celistvost a nepórovitost, jelikož tyto povlaky podporují korozi základního materiálu. Katodické povlaky tak zajišťují pouze ochranu bariérovou nikoliv i katodickou. [11]

Tabulka 1 Elektrodový potenciál kovů [11]



Prvek	Standardní potenciál E_v [V]
Pt	1,600
Au	1,360
Ag	0,880
Cu	0,337
H	0,000
Pb	-0,126
Sn	-0,136
Ni	-0,250
Cd	-0,403
Fe	-0,440
Cr	-0,740
Zn	-0,763
Mn	-1,100
Ti	-1,630
Al	-1,660
Mg	-2,370

4.3.1 Niklové povlaky

Niklový povlak lze použít buďto jako mezipovlak při chromátování nebo jako finální povlak. Ocelové a hliníkové předměty se mohou niklovat přímo na materiál, avšak se často využívá kombinace niklu a mědi, jelikož samostatný nikl je drahý. Při niklování zinkových předmětů se musí před vytvořením niklového povlaku udělat mezipovlak mědi. Nikl kvůli svým vlastnostem vytváří solidní ochranu a vizuálně hezký i lesklý povrch. Dále jsou také u niklu populární duplexní nebo triplexní povlaky. Jedná se o vyloučení dvou nebo tří niklových povlaků s jinými korozními a mechanickými vlastnostmi. První povlak je více korozně odolný, ale zato méně lesklý, druhý povlak naopak. Tímto se sníží tloušťka kombinovaného povlaku a docílí se tak požadovaných vlastností. [12]

Lze niklovat v různých lázních. Nejběžnější jsou síranové lázně. Samotné síranové lázně se ale nepoužívají. K hlavní složce, kterou je síran nikelnatý (NiSO_4) se přidává minimální množství chloridu nikelnatého (NiCl_2). Tyto lázně pracují při teplotě 50-70 °C s proudovou hustotou 2-6 $\text{A}\cdot\text{dm}^{-2}$. Pomocí síranových lázní lze docílit jemnozrnných a matných povlaků s malým vnitřním pnutí. Lesklost se dá zajistit pomocí různých přísad.

Hlavní výhodou těchto lázní je jednoduchost a snadná údržba. Dále jsou také méně korozivní a levnější než třeba lázně chloridové. [2]

Samotné chloridové lázně jsou také omezené, protože vlastnosti vzniklých povlaků nejsou příliš dobré, za to však dovolují pracovat s vyššími proudovými hustotami (až $15 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$). Pracovní teploty jsou stejné jako u síranových lázních, oproti kterým jsou ale chloridové lázně agresivnější a vytváří křehčí povlaky. S lesklutvornými přísadami dokáží chloridové lázně vyloučit velmi lesklé niklové povlaky. [2]

Mezi starší lázně, kde neklademe takový důraz na kvalitu povlaku patří síranohořečnaté lázně, kde je nositelem kovu síran nikelnatý a síran hořečnatý. Povlaky vyloučené v těchto lázních bývají matné a jemnozrné. [2]

4.3.2 Zinkové povlaky

Vylučování zinkových povlaků se provádí převážně na ocelových předmětech, kde zinek vytváří anodickou ochranu a chrání tak dobře před korozí i v horších atmosférách. Zinkové povlaky se dále pak ještě chromátují či fosfátují a získávají tak výrazně vyšší životnost. Pro vylučování zinku není třeba na předmětech dělat mezivrstvy, což zjednodušuje celkový proces galvanického zinkování. Zinkové povlaky se v průmyslu používají spíše pro antikorozi účinky, avšak se setkáváme i s dekorativním využitím. [12]

V praxi se využívá hned několika různých zinkovacích elektrolytů, díky kterým lze vyloučit jak lesklé, tak i matné povlaky. Mezi často využívané lázně patří kyanidové lázně. Kyanidové lázně jsou sice jedovaté a mají nízký proudový výtěžek, avšak mají vysokou hloubkovou účinnost, tvoří stejnoměrnější povlaky, mají levné vanové zařízení a snadnou regeneraci. [2]

Jako další lze použít bezkyanidové alkalické lázně. V těchto lázních je zinek přítomen ve formě zinečnanu. Oproti kyanidovým lázním však pracují s nižší proudovou hustotou, ale oproti kyselým mají zas větší účinnost hloubkovou. Vytváří relativně matné povlaky, takže pro lesklý povrch jsou třeba přísady. Výhodou těchto lázní je stálost a oproti kyanidovým lázním nejedovatost. [2]

Kyselé lázně se využívají v automatických procesech (pokovování drátů a pásů), jelikož mají vysokou proudovou účinnost a nízkou účinnost hloubkovou. Hlavní složkou je zde síran zinečnatý, kde vodícím roztokem je H_2SO_4 . Modernější je však využívání slabě kyselých lázní, které mohou pokovovat pružiny či zboží ze šedé litiny. [2]

4.3.3 Chromové povlaky

Chromové povlaky se používají, protože chrom, který je vcelku neušlechtilým kovem disponuje jednou důležitou vlastností. Je schopen se velmi snadno pasivovat i při minimálním oxidačním účinku a tím získává korozní odolnost. Chrom je ale špatně smáčivý, což znamená, že odpuzuje vodu a mastnoty. Špatnou odolnost vykazuje pouze proti kyselině chlorovodíkové a horké kyselině sírové. Chromový povlak je vcelku tvrdý, a pokud se usiluje o snížení tvrdosti, je třeba ho žíhat na teplotu 350 °C. Vlastnosti tohoto kovu z něj dělají ideální materiál pro finální povlak jak dekorativní, tak i korozivzdorný. Nízký elektroodvodový potenciál (-0,74) znamená, že na ocelové předmětu vytváří krom bariérové ochrany i ochranu katodickou. [12]

Chromovací lázně mají na rozdíl od ostatních velmi nízkou hloubkovou účinnost a katodický proudový výtěžek. V těchto lázních se využívá nerozpustných olověných anod obsahujících legury (Sb, Sn). Často se tak využívá chrominových anod (Pb legované Ag). Tyto chrominové anody nepasivují a pracují s vyššími proudovými hustotami. Pokud by docházelo k užívání chromových anod, dostával by se chrom do roztoku ve formě trojmocného kationtu Cr^{3+} , který je ve větším množství nežádoucí, jelikož se ve speciálních případech chce chrom šestimocný. Ten lze získat tím, že se do lázně doplňuje oxid chromový CrO_3 , který je obsažen v kyselině chromové H_2CrO_4 . [2]

4.3.4 Další povlaky

Zatím byly jmenovány ty nejčastější kovy pro galvanické povlaky, kterými jsou zinek, chrom a nikl. Mezi další a také vcelku hojné kovy patří cín, měď či kadmium nebo také slitiny jako je třeba mosaz. Dále lze předměty i zlatit nebo stříbřit. [12]

Měděné povlaky se využívají hlavně při niklování, zlacení nebo stříbření jako mezivrstva. Dále se lze také setkat s niklovými povlaky jako samostatnými, které plní funkci dekorativní. Při dekorativních povlacích je však třeba chránit povrch ještě nátěrem kvůli koroznímu vlivu atmosféry. [2] [12]

Cínové povlaky jsou v průmyslu také populární, jelikož má cín solidní korozní odolnost, je nejedovatý, dobře pájitelný a má dobré třecí vlastnosti. Oproti žárovému povlaku má ten galvanický výhodu tvorby libovolně tenkého povlaku. Cín však chrání ocel katodicky je tak třeba dbát na celistvost a nepórovitost povlaku. [2] [12]

Kadmiové povlaky jsou velmi podobné těm zinkovým. Kadmiové povlaky se ale na rozdíl od těch zinkových používají k anodické ochraně mědi a slitin mědi, jelikož

kadmium má vyšší elektrodový potenciál než železo. Kadmiové povlaky mají v přímořských oblastech lepší korozní odolnost než ty zinkové, ale naproti tomu jsou zinkové povlaky odolnější v atmosférách znečištěných sirnými látkami. Kadmiové povlaky mají dále dobré kluzné vlastnosti a dobrou pájitelnost. [2] [12]

Stříbření se používá nejčastěji v elektrotechnice, v bižuterii a při výrobě hudebních nástrojů příborů a nádobí, protože stříbro dodává předmětům lesk. Stříbro je ušlechtilým kovem, který disponuje výbornou korozní odolností a elektrickou vodivostí. Výhodou stříbra je snadné vylučování na oceli, bronzu a zinku. Bohužel má velmi nízkou přilnavost, a tak je nutnost základní materiál předupravit, například mezipovlakem mědi či niklu. [2] [12]

5. Zkoušky galvanických povlaků

Zkoušky nátěrových hmot, vrstev a povlaků jak galvanických, tak organických je velká řada a některé z nich se i často prolínají. U galvanických povlaků se zkouší hlavně přilnavost, otěruvzdornost a ochranu proti korozi. Ke každému druhu bylo vybráno několik běžných zkoušek, které se v praxi používají.

5.1 Zkoušky přilnavosti

Zkoušky přilnavosti (adhezní zkoušky) slouží ke zjištění přilnavosti povlaku k základnímu materiálu. Těchto zkoušek je hned několik a všechny popisuje norma ČSN EN ISO 2819. [13]

5.1.1 Zkouška přilnavosti tepelným šokem

Během této zkoušky se ohřeje pokovený vzorek, který se pak následně ochladí. Princip této zkoušky závisí na rozdílném koeficientu roztažnosti základního materiálu a povlaku. Tudíž lze tuto zkoušku provádět jen v případě, je-li dostatečný rozdíl mezi těmito koeficienty. [13] [14]

Zkouška probíhá tak, že se vzorek ohřeje na teplotu podle toho, o jaký povlak a základní materiál se jedná. Teploty pro různé kombinace jsou popsány v *tabulce 2*. Tuto teplotu je třeba držet v rozmezí ± 10 °C. Doba pobytu vzorků v peci se pohybuje v rozmezí 0,5 – 1 h. Pro kovy podléhající silné oxidaci je třeba vzorek ohřívat v inertní nebo redukční atmosféře nebo ve vhodné kapalině. Po ohřátí se vzorek neprodleně zchladí ponořením do vody o pokojové teplotě (cca 20 °C). [13]

Tabulka 2 Teploty pro zkoušku tepelným šokem [13]

Základní materiál	Povlakový kov	
	Cr, Ni, Ni + Cr, Cu, Sn – Ni	Sn
Ocel	300 °C	150 °C
Slitiny Zn	150 °C	150 °C
Cu a její slitiny	250 °C	150 °C
Al a jeho slitiny	220 °C	150 °C

5.1.2 Vrypová zkouška

Vrypová zkouška, známá také jako scratch test je vcelku jednoduchá a účinná zkušební metoda přilnavosti. Principem této metody je plynulé rostoucí zatěžování indentoru. Tento indentor je orientován kolmo ke vzorku, který se pohybuje konstantní rychlostí a vytváří se tak ve vzorku vryp. Mezi povlakem a základním materiálem začne vznikat pnutí, které po dosažení kritické hodnoty způsobí prošení povlaku a jeho odtržení od základního materiálu. Této hodnotě se říká kritické zatížení a používá se pro míru adheze povlaku. Vrypová zkouška se také používá na měření tvrdosti povrchu. [13] [15]

5.1.3 Zkouška leštěním

Při této zkoušce dochází k leštění galvanického povlaku. Při této operaci se povlak zpevňuje a absorbuje teplo vzniklé třecími silami mezi povlakem a nástrojem. Pokud je povlak moc tenký, tak se při těchto podmínkách může kvůli nízké adhezi odloupnout. [13]

5.1.4 Zkouška poškrábáním

Zkouška poškrábáním probíhá tak, že zkušební těleso působí na povrch buď konstantní nebo postupně se zvyšující silou. Hodnota adheze je pak udávána kritickou silou L_{C2} . Zkušební těleso je pak popsáno v normě EN 1071. [13]

5.1.5 Zkouška odloupením v tahu

Zkouška odloupením je vhodná pro povlaku o tloušťce menší než 125 μm . Vzorky pocínované oceli nebo z mosazi o rozměru 75x10 mm o tloušťce 0,5 mm. Tento vzorek je pak ohnut do pravého úhlu ve vzdálenosti 10 mm od jednoho okraje. Rovina této kratší strany se připájí k pokovenému dílu tak, že delší strana vzorku je kolmá k povlaku. Poté se následuje tahová zkouška vzniklého pájeného spoje, pokud při této zkoušce dojde k poruše spoje dříve než k odloupení povlaku, tak díl zkouškou prošel. [13] [14]

5.1.6 Zkouška pilování

U této zkoušky je třeba zkušební těleso odříznout, a tak vznikne odhalená hrana bez povlaku. Zkušební těleso se pak upne do svěráku a na řez pomocí hrubého pilníku se piluje pod úhlem cca 45°. Aby povlak v testu uspěl, nesmí se při pilování povlak loupát. Zkouška pilováním není vhodná pro velmi tenké povlaky a pro měkké povlaky jako jsou například zinkové nebo kadmiové. [13] [14]

5.1.7 Zkouška hloubkovým tahem

Zkouška hloubkovým tahem je zkouškou, která zjišťuje přilnavost galvanických povlaků na plechu. Tato metoda nabízí dvě možnosti. Při této zkoušce je pokovený materiál deformován pomocí razidla do přírubové prohlubně. U Erichsenovy zkoušky je pomocí hydrauliky vtlačeno razidlo kulového charakteru s průměrem 20 mm do vzorku rychlostí 0,2-6 mm/s do požadované hloubky. Pokud adheze povlaku dobrá, nebude se povlak odlupovat ani při proražení razidla. [13] [14]

5.1.8 Zkouška podle Rockwell C

U typu zkoušky C je použit diamantový kužel, který proniká do povrchu a je zatíženo silou 15 kp (1 kilopond = 98,1 N). Při odstranění zatížení dochází k delaminaci povlaku a základního materiálu a vytváří stopu. Výsledná adheze je pak vizuálně hodnocena čtyřmi stupni adheze od HF1 do HF4. [13]

5.1.9 Zkouška brokováním

Principem této zkoušky je, že ocelové broky pomocí gravitace či proudění stlačeného vzduchu dopadají na povlak a způsobují jeho deformaci. Pokud bude adheze povlaku nízká začnou se na povlaku vytvářet puchýře.

K testování se nejčastěji používá trubka o průměru 19 mm a délce 150 mm, jako zásobník pro broky o průměru cca 0,75 mm. Broky jsou pak tryskány tlakem 0,07–0,21 MPa. Vzdálenost mezi tryskou a vzorkem se pohybuje mezi 3–12 mm. [13] [14]

5.1.10 Zkouška vinutím

Tento test spočívá ve vinutí drátu nebo pásku okolo trnu. Jednotlivé parametry vzorků, zkušebního trnu a rychlost vinutí mohou být standardizovány, ale nejsou normou přesně dané. Pokud jsou na vzorku při navíjení jakékoliv známky porušení či odlupování povlaku, je brán test za nezdařilý a povlak nemá dostatečnou adhezi. [13]

5.1.11 Tahová zkouška

Pokovený vzorek se upne do zkušebního tahového stroje a nechá se namáhat tahem, dokud nedojde k destrukci vzorku. Poté se vizuálně kontroluje spojení povlaku a základního materiálu v místě lomu. Kontroluje se dále odloupení povlaku u místa lomu. Rozměry vzorku jsou stejné jako u tahové zkoušky popsané normou ČSN EN ISO 6892-1. [13]

5.1.12 Zkouška ohybem

Tato zkouška spočívá v prostém ohýbání vzorku a sledování, jestli se povlak odloupe. Pokud ano je povlak brán jako špatně přilnavý. Zkouška je vhodná pro tenké díly jako jsou plechy, dráty, pružiny atd. Vzorky se zkoušejí čtyřmi podobnými způsoby.

- 1) Vzorek je ohýbán opakovaně o 180° podél osy s průměrem rovným tloušťce vzorku, dokud nedojde k jeho poruše. Poté se zkontroluje, jestli se povlak neloupe.
- 2) Vzorek se ohne o 180° jako v předešlé metodě, ale jen jednou, poté se pod mikroskopem ohnutá část 4x zvětší a zkontroluje se, jestli se povlak neloupe.
- 3) Vzorek se upne do svěráku a ohýbá se, dokud se neporuší poté se vzorek zkontroluje jak v druhé metodě. [13] [14]

5.1.13 Katodová zkouška

Katodová zkouška testuje přilnavost tak, že pokovený předmět se umístí do 5% roztoku hydroxidu sodného (NaOH) o hustotě $\rho = 1,054 \text{ g.ml}^{-1}$ při teplotě 90 °C a proudové hustotě 10 A/dm² po dobu 2 minut (lze také použít 5% H₂SO₄ při teplotě 60 °C). V místech, kde je špatná přilnavost povlaku se začnou tvořit bublinky. To je způsobeno tím, že se z katody uvolňuje vodík, který tak vytváří tlak. Vodík difunduje skrz povlak a hromadí se při nespojitosti mezi povlakem a základním materiálem. [13] [14]

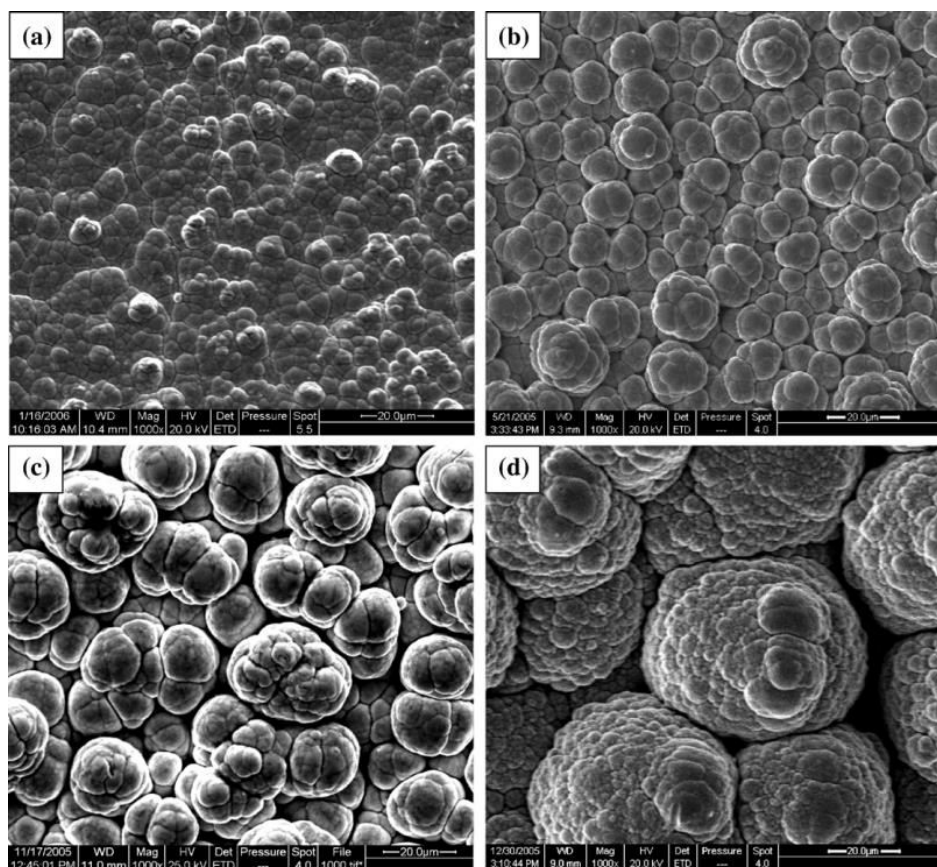
Pokud povlak po 15 minutách od provedení zkoušky neublá, je jeho přilnavost vyhodnocena jako dobrá. Pokud je však povlak málo přilnavý, začnou se na něm tvořit bubliny někdy mezi 5. a 15. minutou. [13] [14]

Metoda je omezena pro povlaky, které jsou schopny propouštět uvolňovaný vodík. Je zejména účinná pro povlaky niklu nebo povlak Ni + Cr, avšak není vhodná pro zinek, olovo, kadmium, cín a měď. [13] [14]

5.2 Zkoušky opotřebení

Zkoušky opotřebení se provádějí, aby se zjistilo, jak povlak ztrácí objem působí-li na něj třecí síla. Tyto zkoušky jsou velmi důležité, jelikož se lze v praxi setkávat často s tím, že jsou dva, či více dílů, u kterých dochází ke vzájemnému kontaktu a následnému opotřebení. Díky těmto zkouškám lze rámcově odhadnout životnost těchto dílů v provozu nebo aspoň porovnat materiály mezi sebou. [16]

Například v Číně v Pekingu v National Key Laboratory for Remanufacturing proběhl experiment, kde pokovovali vzorky niklem technologií tamponování za použití různých proudových hustot. Díky tomu zjistily, že povlaky vytvořené nižší proudovou hustotou mají jednodušší mikrostrukturu, vyšší modul pružnosti a vyšší mikrotvrdost, jak lze vyčíst z obrázku 2.

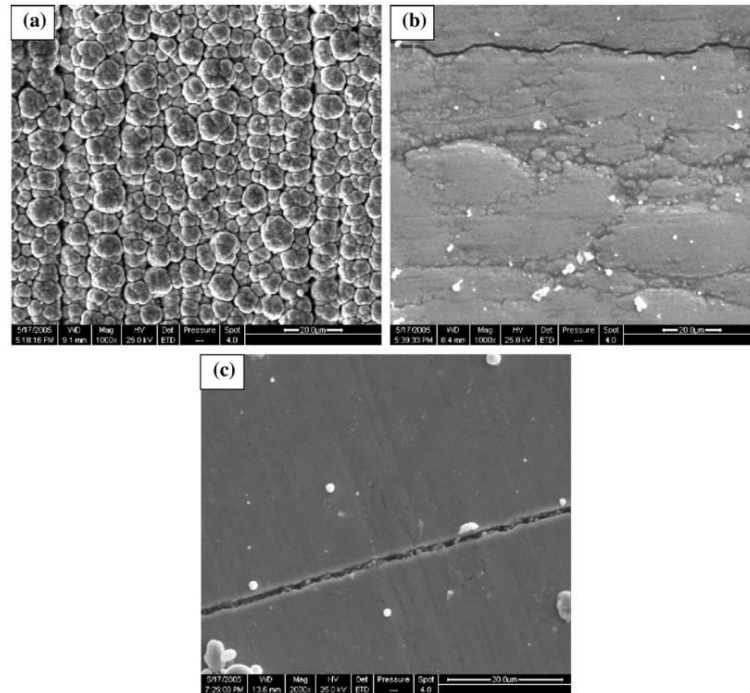


Obrázek 2 Rozdíly mikrostruktury při různých proudových hustotách [17]

Při dosažení kritické relativní rychlosti, nebyl povlak pórovitý. Dále se dá také zvýšením kontaktního tlaku mezi vzorkem a anodou s tamponem zvyšovat hustota a hladkost povrchu. Pokud je však kontaktní tlak moc vysoký vzniká tak veliké vnitřní pnutí

v povlaku a může snadno dojít k jeho prasknutí, jak lze vidět na u varianty (c) a (b) v obrázku 3.

Tímto experimentem zjistili, že je možno správně upravit parametry pokovování tak, aby se mohly zlepšit mechanické a tribologické vlastnosti. [17]

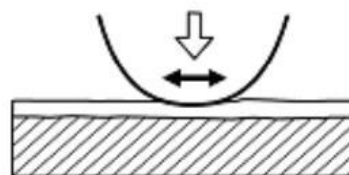


Obrázek 3 Drsnost povrchu při rozdílném kontaktním tlaku [17]

5.2.1 Fretting test

Fretting test je druh zkoušky opotřebení při kterém k pohybu hrotu nebo kuličky pohybující se nízkofrekvenčními kmity simulující vibrace, kterými jsou díly v průmyslu namáhány. Opotřebení frettingem je tedy povrchové porušení, které vzniká tímto působením. Fretting se může definovat jako speciální případ únavového opotřebení povrchu. [18]

Jako finální výstup této zkoušky je průběh koeficientu tření v závislosti na počtu cyklů, opotřebení tělíska a charakter a velikost vytvořené tribologické stopy. [18]



Obrázek 4 Schéma principu fretting testu [18]

5.2.2 Tribologická analýza PIN on DISC

Princip PIN on DISC testu spočívá v tom, že je zkušební těleso tvaru disku. Na jeho povrch je přiloženo tzv. PIN tělísko, které má tvar válečku nebo nerotující kuličky. Předem se stanoví vzdálenost od středu vzorku a zatěžující síla pin tělíska. Disk se pak začne otáčet předem zvolenými otáčkami a provede určený počet cyklů. Tímto procesem vytvoří tělísko na povrchu vzorku stopu, která je pak následně analyzovaná pomocí mikroskopu. Sleduje se tvar dráhy, hloubka a stav okolí stopy. Výsledky testu jsou pak závislé na zvolených parametrech, kterými jsou:

- Zatěžující síla.
- Velikost styčné plochy (závislé na geometrii pin tělíska).
- Relativní rychlost pohybu mezi tělískem a vzorkem.
- Počet cyklů.
- Teplota povrchu vzorku.
- Případné použití maziv.
- Kvalita a stav povrchu vzorku.
- Materiál vzorku. [19]

5.3 Korozní zkoušky

Korozní zkoušky jsou v praxi běžně používané pro srovnání a výběr vhodného materiálu či povrchové úpravy. Pro zjištění těchto informací se používá tzv. zrychlené korozní zkoušky. Tyto zkoušky se provádějí ve speciálních komorách, kde na zkušební vzorky působí uměle vytvořená atmosféra. Tyto atmosféry pracují při zvýšené teplotě a výrazně zvyšuje korozní agresi. Korozní zkoušky nejsou v praxi brány jako konečné, ale spíše jako srovnávací, vždy je pak lepší vybraný materiál nebo povrchovou úpravu vyzkoušet v provozu. Pro korozní zkoušky je hned několik atmosfér, ve kterých se mohou vzorky testovat. [20] [21] [22]

5.3.1 Korozní zkouška oxidem siřičitým ve vlhké atmosféře

Korozní zkouška oxidem siřičitým (SO_2) ve vlhké atmosféře je stanovena normou ČSN EN ISO 22479, která nahrazuje ještě donedávna platnou normu ČSN ISO 6988. Zkušební vzorky se exponují v komoře s vlhkou atmosférou. Oxid siřičitý, který je pak obsažen v atmosféře začne kondenzovat na povrchu vzorku a korozně ho napadat. Objem komory se pohybuje okolo 300 l a vzorky musejí být od sebe dostatečně rozmístěny tak, aby se mezi sebou neovlivňovaly a nechránily před vlivem prostředí. Norma pak předepisuje vzdálenosti

vzorků od sebe a od stěn komory. Délka jednoho zkušebního cyklu je 24 h a teplota v komoře se pohybuje okolo 40 °C. Počet zkušebních cyklů je libovolný, norma však doporučuje 1, 2, 5, 10, 15 nebo 20 cyklů. [20]

5.3.2 Korozní zkouška solnou mlhou

Korozní zkouška solnou mlhou, probíhá v mlze roztoku chloridu sodného (NaCl). Celá tato metoda je popisována v normě ČSN EN ISO 9227. Při použití běžné neutrální solné mlhy je pracovní teplota 35 ° ± 2 °C. Obsah chloridu sodného v roztoku je 50 ± 5 g.l⁻¹. Doba trvání zkoušky je stanovená pro daný materiál. Doporučené doby zkoušky jsou 2, 6, 24, 48, 96, 168, 240, 480, 720 a 1 008 h. [21]

5.3.3 Korozní zkouška v kondenzační komoře

Při korozní zkoušce v kondenzační komoře je vzorek vystaven působení kondenzaci vodních par za zvýšené teploty. Korozní zkoušku v kondenzační komoře popisuje norma ČSN 03 8131. V prostoru komory během zkoušky se musí dodržovat teplota 35 ° ± 2 °C a 100% relativní vlhkost. Jeden zkušební cyklus trvá 24 h. Norma doporučuje počet zkušebních cyklů z řady: 1, 2, 3, 7, 10, 14, 16, 21, 28 a dále násobky 7. [22]

6. Technologie tamponování

Technologie tamponování, známé občas jako selektivní galvanické pokovování je speciální technikou elektrolytického pokovování. Při této metodě není katoda s anodou ponořena v elektrolytu jako u běžného galvanického pokovování. Jako katoda je zapojen pokovovaný materiál a anoda je konstruována v držáku a je obalena tzv. tampónem, ve kterém je nasáklý elektrolyt zvoleného povlaku. V tomto případě je elektrolyt nositelem iontů povlakového kovu. Tento tampon je většinou z polyesteru (dacronu), bavlny nebo jiného savého materiálu. Tato technologie nachází uplatnění zejména při opravování poškozených povlaků, jelikož oproti klasickému ponoru opravujeme jen postiženou část. Nebo tuto technologii také lze použít k pokovení jen určité části materiálu, a ne celého předmětu. Dále se dá také využít pro rozměrné díly, které by bylo těžké umístit do lázně s elektrolytem. Hlavní nevýhodou je však to, že tato technologie není vhodná pro pokovování špatně dostupných míst. [23] [24] [25]

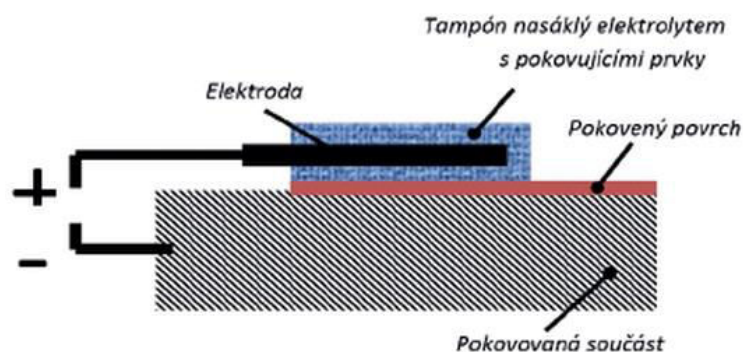
6.1 Historie tamponování

V minulosti se technologie tamponování používala pouze k opravě vadných a poškozených povlaků. V počátcích vypadalo pokovení pomocí tamponu jako svařování. Anodou se pohybovalo po poškozené části povlaku jako při svařování a vadná část se zacelila. Jelikož byla tato technologie teprve počátcích, tak nebyly výsledné povlaky dosti kvalitní a technologové ještě úplně nevěděli jaké pracovní podmínky jsou ideální. Tím vznikaly levné a nekvalitní povlaky. [25]

Úplně první anody se dělaly rozpustné z kovů obalených pouhým hadrem. Z toho se pak brzy přešlo na nerozpustné anody, jak je známo dnes. [26]

6.2 Princip tamponování

Tvorba povlaku probíhá tak, že anoda setká se základním materiálem (katodou). Tím se uzavře elektrický stejnosměrný obvod a na povrchu materiálu se začne z elektrolytu tvořit povlak zvoleného kovu. V průběhu procesu je však třeba doplňovat elektrolyt v tampónu, to lze v případě použití pro opravy lze dělat ručně, pokud by se měla výroba automatizovat, byl by třeba zajistit přívod elektrolytu přímo do tampónu pomocí čerpadla. [23]



Obrázek 5 Schéma tamponování [24]

Při tamponovém galvanickém pokovování se musí hlídat korigovat určité parametry jako je proudová hustota, u které se při zvyšující hodnotě zjemňuje mikrostruktura povrchu. Dále také závisí na přítlačné síle tamponu k pokovovanému vzorku, protože zvyšující se síla sice zajistí méně drsný povrch, avšak se zvyšují vnitřní pnutí v povlaku. Rychlost pohybu anody bude určovat tloušťku povlaku vytvořeného touto technologií. [17]

6.2.1 Zařízení

Anoda

Běžným materiálem anody je grafit. Grafit se dá jednoduše opracovávat do různých tvarů a libovolných velikostí. Je však třeba předejít tomu, aby nedošlo ke kontaminaci uhlíkových anod zinkem nebo mědí. Vyšší obsah čistého uhlíku znamená vyšší odolnost vůči vnikání nečistot. Mezi další materiály používané k výrobě anod patří tantal, platinovaný titan a slitiny platiny. Jako nevhodná se ukázala nerezová ocel, u které dochází k degradaci při vlivu chloridů a dalších chemikálií. Rozpustné anody jsou neefektivní kvůli intenzivní anodové polarizaci. [26]

Zdroj napětí

Většina operací při tamponování pracuje uvnitř rozsahu napětí 8-30 V. To znamená, že je nutné mít regulovatelný zdroj v tomto rozsahu. Při tamponování proud kolísá mezi nulou maximem, jelikož dochází ke střídavému přikládání a odkládání anody k povrchu pokovovaného materiálu. Zdroj by také měl být opatřen bezpečnostním vypínačem, který při poruše či zkratu okamžitě přeruší elektrický proud. Tímto opatřením se chrání nejen obsluha pracoviště, ale i pokovovaný díl. [26]

Kontrola zdroje probíhá tak, že při procesu se zaznamenávají hodnoty na voltmetru, případně se mohou sledovat i hodnoty proudu na ampérmetru. Je třeba také brát v potaz to, že doba potřebná k vytvoření požadované tloušťky závisí na poměru času průchodu proudu a doplňování elektrolytu. [26]

Elektrolyt

Elektrolyty u tamponování mají mnohem vyšší obsah kovové složky než u běžného ponoru do lázně. Tento vysoký obsah je nutný k tomu, aby bylo umožněno dosáhnout vysokých rychlostí pokovování. Díky vysoké rychlosti dochází k rychlému vyčerpání kovových iontů z relativně malého množství roztoku, který je obsažen v tamponu obaleného kolem anody. Kvůli tomu je třeba elektrolyt průběžně doplňovat, což se dělá v praxi automaticky pomocí čerpadla. [26] [27]

6.2.2 Druhy elektrolytů

Elektrolyty pro tamponování se obecně dělí na roztoky a gely. Jediná výhoda gelu oproti roztoku je ta, že u gelu se znatelně snižuje riziko znečištění okolních ploch elektrolytem nebo zatečení korozně agresivního elektrolytu na nežádoucí místa. Kvalita povlaku, kterou pak lze dosáhnout pomocí gelu či roztoku stejná. [27]

6.2.3 Výhody a nevýhody tamponování

V praxi se s technologií tamponování lze setkat, protože je tato technologie využívána na opravy galvanických povlaků anebo nahrazuje klasické galvanické pokovování ponorem do lázně. Zde je několik výhod a nevýhod této technologie, které mohou pomoci při rozhodování, jestli chceme tamponování použít, či nikoli. [26]

Výhody

- Zařízení pro tamponování je kompaktní a přenosné. Lze ho přesunout k dílu bez potřeby rozebírání procesní sestavy.
- Není potřeba složitých předúprav povrchu, stačí aby byl povrch dostatečně čistý. Toho lze dosáhnout broušením a čištěním v rozpouštědlech.
- Jelikož díl neponořujeme do lázně, tak se výrazně nezahřívá. Při občasném zahřátí se jeho teplota může pohybovat nad 55 °C.
- Tuto technologii lze použít pro většinu kovů a slitin. Na běžně používaných materiálech jako je ocel, litina, hliník, měď, zinek či chrom mají povlaky vyrobené tamponem vynikající přilnavost. Problémem mohou být kovy jako titan a tantal.
- Tloušťku vytvořeného povlaku lze kontrolovat. Lze pokovovat i hůře opracované díly bez potřeby upravení.
- Vhodné pro rozměrné díly.
- Nižší spotřeba elektrické energie.
- Nízká vodíková křehkost vytvořené vrstvy.
- Při pokovování je elektrolyt obsažen pouze v tamponu, což znamená, že jeho spotřeba je nízká. [26] [27] [28]

Nevýhody

- I když lze mít pokovovací rychlost výrazně vyšší než u ponoru do lázně, stále se jedná o pomalý proces oproti žárovému ponoru/nástříku.
- Takto vytvořené povlaky mají dosti omezenou tvrdost a nelze je použít pro účely vyžadující vysokou odolnost proti opotřebení. Nejtvrdší povlaky mají tvrdost cca 54 HRC.
- Technologie není vhodná pro tvarově složité díly obsahující dutiny.

- Cena elektrolytu je dražší než u klasického galvanického pokovení, kvůli vysokým koncentracím kovových solí v elektrolytu. Což znamená, že složitý tvar dílu není úplně vhodný pro tamponování. Složitost znamená větší plochu a tím i více potřebného elektrolytu. Pak také záleží na tloušťce povlaku.
- Materiál tamponu je běžně bavlna. Problém bavlny je, že má nízkou pevnost a rychle se opotřebovává, Vlákná se pak lámou a začleňují se do vznikajícího povlaku. Dále také materiál musí být odolný vůči elektrolytu, kterým je zásaditého či kyselého charakteru. [28] [26]

Z výše uvedeného lze usoudit, že pokud se hodlá technologie tamponování používat na vytváření povlaků, tak je třeba se zamyslet nad tím, jak rozměrný a tvarově náročný díl je a jaká tvrdost a přilnavost se požaduje. [26] [28]

6.2.4 Vlastnosti vytvořeného povlaku

Povlaky vzniklé tamponováním se nanášejí rychleji než při ponořování do lázně, což vyvolává spekulace ohledně kvality povrchu. Zprvu byla kvalita tamponování o dost nižší, ale postupem času se zařízení zdokonalovala tak, že jsou kvality obou metod dost srovnatelné. [28]

Adheze

Přilnavost u tamponování je téměř srovnatelná s ponorem v lázni u mnoha materiálů. Podobné adheze povlaku se dosáhne u oceli, litiny, mědi a niklu. Omezenou adhezi dosahuje u obtížně pokovitelných materiálů jako je titan, wolfram nebo tantal. [28]

Většina hodnocení adheze byla provedena pomocí destruktivních testů jako jsou dlátové nebo ohybové zkoušky. Což znamená, že přilnavost a soudružnost povlaků vytvořených tamponováním je přibližně stejná jako kohezní pevnost základního materiálu. [28]

Tvrdost

Tvrdost různých povlaků vzniklých tamponováním nebo ponorem do lázně se od sebe liší. Hodnoty naměřeny metodou podle Vickerse jsou v tabulce 3. Ve většině případů je tvrdost povlaků vytvořených tamponováním nižší nebo podobná s povlaky vytvořenými ponorem do lázně. Zajímavé ale je, že hodnoty pro zlato a kobalt jsou u tamponování znatelně vyšší než u ponoru. [28]

Tabulka 3 Porovnání hodnot tvrdosti tamponování a ponoru do lázně [28]

Materiál povlaku	Ponor do lázně [HV]	Tamponování [HV]
Kadmium	30-50	20-27
Chrom	280-1200	580-780
Kobalt	180-440	510
Měď	53-350	140-210
Zlato	40-100	140-150
Olovo	4-20	7
Nikl	150-760	280-580
Palladium	85-450	375
Rhodium	550-1000	800
Stříbro	42-190	70-140
Cín	4-15	7
Zinek	35-125	40-54

Vodíková křehkost

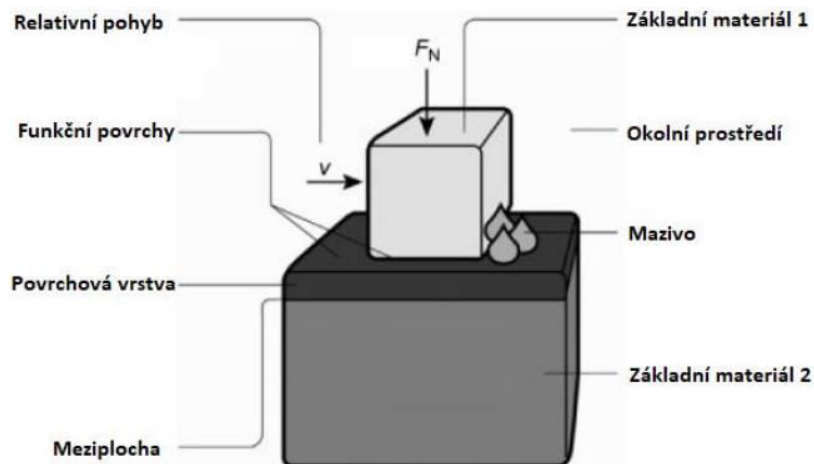
Získané studie říkají, že u technologie tamponování dochází pouze k nízké vodíkové křehkosti základního materiálu. [28]

7. Tribologie

Tribologie je raným vědeckým oborem, který se zabývá studiem a popisem tření, dále mazáním a opotřebením funkčních dvojic. Tribologie zkoumá jak na sebe při vzájemném kontaktu a pohybu působí dvě plochy. Silové působení těchto ploch se nazývá tření a je to vlastně pasivní odpor proti pohybu. Nejdůležitějším úkolem tohoto oboru je vývoj vhodných maziv, prodloužení životnosti a snížení, či zamezení opotřebením povrchu. Poznatky získané tribologií se využívají při volbě vhodných materiálů pro výrobu strojních součástí. U galvanického pokovování nás pak zajímá tribologie vzniklých povlaků. [29] [30]

7.1 Tribologický systém

Tribologický systém je tvořen dvěma tělesy a jejich stykovými plochami, látkou, která se mezi nimi nachází a blízkým okolím těchto těles. Tyto systémy se dělí na přírodní a umělé. Přírodní je například lidský kloub nebo kořen rostliny. Umělé jsou pak ty, co jsou vytvořeny člověkem jako například dvě spolu zabírající ozubená kola. [30] [31]



Obrázek 6 Tribologický systém [31]

7.2 Význam tribologie

Důležitý význam má tribologie v ekonomické stránce. Jelikož tření má vliv a opotřebení strojů, nástrojů a zařízení, tudíž i na jejich životnost, je třeba dbát na zlepšování tribologických podmínek. S tribologií se musí počítat od návrhu, konstrukci a výrobu stroje až po jeho montáž a údržbu. Jinými slovy, když se s přítomností tření nebude počítat už od začátku, může to v budoucnu přijít na velké náklady za rychlé opotřebení nástrojů a strojních součástí. Krom nemalých peněžních částek vydaných za opravy a nové nástroje, je taky důležitý čas opravy, díky kterému je výroba pozastavena či omezena. [32]

Mezi nejčastější chyby, ke kterým dochází z tribologického hlediska patří:

- Špatná volba funkční dvojice.
- Špatná konstrukční řešení.
- Špatná volba maziva a jeho metoda mazání.
- Ignorování vlivu okolí (teplo, prach, znečištění).

Cílem tribologie je pak, co největší omezení těchto vad způsobených vlivem třecích sil. [32]

8. Experimentální část

Experimentální část práce se zabývá nanesením niklového povlaku na vzorky tří druhů metodou galvanického pokovování ponorem i technologií tampónování. Celkem bylo každou metodou pokoveno 11 vzorků pro následné testy. Dále pak byla zkoumána vylučovací rychlost v závislosti na čase, drsnost vzorků před a po pokovení, zkouška ohybem, zkouška tepelným šokem a tribologická zkouška. Následně pak probíhalo vyhodnocení získaných dat a porovnání obou metod.

8.1 Použitá zařízení pro pokovení vzorků

Pro zhotovení vzorků byla použita odmašťovací ultrazvuková vana K-2LE, laboratorní zdroj Manson SPS 9602, zařízení pro galvanické pokovování ponorem, tampónovací anoda a vodiče.

8.1.1 Odmašťovací ultrazvuková vana K-2LE

Prvním krokem před samotným pokovováním byly předúpravy povrchu. Pro odmašťování byla použita ultrazvuková odmašťovací vana K-2LE. Vana je z nerezové oceli a je vybavená digitálním časovačem s možností nastavit délku operace na 0-90 min. Dále je vana vybavena termostatem s nastavitelnou hodnotou mezi 20-80 °C. Objem vany je 2 l s výškou hladiny 80 mm. [33]



Obrázek 7 Laboratorní ultrazvuková vana K-2LE [33]

8.1.2 Laboratorní zdroj Manson SPS9602

Jako zdroj napětí byl použit laboratorní stejnosměrný zdroj Manson SPS9602. Proud zařízení je možno v průběhu regulovat a nastavit tak potřebné parametry proudu a napětí. Příklad je vybaven dvěma digitálními ukazateli proudu a napětí, konektory pro kabely barevně oddělenými podle orientace +/- . Konektory jsou 4 (dva páry) jeden pár na čelní a druhý na zadní straně. Výstupní regulovatelné napětí je 1-30 V a proud 0-3 A. [34]



Obrázek 8 Laboratorní zdroj Manson SPS9602 [34]

8.1.3 Stanoviště galvanického pokovování

Samotné zařízení pro galvanické pokovování se skládá ze zdroje napětí, nádoby, niklových anod a měděného nosníku pro zavěšení katody. Anody jsou zapojené kladně červeným kabelem. Nosník, na kterém byly pomocí měděného drátu zavěšeny vzorky byl zapojen záporně černým kabelem jako katoda. Byl použit elektrolyt na bázi chloridu nikelnatého



Obrázek 9 Pokovovací lázeň

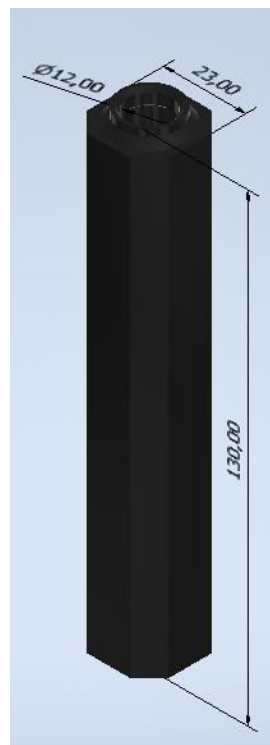
8.1.4 Anoda pro lokální galvanické pokovování

Anodu pro lokální galvanické pokovování, respektive pokovovací zařízení bylo třeba zkonstruovat. Skládá se z grafitové tyče, izolace, obalu elektrody a tampónu.

Obal elektrody se vymodeloval v programu Autodesk Inventor 2022 a nechal se zhotovit na 3D tiskárně Ender 3 V2.



Obrázek 10 3D Tiskárna Ender 3 V2 [35]



Obrázek 11 Model obalu

Po vytisknutí obalu se elektroda složila. Byla zvolena uhlíková elektroda, protože při pokovování nezanechává ve vytvořeném povlaku vměstky. Grafitová tyč se nařezala na požadovanou délku a obalila se izolací.



Obrázek 12 Grafitová tyč

Grafitová tyč obalená izolací se pak vložila do obalu a pracovní část elektrody se obalila tampónem, který byl vyroben z kuchyňské houby.



Obrázek 13 Anoda pro lokální galvanické pokovování

8.2 Zhotovení vzorků

8.2.1 Ponorem

Vzorky byly už mechanicky předupravené, tudíž bylo potřeba před jejich pokovením provést jen chemické předúpravy. Prvním krokem bylo ultrazvukové odmaštění. Odmašťování vzorků probíhalo v laboratorní ultrazvukové vaně K-2LE při teplotě 50 °C po dobu 5 minut. Pro odmašťování byl použit vhodný 10% roztok Star 75 PN. Následně probíhal oplach v demineralizované vodě po dobu 1 minuty. Po oplachu následovalo dekapování v kyselině sírové (H_2SO_4) po dobu 2 minut. Poté následoval opět oplach po stejnou dobu.

Po chemické předúpravě neprodleně následovalo galvanické pokovování. Uspořádání pokovovací lázně je popsáno výše. Pro pokovení byl použit elektrolyt na bázi chloridu nikelnatého (NiCl_2). Před celým procesem bylo třeba vypočítat plochy vzorků a následně pak ze zvolené proudové hustoty dopočítat proud při pokovování a čas.

Výpočet potřebného proudu a doby pokovení

Potřebný proud se spočítá takto:

$$I = J \cdot S \quad (3)$$

Kde:

I je potřebný proud [A]

J je proudová hustota [$\text{A} \cdot \text{dm}^{-1}$]

S je plocha vzorku [dm^2]

Proudová hustota byla zvolena $2 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-1}$. Plocha pro vzorek na obrázku 14 (vzorek A) byla $0,9264 \text{ dm}^2$, pro vzorek na obrázku 15 (vzorek B) byla $0,1257 \text{ dm}^2$ a pro vzorek C z obrázku 16 byla plocha $0,1348 \text{ dm}^2$. Poté bylo dosazeno do vzorce a určil se proud pro vzorek A:

$$I = 2 \cdot 0,9264 = 1,85 \text{ A}$$

Jelikož laboratorní zdroj nabízí pouze desetinné hodnoty proudu, tak bylo zvoleno 1,9 A. Stejným výpočtem se stanovil proud pro vzorek B, který činil 0,25 A.

Jelikož jsem pokovoval 3 vzorky B naráz, tak byl pracovní proud stanoven na 0,8 A. Poté se stanovil i proud pro vzorek C, který činil 0,27 A. Vzorky C se pokovovaly 2 naráz, tudíž byl pracovní proud stanoven na 0,6 A.



Obrázek 14 Vzorek A



Obrázek 15 Vzorek B



Obrázek 16 Vzorek C

Vzorek A byl použit pro ohybovou zkoušku, základním materiálem je nízkouhlíková ocel připravena dle standardu ASTM D 609. Vzorek B pro zkoušku tepelným šokem, základním materiálem je ocel S235JRG1. Vzorek C byl využit na tribologickou zkoušku a je z oceli 52100, která je popsána normou ASTM ocel 100Cr6 je ekvivalentem k této oceli.

Výpočet doby pokovení

Výpočet se stanovuje dle níže popsaného vzorce

$$t_{exp} = \frac{m}{7,8 \cdot I} \quad (4)$$

Kde:

t_{exp} je expoziční čas [min]

m je hmotnost naneseného kovu [mg]

I je potřebný proud [A]

Pro provedení výpočtu je třeba ještě určit hmotnost naneseného kovu, která se spočítá jako:

$$m = S \cdot 0,38 \cdot t \quad (5)$$

Kde:

S je plocha vzorku [cm^2]

t je tloušťka povlaku [μm]

Zvolená tloušťka povlaku všech vzorků byla 15 μm . Plocha vzorku A byla převedena, takže činila 92,64 cm^2 . Poté se dosadilo do vzorce pro výpočet doby pokovení.

$$t_{exp} = \frac{m}{7,8 \cdot 1,9} = \frac{92,64 \cdot 0,38 \cdot 15}{7,8 \cdot 1,9} = 35,6 \text{ min}$$

Obdobný způsobem se stanovila doba pokovení i pro vzorek B $t_{exp} = 34,4 \text{ min}$ a pro vzorek C $t_{exp} = 32,8 \text{ min}$.

Vzorky pro určení vylučovací rychlosti se pokovovaly po dobu 5, 10 a 20 minut. Pro vylučovací rychlost byl použit vzorek typu A. Pro ohybovou zkoušku byly zhotoveny 3 vzorky typu A, pro zkoušku tepelným šokem byly zhotoveny 3 vzorky typu B a pro tribologickou zkoušku 4 vzorky typu C.

8.2.2 Lokálně

Pro lokální pokovení (tampónem) byly zvoleny stejné předúpravy povrchu jako při galvanickém pokovování ponorem. Pro jednotlivé operace se dodržoval stejný čas jako u předchozí metody pokovování.

Při pokovování se vyrobená anoda zapojila kladně (červeným kabelem) a pokovovaná součást záporně (černým kabelem). Před pokovením byl tampón krátce namočen v elektrolytu a po kontaktu tampónu s katodou, a dodání proudu, začal pokovovací proces. Jako elektrolyt byl použit vysokorychlostní elektrolyt na bázi chloridu nikelnatého.



Obrázek 17 Vysokorychlostní elektrolyt na bázi chloridu nikelnatého [36]

U vysokorychlostní elektrolytu vhodného pro lokální pokovování se jako hlavní pracovní parametr neurčuje proud, nýbrž napětí. Z prospektu k elektrolytu bylo vyčteno, že pro niklové povlaky se doporučované napětí pohybuje mezi 4,5 – 9,5 V. Byla zvolena střední hodnota, která je 7 V. Pro zvolené napětí odpovídal proud 0,2 A.

Co se týče vzorků, tak byly pokoveny stejné typy vzorku při stejném množství. Doba pokovení jedné strany činila 2 minuty. Vzorky byly pokovovány z obou stran. Jediná změna proběhla u vzorku na vylučovací rychlost, kde byl pro všechny 3 časy použit jeden vzorek. Pokovovací časy u vylučovací rychlosti byly voleny na 1, 2 a 3 minuty.

8.3 Vylučovací rychlost

Prvním zkoumaným parametrem byla vylučovací rychlost obou metod. Podmínky u obou metod byly voleny tak, aby došlo k vytvoření plynulého a nepoškozeného povlaku. Pro galvanické pokovování ponorem se pracovalo s proudovou hustotou $2 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$. Při vyšších proudových hustotách docházelo ke špatnému vylučování povlaku na vzorku. U tampónování se pracovalo s napětím 7 V, což je doporučovaná hodnota pro používaný elektrolyt.

Pro měření tloušťky povlaku se použil tloušťkoměr Universal Leptoskop od firmy Karl Deutsch a měřicí sonda FeN. U každého vzorku bylo naměřeno 12 hodnot s tím, že horní a dolní hodnota tloušťky se vyškrtla z měření. Tloušťkoměr je vybaven dvěma měřicími sondami, Fe sondou pro měření nemagnetických vrstev na magnetizovatelné oceli a FeN sondou pro měření elektricky nevodivých vrstev na neželezných kovech. Zařízení obsahovalo i kalibry pro korektní nastavení přístroje. [37]



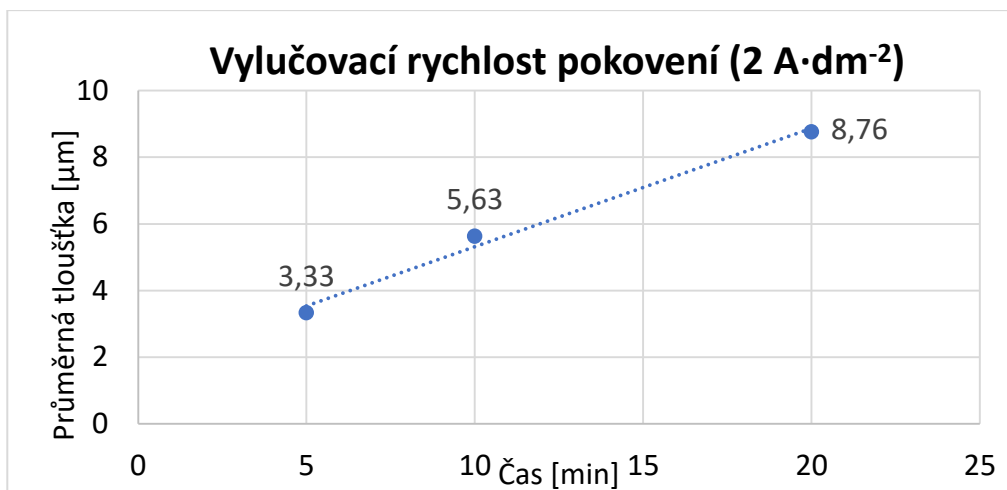
Obrázek 18 Tloušťkoměr Universal Leptoskop s Fe, FeN sondou a kalibry [37]

8.3.1 Vylučovací rychlost galvanického pokovování ponorem

První byla měřená rychlost u galvanického pokovování ponorem. Časy pokovování byly 5, 10 a 20 minut. Použitá proudová hustota byla $2 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$. Výsledné hodnoty jsou vidět v tabulce a grafu níže.

Tabulka 4 Tloušťky povlaku v závislosti na čase pokovování

Č. m./Čas [min]	Tloušťka povlaku [μm]		
	5	10	20
1	3	4,7	7,7
2	3,5	4,4	6,8
3	3,3	6,1	8,7
4	3,5	6,1	8,7
5	3,4	4,9	7,5
6	3	6,5	10,3
7	3,4	5,3	10,3
8	3,5	6,5	8,2
9	3,2	6,1	8,2
10	3,5	5,7	11,2
Průměr	3,33	5,63	8,76



Graf 1 Vylučovací rychlost galvanického pokovení ponorem

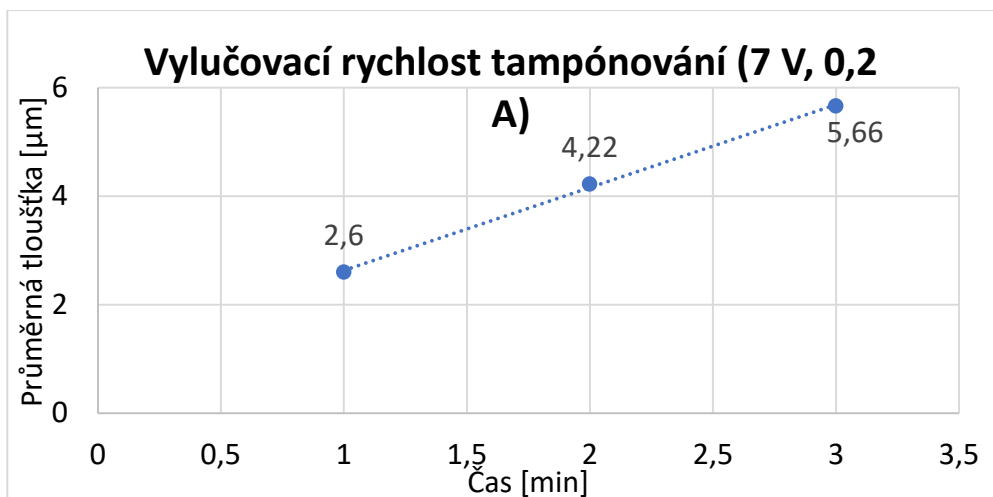
Z grafu 1 lze vyčíst, že vylučovací rychlost je zpočátku rychlejší, závislost je téměř lineární v závislosti na čase. Naměřené hodnoty přibližně odpovídají teoretickým výpočtům, jelikož pro dosažení tloušťky 15 μm při proudové hustotě 2 A·dm⁻² se počítalo, že čas nanesení povlaku bude 35,6 min. U času 20 min máme tloušťku 8,76 μm, což je o cca 1 μm více než polovina stejně tak jako čas pokovení.

8.3.2 Vylučovací rychlost lokálního pokovení

Dále byla určena vylučovací rychlost u tampónování za použití vysokorychlostního elektrolytu, který se pro tuto technologii používá. Sledované tloušťky povlaku byly určeny pro časy 1, 2, 3 minuty. Stejně jak u předchozí metody naměřená data jdou vidět v tabulce a grafu dále.

Tabulka 5 Tloušťky povlaku v závislosti na čase lokálního pokovování

Č. m./Čas [min]	Tloušťka povlaku [μm]		
	1	2	3
1	2,6	3,9	6,1
2	2,3	3,8	6,4
3	2,6	4,1	5,1
4	2,6	4,3	5,7
5	2,7	4,5	5,7
6	2,7	3,9	6,5
7	2,6	4,1	4,9
8	2,9	4,8	5,6
9	2,7	5	5,2
10	2,3	3,8	5,4
Průměr	2,6	4,22	5,66



Graf 2 Vylučovací rychlost tampónování za použití vysokorychlostního elektrolytu

Z grafu lze vyčíst že vylučovací rychlost u lokálního pokovování je lineární při malých tloušťkách. Vylučovací rychlost při vyšších tloušťkách se nezkoumala.

Když se porovná tabulka 4 a tabulka 5, tak si lze všimnout, že tloušťka povlaku, která se vyloučila za dobu 10 minut u ponoru lze dosáhnout u lokálního pokovení za využití vysokorychlostního elektrolytu za pouhé 3 minuty. Nevýhodou tohoto elektrolytu je však dostupnost a cena.

8.4 Drsnosti povrchu

Drsnosti povrchů byly měřeny pomocí drsnoměru Mitutoyo SJ-210. Sledoval jsem hodnoty Ra, Rq a Rz na nepokovených i pokovených vzorcích pro obě metody pokovování. Měřeno bylo vždycky 12 hodnot na každém vzorku s tím, že se pak horní a dolní extrém vyškrtnul. [38]



Obrázek 19 Drsnoměr Mitutoyo SJ-210 [38]

Naměřené hodnoty byly zpracovány a jsou vidět v tabulkách 6, 7, 8 níže.

Tabulka 6 Hodnoty drsností nepokovených vzorků

Vzorek A před pokovením [μm]									
Č. měř.	Vzorek 1			Vzorek 2			Vzorek 3		
	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
1	0,216	0,303	2,002	0,381	0,462	2,078	0,189	0,312	1,732
2	0,321	0,388	1,857	0,235	0,291	1,511	0,232	0,271	2,003
3	0,206	0,258	1,455	0,23	0,277	1,474	0,284	0,299	1,954
4	0,196	0,253	1,276	0,219	0,27	1,438	0,229	0,302	1,448
5	0,393	0,477	2,175	0,288	0,356	1,636	0,276	0,311	1,632
6	0,4	0,478	1,341	0,33	0,398	2,025	0,286	0,432	1,851
7	0,202	0,269	1,506	0,168	0,208	1,136	0,325	0,289	1,922
8	0,213	0,265	2,253	0,365	0,458	2,083	0,324	0,333	2,082
9	0,185	0,235	1,356	0,153	0,214	1,111	0,245	0,325	1,432
10	0,283	0,226	1,528	0,184	0,203	1,306	0,275	0,414	1,668
Průměr	0,262	0,315	1,675	0,255	0,314	1,580	0,267	0,329	1,772

Tabulka 7 Hodnoty drsností vzorků pokovených ponorem

Vzorek A pokovený ponorem									
Č. měř.	Vzorek 1			Vzorek 2			Vzorek 3		
	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
1	0,995	1,241	5,697	0,981	1,447	4,895	1,245	1,336	6,021
2	1,174	1,444	6,528	0,935	1,154	5,523	1,265	1,392	6,124
3	1,165	1,467	6,824	0,998	1,366	6,002	1,198	1,224	6,312
4	1,08	1,368	6,545	1,214	1,271	5,541	1,175	1,401	5,847
5	1,137	1,353	5,217	0,978	1,358	5,236	1,291	1,158	6,017
6	0,94	1,185	5,296	0,934	1,118	5,364	1,102	1,127	5,726
7	0,979	1,193	5,754	1,127	1,201	5,132	1,147	1,324	5,425
8	0,93	1,113	4,462	0,976	1,105	4,997	1,203	1,421	6,117
9	0,96	1,156	4,972	1,163	1,225	6,124	1,158	1,276	6,66
10	0,958	1,175	5,091	1,172	1,193	5,987	1,142	1,382	6,214
Průměr	1,032	1,270	5,639	1,048	1,244	5,480	1,193	1,304	6,046

Tabulka 8 Hodnoty vzorků pokovených lokálně

Vzorek A pokovený lokálně									
Č. měř.	Vzorek 1			Vzorek 2			Vzorek 3		
	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
1	0,295	0,436	3,194	0,381	0,511	3,025	0,29	0,498	1,985
2	0,265	0,541	2,777	0,354	0,432	3	0,286	0,478	2,616
3	0,308	0,474	3,004	0,299	0,487	3,114	0,274	0,485	3,154
4	0,337	0,441	2,913	0,302	0,501	3,066	0,315	0,466	3,054
5	0,284	0,462	2,556	0,346	0,522	2,915	0,325	0,441	2,918
6	0,279	0,385	2,319	0,311	0,498	2,871	0,288	0,502	2,557
7	0,326	0,393	3,186	0,374	0,4	3,141	0,243	0,523	2,851
8	0,294	0,457	3,216	0,311	0,432	3,594	0,322	0,513	2,659
9	0,277	0,474	2,359	0,321	0,444	3,017	0,301	0,485	3,114
10	0,358	0,4	3,041	0,289	0,526	2,999	0,288	0,421	3,214
Průměr	0,302	0,446	2,857	0,329	0,475	3,074	0,293	0,481	2,812

Z tabulek lze vyčíst, že drsnost vzniklého povrchu u povlaku vytvořeného galvanickým pokovením ponorem je výrazně vyšší než u povlaku vzniklého tamponováním, což může být způsobeno tím, že při tvorbě povlaku lokální metodou je tampón v přímém kontaktu se vzorkem. Hodnoty naměřené u tampónování jsou jen o malinko vyšší než u povrchu nepokoveného vzorku. Vzorky, u kterých byla zkoumána drsnost byly dále použity na ohybovou zkoušku.

8.5 Ohybová zkouška

První ze dvou zkoušek přilnavosti, které se prováděly byla ohybová zkouška. Principem je vlastně ohnutí vzorku o 180° a následná kontrola soudružnosti povlaku. Zkouška je kompletně popsána v páté kapitole. Zkoušeno bylo celkem 6 vzorků, 3 pro každou pokovovací metodu. Pro ohnutí byl použit speciální přístroj pro ohybovou zkoušku přilnavosti povlaku na kónickém trnu.



Obrázek 20 Přístroj pro ohýbání vzorků

Vzorek se upnul do přístroje z obrázku 19. Následně se ohnul o 180° , kdy se vzorek ohnul o kónický trn. Všechny 6 vzorků prošlo úspěšně zkouškou a nebyla vyzorována žádná porucha soudružnosti povlaku ani odlupování. Na obrázcích níže lze vidět obrázek vzorku obou metod před a po provedení zkoušky.



Obrázek 21 Vzorek před zkouškou



Obrázek 22 Vzorek po zkoušce



Obrázek 23 Vzorek před zkouškou



Obrázek 24 Vzorek po zkoušce

Na obrázku 20 a 21 je vzorek pokovený ponorem a na obrázku 22 a 23 je povlak vyrobený lokálně. U lokálního pokovování byla pokovena pouze část vzorku v okolí ohybu. Na vzorcích lze vidět, že po provedení zkoušky se povlak neodlupuje.

8.6 Zkouška tepelným šokem

Druhou zkouškou přilnavosti je zkouška tepelným šokem. Stejně jako ohybová zkouška je i tato popsána v kapitole 5. Ve stručnosti se jedná o to, že pokovené vzorky se vloží do pece a ohřejí se na danou teplotu po dobu cca 1 hodiny. Vzorky se poté vytáhnou a zchladí buď na vzduchu, anebo ponorem do vody, která má pokojovou teplotu po dobu 5 minut. Po zchlazení se pak zkoumá, jestli povlak nepraskl anebo jestli se neodloupil.

Zkoušeno bylo celkem 6 vzorků, 3 pro každou metodu pokovování. Pro niklové povlaky na oceli je teplota, při které se má vzorek hodinu ohřívat v peci, je 300 °C. Pro ohřátí vzorků se použila pec Elsa-I-30/120 s příkonem 12 kVA a maximální dosažitelnou teplotou 1200 °C.



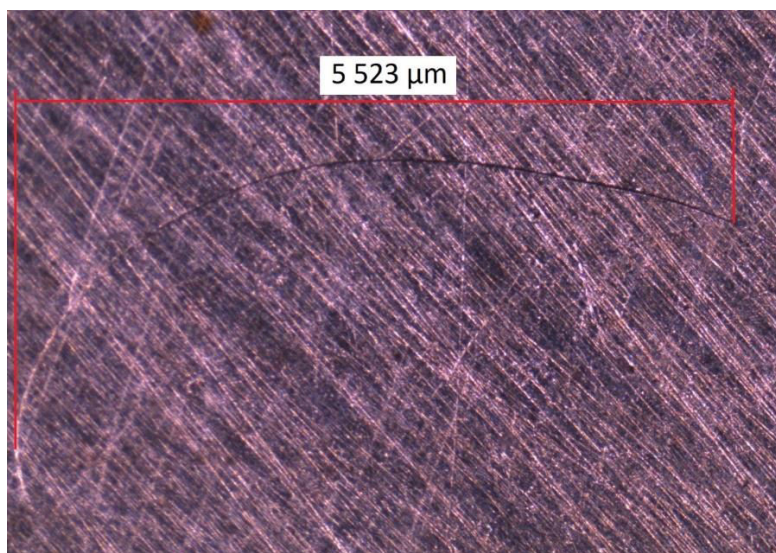
Obrázek 25 Pec Elsa-I-30/120

Po ohřátí a prudkém zchlazení následovalo vyhodnocení zkoušky pomocí mikroskopu Olympus SZ 61. Na povrchu všech vzorků byly zpozorovány praskliny a teplotní koroze, tudíž vzorky neprošly zkouškou a povlak byl vyhodnocen jak nedostatečně kvalitní.

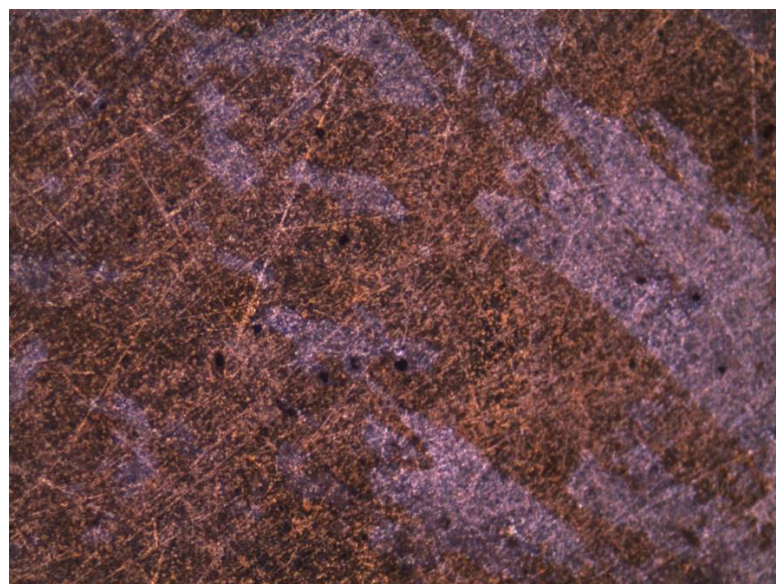
Na obrázku 26 jde vidět rozměrná prasklina povlaku u vzorku, který vznikl metodou galvanického pokovování ponorem. U mikroskopu bylo použito zvětšení až 4,5x. Z obrázku lze usoudit, že za nekvalitou povlaku může stát nedostatečná předúprava povrchu. Dále také měla vliv porezita povlaku, která jde vidět na obrázku 27. Hnědozlaté skvrny na obrázcích 26 a 27 jsou tepelně ovlivněné korozí pobytem vzorků v peci.



Obrázek 26 Mikroskop Olympus SZ 61



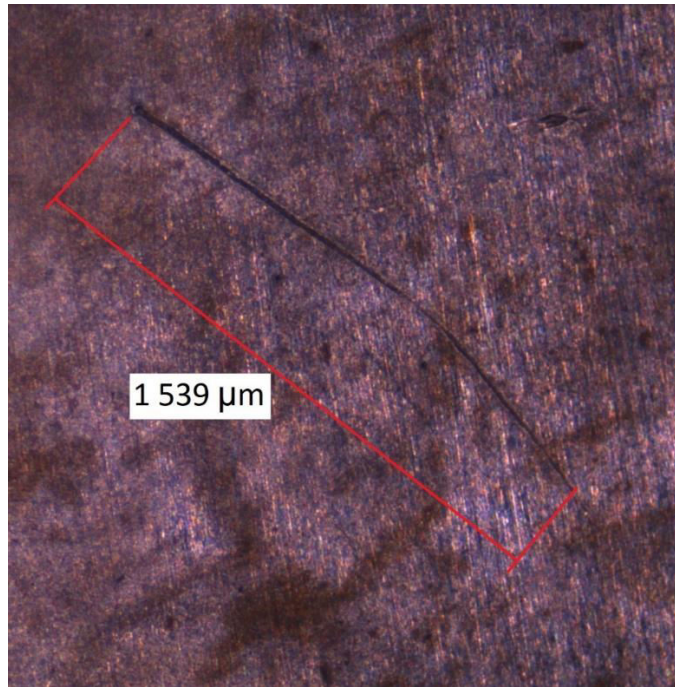
Obrázek 27 Prasklina povlaku vytvořeného ponorem



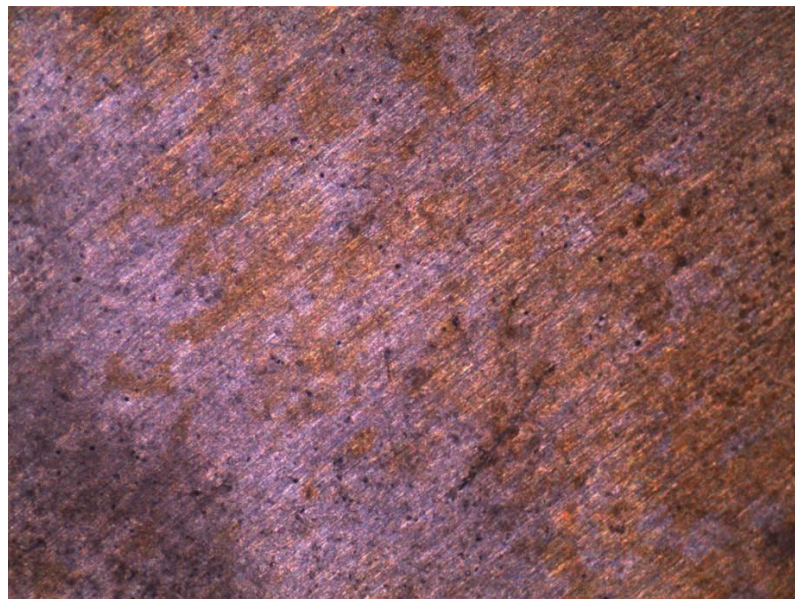
Obrázek 28 Porezita povlaku vytvořeného ponorem

Porezita povlaku na obrázku 27 je znázorněna černými tečkami. Porezita mohla vzniknout pomocí nedostatečných předúprav, nebo díky procesu pokovování, kdy některé povlaky jsou porézní.

Vzorky pokovené lokálně, dopadly obdobně jako vzorky pokovené ponorem. Na obrázku 28 lze vidět, jak porezita povlaku může značně ovlivnit výsledek zkoušky, jelikož je v místě pór lokalizovaná prasklina.



Obrázek 29 Prasklina vedoucí od póry u povlaku zhotoveného lokálně



Obrázek 30 Porezita a teplotní oxidace povlaku zhotoveného lokálně

Ze získaných dat nelze jednoznačně určit, která metoda zaručuje větší přilnavost, jelikož vzorky obou metod neuspěly v testu teplotního šoku. Na druhou stranu ale u vzorků zhotovených ponorem byly praskliny až na jednu výjimku cca 4-5násobně větší a byly bez problémů poznatelné lidským okem. Vzorky zhotovené lokální metodou oproti ponoru měly zas vyšší porezitu.

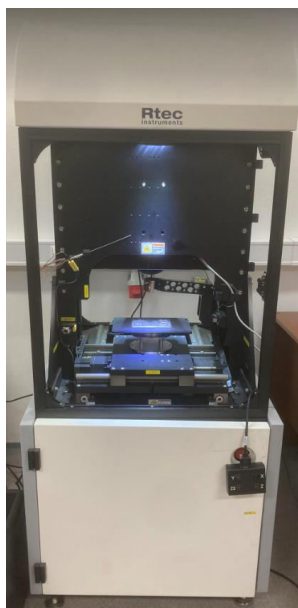
8.7 Tribologická zkouška

Poslední vybranou zkouškou je tribologická zkouška, jejíž princip spočíval v tom, že se vzorek upnul do čelistí, aby byl nehybný. U tohoto testu konal PIN na vzorku lineární vratný pohyb kalenou ocelovou kuličkou o průměru 6,3 mm, která tvořila druhé těleso tribologické dvojice. Dráha byla dlouhá 17 mm a rychlost pohybu PINu s kalenou kuličkou byla $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro zvolené časy zkoušky testu povlaků, byla zvolena nepřímo úměrně různá zatížení. Na každém vzorku bylo vyzkoušeno všech pět kombinací zatížení v závislosti na čase a výsledky obou pokovovacích metod byly spolu porovnávány. Tabulka 9 znázorňuje časy a jejich vybrané zatížení.

Tabulka 9 Parametry zkoušky

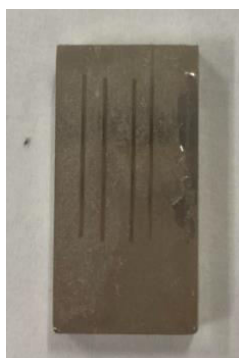
Čas [min]	Zatížení F_z [N]
1	70
2	65
3	60
4	55
5	50

Byl použit tribometr MFT-5000 od firmy Rtech Instruments, jedná se o multifunkční tribometr. Jedná se o tribometr, který dosahuje vysokých rychlostí a je modulární. Tribometr MFT-5000 navíc obsahuje integrovaný 3D profilometr, který umožňuje povrchovou analýzu změn v závislosti na čase. Profilometr zaznamenává v čase koeficient tření, opotřebení, tvrdost, adhezi a další vlastnosti. [39]

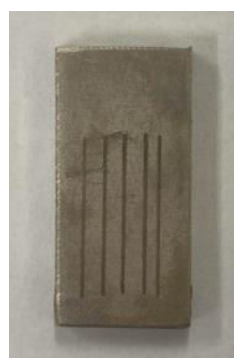


Obrázek 31 Tribometr MFT-5000 [39]

Zkoušeny byly 4 vzorky pro každou metodu pokovení, a pak jeden čistě ocelový nepokovený vzorek. Pro vyhodnocení byly použity pouze 3 vzorky od každé z metod pokovení, jelikož první vzorek byl použit pro stanovení vhodných zkušebních parametrů.



*Obrázek 32 Vzorek 1 po
tribologickém testu – tribometr
MFT-5000*



*Obrázek 33 Vzorek 2 po
tribologickém testu – tribometr
MFT-5000*

Zkoušeny byly 4 vzorky pro každou metodu pokovení, a pak jeden čistě ocelový nepokovený vzorek. Pro vyhodnocení byly použity pouze 3 vzorky od každé z metod pokovení, jelikož první vzorek byl použit pro stanovení vhodných zkušebních parametrů.

Před začátkem a po konci zkoušky se vždy vzorek zvážil, aby se zaznamenala hodnota opotřebení povlaku. Pro zvážení vzorků se použila laboratorní váha Ohaus Explorer Pro

Analytical EP114C. Hmotnosti před a po zkoušce jsou znázorněny v tabulce 10. Každý vzorek jsem vážil 3x a stanovil se pak aritmetický průměr.



Obrázek 34 Laboratorní váha Explorer Pro Analytical EP114C [40]

Tabulka 10 Hmotnosti vzorků zhotovených technologií ponorem a lokálně vážené před a po tribologickém testu a jejich hmotnostní úbytek

č.	Ponorem			Lokálně		
	Před [g]	Po [g]	Δ [g]	Před [g]	Po [g]	Δ [g]
1	13,4792	13,4786	0,0006	11,4832	11,4827	0,0005
2	13,2061	13,2038	0,0023	11,3702	11,37	0,0002
3	13,0871	13,076	0,0111	11,5014	11,5009	0,0005

Z tabulky lze vyvodit, že povlak zhotovený lokálně odolává opotřebení lépe než povlak zhotovený ponorem. Hodnota u vzorku 3 zhotoveného ponorem je výrazně vyšší, jelikož při testu došlo k značnému porušení povlaku a jeho odlupování.



Obrázek 35 Znamky odlupování povlaku na vzorku 1



Obrázek 36 Znamky odlupování povlaku na vzorku 2

Hlavním sledovaným parametrem u tribologické zkoušky byl koeficient tření povlaku. Pomocí softwaru MFT17 se v průběhu zkoušky zaznamenávala třecí síla v opačném směru pohybu kuličky. Pomocí zatěžující síly a síly tření, pak program zaznamenal graf koeficientu tření v závislosti na čase. Koeficient tření se počítá jako:

$$f = \frac{F_x}{F_z} \quad (6)$$

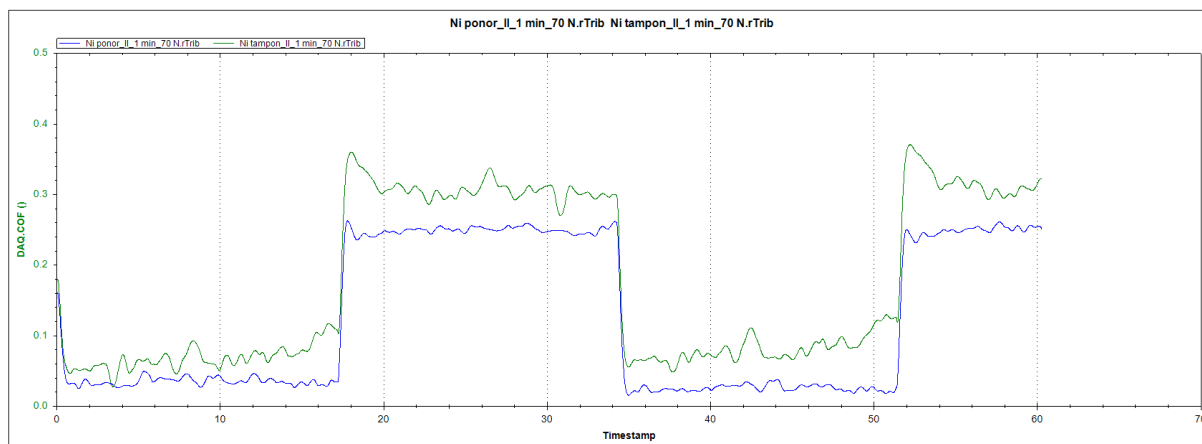
Kde:

f je koeficient tření

F_x je třecí síla [N]

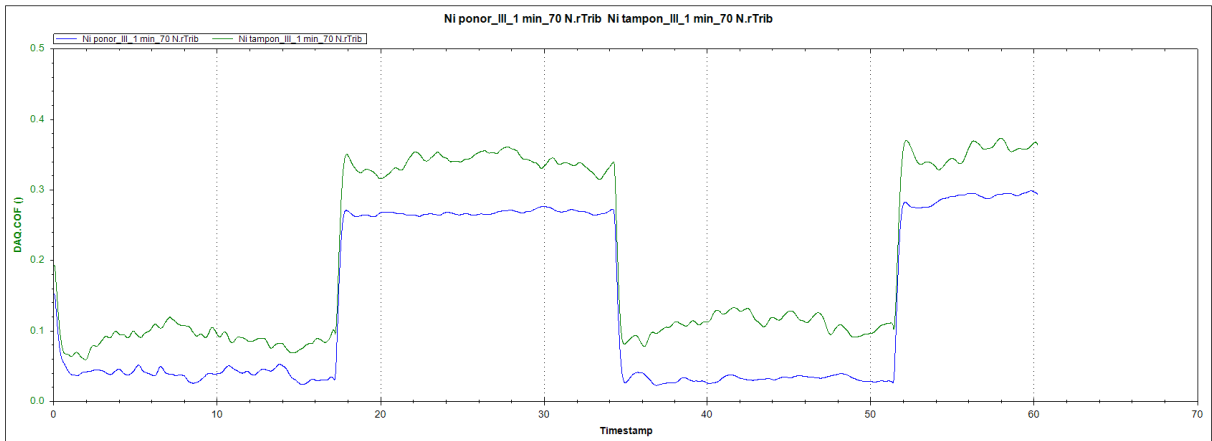
F_z je zatěžující síla [N] [41]

V grafu 3, 4 a 5 lze vidět, že koeficient tření u povlaků zhotovených lokálně je vyšší než u povlaků zhotovených standartní metodou. To se dá jednoznačně říct jen u měření, kdy bylo použito vyššího zatížení (70 N) a krátkého času (1 min). Koeficient tření vzorků pokovených lokálně je znázorněn zeleně, u ponoru modře a u oceli fialově. V grafech je čas znázorněn v sekundách. Koeficient tření nemá jednotky.



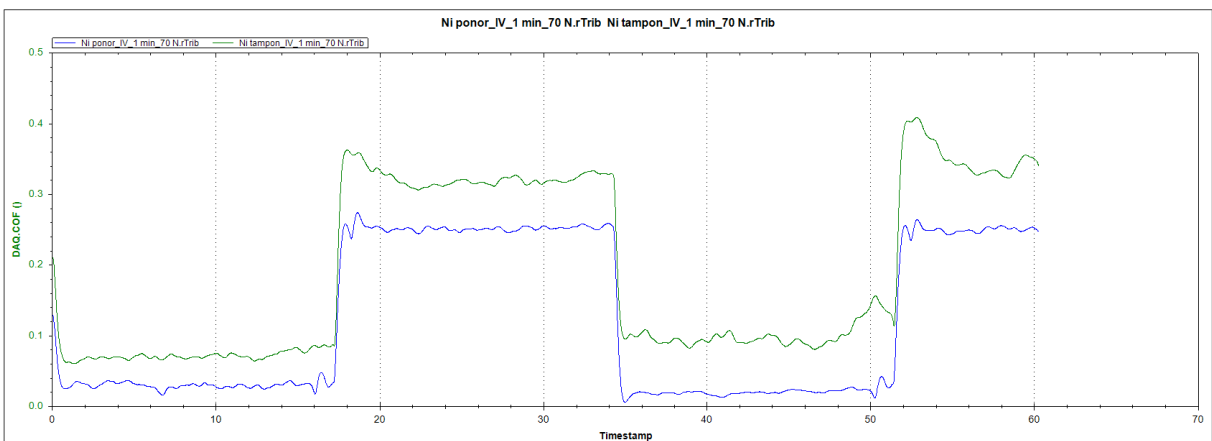
Graf 3 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 1 – pokoven ponorem, a vzorek 1 – pokoven lokálně (1 min, 70 N)

Průměrná hodnota koeficientu tření u technologie ponorem byla 0,1243 se směrodatnou odchylkou 0,1085 a u technologie lokálního pokovování byla průměrná hodnota koeficientu tření 0,1763 se směrodatnou odchylkou 0,1189.



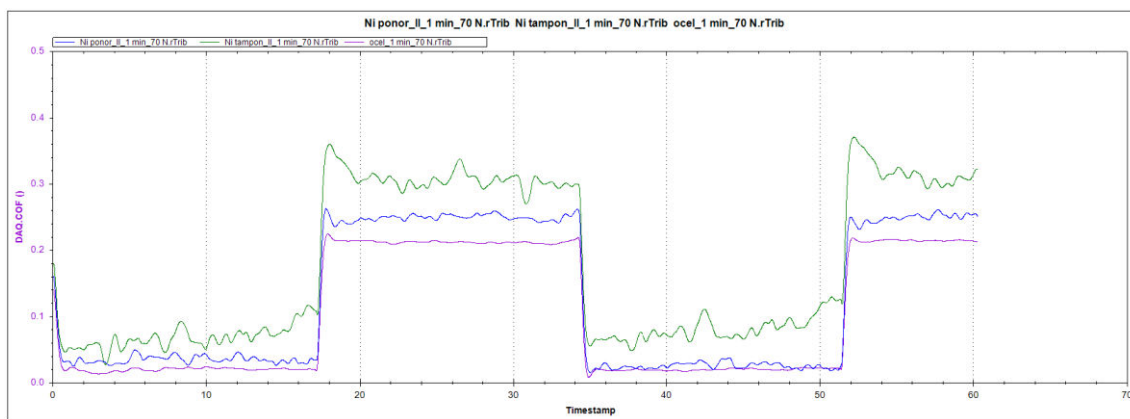
Graf 4 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 2 – pokoven ponorem, a vzorek 2 – pokoven lokálně (1 min, 70 N)

Průměrná hodnota koeficientu tření u technologie ponorem byla 0,1379 se směrodatnou odchylkou 0,1182 a u technologie lokálního pokovování byla průměrná hodnota koeficientu tření 0,2036 se směrodatnou odchylkou 0,122.



Graf 5 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 3 – pokoven ponorem, a vzorek 3 – pokoven lokálně (1 min, 70 N)

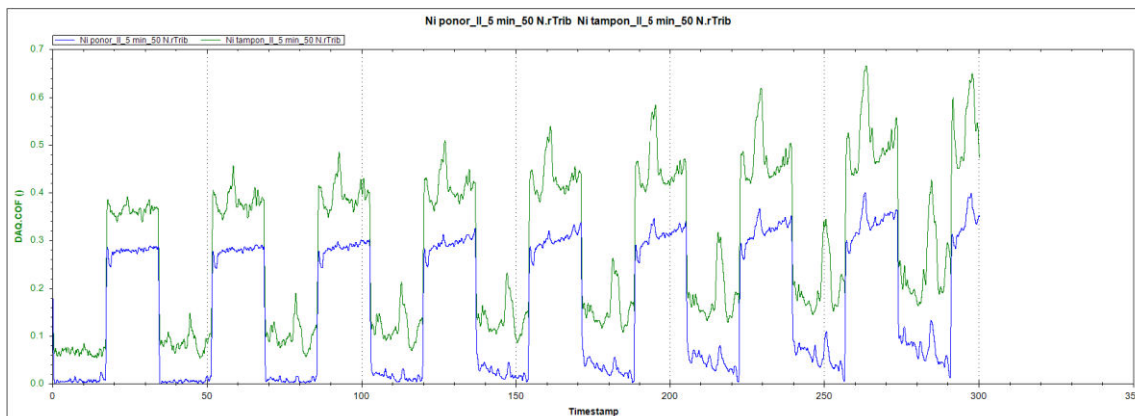
Průměrná hodnota koeficientu tření u technologie ponorem byla 0,1221 se směrodatnou odchylkou 0,1118 a u technologie lokálního pokovování byla průměrná hodnota koeficientu tření 0,1924 se směrodatnou odchylkou 0,1241.



Graf 6 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 1 – pokoven ponorem, vzorek 1 – pokoven lokálně, a nepokovený vzorek (1 min, 70 N)

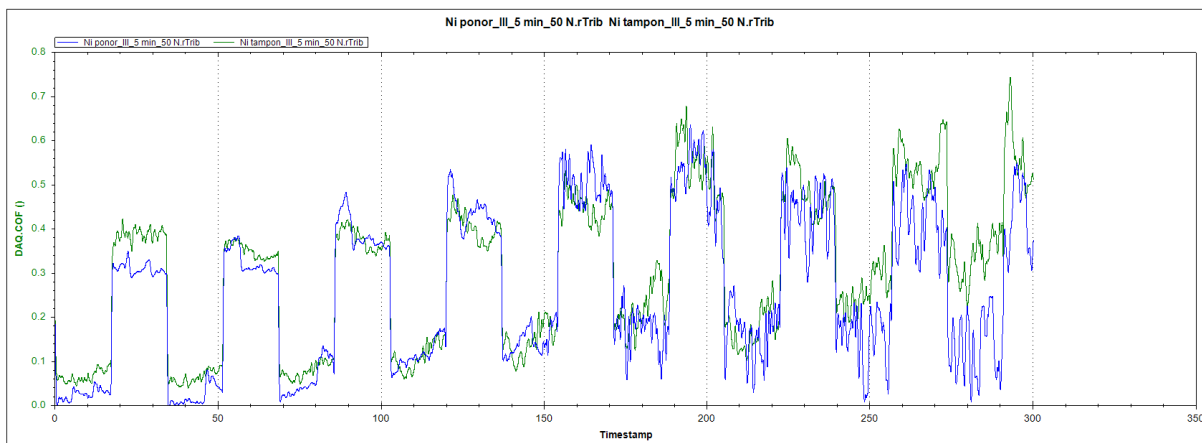
Graf 6 pak znázorňuje porovnání vzorku 1 pokoveného ponorem, vzorku 1 pokoveného lokálně a nepokoveného vzorku, kde lze vidět, že hodnoty pro nepokovený vzorek (ocel) jsou nižší než u niklových povlaků zhotovených oběma metodami. Průměrná hodnota koeficientu tření u nepokoveného vzorku byla 0,1028 se směrodatnou odchylkou 0,0954. Hodnoty oceli byly nižší ve všech případech, což lze vidět v grafech nacházejících se v příloze.

Graf 7 ukazuje, že lokální povlaky mají vyšší koeficient tření i při delším času a nižšímu zatížení. Nelze to však prohlásit za jednoznačné, protože grafy 8 a 9, kde jsou porovnávány další dvojice vzorků, ukazují něco jiného. Z grafu 7 je patrné, že od času cca 120 s došlo k postupnému prodření povlaku vyrobeného lokálně, mohlo dojít i ke tvorbě tzv. „mikrosvarů“. Při prodření na základní materiál se hodnota koeficientu nesnížila na hodnoty odpovídající oceli viz graf 6. Hodnota se koeficientu tření se postupně zvyšuje, protože povrchy tribologické dvojice byly ovlivněny mezi sebou.



Graf 7 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 3 – pokoven ponorem, a vzorek 3 – pokoven lokálně (5 min, 50 N)

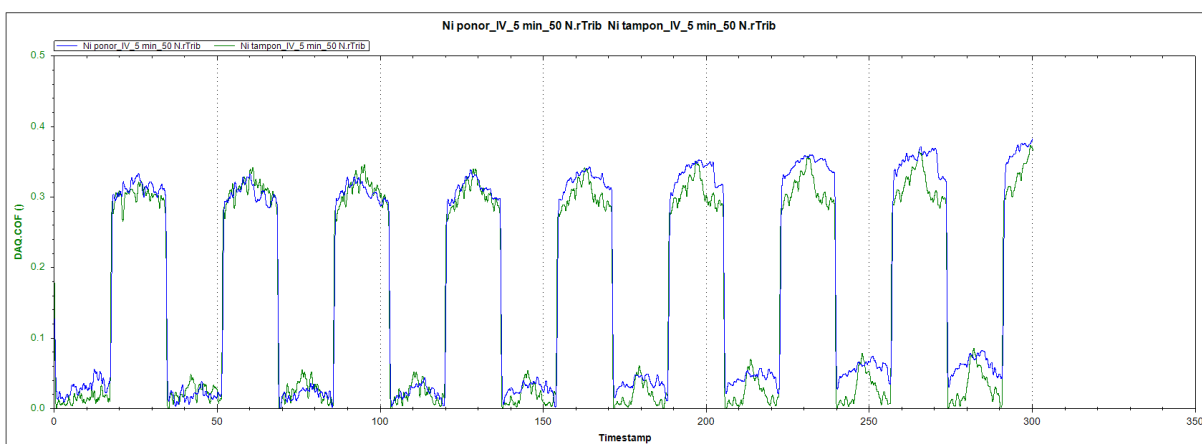
Průměrná hodnota koeficientu tření u technologie ponorem byla 0,1619 se směrodatnou odchylkou 0,1391 a u technologie lokálního pokovování byla průměrná hodnota koeficientu tření 0,2844 se směrodatnou odchylkou 0,1605.



Graf 8 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 2 – pokoven ponorem, a vzorek 2 – pokoven lokálně (5 min, 50 N)

Průměrná hodnota koeficientu tření u technologie ponorem byla 0,2585 se směrodatnou odchylkou 0,1734 a u technologie lokálního pokovování byla průměrná hodnota koeficientu tření 0,3012 se směrodatnou odchylkou 0,1712.

Nejlépe pozorovatelné hodnoty však ukazuje graf 9. Při zkoušení vzorků nedošlo k prodření povlaku, jako u některých měření a lze z grafu vyčíst, že při nízkém zatížení po delší dobu (konkrétně 50 N, 5 min) jsou koeficienty pro obě pokovovací metody přibližně stejné.



Graf 9 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 3 – pokoven ponorem, a vzorek 3 – pokoven lokálně (5 min, 50 N)

Průměrná hodnota koeficientu tření u technologie ponorem byla 0,1744 se směrodatnou odchylkou 0,1456 a u technologie lokálního pokovování byla průměrná hodnota koeficientu tření 0,1605 se směrodatnou odchylkou 0,1437.

Vzhledem k tomu, že při nižším zatížení a delším čase docházelo často k prodření povlaku nebylo porovnání pro prodřené dráhy zaznamenáno do tabulky 11. Byla zaznamenána pouze data naměřená pro časy 1, 2, 3 minuty a jejich odpovídající zatížení 70, 65, 60 N.



Obrázek 37 Prodřené dráhy na vzorku zhotoveného lokálně



Obrázek 38 Prodřené dráhy na vzorku zhotoveného lokálně

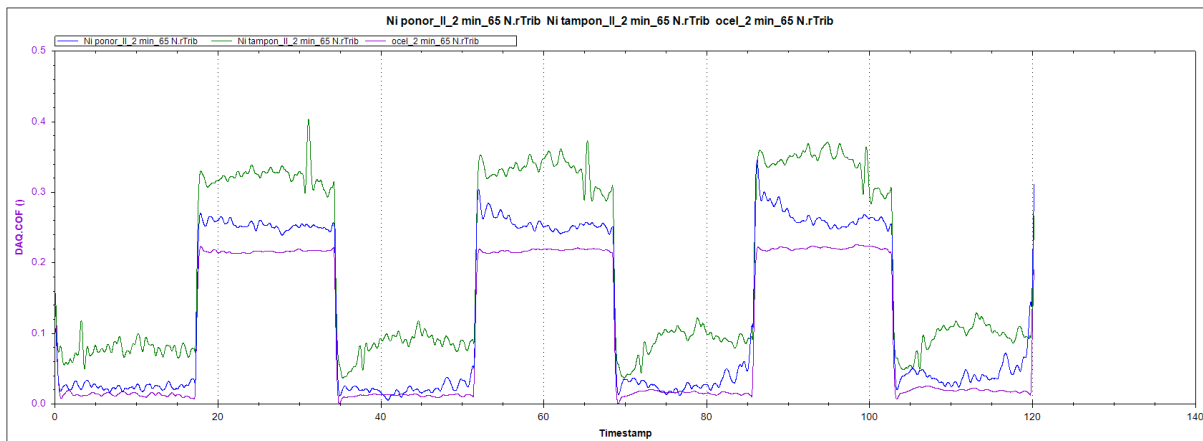
Tabulka 11 Hodnoty koeficientu tření

č.	Hodnoty koeficientu tření f								
	Ponorem			Lokálně			Nepokovený vzorek		
	70 N	65 N	60 N	70 N	65 N	60 N	70 N	65 N	60 N
1	0,1243	0,1284	0,1391	0,1763	0,1897	0,2206	0,1028	0,1017	0,1113
2	0,1379	0,1698	0,2543	0,2036	0,2095	0,2348	-	-	-
3	0,1221	0,1484	0,2223	0,1924	0,2032	0,1595	-	-	-
\bar{x}	0,1281	0,1489	0,2052	0,1908	0,2008	0,2050	0,1028	0,1017	0,1113

Tabulka 12 Směrodatná odchylka koeficientu tření

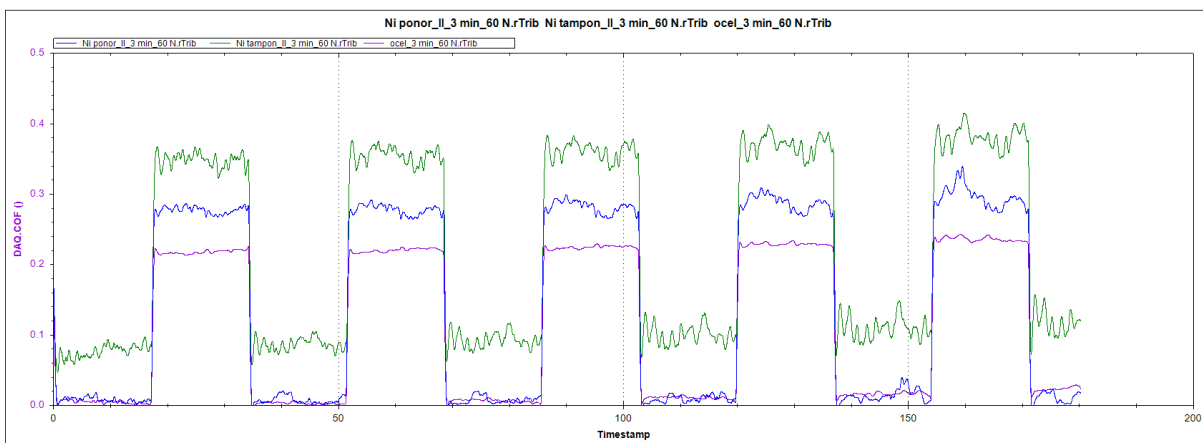
č.	Směrodatná odchylka koeficientu f								
	Ponorem			Lokálně			Nepokovený vzorek		
	70 N	65 N	60 N	70 N	65 N	60 N	70 N	65 N	60 N
1	0,1085	0,1145	0,137	0,1189	0,1234	0,1348	0,0954	0,1003	0,1075
2	0,1182	0,1126	0,1576	0,122	0,1254	0,1531	-	-	-
3	0,1118	0,1155	0,1519	0,1241	0,1238	0,1297	-	-	-

Z tabulek 11 a 12 je názorné, že koeficient tření pro nižší čas a vyšší zatížení je menší pro povlaky vyráběné standartně a ne lokálně. Při zvyšování času a ubírání zatížení se hodnoty dorovnávají. Tabulku ještě podporují dva vybrané grafy 9 a 10, které znázorňují závislost pro časy 2 a 3 min a k nim odpovídající zatížení. Ostatní grafy jsou v příloze.



Graf 10 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 1 – pokoven ponorem, vzorek 1 – pokoven lokálně (2 min, 65 N)

Průměrná hodnota koeficientu tření u technologie ponorem byla 0,1284 se směrodatnou odchylkou 0,1145, u technologie lokálního pokovování byla průměrná hodnota koeficientu tření 0,1897 se směrodatnou odchylkou 0,1234 a u nepokoveného vzorku byla průměrná hodnota koeficientu tření 0,1017 se směrodatnou odchylkou 0,1003.



Graf 11 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 1 – pokoven ponorem, vzorek 1 – pokoven lokálně (3 min, 60 N)

Průměrná hodnota koeficientu tření u technologie ponorem byla 0,1391 se směrodatnou odchylkou 0,1370, u technologie lokálního pokovování byla průměrná

hodnota koeficientu tření 0,1897 se směrodatnou odchylkou 0,1234 a u nepokoveného vzorku byla průměrná hodnota koeficientu tření 0,1113 se směrodatnou odchylkou 0,1075.

Touto tribologickou zkouškou se v uvedených testech pro tyto případy zjistilo, že povlaky zhotovené ponorem do lázně se opotřebují více než ty vytvořené lokálně. Dále se zjistilo, že tampónové povlaky mají vyšší koeficient tření než povlaky vzniklé ponorem.

9. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s problematikou galvanického pokovování a technologie tampónování. Dále popsat a porovnat tyto metody. Práce se zabývala galvanickými povlaky a jejich zkouškami.

Součástí experimentální části bylo zhotovit vzorky pomocí obou zmíněných metod a provést na vzorcích různé zkoušky a zkoumat jejich vlastnosti. Přesněji zkoumat drsnosti povrchu povlaků před a po pokovení, vylučovací rychlosti použitých elektrolytů, adhezní a tribologické vlastnosti. Vzorky byly zkoušeny na tribometru MFT 5000. Drsnosti povrchu u vzorků zhotovených lokálně byly nižší než u vzorků pokovených ponorem do lázně. Vylučovací rychlost u lokálního pokovování byla výrazně vyšší (cca 3,5x). Vylučovací rychlost u tampónování byla vyšší hlavně díky použití vysokorychlostního elektrolytu, který i když ušetří čas, je vykompenzován vyšší cenou a horší dostupností. Obě metody pokovování poskytují dostatečnou přilnavost povlaku, protože všechny vzorky prošly ohybovou zkouškou. Detailnější data však poskytla zkouška tepelným šokem, u které se pak po vyhodnocení zjistilo že povlaky vzniklé tamponováním poskytují o něco lepší přilnavost, i když také měly po zkoušce tepelným šokem defekty. Na druhou stranu byly tyto povlaky poréznější. Data získaná z tribologické zkoušky ukázala, že tamponované povlaky mají vyšší koeficient tření. Při snižování zatěžující síly a prodlužování zkušebního času se koeficienty tření u obou metod podobaly. Tribologická zkouška ukázala nižší přilnavost povlaku u povlaků zhotovených ponorem, protože při dlouhé zkušební době docházelo k prodření i k odlupování povlaku.

Tampónové povlaky poskytují dobré vlastnosti a technologie by se dala použít i pro pokovování celého povrchu, a nejen k opravám a renovaci.

Bibliografie

- [1] KREIBICH, Viktor a Karel HOCH. *Koroze a technologie povrchových úprav*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1984.
- [2] KRAUS, V. *Povrch a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000.
- [3] Omílání. In: *ROC Galvanik* [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://www.roc-galvanik.cz/mechanicke-opracovani-povrchu/omilani/>
- [4] PODJUKLOVÁ, Jitka. *Speciální technologie povrchových úprav I*. Dot. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1997. ISBN 80-707-8235-8.
- [5] SVOBODA, Jakub. *Chemické předúpravy povrchu, Nekovové anorganické povlaky*. Praha.
- [6] Electroplating. In: *LibreTexts* [online]. California, 2020 [cit. 2023-03-24]. 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)
- [7] KUCHAR, Jiří. *Galvanické pokovování neboli elektrolytické pokovování*. ČVUT FS (Praha).
- [8] Introduction: the galvanic process. In: *LEGOR* [online]. Italy, 2022 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://www.legor.com/en-us/plating-lp/37-introduction-the-galvanic-process>
- [9] LA-NIECE, Susan a Paul CRADDOCK. *Metal Plating and Patination: Cultural, technical and historical developments*. Butterworth-Heinemann, 1993. ISBN 9780750616119.
- [10] History of electroplating. In: *Sharrettsplating* [online]. Emigsville [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://www.sharrettsplating.com/blog/history-of-electroplating/>
- [11] KREIBICH, Viktor. *Úvod do problematiky povrchových úprav*. ČVUT FS (Praha).
- [12] RUMIL, Vladimír a Miloslav SOUKUP. *Galvanické pokovování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1981. ISBN 04-614-81.
- [13] ČSN EN ISO 2819. *Kovové povlaky na kovových podkladech - Elektrolytický a chemický vyloučené povlaky - Přehled metod pro zkoušení přilnavosti*. Praha: Český normalizační institut, 2018.

- [14] 12 ways to test the bond strength of a plating. In: *TL Technology* [online]. Huizhou, 2022 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.bltpating.com/info/12-ways-to-test-the-bond-strength-of-a-plating-67387202.html>
- [15] *Tenké vrstvy: Scratch test (vrypová zkouška)*. Západočeská univerzita v Plzni, 2006. Dostupné také z: https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel_1.pdf
- [16] Zkoušky odolnosti proti tření, opotřebení a oděru, pozorování, analýza a měření. In: *Keyence* [online]. Mechelen, Belgie: Keyence [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/ss/products/microscope/vhx-casestudy/chemistry/wear-test.jsp>
- [17] WU, Bin, Bin-shi XU, Bin ZHANG a Shi-yun DONG. *The effects of parameters on the mechanical properties of Ni-based coatings prepared by automatic brush plating technology*. 2007, 8.
- [18] *Fretting test*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006. Dostupné také z: https://www.opi.zcu.cz/fretting_test_fav.pdf
- [19] KŘÍŽ, Antonín. *TRIBOLOGICKÁ ANALÝZA PIN-ON-DISC PIN-ON-DISC TRIBOLOGICAL TEST*. Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-7849-972-5. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/38869688-Tribologicka-analyza-pin-on-disc-pin-on-disc-tribological-test-antonin-kriz.html>
- [20] ČSN EN ISO 22479. *Koroze kovů a slitin - Zkouška oxidem siřičitým ve vlhké atmosféře (s určeným objemem plynu)*. Česká republika, 2023.
- [21] ČSN EN ISO 9227. *Korozní zkoušky v umělých atmosférách - Zkoušky solnou mlhou*. Česká republika, 2017.
- [22] ČSN 03 8131. *Korozní zkouška v kondenzační komoře*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1973.
- [23] *Povrcháři: Lokální galvanické pokovení - tamponování*. 2010, , 21 s. ISSN 1802-9833. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/13569171-Slovo-uvodem-lokalni-galvanicke-pokoveni-tamponovani-jiri-cerman-petr-spatenka-tu-v-liberci-uvod.html>
- [24] Technologie tamponování – lokální galvanické pokovování. In: *Engineering.sk* [online]. [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/3161-technologie-tamponovani-lokalni-galvanicke-pokovovani>

- [25] RUBINSTEIN, Marvin. *Das Tampongalvanisieren* [online]. 1985 [cit. 8.4.2023]. Dostupné z: https://www.leuze-verlag.de/images/stories/virtuemart/product/blick-ins-buch/TampongalvanisierenBd1_Rubinstein_1985_Blick.pdf
- [26] Brush plating. In: JONES, D. a J.K. DENNIS. *Surface Technology*. 12. 12. Birmingham, United Kingdom, 1981, , s. 57-73.
- [27] *Povrcháři*. Praha, 2008, . ISSN 1802-9833. Dostupné také z: http://povrchari.cz/kestazeni/200803_povrchari.pdf
- [28] NORRIS, J. C. Brush plating. In: *Metal finishing* [online]. 1995, 349-350, 352, 354-361 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002605769593384E>
- [29] STACHOWIAK, Gwidon a Andrew BATCHELOR. *Engineering tribology*. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 07-506-7836-4.
- [30] BEČKA, Jan. *Tribologie*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1621-8.
- [31] MANG, Theo, Kirsten BOBZIN a Thorsten BARTLES. *Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication*. 1. Germany: Wiley-VCH, 2011. ISBN 978-3-527-32057-8.
- [32] BLAŠKOVIČ, P., J. BALLA a M. OZIMKO. *Tribológia*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 80-05-00 633-0.
- [33] Laboratorní ultrazvuková vana K-2LE nerezová, elektronické ovládaní. In: *KRAINTEK CZECH, s.r.o.* [online]. [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.kraintek.cz/laboratorni-ultrazvukove-vany-s-elektronickym-ovladanim/laboratorni-ultrazvukova-vana-k-2le-nerezova-elektronicke-ovladani-d92>
- [34] MANSON SPS-9602 laboratorní zdroj 1-30V/0-30A. In: *GM electronic* [online]. [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1505599/manson-sps-9602-laboratorni-zdroj-1-30v-0-30a>
- [35] Ender 3 V2. In: *3DJake* [online]. [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/3d-tiskarny-nahradni-dily-creality/ender-3-v2?sai=8763>
- [36] Bright Nickel Brush Plating Solution. In: *Gateros Plating* [online]. [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.gaterosplating.co.uk/product-page/bright-nickel-brush-plating-solution>

- [37] MĚŘIČ TLOUŠŤKY POVLAKU LEPTOSKOP 2042. In: *Karl Deutsch* [online]. [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.karldeutsch.de/produkt/schichtdickenmessgeraet-leptoskop-2042/>
- [38] Surftest SJ-210 [mm] - Mitutoyo. In: *Mitutoyo* [online]. [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/1292249246959/Surftest%20SJ-210%20%5Bmm%5D/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/178-560-11D/index.xhtml;jsessionid=A14B9E66D7BE56FE791B375F8A807360](https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/1292249246959/Surftest%20SJ-210%20%5Bmm%5D/$catalogue/mitutoyoData/PR/178-560-11D/index.xhtml;jsessionid=A14B9E66D7BE56FE791B375F8A807360)
- [39] MFT-5000 Multi Function Tribometer. In: *Rtech Instruments* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://rtec-instruments.com/tribometer/universal-tribometer/>
- [40] Explorer™ Pro Analytical EP114C - OHAUS. In: *OHAUS* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://us.ohaus.com/en-US/Products/Balances-Scales/Analytical-Balances/Explorer-Pro-Analytical/EP114C>
- [41] Koeficient tření. In: *LPM* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.lpm.cz/cs/kunststofflexikon/gleitkoeffizient>

Seznam tabulek

Tabulka 1 Elektrodotový potenciál kovů [11]	26
Tabulka 2 Teploty pro zkoušku tepelným šokem [13].....	30
Tabulka 3 Porovnání hodnot tvrdosti tamponování a ponoru do lázně [28].....	41
Tabulka 4 Tloušťky povlaku v závislosti na čase pokovování	50
Tabulka 5 Tloušťky povlaku v závislosti na čase lokálního pokovování.....	51
Tabulka 6 Hodnoty drsností nepokovených vzorků	53
Tabulka 7 Hodnoty drsnosti vzorků pokovených ponorem	53
Tabulka 8 Hodnoty vzorků pokovených lokálně.....	53
Tabulka 9 Parametry zkoušky	59
Tabulka 10 Hmotnosti vzorků zhotovených technologií ponorem a lokálně vážené před a po tribologickém testu a jejich hmotnostní úbytek.....	61
Tabulka 11 Hodnoty koeficientu tření.....	66
Tabulka 12 Směrodatná odchylka koeficientu tření.....	66

Seznam obrázků

Obrázek 1 Princip kyselého galvanického zinkování v lázni síranu zinečnatého [7]	22
Obrázek 2 Rozdíly mikrostruktury při různých proudových hustotách [17]	33
Obrázek 3 Drsnost povrchu při rozdílném kontaktním tlaku [17].....	34
Obrázek 4 Schéma principu fretting testu [18]	34
Obrázek 5 Schéma tamponování [24]	37
Obrázek 6 Tribologický systém [31]	42
Obrázek 7 Laboratorní ultrazvuková vana K-2LE [33]	43
Obrázek 8 Laboratorní zdroj Manson SPS9602 [34].....	44
Obrázek 9 Pokovovací lázeň	44
Obrázek 10 3D Tiskárna Ender 3 V2 [35]	45
Obrázek 11 Model obalu	45
Obrázek 12 Grafitová tyč.....	45
Obrázek 13 Anoda pro lokální galvanické pokovování.....	46
Obrázek 14 Vzorek A	47
Obrázek 15 Vzorek B.....	47
Obrázek 16 Vzorek C.....	47
Obrázek 17 Vysokorychlostní elektrolyt na bázi chloridu nikelnatého [36]	48
Obrázek 18 Tloušťkoměr Universal Leptoskop s Fe, FeN sondou a kalibry [37]	49
Obrázek 19 Drsnoměr Mitutoyo SJ-210 [38].....	52
Obrázek 20 Přístroj pro ohýbání vzorků	54
Obrázek 21 Vzorek před zkouškou	54
Obrázek 22 Vzorek po zkoušce	54
Obrázek 23 Vzorek před zkouškou	54
Obrázek 24 Vzorek po zkoušce	54
Obrázek 25 Pec Elsa-I-30/120.....	55
Obrázek 26 Mikroskop Olympus SZ 61.....	56
Obrázek 27 Prasklina povlaku vytvořeného ponorem	56

Obrázek 28 Porezita povlaku vytvořeného ponorem	56
Obrázek 29 Prasklina vedoucí od póry u povlaku zhotoveného lokálně.....	57
Obrázek 30 Porezita a teplotní oxidace povlaku zhotoveného lokálně	57
Obrázek 31 Tribometr MFT-5000 [39].....	59
Obrázek 32 Vzorek 1 po tribologickém testu – tribometr MFT-5000	59
Obrázek 33 Vzorek 2 po tribologickém testu – tribometr MFT-5000	59
Obrázek 34 Laboratorní váha Explorer Pro Analytical EP114C [40]	60
Obrázek 35 Znamky odlupování povlaku na vzorku 1	60
Obrázek 36 Znamky odlupování povlaku na vzorku 2	60
Obrázek 37 Prodřené dráhy na vzorku zhotoveného lokálně	65
Obrázek 38 Prodřené dráhy na vzorku zhotoveného lokálně	65

Seznam grafů

Graf 1 Vylučovací rychlost galvanického pokovení ponorem	51
Graf 2 Vylučovací rychlost tampónování za použití vysokorychlostního elektrolytu	52
Graf 3 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 1 – pokoven ponorem, a vzorek 1 – pokoven lokálně (1 min, 70 N)	62
Graf 4 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 2 – pokoven ponorem, a vzorek 2 – pokoven lokálně (1 min, 70 N)	63
Graf 5 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 3 – pokoven ponorem, a vzorek 3 – pokoven lokálně (1 min, 70 N)	63
Graf 6 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 1 – pokoven ponorem, vzorek 1 – pokoven lokálně, a nepokovený vzorek (1 min, 70 N)	64
Graf 7 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 3 – pokoven ponorem, a vzorek 3 – pokoven lokálně (5 min, 50 N)	64
Graf 8 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 2 – pokoven ponorem, a vzorek 2 – pokoven lokálně (5 min, 50 N)	65
Graf 9 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 3 – pokoven ponorem, a vzorek 3 – pokoven lokálně (5 min, 50 N)	65
Graf 10 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 1 – pokoven ponorem, vzorek 1 – pokoven lokálně (2 min, 65 N)	67
Graf 11 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 1 – pokoven ponorem, vzorek 1 – pokoven lokálně (3 min, 60 N)	67

Přílohy



Příloha 1 Zkušební vzorek pro nastavení zkušebních parametrů pro tribologickou zkoušku



Příloha 2 Vzorek 3 pokoven ponorem, po tribologické zkoušce



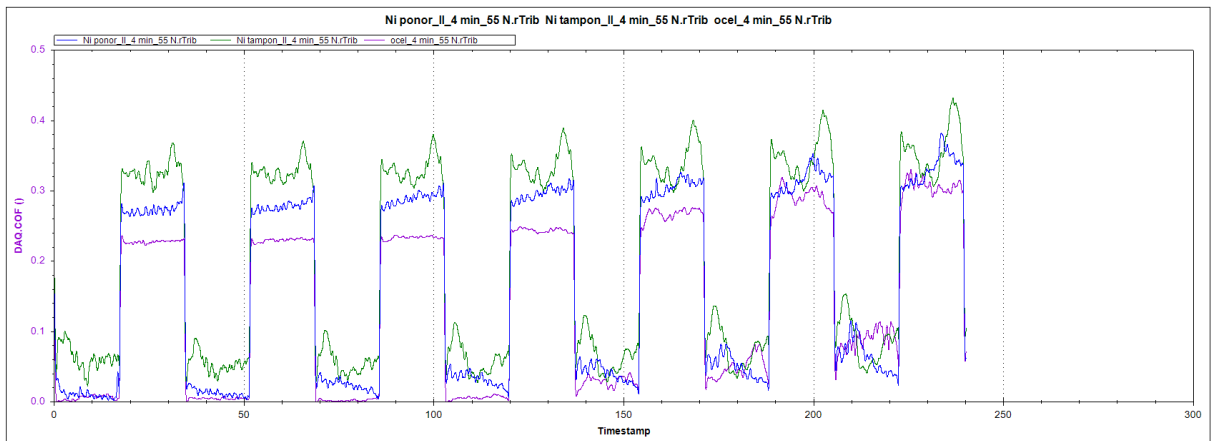
Příloha 3 Zkušební vzorek pro nastavení zkušebních parametrů pro tribologickou zkoušku



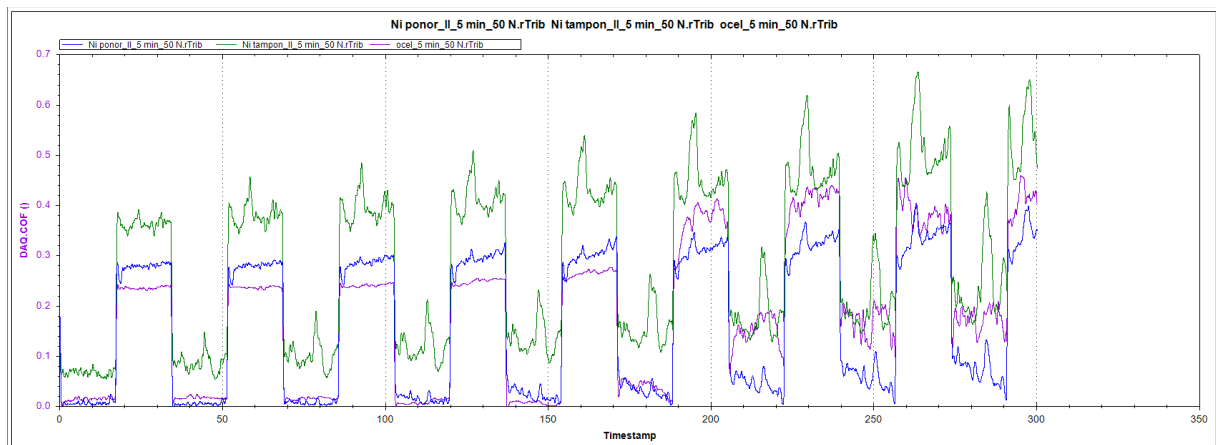
Příloha 4 Vzorek 2 pokoven lokálně, po tribologické zkoušce



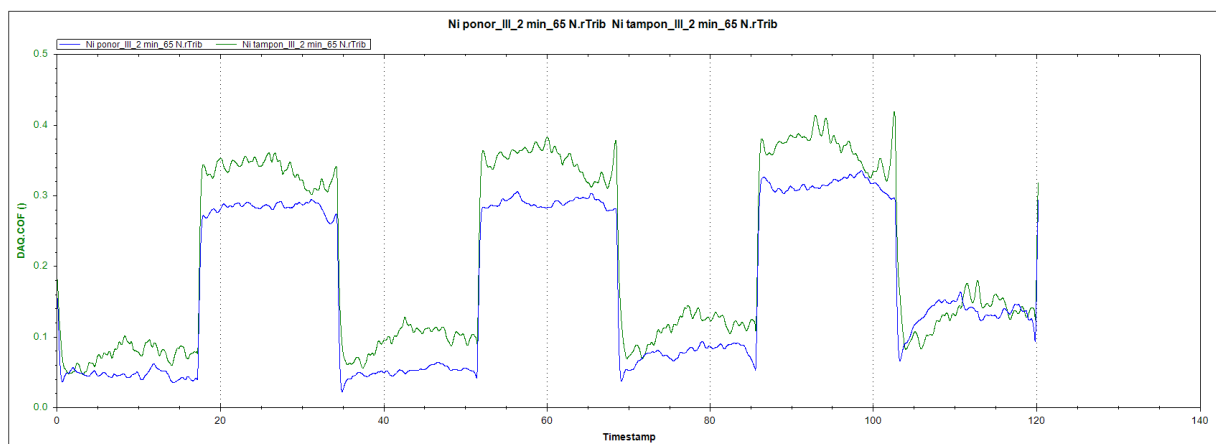
Příloha 5 Vzorek 3 pokoven lokálně, po tribologické zkoušce



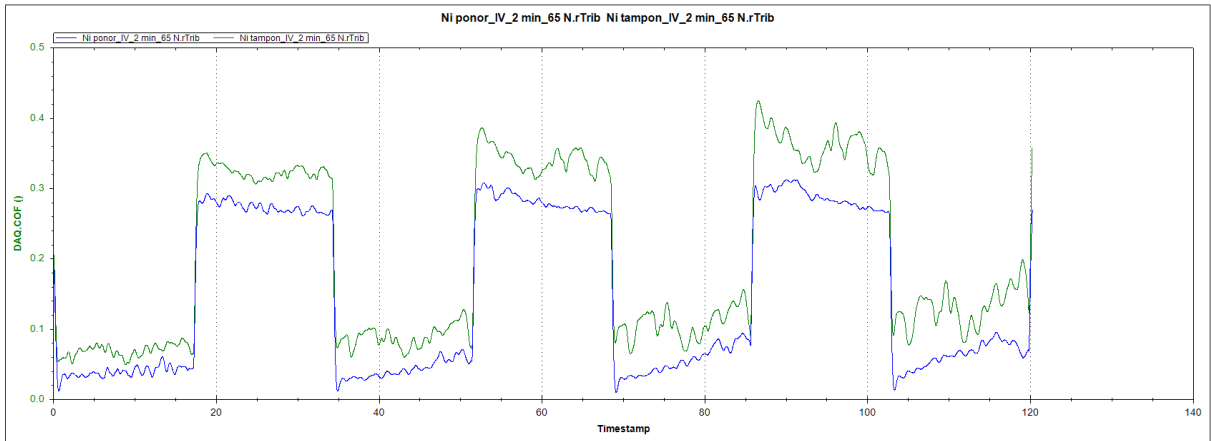
Příloha 6 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 1 – pokoven ponorem, vzorek 1 – pokoven lokálně, a nepokovený vzorek (4 min, 55 N)



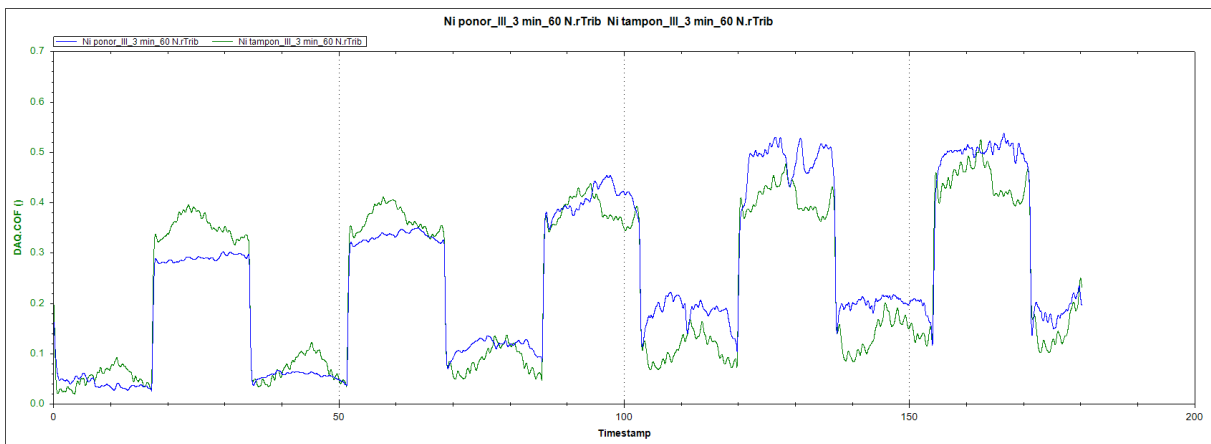
Příloha 7 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 1 – pokoven ponorem, vzorek 1 – pokoven lokálně, a nepokovený vzorek (5 min, 50 N)



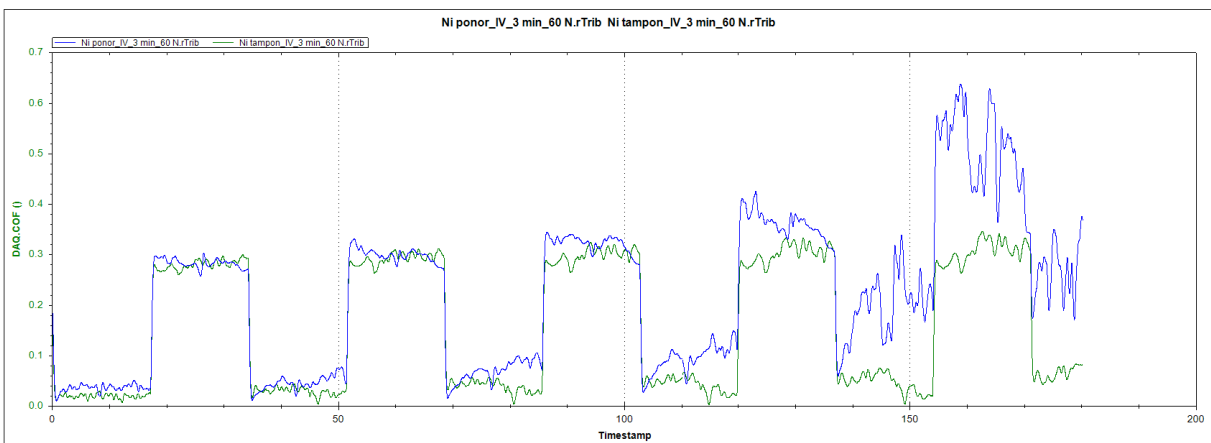
Příloha 8 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 2 – pokoven ponorem, a vzorek 2 – pokoven lokálně (2 min, 65 N)



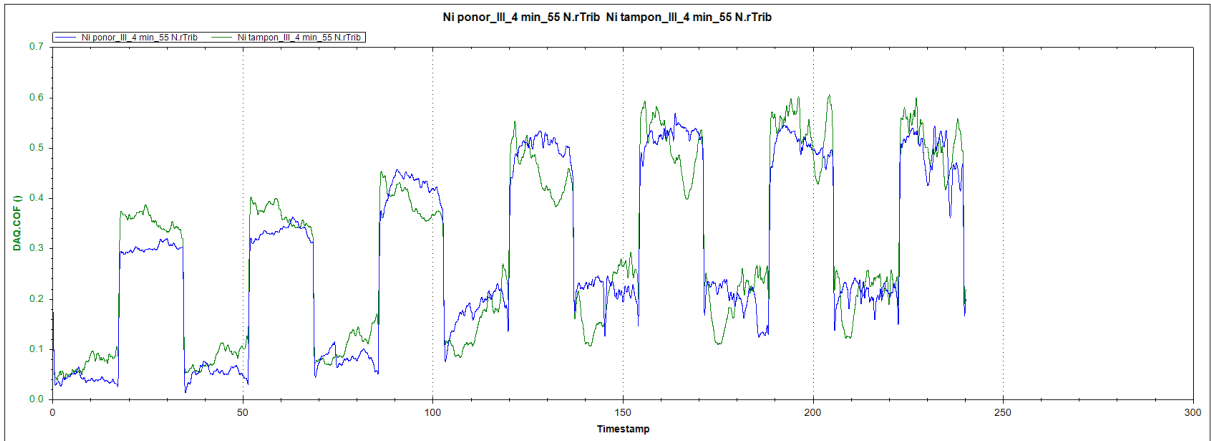
*Příloha 9 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 3 – pokoven ponorem,
a vzorek 3 – pokoven lokálně (2 min, 65 N)*



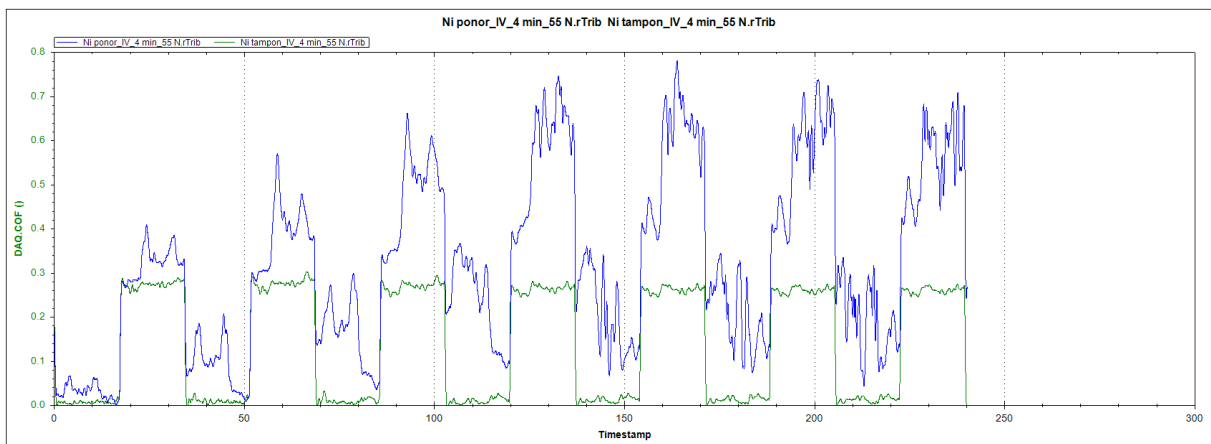
*Příloha 10 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 2 – pokoven ponorem,
a vzorek 2 – pokoven lokálně (3 min, 60 N)*



*Příloha 11 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 3 – pokoven ponorem,
a vzorek 3 – pokoven lokálně (3 min, 60 N)*



Příloha 12 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 2 – pokoven ponorem, a vzorek 2 – pokoven lokálně (4 min, 55 N)



Příloha 13 Příloha 12 Hodnoty koeficientu tření pro vzorek 3 – pokoven ponorem, a vzorek 3 – pokoven lokálně (4 min, 55 N)