

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra Mechanické Technologie

Vliv teploty elektrolytu na vlastnosti slitinového
galvanického povlaku Ni-Fe

The Influence of Electrolyte Temperature on
Characteristics of Ni- Fe Electrodeposits

Student:

Bc. Josef Marek

Vedoucí Diplomové práce:

Ing. Xenie Ševčíková



Ostrava 2011

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Akademický rok: 2010/2011

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Zadání Diplomové práce:

Student:

Bc. Josef Marek

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Specializace:

70 Strojírenská technologie

Téma:

Vliv teploty elektrolytu na vlastnosti slitinového
galvanického povlaku Ni-Fe

The Influence of Electrolyte Temperature on Characteristics of Ni- Fe Electrodeposits

Zásady pro vypracování:

1. Současný stav technologie elektrolytického vylučování slitiny Ni-Fe – literární rešerše, zhodnocení.
2. Návrh experimentů a volitelných experimentálních parametrů.
3. Provedení experimentů včetně přípravy vzorků pro metalografii a případně další mechanické zkoušky.
4. Metalografické studium vyloučených vrstev.
5. Vyhodnocení výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

- BARTL, D. O., MUDROCH, O. [i]Technologie chemických a elektrochemických povrchových úprav, I. Díl.[/i] 1. vyd., Praha SNTL 1956
- CYRUS, Z., CHOCHOLOUŠEK, J., KRISTOFORY, F. a VÍTEK, J. [i]Kurz galvanizérů 1[/i]. Učební texty a návody do cvičení, 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1996, 144 s.
- RUML, V., SOUKUP, M. [i]Galvanické pokovování.[/i] SNTL Praha 1981
- SAFRANEK, W. H. Nickel Alloys. In [i]The Properties of Electrodeposited Metals and Alloys.[/i] 2nd. Ed., AESF Orlando, Florida 1986, p. 326
- LANDA V. Galvanicky vyloučené tlusté vrstvy Ni-Fe a jejich vlastnosti, [i]Strojírenství[/i]. 1984, č. 11
- KRISTOFORY, F. [i]Renovace strojních součástí galvanickými povlaky[/i]. Disertační práce. Ostrava: VŠB-TUO. Fakulta strojní. 1992, 187 s.
- KRISTOFORY, F. [i]Studium vlastností galvanických povlaků k ochraně strojních součástí proti opotřebením[/i]. Habilitační práce. Ostrava: VŠB-TUO. Fakulta strojní. 2000, 86 s.



Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Xenie Ševčíková**

Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Nejedlý

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011





prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty



Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2011

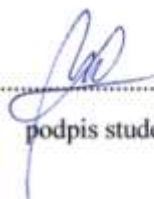
.....
podpis studenta



Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20. 5. 2011


.....
podpis studenta



Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí mé diplomové práce paní Ing. Xenii Ševčíkové, a to za obětavou spolupráci, ochotu a vstřícné jednání při zpracování této práce. Dále bych touto cestou chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Nejedlému, který mi poskytl odbornou asistenci v experimentální části a cenné rady.



ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MAREK, J. Vliv teploty elektrolytu na vlastnosti slitinového galvanického povlaku Ni-Fe. Ostrava: katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011, Diplomová práce, vedoucí Ing. Xenie Ševčíková.

Diplomová práce se zaměřuje na vliv teploty elektrolytu a složení lázně u galvanických povlaků Ni-Fe. Cílem je zachování mechanických vlastností Ni-Fe povlaku, při dosažení co nejnižších teplot lázně elektrolytu. Práce obsahuje teoretický popis Ni-Fe povlaků, požadavky na ně kladené a prvky ovlivňující vylučování Ni-Fe povlaku. S využitím poznatků v galvanotechnice byly stanoveny parametry vylučování. Experimentální část se poté zabývá působením změn parametru na mechanické vlastnosti Ni-Fe povlaků.

ANNOTATION OF THESIS

MAREK, J. The Influence of Electrolyte Temperature on Characteristics of Ni- Fe Electrodeposits. Ostrava: Department of Mechanical Technology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB - Technical University of Ostrava, 2011, head: Ing. Xenie Ševčíková

This graduation thesis focuses on the influence of temperature and electrolyte bath composition on electroplating Ni-Fe coatings. The aim is to preserve the mechanical properties of Ni-Fe coating process to achieve the lowest temperature of the bath electrolyte. The work includes a theoretical description of the Ni-Fe coatings, the requirements placed on them and the elements affecting the secretion of Ni-Fe coating. Using knowledge of electroplating parameters were determined excretion. The experimental section then deals with the effects of parameter changes on the mechanical properties of Ni-Fe coatings.



Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů	11
Úvod	12
1 Technologie elektrolytického vylučování slitin Ni-Fe povlaků	13
1.1 Současný stav v oblasti galvanických povlaků	13
1.1.1 Princip vylučování slitinových povlaků	13
1.1.2 Elektrolyty pro galvanické vylučování niklu	14
1.1.3 Faradayovy Zákony	15
1.2 Slitinové povlaky Ni-Fe	16
1.2.1 Využití povlaků Ni-Fe	16
1.2.2 Produktivita procesu	16
1.2.3 Ekonomika procesu	17
1.2.4 Ekologické dopady	17
1.3 Parametry vylučování	17
1.4 Požadavky kladené na vylučování Ni-Fe povlaků	18
1.4.1 Adheze	18
1.4.2 Tloušťka	19
1.4.3 Vzhled	19
1.4.4 Korozivzdornost	20
1.4.5 Pórovitost	20
1.4.6 Rozložení povlaku Ni-Fe	20
1.5 Mechanické vlastnosti na bázi Ni-Fe povlaků	20
1.6 Technologický postup aplikace slitiny Ni-Fe	22
1.6.1 Příprava povrchu	22
1.7 Vliv elektrolytu na slitinový povlak Ni-Fe	23



1.7.1	<i>Vnitřní napětí</i>	23
1.7.2	<i>Postup zamezení vzniku vodíku</i>	23
1.7.3	<i>Rozdělení příčiny napjatosti povlaku</i>	24
1.8	Kontrola lázně Ni-Fe	24
1.8.1	<i>Kontrola pH elektrolytu</i>	24
1.8.2	<i>Obsah kovů</i>	24
1.8.3	<i>Obsah sacharinu</i>	24
1.8.4	<i>Povrchové napětí</i>	24
2	Návrh metodiky měření a volba experimentálních parametrů	25
2.1	Seznam měřicích přístrojů a příslušenství	26
2.2	Chemické složení Ni-Fe lázně	26
2.3	Volba experimentálních parametrů	27
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
3.1	Metodika experimentálních činností	28
3.1.1	<i>Charakteristika a příprava IS-metru</i>	28
3.2	Postup vyloučení Ni-Fe	29
3.3	Přípravy vzorků pro metalografii	30
3.3.1	<i>Metalografická metoda</i>	30
3.3.2	<i>Broušení</i>	30
3.3.3	<i>Leštění</i>	30
3.4	Měření napětí slitinových Ni-Fe povlaků	31
3.4.1	<i>Lázně bez obsahu sacharinu</i>	31
3.4.2	<i>Lázně s obsahem 2 g/l sacharinu</i>	37
3.5	Hmotnostní nárůst po pokovení	43
3.6	Výpočty	44
4	Vyhodnocení experimentu	46
4.1	Souhrn parametrů vylučování a hodnocení povlaků	46



4.2	Vizuální kontrola povlaku.....	48
4.3	Metalografické studium vyloučených vrstev	51
4.4	Parametry vylučování, naměřené a vypočítaných hodnot	76
5	Shrnutí a diskuze	82
5.1.1	<i>Závislosti proudové hustoty, teploty na vnitřním napětí</i>	<i>82</i>
5.1.2	<i>Závislost vnitřního napětí na obsahu sacharinu.....</i>	<i>83</i>
5.1.3	<i>Tloušťka vyloučené Ni-Fe vrstvy.....</i>	<i>84</i>
6	Závěr	85
	Seznam obrázků	86
	Seznam tabulek	87
	Seznam grafů	89
	Seznam použité odborné literatury.....	90



Seznam použitých značek a symbolů

A	aniont	[-]
A_e	elektrochemický ekvivalent	[g/l]
d	tloušťka pásku	[μm]
E	modul pružnosti	[MPa]
F	faradayův náboj	[96 500 C.mol ⁻¹]
HV	tvrdost dle Vickerse	[-]
i	proudová hustota	[A/dm ²]
I	proud	[A]
K	kationt	[-]
M	molární hmotnost	[g.mol ⁻¹]
m_k	hmotnost povlaku	[g]
m_1	hmotnost vzorku před vyloučením Ni-Fe	[g]
m_2	hmotnost vzorku po vyloučení Ni-Fe	[g]
T	teplota	[°C]
U	napětí	[V]
σ	makronapětí	[MPa]
η	proudový účinek	[%]
τ	tloušťka povlaku při prodloužení/zkrácení	[μm]
τ_k	doba ukončení experimentu	[min]
NiSO ₄	síran nikelnatý	
NiCl ₂	chlorid nikelnatý	
MgSO ₄	síran hořečnatý	
Ni(BF ₄) ₂	floroboritan nikelnatý	
Ni(NH ₂ SO ₃) ₂	niklsulfamát	



Úvod

Povrchové úpravy jsou stěžejní částí v mnoha odvětvích a ovlivňují vlastnosti výrobků. Galvanování nám umožňuje vylučovat velmi tenké vrstvy na povrchu součástí. Velká část galvanických lázní pracuje za vyšších teplot, pohybujících se až do teploty blížíící se 100°C a je možné vylučovat silné vrstvy těchto povlaků, tedy v dlouhodobém nepřetržitém procesu. Náklady na udržování těchto teplot lázní jsou příliš nákladné, a proto by bylo velmi výhodné tyto teploty snížit až k teplotám blížíící se pokojové teplotě a přitom zachovat veškeré požadované vlastnosti těchto povlaků.

Nejvýznačnějšími parametry v povrchových úpravách jsou jejich mechanické vlastnosti, kterými jsou tvrdost, pevnost a odolnost vůči opotřebení. Z dalších jsou to fyzikální a chemické vlastnosti, které je nutno během procesu dodržet. Další z důležitých aspektů je také samotný vzhled těchto povlaků a jejich korozní odolnost.

Mezi hlavní výhody slitin patří především možnosti dosažení odlišných vlastností vylučovaných vrstev, které jsou v mnoha ohledech lepší než čistý kov. Slitinové povlaky Ni-Fe dosahují pevnosti v tahu 1800MPa a tvrdosti kolem 600HV a jsou velmi odolné vůči kavitaci a adheznímu opotřebení. Využití Ni-Fe povlaků se ve velké míře používá k renovaci součástí. Tato metoda je mnohem šetrnější než například navařování, protože pracuje za nižších teplot a nedochází k tepelnému namáhání základního materiálu.

Hlavní část diplomové práce se zabývá zkoumáním změn vlivu teploty, parametrů vylučování a chemického složení lázně na vlastnosti Ni-Fe povlaku. Budu se zabývat změnami teplot, chemickým složením lázně a proudovou hustotou elektrolytu a jejich vlivy na vnitřní napětí povlaku během galvanování. V závislosti na těchto proměnných budu dále u jednotlivých vzorků pozorovat změny vzhledu a tloušťku vyloučené vrstvy.



1 Technologie elektrolytického vylučování slitin Ni-Fe povlaků

1.1 *Současný stav v oblasti galvanických povlaků*

Galvanické pokovování je založeno na zákonech elektrolýzy – soli kovu, který chceme katodickým procesem vylučovat, jsou sloučeniny s elektrovalenční vazbou. Kovové soli bývají většinou v pevném skupenství a k jejich rozpuštění a vytvoření podmínek k elektrolýze se povětšinou používá voda.

Rozpuštěním anorganických solí ve vodě se zruší krystalová mřížka, přičemž hnací silou jsou solvatační síly, které odstraňují přitažlivé síly mezi kationty a anionty. Elektrolytickou disociací vznikají ionty, které se v roztoku volně pohybují. Záporné ionty nesou přebytečné elektrony a kladně nabitě ionty mají nedostatek elektronů. Ionty rozpuštěných solí ve vodném roztoku umožňují, aby roztok vedl elektrický proud. Připojením elektrod vložených do roztoku k vnějšímu zdroji stejnosměrného proudu s vhodným napětím, kladně nabitě kationty kovu přijmou na záporné elektrodě (katodě) chybějící elektrony, vznikne elektroneutrální atom kovu, který se následně zabudovává do krystalové mřížky a vzniká tak na katodě kovová vrstva. Na kladně nabitě kovové elektrodě (anodě) dochází k ochuzení vrstvy atomů na fázovém rozhraní elektroda – roztok o elektrony a ty pak přecházejí do roztoku ve formě kladně nabitých kationtů. Důležitým faktorem při takto probíhající elektrolýze je to, že se na povrchu katody začne usazovat vrstva kovu a je-li anoda z téhož kovu dochází k jeho kontinuálnímu doplňování v roztoku.

[3]

1.1.1 *Princip vylučování slitinových povlaků*

Pokud roztok (elektrolyt) obsahuje kationty několika kovů, tyto se postupně vylučují na katodě a to tak, že se vylučuje kov s nejkladnějším potenciálem (ušlechtilý kov) a poté postupně kovy méně ušlechtilé. Podle tohoto principu by se měli vylučovat pouze kovy, které jsou ušlechtilější než vodík – Cu, Ag, Pt atd. – ale ve skutečnosti tomu tak není, protože potenciály, při nichž dochází k vylučování vodíku na jednotlivých kovech, jsou zápornější, než jsou jejich nulové potenciály. Rozdíl mezi skutečným a teoretickým potenciálem vodíku se nazývá vodíkové předpětí a tyto hodnoty na jednotlivých kovech jsou různé. U řady kovů je vodíkový potenciál negativní, a proto je možné tyto kovy vylučovat z vodných roztoků. Galvanicky vyloučené čisté kovy mají



omezené fyzikální a mechanické vlastnosti. Jednou z možností jak dosáhnout nových vlastností je kombinace několika kovů, kompozitních povlaků, nekovových elementů v galvanické vrstvě.

Katodické vylučování kovu z jednoho kationtu je možné rozdělit na reakce, které vystihují přechod hydratovaného kovového kationtu přítomného v roztoku až na atom kovové mřížky. Přenos náboje je závislý na koncentraci reagujících složek. Jedná se o heterogenní proces, uskutečňující se na rozhraní mezi elektrolytem – kapalnou fází – a elektrodou – tuhou fází.

Jestliže jsou potenciály vybraných kovů blíže, tím je uskutečnění vylučování jejich slitin reálnější. Důležité je sledování parciální polarizační závislosti kovů. Může dojít k tomu, že řídicím dějem jsou i jiné kroky elektrodového pochodu než přenos náboje, nebo jsou značně odlišné kinetické parametry.

Nikl se vylučuje s řadou kovů pomaleji než by odpovídalo standardnímu rovnovážnému potenciálu. Tento jev se podle Bennera nazývá anomální spolu vylučování a jedná se například o Ni-Co, Ni-Zn, Ni-Fe. Nikl se vylučuje v binárních soustavách mnohem pomaleji než kobalt, železo, nikl, zinek. [3]

1.1.2 Elektrolyty pro galvanické vylučování niklu

Složení roztoků pro galvanické niklování musí být co nejstálější, tedy nesmí nastat samovolný účinných složek lázní. Lázně pro niklování mohou být použity tyto:

- Síranové lázně – hlavní složkou lázně je síran nikelnatý – NiSO_4 s přísadou chloridu nikelnatého NiCl_2 . Tyto Lázně jsou levné, jednoduché na údržbu a jsou málo korozivní. Lázně vylučují jemnozrnné matné povlaky s malým vnitřním napětím. Pracovní teplota lázně se pohybuje v rozmezí 50 – 70 °C.
- Chloridové lázně – hlavní složkou lázně je chlorid nikelnatý - NiCl_2 . Tyto lázně mají menší spotřebu proudu, větší hloubkovou účinností a vysokou vodivost. Hlavní nevýhodou je vysoká křehkost vyloučeného povlaku a silná agresivita lázně. Pracovní teplota lázně se pohybuje v rozmezí 50 – 70 °C
- Síranohořečnaté lázně – hlavní složkou je síran hořečnatý - MgSO_4 a síran nikelnatý NiSO_4 . Tyto lázně jsou již zastaralé, kvalita těchto povlaků není příliš vysoká. Jsou vhodné pro provozy s nižším technickým vybavením.
- Fluoroboritanové a sulfamátové lázně – hlavní složkou lázně je fluoroboritan nikelnatý $\text{Ni}(\text{BF}_4)_2$ neboli niklsulfamát $\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2$. Tyto povlaky mají lepší vlastnosti než síranové. Lázně pracují s vysokými proudovými hustotami až 20



A.dm². Lázně disponují vysokou koncentrací kovu 120 g/l a vysokou vodivost a vylučovací rychlost. Hlavní nevýhodou jsou vysoké náklady na čisté základní chemikálie, které jsou citlivé na znečištění – nutnost použití kontinuální filtrace. Lázně na bázi Fluoroboritanové lázně jsou značně korozivní. [3, 9, 10]

1.1.3 Faradayovy Zákony

Faradayovými zákony jsou vyjádřeny vztahy mezi množstvím vyloučeného kovu a elektrickým nábojem prošlým elektrolyzérem.

1. *Faradayův zákon*: Hmotnost látky vyloučené na elektrodě závisí přímo úměrně na elektrickém proudu, procházejícím elektrolytem, a na čase, po který elektrický proud procházel. Tento vztah je nazýván zákonem elektrochemického působení. [1]

$$m = A_e \cdot I \cdot t = a \cdot Q \quad (1)$$

2. *Faradayův zákon*: Látková množství vyloučená stejným nábojem jsou pro všechny látky chemicky ekvivalentní, neboli elektrochemický ekvivalent a závisí přímo úměrně na molární hmotnosti látky. [1]

Elektrochemický ekvivalent je dán výrazem: $A_e = \frac{M}{nF}$ (1)

Oba Faradayovy zákony je pak možno vyjádřit ve tvaru: $m = M \cdot I \cdot t / nF$ (1)

Kde F je Faradayova konstanta $F = 9,6485 \times 10^4$ C.mol⁻¹ a udává velikost náboje potřebnou pro vyloučení 1 gramekvivalentu kovu.

V galvanotechnice se mnohdy užívají jako jednotky elektrického množství tzv. ampérhodiny- Ah. A tudíž k vyloučení jednoho gramekvivalentu pak je zapotřebí 26,8 Ah.

Při galvanickém pokovování na elektrodách kromě hlavních elektrochemických reakcí vznikají ještě vedlejší reakce. Tyto reakce způsobují, že dodané množství elektrického proudu není zcela spotřebováno na vylučování a rozpouštění kovu. Ke kvantitativnímu popisu této skutečnosti byl definován proudový výtěžek r (katodický nebo anodický) rovnicí [1]:

Proudový výtěžek r (katodický nebo anodický) pak platí:

$$r_{kat(anod)} = m_{skut} / m_{teor} \cdot 100[\%] \quad (1)$$



1.2 Slitinové povlaky Ni-Fe

Technologie vylučování čistého niklu je v současné době na vysoké úrovni, a proto je zřejmé, že vytváření jeho slitin je pochopitelné. Z ekonomického hlediska je velmi vhodné vytváření jeho slitiny se železem. Zda-li je slitina psána jako Ni-Fe, znamená to, že niklu je ve slitině obsaženo více jak 50%.

Vylučování slitin je několikanásobně technologicky složitější proces než u čistých kovů, i přesto má několik významných výhod. Mezi hlavní výhody patří především možnosti dosažení odlišných vlastností vylučovaných vrstev, které jsou v mnoha ohledech lepší než čistý kov. Mechanické vlastnosti povlaku jsou výrazně vyšší než vlastnosti čistého niklu. Z pohledu dostupnosti a velmi nízké ceny železa jako legujícího prvku je velmi vhodná slitina Ni-Fe s obsahem železa 15 - 30%.

Princip vylučování Ni-Fe je založen na rozpustnosti soli Ni a Fe. Plocha anody je obsazena ze dvou třetin niklem a z jedné třetiny plochy anody železem. Na katodu, kterým je samotný předmět, se nejprve vylučuje kov s nejkvalitnějším potenciálem, poté kov méně ušlechtilý. [7]

1.2.1 Využití povlaků Ni-Fe

Využití povlaků slitin Ni-Fe je rozděleno do dvou základních skupin. Rozdíl je v tloušťce povlaků.

První skupina se využívá pro její korozivzdorné a vzhledové účely. Tloušťka tohoto povlaku bývá do $5 \cdot 10^{-3}$ m. Druhá skupina je důležitá převážně pro ochranu součástí před opotřebením, tudíž i tloušťka tohoto povlaku může dosahovat až několika milimetrů.

Použití těchto povlaků je velmi vhodné, protože je šetrné k základnímu materiálu – vlastní pokovení probíhá při nízkých teplotách a nedochází k tepelnému namáhání. Je vhodný pro součásti složitějších tvarů, je možné pokovovat i velké součásti, omezení je pouze ve velikosti vany. Velmi vhodný je pro renovaci součástí, doplnění chybějících rozměrů například při navařování, svařování, metalizaci. [5]

1.2.2 Produktivita procesu

Jestliže je požadována větší tloušťka ochranné vrstvy, počítá se s průměrnými proudovými hustotami 1 až 5 $A \cdot dm^{-2}$, což v případě katodického účinku nad 0,9 představuje rychlost vylučování 10-50 $\mu m/h$.



1.2.3 *Ekonomika procesu*

Podle Faradayových zákonů, které platí při galvanickém pokovování, se na vyloučení 1g niklu spotřebuje energie cca do 0,01kWh. Mnohem vyšší energie se využívá k udržování provozní teploty elektrolytu, která je obvykle pro niklování 50 – 60 °C. [5]

1.2.4 *Ekologické dopady*

Galvanické pokovování pracuje s těžkými kovy, únik do okolí by znamenal ekologické znečištění ve velkém rozsahu. Úniky par do ovzduší jsou závislé na proudovém účinku. U Ni-Fe slitin je velká účinnost až 98%, a proto zde není velké riziko tohoto znečištění. Dalším rizikem je únik do odpadních vod, proto je nutné vybudování neutralizačních stanic, do kterých se odvádí veškeré oplachy z výroby. [5]

1.3 *Parametry vylučování*

Časové rozmezí mezi přípravou povrchu a samotným nanesením povlaku Ni-Fe bylo co nejkratší. Delší čas mezi operacemi může vést k jemné oxidaci, a tím i zhoršení přilnavosti povrchu. Během vylučování slitinového povlaku Ni-Fe je pohyb katody a míchání elektrolytu velmi nutné a to z toho důvodu, aby nedošlo k vytvoření čar od difundujícího vodíku.

Teploty vhodné pro vylučování elektrolytu se pohybují v rozmezí 50 - 60°C, při jiných teplotách dochází k odlupování povlaku ze součásti. Elektrolyt dovoluje vysoké rozmezí hodnot pH, které se pohybuje mezi (1,8 - 4,8), avšak provozně je vhodné pracovat mezi pH 2,3 - 2,8. Tím se dosahuje vysoké katodické účinnosti až 98%. Při použití katodické proudové hustoty 5A.dm⁻² se dosahuje rychlosti vylučování 50μm/h. U zvyšující se proudové hustoty dochází ke snížení obsahu železa ve vrstvě. Při vysokých proudových hodnotách může dojít až ke spálení povlaku. Elektrolyt má dobrou stabilitu, lze pracovat po průchodu až několika set A.h/l elektrolytu. V průběhu elektrolýzy se musí provádět analytická kontrola lázně. Elektrolyt je značně náročný na regulaci, kontrolu a doplňování jednotlivých složek, i přesto je velmi stabilní. [8]

Ideální poměr slitinových anod Ni : Fe není dostupný, proto se zavádí dvojitý anodový okruh tak, že dílčí proudy procházejí niklovými a železnými anodami a je možné je regulovat v nezbytném poměru. Optimální poměr je $I_{Ni} : I_{Fe} = 4 : 1$. Železo



se v elektrolytu samovolně rozpouští, koncentrace se postupně zvyšuje - snižuje se poměr kationtů $Ni^{2+} : Fe^{2+}$. Z toho důvodu je nutné při delším přerušení elektrolýzy anody železa vyjmout. Tento problém lze řešit z ekonomického hlediska tak, že se bude méně zatěžovat větev Fe proměnným odporem - je poměrně nevýhodný. Další možností je oddělený anodový okruh na dva nezávislé zdroje proudu. [5, 8]

1.4 Požadavky kladené na vylučování Ni-Fe povlaků

Požadavky kladené na povlak pro elektrolytické vylučování Ni-Fe je dána normou ČSN 1403. Hlavní činitelé, kterým musí povlaky vyhovovat, jsou tyto:

- Tloušťka
- Vzhled
- Mechanické vlastnosti nanášené vrstvy
- Pórovitost
- Chemické složení
- Korozivzdornost
- Přílnavost k základnímu materiálu
- Vnitřní napětí
- Ovlivnění struktury a vlastností základního materiálu součástí
- Ekonomičnost
- Produktivita procesu
- Ekologické dopady

Povlaky jsou vzhledově lesklé, vlastnosti jsou závislé na proudové hustotě katody. Při proudové hustotě 1 - 7 A.^{dm⁻²} na katodě jsou povlaky železa s obsahem 35% lesklé, plastické, s nízkým vnitřním napětím, dosahují dobré korozní odolnosti a dobré vyrovnávací schopnosti. [7]

1.4.1 Adheze

Adheze je závislá ve značné míře na předběžné přípravě povrchu základního materiálu. Mezi důležité procesy patří dokonalé odmaštění povrchu a mikrogeometrie, přílnavost významně ovlivňuje i vnitřní napětí 1. druhu ve vylučování galvanického povlaku.



Velmi dobré galvanické přilnavosti se dosahuje u mědi a jejich slitin. Při použití povlaku na oceli je situace složitější. Čím více je ocel legovaná, tím více dochází k vytvoření pasivační vrstvy, která způsobí špatnou adhezi galvanické vrstvy. Z dalších příčin špatné adheze je výskyt koloidních látek na kovovém povrchu (grafit vyloučený při částečném odleptání železa v průběhu předběžných úprav moření), bývají to součásti, které byly chemickotepelně zpracovány karbonitridací nebo cementováním. U některých lehkých slitin může být následkem špatné adheze k podkladovému materiálu hořčík či zinek. Vodík v povlaku může být další příčinou špatné adheze, avšak není příliš závažný, protože samovolně difunduje až při teplotách nad 200°C.

Další důsledek bývá způsoben odlišnou strukturou podkladu a galvanické vrstvy. Typ mřížky určujeme rentgenovou difrací a rozmezí, ve kterých se smí lišit poloměry atomu, je udáván 2,4 - 12,5%. Jestliže dojde k tomu, že by se atomový poloměr lišil více, používá se mezivrstva mezi povlakem a součástí. Časté využívání této metody bývá u slitin zinku, kde se mezivrstva mědi vylučuje z kyanidového elektrolytu. [5, 9]

1.4.2 Tloušťka

U tloušťky povlaku se přihlíží na náročnost provozních podmínek, funkci a mechanické vlastnosti, o kterých rozhoduje konstruktér. Tloušťka povlaku, který je požadován, je minimální místní tloušťka, kterou musí povlak mít. Je měřena v jakémkoliv místě funkčního povlaku, jehož je možné se dotknout kuličkou o průměru 20 mm, pokud není stanoveno jinak. Velmi důležitá je geometrická přesnost povrchu, je možné vylučovat povlak silné tloušťky i proměnných tloušťek na různých místech povrchu součásti. Docílení proměnné tloušťky povlaku lze dosáhnout vhodným uspořádáním geometrie elektrolyzéry, nebo z pomoci stínění je možné dosáhnout rozdílného zesílení vrstvy. Tento proces může být omezen fyzikální podstatou procesu – rozdělením katodických proudových hustot.

Při nanášení tlustostěnného povrchu je však velmi obtížné dosáhnout stejné tloušťky povlaku a získat hladký povrch. [9,10]

1.4.3 Vzhled

V místech funkčnosti povlaku nesmí být důlky, trhliny, tvoření šupin, spálené povlaky puchýře, puchýře a nepokovené plochy. Povlak musí být hladký a bez těchto viditelných vad. Pokud se jedná o povlak, který pokrývá jen část povrchu, nesmí docházet k tomu, aby po obrábění nebylo na okrajích zesílení, nerovné hrany, výrůstky a podobné vady.



Ke kontrole se využívají schválené vzorky výrobků. U elektrochemicky pokovených výrobků, které se posléze budou brousit na přesný rozměr, je nepřípustné použít chladicí kapaliny s příměsí síry. Postup při broušení musí být jemný, aby nedošlo ke vzniku případných trhlin. [5]

1.4.4 Korozivzdornost

Povlaky Ni-Fe s přísadami leskutvorných látek a obsahem železa do 30% se téměř nemění oproti lázním vyloučených bez leskutvorných přísad, kde se koroze zvyšuje s porovnáním se sírou téměř 65x. U niklových povlaků síra značně zvyšuje rychlost koroze v aktivním i pasivním stavu. Důvody mohou být způsobeny stavem povrchu, strukturou, krystalografickou morfologií. [2]

1.4.5 Pórovitost

Pórovitost zhoršuje mechanické vlastnosti povrchu a je tedy nežádoucí. V případě, že nastane elektrochemická koroze, je pórovitost o to více nežádoucí. Zkouška pórovitosti se provádí kupříkladu horkou vodou nebo modifikovanou ferroxylou zkouškou.

1.4.6 Rozložení povlaku Ni-Fe

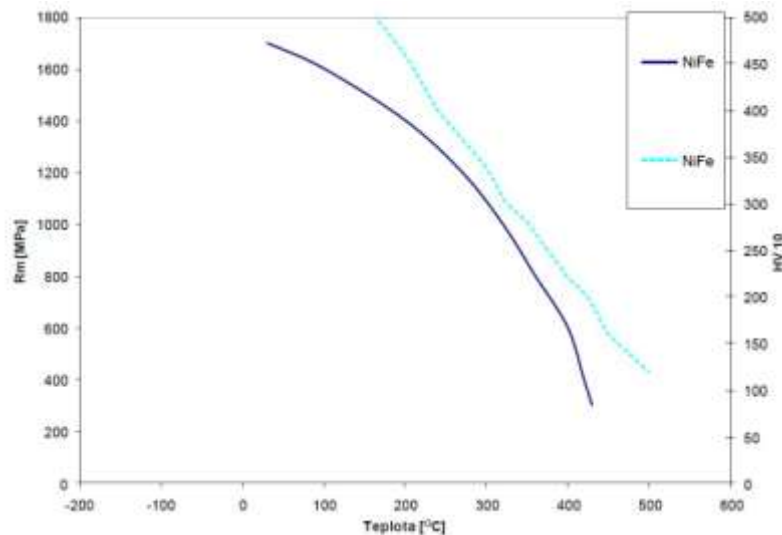
V přechodové vrstvě se množství železa postupně snižuje od základního materiálu až k hodnotě obsahu železa v povlaku. Obsah niklu od základního materiálu rovnoměrně roste až k povlaku a u něj se hodnota ustálí. Množství obou prvků v základním materiálu není konstantní, ale mění se v určitém rozmezí. Nikl se částečně dostává při elektrolytickém vylučování povlaku do základního materiálu. Tyto procesy z důvodu velmi krátkého využívání Ni-Fe povlaku nejsou vysvětleny. [2]

1.5 Mechanické vlastnosti na bázi Ni-Fe povlaků

Z hlediska základních mechanických vlastností, kterými jsou pevnost a tvrdost, které se vylučují galvanicky z vodných roztoků, je nejvhodnější Fe-Co-Ni. Tvrdost a pevnost bývají vyjádřeny v poměru 1 : 3. Tvrdost je udávána v HV a pevnost v MPa. Poměr neplatí vždy a jeho závislost se může měnit. Větší nároky bývají na tvrdost, jelikož je spjata s odolností vůči opotřebení. Tažnost elektrochemicky vyloučených povlaků je velmi důležitá v případech ohýbání nebo tváření povlaku a jeho nedostatečnost by vedla k jeho praskání již při tváření.



Pevnost povlaku při použití legujícího prvku železa může dosáhnout až trojnásobně vyšší pevnostní charakteristiky, než má samotný nikl. Vysoká tvrdost kolem 600 HV má za následek větší nároky při opracování, a tím i vyšší křehkost povlaku. Pevnost v tahu dosahuje při 25°C 1800 - 2000 MPa, ta se při vystavení vysokým teplotám rychle snižuje. [4]



Graf 1 Vliv Závislosti teploty zpracování na tvrdosti HV 10 a pevnosti v tahu [3]

Povlaky disponují velmi dobrou odolností proti kavitačnímu opotřebení, což způsobuje velmi jemná lamelární struktura. U povlaků Ni-Fe dochází k vytvoření siřníku NiS při zvýšených teplotách nad 200°C, a tím dochází k sírové křehkosti a snižuje se soudržnost materiálu. Eliminací toho jevu je vylučování slitin niklu s malým obsahem manganu. Nejméně rizikové pracovní teploty slitiny Ni-Fe jsou v rozmezí 100-150°C, u kterých nedochází ke změně mechanických vlastností.

Slitiny typu Ni-Fe bývají většinou vylučovány s pomocí inhibitorů I. třídy s obsahem síry s volným párem. Tyto povlaky mají po vyloučení vysokou tvrdost, ale při zvyšování teploty se jejich tvrdost velmi rychle snižuje. Z tohoto důvodu se používají elektrolyty, které neobsahují zmíněnou síru. Jsou to elektrolyty s přísadou inhibitorů I. třídy, u kterých se makronapětí účinně snižuje, a tudíž se může dosáhnout až nulových napětí. Čím více se zvyšuje obsah přísad v elektrolytu, tím se snižuje základní hodnota mikrotvrdosti.

Při použití Ni-Fe+sacharin, Ni-Fe+140ml, Ni-Fe+260 ml a Ni-Fe+340 ml se dosáhlo nejmenšího poklesu mikrotvrdosti při použití přísad sacharinu. U sacharinu



můžeme pozorovat, že od teploty transformace (200°C) začíná docházet k lineárnímu poklesu. Při teplotě 450°C je mikrotvrdost nižší než u ostatních zmiňovaných slitin vyloučených za přítomnosti přísady. Tento rozdíl lze přičíst nižšímu obsahu síry v povlaku.

Povlaky vyloučené bez přísady síry přesto malý obsah síry obsahují. Lze to vysvětlit tím, že se v elektrolytu vyskytuje kyselina 5-sulfosalicytová jako komplexotvorné činidlo. [4,5]

1.6 Technologický postup aplikace slitiny Ni-Fe

Aby bylo možné vyloučit kvalitní slitinový povlak, je nutné dodržovat předepsané technologické postupy a též chemické složení lázně. Při změně požadovaných podmínek může dojít k odlupování slitinového povlaku, ke spálení povlaku na hranách součásti, popřípadě může dojít ke špatným mechanickým vlastnostem.

1.6.1 Příprava povrchu

- Přebroušení – z materiálu se odstraní drobné nerovnosti, rýhy a podobně
- Odmaštění - provádí se v organických rozpouštědlech - benzin, perchloretylen, nebo v alkalických lázních Radalon, Synalod 30. Při použití organických rozpouštědel následuje sušení, při použití alkalických lázní se používá oplach studenou vodou .
- Moření - se provádí pokud je povrch součásti korozně napaden. Jestliže koroze není zřejmá, tento krok se vynechává, především při použití cementace na součásti, protože způsobuje na povrchu součásti vznik koloidního grafitu.
- Leptání povrchu - způsobuje u naleptaného základního materiálu skutečnou velikost pokovovaného povrchu, a tím dochází ke zlepšení adhezních sil. Používá se anodické leptání základního materiálu.
- Depasivace - pro povrch legovaných oceli se používá metoda nikl-strike. Je to metoda, při které se nanese mezivrstva niklu, která zlepšuje adhezi Ni-Fe. Lázeň obsahuje sulfosalicylan niklu a kyselinu sulfosalicytovou. Doba nanášení je cca pět minut a probíhá při teplotě 20°C a katodické proudové hustotě 10A.dm⁻². [2, 9]



1.7 Vliv elektrolytu na slitinový povlak Ni-Fe

1.7.1 Vnitřní napětí

Vnitřní napětí vzniká u galvanických povlaků velmi často a je příčinou deformace v krystalové mřížce vylučovaného kovu. Podle rozsahu vnitřního napětí se dělí do následujících třech skupin.

- Napětí prvního druhu – také se nazývají makronapětí, jsou taková napětí, která působí na povrchu povlaku, v některých případech nabývají značných hodnot a mohou překročit i mez pevnosti povlaku
- Napětí druhého druhu – působí v menším rozsahu - vzniká v oblasti krystalitů a zrn
- Napětí třetího druhu – se vyskytuje na úrovni atomových skupin

Vnitřní napětí a katodická proudová hustota je ovlivněna především pH faktorem. Čím vyšší je pH, tím větší je i proudová účinnost. Jak jsme si uvedli výše, optimální pH se pohybuje v rozmezí mezi 2,3 – 2,8. V případě, že pH převyší hodnotu 3, je proudová účinnost vysoká, ale ve velké míře se zvyšuje vnitřní napětí vyloučeného povlaku. S rostoucím pH také dochází k větší rychlosti oxidace Fe^{2+} na Fe^{3+} .

Při poklesu pH pod hodnotu 1,9 se katodická proudová účinnost výrazně snižuje. Při elektrolytickém vylučování povlaku, kdy je katodická proudová účinnost menší než 100%, dojde k redukci Fe^{3+} a vylučování vodíku. K zabránění tomuto procesu – vznik nerozpustné sloučeniny Fe^{3+} , způsobující drsnost povlaku a zvýšení vnitřního napětí, se přidává sulfosalicylan sodný.

Další z důležitých parametrů při vylučování Ni-Fe je povrchové napětí. Při velmi vysokém povrchovém napětí dochází k zabránění úniku vodíku z pokovované součásti a vzniku vodíkového pettingu. [2, 5]

1.7.2 Postup zamezení vzniku vodíku

- Pohybem katodové tyče
- Míchání elektrolytu
- Snížení povrchového napětí elektrolytu – pomocí přidáváním smáčedla, jeho vlastnosti nesmí zvyšovat vnitřní napětí, musí být dobře rozpustné v rozmezí pH 1–5
- Pokovení za rotace – je vhodné pouze u součástí, které jsou rotační z důvodu rovnoměrného nanášení povlaku [4]



1.7.3 Rozdělení příčiny napjatosti povlaku

- Vodík, který difunduje do kovu, na fázovém rozhraní a do elektrolytu způsobuje smrštění mřížky. Tento druh napětí vzniká pouze u vrstev, u kterých dochází ke spolu vylučování vodíku.
- Na povrchu katody, převážně na hranách, se molekuly vody usadí společně s kovovým atomem. Za vysokého gradientu elektrostatického pole reagují za vzniku oxidů nebo hydroxidů, které mohou být zpět redukovány na kov, což způsobuje smrštění mřížky. [4]
- Kationt musí projít energetickou bariérou při přeměně z hydratovaného stavu na kovový stav v mřížce. V kationtu zůstává při průchodu přebytek energie, a tím má vyšší teplotu než je teplota okolí. Mřížka expanduje v tenké vrstvě vyloučených kovových atomů a v důsledku toho dochází po ochlazení ke vzniku tahových napětí.

1.8 Kontrola lázně Ni-Fe

1.8.1 Kontrola pH elektrolytu

V průběhu vylučování vodíku na katodě pH stoupá, proto je nutné jej v průběhu procesu kontrolovat v rozmezí 2,3 - 2,8. Pokud je to nutné, pomocí kyseliny sírové se pH upravuje na požadovanou mez.

1.8.2 Obsah kovů

V lázních v průběhu procesu obsah železa stoupá, proto je nutné jej kontrolovat přibližně po 100A.h/l. Kontrola probíhá odebráním části elektrolytu a podle výsledku se doplní síran nikelnatý a síran železnatý.

1.8.3 Obsah sacharinu

Zjišťování obsahu sacharinu analytickou metodou je poměrně složitý způsob a není přesný. Pokles sacharinu v lázni se projeví jako snížení lesku Ni-Fe povlaku a později jako makronapětí. V případě ztráty lesku se přidává sacharin v množství 0,25 g/l, což odpovídá původnímu množství. Pokud dojde k předávkování sacharinem, vznikne tlakové napětí.

1.8.4 Povrchové napětí

Pro stanovení povrchového napětí je určována střední hmotnost kapky, která se odtrhává působením tíže od rovinného zabroušeného povrchu silnostěnné kapiláry. [1]



2 Návrh metodiky měření a volba experimentálních parametrů

Základním cílem experimentu je prozkoumat závislosti Ni-Fe povlaku na proměnných parametřů vylučování, při zachování jejich mechanických vlastností. V první část experimentu zahrnovala přípravu vzorků - odmaštění, vážení. Následovala příprava lázně a nastavení IS-metru pro měření délkových změn. Během každého procesu se zapisovali hodnoty z IS-metru, proměnné parametry vylučování teplota lázně, čas a proudová hustota. V druhé fázi se upravovalo složení Ni-Fe lázně s přídavkem 2g / l sacharinu - použito u vzorků č. 13 - 24. Následně se budeme zabývat vlivem přídavku sacharinu u vzorků č. 13 - 24 a vzorku č. 1 - 12 bez sacharinu.

Dalším krokem bylo opětovné vážení vzorku nyní již s vyloučenou Ni-Fe vrstvou. Hmotnosti před a po vyloučení Ni-Fe vrstvy se použily pro výpočty proudové účinnosti. Dále proběhla vizuální kontrola vyloučeného povlaku, její hodnocení u každého vzorku.

Následně se vzorky připravily pro metalografii zaléváním za studena ve vakuu. Metalografická metoda zahrnovala vizuální dokumentaci a hodnocení vzorků při 100 násobném zvětšení a měření tloušťky vyloučené vrstvy. Poslední částí bylo zhodnocení jednotlivých vzorků a pro přehlednost vytvoření grafického znázornění závislosti vylučovacích parametrů na Ni-Fe vrstvě.

Můžeme zjistit:

- Vnitřní napětí pomocí IS-metru, který nám zkracuje a prodlužuje vzorek. Délkové rozdíly dosadíme do vzorců a získáme vnitřní napětí.
- Vizuální makroskopická a mikroskopická kontrola struktury povlaku – (rovnoměrnost vyloučení povlaku, peening, lesk povlaku, spálení povlaku v důsledku vyšších proudů)
- Tloušťka povlaku pomocí světelného mikroskopu NEOPHOT 21-
- Obsah Ni a Fe v povlaku – pomocí řádkovacím elektronovým mikroskopem REM – jemnost, rovnoměrnost struktury, tvoření globul a lupínků, tvorba lamel
- Hmotnost nárůstků po pokovení pomocí laboratorních vah Mettler Toledo - AB 204 - S typu Classic



2.1 Seznam měřících přístrojů a příslušenství

- IS-metr
- Termostat (U10)
- Indukční snímač (Millitron 1202D)
- Transformátor (GLZ 10 40V-40A)
- Laboratorní váhy (Mettler Toledo - AB204 - S typu Classic)
- Stopky
- Chloroform p.a.
- Destilovaná voda
- Speciál Star 50

2.2 Chemické složení Ni-Fe lázně

$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,7 mol/l ~ 200g/l
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,05 mol/l ~ 14g/l
KOH	0,12 mol/l ~ 6,7 g/l
KBr	0,085 mol/l ~ 10 g/l
H_3BO_3	0,5 mol/l ~ 30 g/l
Laurylsíran sodný	0,2 g/l
Sacharin	2 g/l
pH lázně bez Sacharinu	2,7
pH lázně s přídatkem Sacharinu	2,5



2.3 Volba experimentálních parametrů

Pro provedení experimentu byly zvoleny tyto proudové hustoty, z kterých vypočítáme velikost proudu a dobu pokovení.

Proudové hustota: $i = 1 \text{ A/dm}^2$
 $i = 3 \text{ A/dm}^2$
 $i = 5 \text{ A/dm}^2$
 $i = 7 \text{ A/dm}^2$

Výpočet Proudu: $I = 1 \text{ A/dm}^2 \cdot 0,35 = 0,35 \text{ A}$
 $I = 3 \text{ A/dm}^2 \cdot 0,35 = 1,05 \text{ A}$
 $I = 5 \text{ A/dm}^2 \cdot 0,35 = 1,75 \text{ A}$
 $I = 7 \text{ A/dm}^2 \cdot 0,35 = 2,45 \text{ A}$



3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Metodika experimentálních činností

3.1.1 Charakteristika a příprava IS-metru

IS-metr slouží k měření délkových změn a tyto rozměry slouží k výpočtu vnitřního napětí podle vzorců. Přístroj se skládá ze tří hlavních částí a to z dolní, střední a horní části. Dolní část slouží k upínání zkušební vzorku, okolo vzorku je rám. Tato část se během měření ponoří do lázně ve svislé poloze. Střední část obsahuje zařízení pro vyvolání předpětí zkušební vzorku. Horní část obsahuje čidlo měřící úchylku. Čidlo je upnuto v ose přístroje pomocí sklíčidla. K měření slouží Indukční snímač (Millitron 1202D).

Pro měření byly použity páskové zkušební vzorky, jejich hrubá délka je 250 mm a tloušťka 0,05mm. Šířka pásku měření neovlivňuje.

Na upínací přípravku vložíme IS-metr tak, aby závěsné tyče přístroje ležely po celé délce v drážkách upínacího přípravku. Jednotlivě povolíme šrouby a do střední drážky na přípravku vložíme vzorek a uchytíme pomocí šroubů. Při upínání nesmí dojít k sebemenšímu deformování vzorku. Přístroj sejmeme z upínacího přípravku. K předepnutí vzorku pootočíme maticí o jednu otáčku do prava. Nejprve o jednu otáčku povolíme vrubovou maticí. Elektronické čidlo Millitron 1202D zasuneme do sklíčidla, dotykové hroty na Millitron 1202D a v IS-metru se musí jemně dotýkat. Mírným dotažením vrubové matice úchylkoměr upevní. Z důvodu zamezení možných výparů zašroubujeme krytku z plexy-skla. Na Millitron 1202D se snažíme docílit celistvých čísel. Jemné dokorigování k hodnotě nula použijeme stupnici na Millitron 1202D, tím docílíme, aby se hodnoty lépe odečítaly.



Obr. 1 IS-metr



3.2 Postup vyloučení Ni-Fe

Před samotným vyloučením kovového povlaku byla provedena příprava jednotlivých vzorků. Nejprve se vybraly vzorky, které nebyly nijak poškozené a deformované. Vybrané vzorky odmastíme pomocí Chloroformu. Po dokonalém odmaštění a proschnutí se jednotlivé vzorky zvážíly na elektronických vahách Mettler Toledo (viz Obr. 2). Další z částí přípravy vzorků bylo jejich upevnění a nastavení samotného IS-metru (viz Obr. 3). IS-metr nastavíme pomocí měrky na nulovou hodnotu. Posléze upevníme pásky do Is-metru. Se stupnicí IS-metru pootočíme tak, aby došlo k přednapětí pásku. Provedeme dekapování a poslední oplach vzorku spolu se spodní částí IS-metru. Přístroj vložíme do lázně, ve které se nechá několik minut temperovat. K IS-metru připojíme čidlo Millitronu (viz Obr. 4), který nám v průběhu elektrolyzy zaznamená délkové změny pásku - vnitřního napětí povlaku. Nyní již zapojíme anody a zapneme pokovovací proud. Při zapojení katody sepneme stopky, které nám měří délku pokovení.

Délka probíhající elektrolyzy u prvního pásku dle výpočtů je 42 minut, po tuto dobu udržujeme konstantní proudy (0,35 A) a teplotu lázně (60°C). V pravidelných intervalech před dosažením 42 minut zapíšeme čtyři hodnoty délkové změny pásku na Millitronu 1202D a tři po uplynutí 42 minut.



Hodnoty ukazující (+) na Militronu 1202D jsou napětí tahové. Hodnoty (-) jsou tlakové. U poslední hodnoty odepneme katodu s Is-metru a zapíšeme hodnoty napětí.

Po ukončení procesu přístroj vyjmeme z lázně. Upnutý vzorek opláchneme destilovanou vodou a vyjmeme z IS-metru. U vzorku změříme délku pokovované délky.

Obr. 2 Elektronické váhy Mettler Toledo



3.3 Přípravy vzorků pro metalografii

3.3.1 Metalografická metoda

Vzorky se připravily k zalévání do bakelitu za studena ve vakuu. Příklad pro zalévání byl použit Struers CitoVac a hmoty Epo Fix Kit. Vzorky se nechali 24 hodin vytvrdit.



Obr. 3 Struers CitoVac

3.3.2 Broušení

Při broušení se použilo sedm druhů brusných papírů s jemností 80, 180, 220, 500, 800, 1200 a 2400. Vzorky byly broušeny vždy dvě minuty, u posledního broušení s použitím jemnosti 2400 byla operace součásti z důvodu dosažení co nejjemnějšího povrchu opakovaná třikrát po jedné minutě. Během každé výměny brusného papíru musely být vzorky opláchnuty vodou, aby zbytková zrna z brusného papíru nezůstaly na povrchu vzorku.

3.3.3 Leštění

Po broušení následovalo leštění vzorku, které probíhalo dvakrát po pěti minutách. Po leštění následovalo očištění lihem od lešticí kapaliny. Poté vysušení horkým vzduchem z důvodu možného vzniku koroze, která by se mohla projevit při dalších měření a ovlivnila by výsledky. Broušení i leštění se provádělo pomocí Struers TegraPol-35.



3.4 Měření napětí slitinových Ni-Fe povlaků

3.4.1 Lázně bez obsahu sacharinu

Teplota Elektrolytu 60°C

Vzorek č. 1

- Váha vzorku 0,887g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,1111 g
- Proud 0,35 A
- Napětí 1,05 V
- Napětí po odepnutí katody 15,8V
- Délka elektrolýzy 42 minut

Tab. 1 Vzorek č.1, čas a délkové změny pásku při 42 minutách

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	38	39	40	41	42	43	44	45
μm	-66,6	-68,1	-69,8	-71,3	-73,1	-74,7	-76,3	-77,0

Vzorek č. 2

- Váha vzorku 0,8799g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,1573g
- Proud 1,05 A
- Napětí během zapojení anody i katody 2,12V
- Napětí po odepnutí katody 10,11 V
- Délka měření 14 minut

Tab. 2 Vzorek č. 2, čas a délkové změny pásku při 14 minutách

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	10	11	12	13	14	15	16	17
μm	+4,1	+5,0	+6,3	+6,3	+7,2	+7,4	+7,5	+7,7

**Vzorek č. 3**

- Váha vzorku 0,8980g
- Váha vzorku po nanesení Ni- Fe 1,2057 g
- Proud 1,75 A
- Napětí 2,92 V
- Napětí po odepnutí katody 8,36 V
- Délka elektrolýzy 8 minut 40sekund

Tab. 3 Vzorek č. 3, čas a délkové změny pásku při 8:40 minutách

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	4:40	5:40	6:40	7:40	8:40	9:40	10:40	11:40
μm	-28,4	-33,9	-38,8	-44,0	-49,3	-54,5	-59,6	-62,2

Vzorek č. 4

- Váha vzorku 0,8777g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,2115g
- Proud 2,45 A
- Napětí 3,52 V
- Napětí po odepnutí katody 5,90 V
- Délka elektrolýzy 6 minut

Tab. 4 Vzorek č. 4, čas a délkové změny pásku při 6 minutách

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	2	3	4	5	6	7	8	9
μm	-13,4	-18,6	-24,5	-30,2	-36,0	-41,5	-46,5	-49,3



Teplota elektrolytu 40°C

Vzorek č. 5

- Váha vzorku 0,8855g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,1308g
- Proud 0,35 A
- Napětí 1,74 V
- Napětí po odepnutí katody 1,82V
- Délka elektrolyzy 42 minut

Tab. 5 Vzorek č. 5, čas a délkové změny pásku při 42 minutách

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>Čas</i>	<i>38</i>	<i>39</i>	<i>40</i>	<i>41</i>	<i>42</i>	<i>43</i>	<i>44</i>	<i>45</i>
<i>μm</i>	<i>-82,6</i>	<i>-84,4</i>	<i>-86,8</i>	<i>-88,4</i>	<i>-89,9</i>	<i>-92,0</i>	<i>-94,0</i>	<i>-94,2</i>

Vzorek č. 6

- Váha vzorku 0,8906g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,1756g
- Proud 1,05 A
- Napětí během zapojení anody i katody 2,69V
- Napětí po odepnutí katody 4,01 V
- Délka měření 14 minut

Tab. 6 Vzorek č. 6, čas a délkové změny pásku při 14 minutách

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>Čas</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>
<i>μm</i>	<i>-40,6</i>	<i>-43,6</i>	<i>-49,1</i>	<i>-51,8</i>	<i>-55,1</i>	<i>-58,4</i>	<i>-63,4</i>	<i>-64,2</i>

**Vzorek č. 7**

- Váha vzorku 0,8851g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,2068g
- Proud 1,75 A
- Napětí 3,43 V
- Napětí po odepnutí katody 9,28V
- Délka elektrolýzy 8 minut 40sekund

Tab. 7 Vzorek č. 7, čas a délkové změny pásku při 8:40 minutách

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	4:40	5:40	6:40	7:40	8:40	9:40	10:40	11:40
μm	-28,6	-33,3	-38,9	-45,1	-51,2	-56,9	-62,9	-65,3

Vzorek č. 8

- Váha vzorku 0,8748g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,2060g
- Proud 2,45 A
- Napětí 4,34 V
- Napětí po odepnutí katody 5,33 V
- Délka elektrolýzy 6 minut

Tab. 8 Vzorek č. 8, čas a délkové změny pásku při 6 minutách

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	2	3	4	5	6	7	8	9
μm	-17,1	-28,4	-39,1	-49,7	-59,2	-67,8	-76,5	-79,5



Teplota elektrolytu 25°C

Vzorek č. 9

- Váha vzorku 0,8542g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,1172g
- Proud 0,35 A
- Napětí 2,18V
- Napětí po odepnutí katody 2,78V
- Délka elektrolyzy 42 minut

Tab. 9 Vzorek č. 9, čas a délkové změny pásku při 42 minutách

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>Čas</i>	<i>38</i>	<i>39</i>	<i>40</i>	<i>41</i>	<i>42</i>	<i>43</i>	<i>44</i>	<i>45</i>
<i>μm</i>	<i>-61,4</i>	<i>-62,7</i>	<i>-64,0</i>	<i>-65,3</i>	<i>-66,5</i>	<i>-67,8</i>	<i>-69,3</i>	<i>-70,7</i>

Vzorek č. 10

- Váha vzorku 0,8831g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,1579g
- Proud 1,05 A
- Napětí během zapojení anody i katody 3,27V
- Napětí po odepnutí katody 7,91V
- Délka měření 14 minut

Tab. 10 Vzorek č. 10, čas a délkové změny pásku při 14 minutách

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>Čas</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>
<i>μm</i>	<i>-65,6</i>	<i>-71,1</i>	<i>-76,2</i>	<i>-81,2</i>	<i>-86,1</i>	<i>-90,5</i>	<i>-95,1</i>	<i>-96,3</i>

**Vzorek č. 11**

- Váha vzorku 0,8512g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,1405g
- Proud 1,75 A
- Napětí 4,48V
- Napětí po odepnutí katody 7,11V
- Délka elektrolýzy 8 minut 40sekund

Tab. 11 Vzorek č. 11, čas a délkové změny pásku při 8:40 minutách

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	4:40	5:40	6:40	7:40	8:40	9:40	10:40	11:40
μm	-68,8	-81,7	-94,3	-107,2	-119,5	-130,1	-138,9	-137,6

Vzorek č. 12

- Váha vzorku 0,8859g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,0981g
- Proud 2,45 A
- Napětí 5,65V
- Napětí po odepnutí katody 7,09 V
- Délka elektrolýzy 6 minut

Tab. 12 Vzorek č. 12, čas a délkové změny pásku při 6 minutách

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	2	3	4	5	6	7	8	9
μm	-10,1	-14,1	-18,9	-24,1	-28,8	-33,1	-36,7	-39,1



3.4.2 Lázně s obsahem 2 g/l sacharinu

Teplota Elektrolytu 25°C

Vzorek č. 13

- Váha vzorku 0,7714g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,0199 g
- Proud 0,35 A
- Napětí 2,08 V
- Napětí po odepnutí katody 4,58 V
- Délka elektrolýzy 42 minut

Tab. 13 Vzorek č. 13, čas a délkové změny pásku při 42 minutách, 2g/l sacharinu

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	38	39	40	41	42	43	44	45
μm	+98,4	+98,2	+98,4	+99,9	+99,1	+99,0	+101,7	+88,5

Vzorek č. 14

- Váha vzorku 0,7726g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,0167g
- Proud 1,05 A
- Napětí během zapojení anody i katody 2,55V
- Napětí po odepnutí katody 4,57 V
- Délka měření 14 minut

Tab. 14 Vzorek č. 14, čas a délkové změny pásku při 14 minutách, 2g/l sacharinu

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	10	11	12	13	14	15	16	17
μm	-23,8	-26,1	-28,7	-31,9	-35,0	-37,7	-40,6	-42,2

**Vzorek č. 15**

- Váha vzorku 0,7780g
- Váha vzorku po nanesení Ni- Fe 1,0140 g
- Proudů 1,75 A
- Napětí 5,37V
- Napětí po odepnutí katody 6,55V
- Délka elektrolýzy 8 minut 40 sekund

Tab. 15 Vzorek č. 15, čas a délkové změny pásku při 8:40 minutách, 2g/l sacharinu

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	4:40	5:40	6:40	7:40	8:40	9:40	10:40	11:40
μm	-14,5	-18,2	-21,4	-24,6	-26,5	-28,7	-31,1	-33,3

Vzorek č. 16

- Váha vzorku 0,7759g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 0,8960g
- Proudů 2,45 A
- Napětí 5,55 V
- Napětí po odepnutí katody 6, 78 V
- Délka elektrolýzy 6 minut

Tab. 16 Vzorek č. 16, čas a délkové změny pásku při 6 minutách, 2g/l sacharinu

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	2	3	4	5	6	7	8	9
μm	+0,0	+0,9	+1,1	+1,4	+2,1	+2,6	+2,6	+2,4



Teplota elektrolytu 40°C

Vzorek č. 17

- Váha vzorku 0,7778g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,0335g
- Proud 0,35 A
- Napětí 1,82 V
- Napětí po odepnutí katody 2,35V
- Délka elektrolyzy 42 minut

Tab. 17 Vzorek č. 17, čas a délkové změny pásku při 42 minutách, 2g/l sacharinu

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>Čas</i>	<i>38</i>	<i>39</i>	<i>40</i>	<i>41</i>	<i>42</i>	<i>43</i>	<i>44</i>	<i>45</i>
<i>μm</i>	<i>+98,7</i>	<i>+99,2</i>	<i>+100,6</i>	<i>+101,0</i>	<i>+104,4</i>	<i>+104,6</i>	<i>+104,7</i>	<i>104,8</i>

Vzorek č. 18

- Váha vzorku 0,7730g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,0781g
- Proud 1,05 A
- Napětí během zapojení anody i katody 2,59V
- Napětí po odepnutí katody 8,09 V
- Délka měření 14 minut

Tab. 18 Vzorek č. 18, čas a délkové změny pásku při 14 minutách, 2g/l sacharinu

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>Čas</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>
<i>μm</i>	<i>-4,1</i>	<i>-5,2</i>	<i>-5,6</i>	<i>-5,8</i>	<i>-6,0</i>	<i>-6,2</i>	<i>-6,2</i>	<i>-6,3</i>

**Vzorek č. 19**

- Váha vzorku 0,7737g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,0939g
- Proud 1,75 A
- Napětí 3,5 V
- Napětí po odepnutí katody 5,14 V
- Délka elektrolýzy 8 minut 40sekund

Tab. 19 Vzorek č. 19, čas a délkové změny pásku při 8:40 minutách, 2g/l sacharinu

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	4:40	5:40	6:40	7:40	8:40	9:40	10:40	11:40
μm	+2,7	+3,8	+5,1	+5,6	+6,4	+7,6	+8,8	+9,0

Vzorek č. 20

- Váha vzorku 0,7735g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,1016g
- Proud 2,45 A
- Napětí 4,10 V
- Napětí po odepnutí katody 4,31 V
- Délka elektrolýzy 6 minut

Tab. 20 Vzorek č. 20, čas a délkové změny pásku při 6 minutách, 2g/l sacharinu

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	2	3	4	5	6	7	8	9
μm	+2,5	+4,2	+5,8	+7,4	+8,9	+10,4	+11,5	+11,5



Teplota elektrolytu 60°C

Vzorek č. 21

- Váha vzorku 0,8623g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,1155g
- Proud 0,35 A
- Napětí 1,56V
- Napětí po odepnutí katody 3,87V
- Délka elektrolyzy 42 minut

Tab. 21 Vzorek č. 21, čas a délkové změny pásku při 42 minutách, 2g/l sacharinu

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>Čas</i>	<i>38</i>	<i>39</i>	<i>40</i>	<i>41</i>	<i>42</i>	<i>43</i>	<i>44</i>	<i>45</i>
<i>μm</i>	<i>+95,6</i>	<i>+96,0</i>	<i>+97,4</i>	<i>+98,7</i>	<i>+99,3</i>	<i>+100,1</i>	<i>+101,3</i>	<i>+101,0</i>

Vzorek č. 22

- Váha vzorku 0,7738g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,0516g
- Proud 1,05 A
- Napětí během zapojení anody i katody 2,25V
- Napětí po odepnutí katody 2,89V
- Délka měření 14 minut

Tab. 22 Vzorek č. 22, čas a délkové změny pásku při 14 minutách, 2g/l sacharinu

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>Čas</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>
<i>μm</i>	<i>-2,7</i>	<i>-3,3</i>	<i>-4,2</i>	<i>-3,8</i>	<i>-4,0</i>	<i>-3,9</i>	<i>-4,0</i>	<i>-3,9</i>

**Vzorek č. 23**

- Váha vzorku 0,7607g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 1,0817g
- Proud 1,75 A
- Napětí 3,06V
- Napětí po odepnutí katody 3,13V
- Délka elektrolýzy 8 minut 40sekund

Tab. 23 Vzorek č. 23, čas a délkové změny pásku při 8:40 minutách, 2g/l sacharinu

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	4:40	5:40	6:40	7:40	8:40	9:40	10:40	11:40
μm	-0,5	-0,7	-1,0	-1,3	-1,3	-1,6	-1,9	-1,9

Vzorek č. 24.

- Váha vzorku 0,7715g
- Váha vzorku po nanesení Ni-Fe 0,1335g
- Proud 2,45 A
- Napětí 3,73V
- Napětí po odepnutí katody 3,85 V
- Délka elektrolýzy 6 minut

Tab. 24 Vzorek č. 24, čas a délkové změny pásku při 6minutách, 2g/l sacharinu

	1	2	3	4	5	6	7	8
Čas	2	3	4	5	6	7	8	9
μm	0,0	+0,2	+1,1	+1,3	+1,2	+1,5	+1,9	+1,2



3.5 Hmotnostní nárůst po pokovení

Jednotlivé vzorky byly zváženy pomocí Laboratorních vah (Mettler Toledo - AB204 - S typu Classic) před a po vyloučení Ni-Fe vrstvy.

Hmotnost získaného povlaku získáme ze vzorce:

$$m_k = m_2 - m_1 [g]$$

Číslo Vzorku	$m_1 [g]$	$m_2 [g]$	$m_k [g]$
1.	0,8874	1,1111	0,2237
2.	0,8799	1,1573	0,2774
3.	0,8980	1,2057	0,3077
4.	0,8777	1,2115	0,3338
5.	0,8855	1,1308	0,2453
6.	0,8906	1,1756	0,2850

Tab. 26 Hmotnost povlaku u vzorku č. 1 - 6

Číslo Vzorku	$m_1 [g]$	$m_2 [g]$	$m_k [g]$
7.	0,8851	1,2068	0,3217
8.	0,8748	1,2060	0,3320
9.	0,8542	1,1172	0,2630
10.	0,8831	1,1579	0,2748
11.	0,8512	1,1405	0,2893
12.	0,8859	1,0981	0,2122

Tab. 25 Hmotnost povlaku u vzorku č. 7 - 12

Číslo Vzorku	$m_1 [g]$	$m_2 [g]$	$m_k [g]$
13.	0,7714	1,0199	0,2485
14.	0,7726	1,0167	0,2441
15.	0,7780	1,0140	0,2360
16.	0,7759	0,8960	0,1201
17.	0,7778	1,0335	0,2557
18.	0,7730	1,0781	0,3051

Tab. 28 Hmotnost povlaku u vzorku č. 13 - 18

Číslo Vzorku	$m_1 [g]$	$m_2 [g]$	$m_k [g]$
19.	0,7737	1,0939	0,3202
20.	0,7735	1,1016	0,3281
21.	0,8623	1,1155	0,2532
22.	0,7738	1,0516	0,2778
23.	0,7607	1,0817	0,3210
24.	0,7715	1,1335	0,3620

Tab. 27 Hmotnost povlaku u vzorku č. 19 - 24



3.6 Výpočty

Výpočty hmotnosti povlaku:

$$m = 2 \cdot \rho \cdot l \cdot s \cdot t [\text{g}]$$

příklad výpočtu:

$$m = 2 \cdot \rho \cdot l \cdot s \cdot t = 2 \cdot 8,68 \cdot 16,5 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{0,2291\text{g}}}$$

Tloušťka povlaku $t = 8 \cdot 10^{-4}$ cm, šířka pásku 10 mm, délka pásku 165 mm

Směsná hustota:

$$\rho = \rho_{\text{Ni}} \cdot 0,8 + \rho_{\text{Fe}} \cdot 0,2 = 8,9 \cdot 0,8 + 7,8 \cdot 0,2 = \underline{\underline{8,68\text{g/cm}^3}}$$

Výpočet napětí:

$$\sigma = -\frac{E \cdot d \cdot \Delta l}{2 \cdot l \cdot t} [\text{MPa}]$$

příklad výpočtu:

$$\sigma = -\frac{E \cdot d \cdot \Delta l}{2 \cdot l \cdot t} = -\frac{1,67 \cdot 10^5 \cdot 0,05 \cdot (-73,1)}{2 \cdot 165 \cdot 8} = \underline{\underline{231,2\text{MPa}}}$$

po úpravě:

$$\sigma = -522 \frac{\Delta l}{l} = -522 \frac{(-73,1)}{165} = \underline{\underline{231\text{MPa}}}$$

$E = 1,67 \cdot 10^5$ MPa modul pružnosti ocelového pásku, $d = 0,05$ mm tloušťka pásku,

Katodická proudová účinnost:

$$\eta = \frac{z \cdot F \cdot m_k}{M \cdot I \cdot \tau_k} \cdot 100 [\%]$$

příklad výpočtu:

$$\eta = \frac{z \cdot F \cdot m_k}{M \cdot I \cdot \tau_k} = \frac{2 \cdot 1608 \cdot 0,2237}{58,128 \cdot 0,35 \cdot 42} = \frac{719,41}{854,48} = 0,841 = \underline{\underline{84,1\%}}$$

Molární hmotnost, (Ni = 58,71 g/mol, Fe = 55,8 g/mol), Molární hmotnost slitiny Ni-Fe :
 $0,2 \cdot 55,8 + 0,8 \cdot 58,71 = \underline{\underline{58,128\text{g/mol}}}$, Faradayova konstanta $F = 96\,500$ C/mol = 1608 A.
 min/mol, Počet nábojů z : Ni = 2, pro Fe = 2



Čas, při kterém je tloušťka povlaku $8\mu\text{m}$:

$$T = \frac{m \cdot l \cdot \tau_k}{m_k} [\text{min}]$$

příklad výpočtu:

$$T = \frac{m \cdot l \cdot \tau_k}{m_k} = \frac{0,2291 \cdot 42}{0,2237} = \underline{\underline{43 \text{ min}}}$$

Hmotnost povlaku o tloušťce $t = 8 \mu\text{m}$: $m = 2 \cdot \rho \cdot l \cdot s \cdot t$ [g], Hmotnost získaného povlaku m_k , Doba ukončení experimentu τ_k

Teoretická tloušťka povlaku:

$$t_t = \frac{I \cdot M \cdot \tau}{2 \cdot F \cdot 2 \cdot l \cdot s \cdot \rho} = K \cdot \tau \cdot I$$

$$t_t = \frac{I \cdot M \cdot \tau}{2 \cdot F \cdot 2 \cdot l \cdot s \cdot \rho} = \frac{0,35 \cdot 58,128 \cdot 2520}{2 \cdot 96500 \cdot 165 \cdot 10 \cdot 0,00868} = 9,27 \cdot 10^{-3} \text{ mm} = \underline{\underline{9,27 \mu\text{m}}}$$



4 Vyhodnocení experimentu

4.1 Souhrn parametrů vylučování a hodnocení povlaků

Tab. 29 Vzorky č. 1 - 12, identifikační tabulka povlaků

Vzorek	Parametry vylučování		Charakteristika vyloučené vrstvy (bez Sacharinu)	
	Teplota	Proudová hustota [A/dm ²]	Vizuální kontrola povlaku	Metalografické studium vyloučené vrstvy
1.	60°C	1	Matný vzhled povlaku, výskyt povrchových nečistot, který může být způsoben špatným oplachem, velmi vysoké napětí povlaku 235MPa	Povlak je nerovnoměrně vyloučený, špatná přilnavost ke vzorku
2.		3	Matný vzhled povlaku, bez viditelných stop porušení, velmi vysoké napětí povlaku 220MPa	Povlak je nerovnoměrně vyloučený
3.		5	Matný vzhled povlaku, bez viditelných stop porušení, napětí povlaku 155MPa	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií
4.		7	Matný vzhled povlaku, výskyt povrchových nečistot, který může být způsoben špatným oplachem, napětí povlaku 119MPa	Povlak je nerovnoměrně vyloučený, mezi povlakem a vzorkem jsou nečistoty
5.	40°C	1	Čistý matný povlak bez známek poškození, , velmi vysoké napětí povlaku 284MPa	Povlak je nerovnoměrně vyloučený, bez anomálií
6.		3	Docházelo k prvním známkám odlupování povlaku na hranách vzorku v jeho spodní části. vysoké napětí povlaku 174MPa	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií
7.		5	Povlaky s vysokým leskem, na hranách dochází k minimálnímu odlupování, napětí povlaku 161MPa	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií, výrazná přechodová vrstva
8.		7	Povlak s vysokým leskem, na hranách dochází k značnému odlupování - vysoká tvrdost, napětí povlaku 187MPa	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií
9.	25°C	1	Povlak částečně lesklý, nedochází k praskání povlaku, vysoké napětí povlaku 210MPa	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií, bez vzniku přechodové vrstvy
10.		3	Povlak s vysokým leskem, minimální praskání na hranách vzorku, vysoké napětí povlaku 272MPa	Povlak je hrbolatý, rovnoměrně vyloučený, méně výrazný přechod
11.		5	Největší vyloučená vrstva, vysoký lesk, docházelo k odlupování povlaku na hranách, vysoká tvrdost povlaku	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií
12.		7	Povlak je značně poškozen	Povlak je nerovnoměrně vyloučený, obsahuje nečistoty,



Tab. 30 Vzorky č. 13 - 24, identifikační tabulka povlaků

Vzorek	Parametry vylučování		Charakteristika vyloučené vrstvy (2 g/l sacharinu)	
	Teplota	Proudová hustota [A/dm ²]	Vizuální kontrola povlaku	Metalografické studium vyloučené vrstvy
13.	25°C	1	Povlak je lesklý bez známek poškození, dobrá přilnavost, vysoké napětí 313MPa	Povlak je rovnoměrně vyloučený, hladký, bez anomálii
14.		3	Povlak je lesklý, nerovnoměrně vyloučený, nedochází k praskání, napětí 110 MPa	Mezi povlakem jsou nečistoty, špatná přilnavost povlaku.
15.		5	Povlak je nerovnoměrně vyloučený, lesklý, napětí povlaku 83MPa	Povlak je nerovnoměrně vyloučený, drobné nečistoty mezi povlakem a vzorkem.
16.		7	U tohoto povlaku nedošlo k vyloučení vrstvy - došlo ke špatnému zapojení obvodu	U tohoto povlaku nedošlo k vylučování Ni-Fe
17.	40°C	1	Nejmenší vyloučená vrstva, povlak je lesklý, výskyt map - způsobené špatným odmaštěním	V povlaku jsou nečistoty, povlak je rovnoměrně vyloučený.
18.		3	Čistý povlak, bez anomálií, lesklý, rovnoměrně vyloučený, nízké napětí povlaku 19MPa	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií, drobné nečistoty mezi povlakem a vzorkem
19.		5	Čistý povlak, bez anomálií, lesklý, rovnoměrně vyloučený, vznik tlakových napětí -20MPa	Povlak obsahuje drobné nečistoty, rovnoměrně vyloučený.
20.		7	Povlak je lesklý bez známek poškození a anomálií, vznik tlakových napětí -28MPa	Vyloučený povlak obsahuje drobné nečistoty rovnoměrně vyloučený
21.	60°C	1	Nehomogenní, výskyt map povrchových nečistot, který může být způsoben špatným oplachem či špatnou manipulací vzorku	Povlak obsahuje nečistoty mezi vzorkem a povlakem, rovnoměrně vyloučený.
22.		3	Vysoký lesk, bez viditelných stop porušení, nízká hodnota vyloučené vrstvy 8μm, minimální napětí povlaku 12MPa	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií, čistý, výrazná vrstva počátku vylučování
23.		5	Vysoký lesk, bez viditelných stop porušení, minimální napětí povlaku 4MPa	Povlak je rovnoměrně vyloučený, drobné nečistoty mezi povlakem a vzorkem.
24.		7	Vysoký lesk, bez viditelných stop porušení, minimální napětí povlaku -3MPa	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií, bez vzniku počáteční vrstvy vylučování



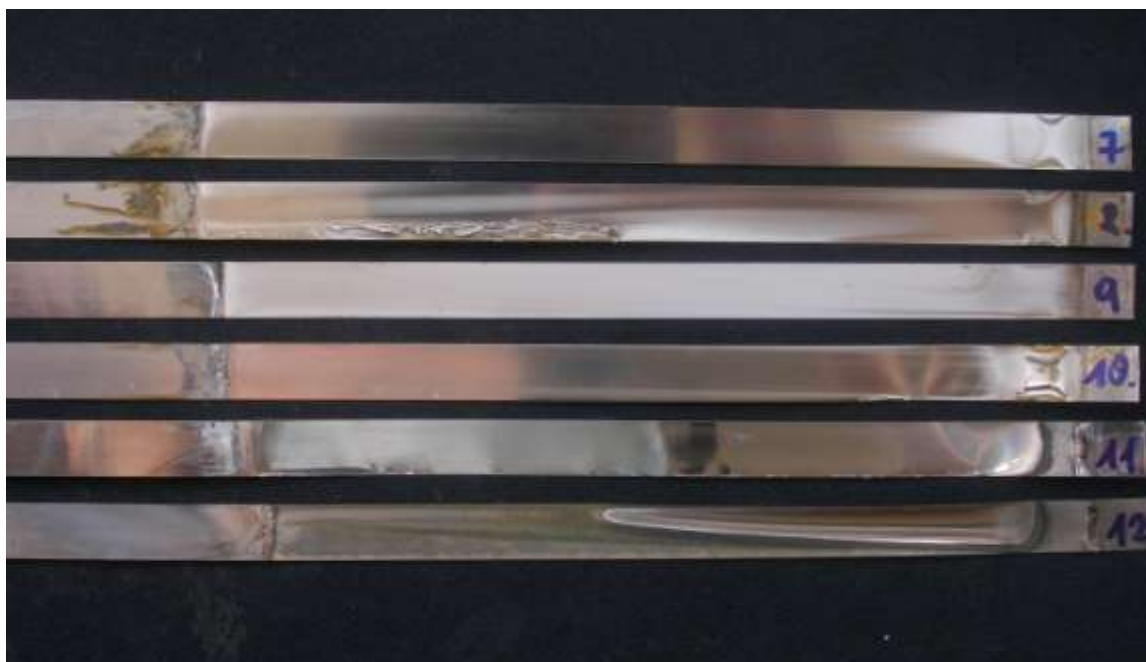
4.2 Vizuální kontrola povlaku

Makroskopická kontrola byla dokumentována digitálním fotoaparátem značky OLYMPUS model CAMEDIA c-7070



Obr. 4 Vzorky č. 1 až 6 vizuální kontrola povlaku

Povlaky se vyznačovali matným vzhledem, rovnoměrným vylučováním, bez známek odlupování povlaku. U vzorku 1 se vyskytuje nerovnoměrně vyloučený povlak, výskyt povrchových nečistot, který může být způsoben špatným oplachem, povlak je nehomogenní. Vzorky č. 2, 3, 4, 5 jsou bez jakýchkoliv viditelných stop porušení, povlaky jsou rovnoměrné. U vzorku č. 6 docházelo k prvním známkám odlupování povlaku na hranách vzorku v jeho spodní části.



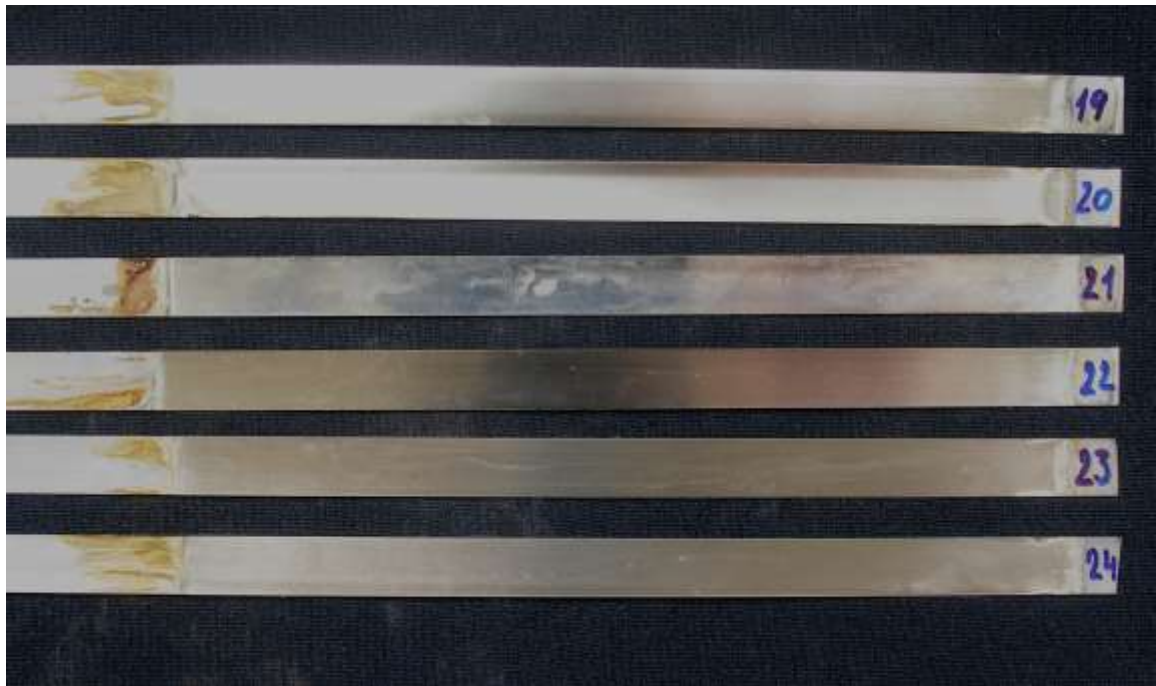
Obr. 5 Vzorky č. 7 až 12 vizuální kontrola povlaku

Povlaky s vysokým leskem, na hranách dochází k značnému odlupování, praskání a ztráty přilnavosti u všech vzorků. Povlaky jsou tvrdé. U vzorku č. 7 a 9 je odlupování minimální.



Obr. 6 Vzorky č. 13 až 18 vizuální kontrola povlaku

Povlaky s vysokým leskem, povlak vzorku č. 13 a 18 rovnoměrně vyloučený bez praskání a ztráty přilnavosti. Povlaky vzorků č. 14, 15 a 16 jsou nerovnoměrně vyloučené, dochází k praskání a odlupování povlaku. U vzorku č. 17 dochází k částečnému výskytu map.

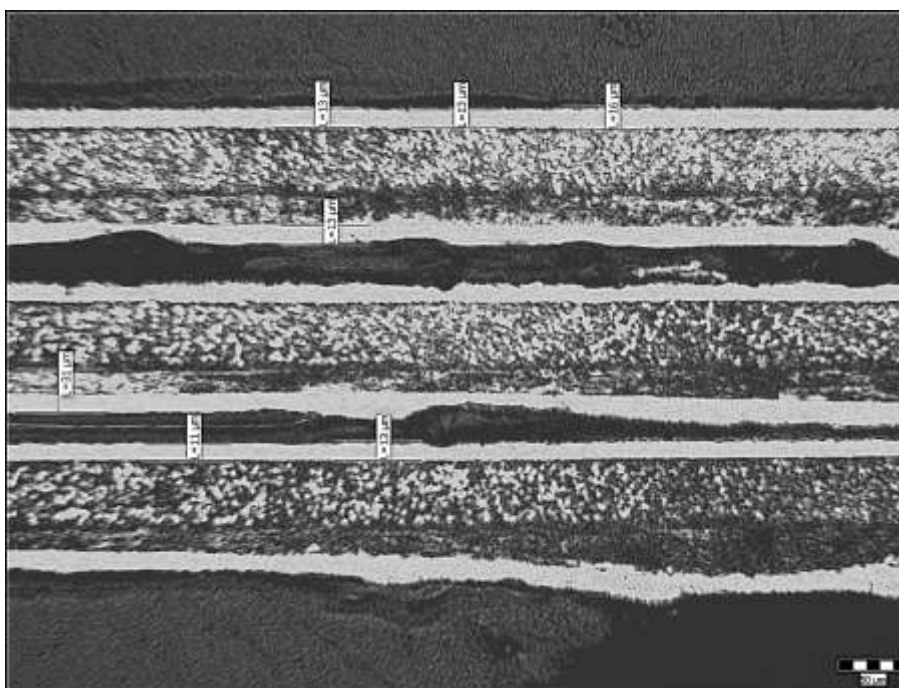


Obr. 7 Vzorky č. 19 až 24 vizuální kontrola povlaku

Povlaky se vyznačovali výrazným lesklým vzhledem s rovnoměrným vylučováním, bez známek odlupování a praskání povlaku. Povlak vzorku č. 21 je nehomogenní, výskyt map povrchových nečistot, který může být způsoben špatným oplachem či špatnou manipulací vzorku. Nejlepších vizuálních vlastností dosahuje vzorek č. 22, 23, 24 bez viditelných stop porušení.



4.3 Metalografické studium vyloučených vrstev

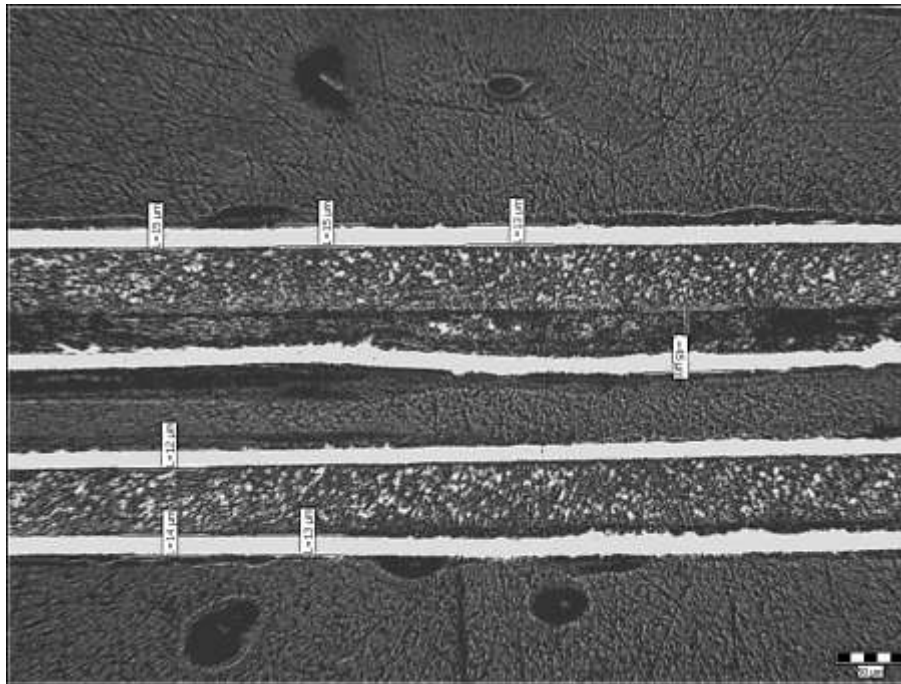


Obr. 8 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 1
(M 100 : 1)

Tab. 31 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 1

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	13	Povlak je nerovnoměrně vyloučený, špatná přilnavost ke vzorku
2	13	
3	16	
4	13	
5	13	
6	11	

Statistiky		
Střední hodnota	13,11	[μm]
Sm. odchylka	1,46	
Úsečka 7	31	

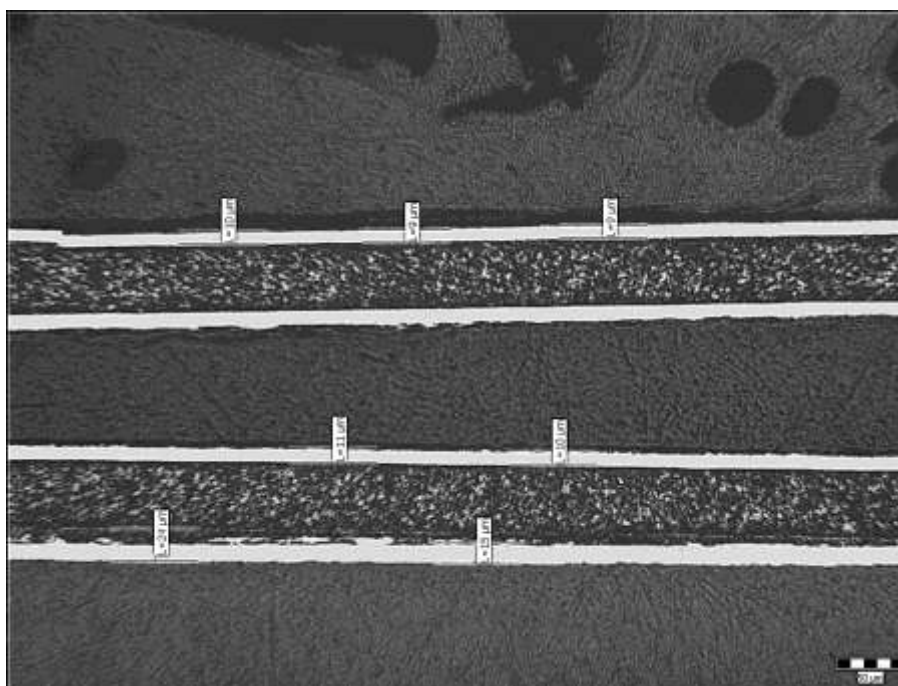


Obr. 9 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 2
(M 100 : 1)

Tab. 32 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 2

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	15	Povlak je nerovnoměrně vyloučený, viditelná přechodová vrstva počátku vylučování Ni-Fe
2	15	
3	13	
4	12	
5	14	
6	13	

Statistiky		
<i>Střední hodnota</i>	13,6	<i>[μm]</i>
<i>Sm. odchylka</i>	1,11	
<i>Úsečka 7</i>	45	

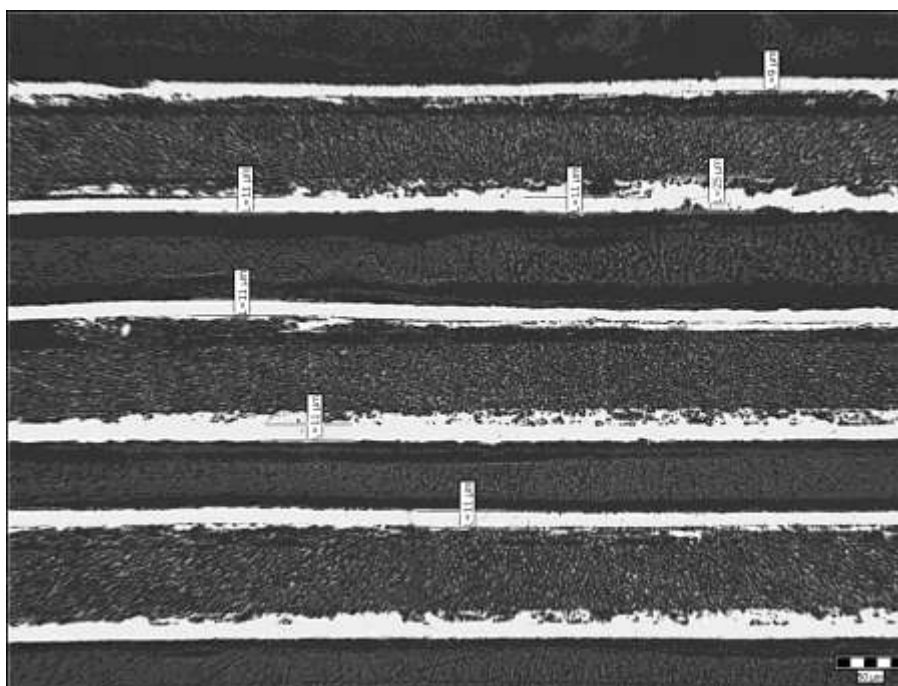


Obr. 10 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 3
(M 100 : 1)

Tab. 33 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 3

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	10	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií, nevýrazná přechodová vrstva vylučování
2	9	
3	9	
4	11	
5	10	
6	15	

Statistiky		
Sřední hodnota	10,6	[μm]
Sm. odchylka	1,39	
Úsečka 7	24	

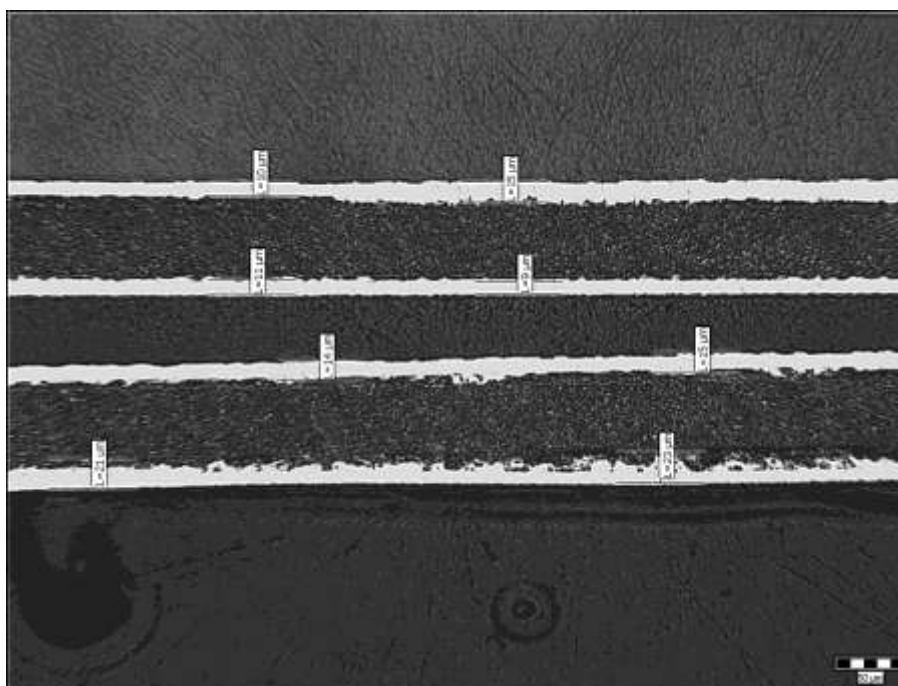


Obr. 11 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 4
(M 100 : 1)

Tab. 34 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 4

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	11	Povlak je nerovnoměrně vyloučený, mezi povlakem a vzorkem jsou nečistoty, které způsobují zhoršení přilnavosti.
2	11	
3	11	
4	11	
5	11	
6	9	

Statistiky		
Střední hodnota	10,6	[μm]
Sm. odchylka	1,04	
Úsečka 7	25	

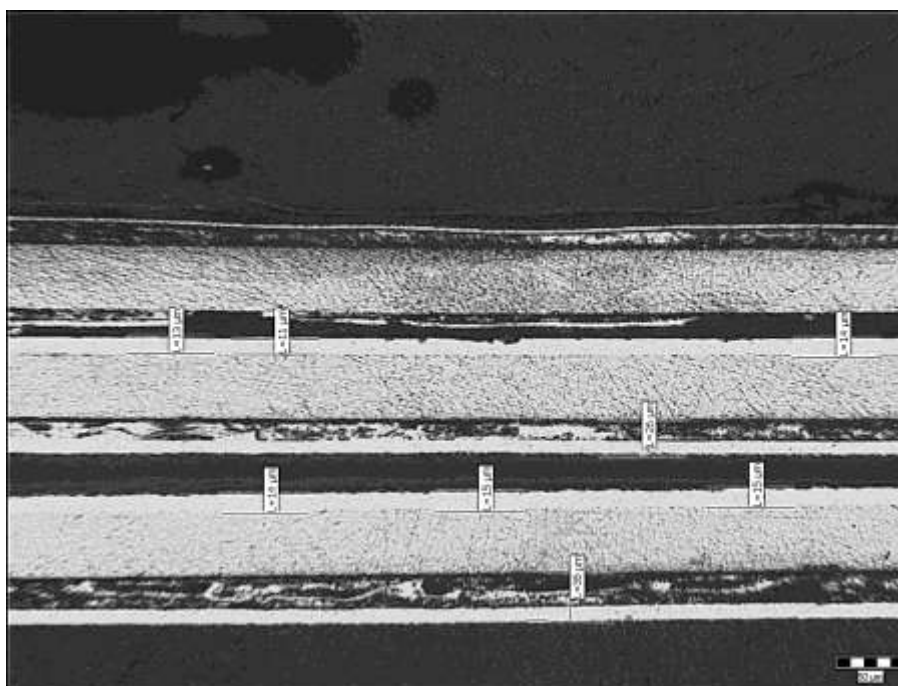


Obr. 12 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 5
(M 100 : 1)

Tab. 35 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 5

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	10	Povlak je při počátku vylučování nerovnoměrně vyloučený, bez anomálií
2	11	
3	15	
4	9	
5	14	
6	15	

Statistiky		
Sřední hodnota	12,3	[μm]
Sm. odchylka	2,4	
Úsečka 7	21	

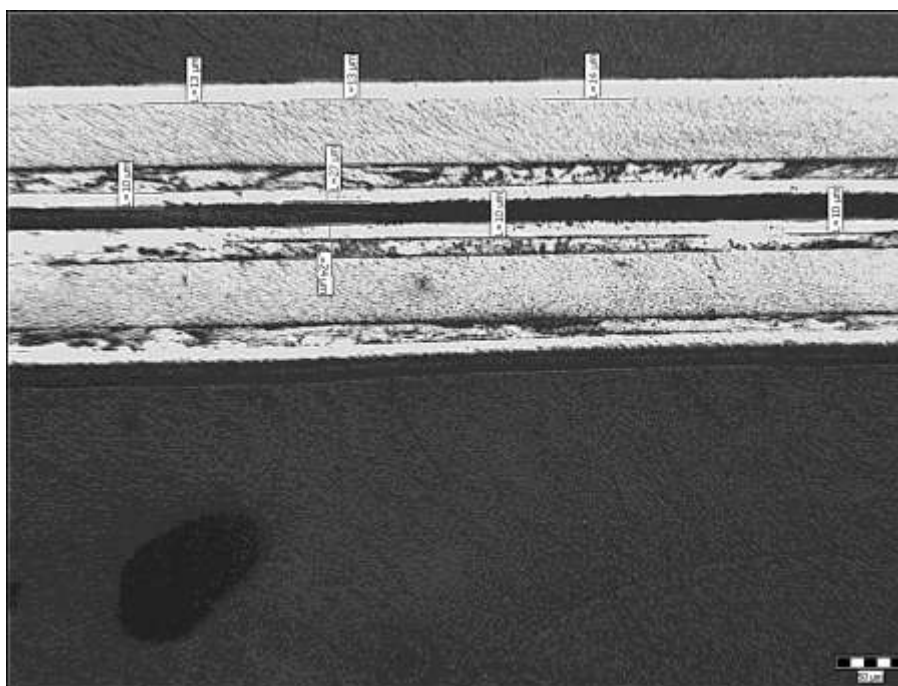


Obr. 13 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 6
($M 100 : 1$)

Tab. 36 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 6

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	13	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií, výrazná přechodová vrstva
2	11	
3	14	
4	15	
5	14	
6	15	

Statistiky		
Sřední hodnota	13,6	[μm]
Sm. odchylka	1,58	
Úsečka 7	36	

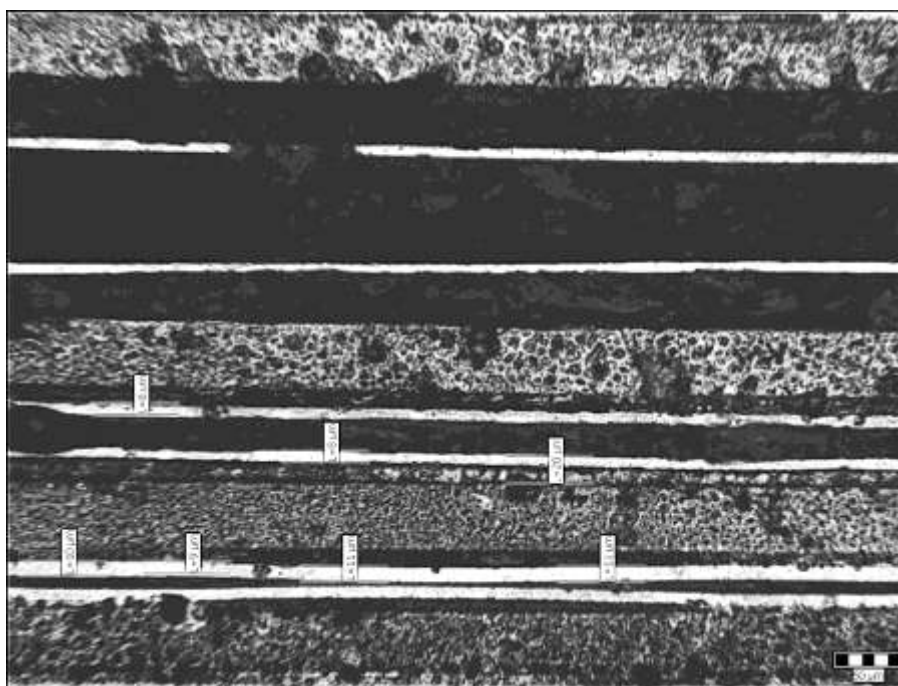


Obr. 14 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 7
(M 100 : 1)

Tab. 37 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 7

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	13	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií, výrazná přechodová vrstva
2	13	
3	14	
4	10	
5	10	
6	10	

Statistiky		
Střední hodnota	11,6	[μm]
Sm. odchylka	2,47	
Úsečka 7	27	

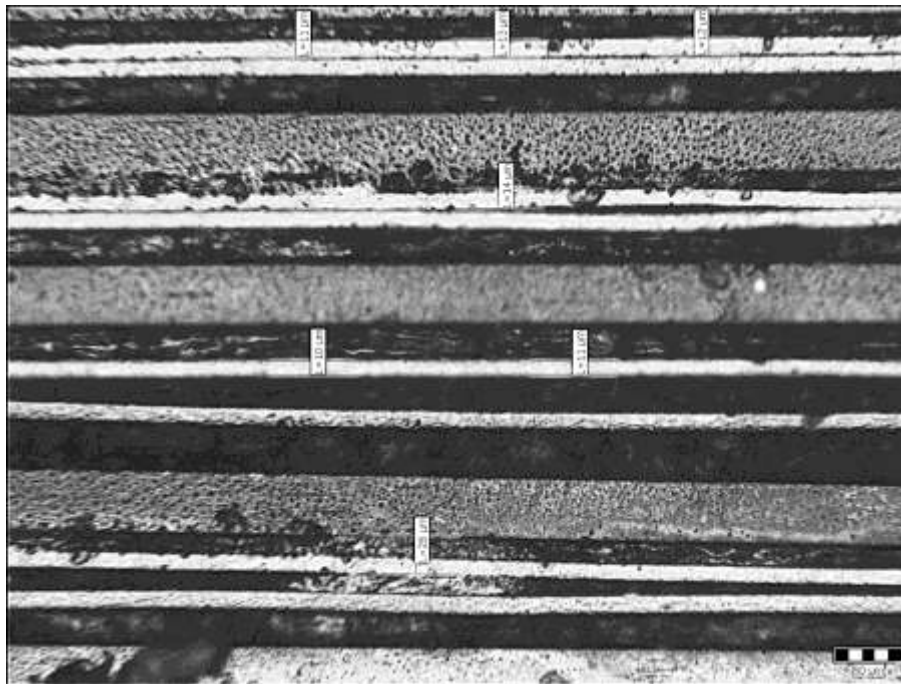


Obr. 15 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 8
(M 100 : 1)

Tab. 38 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 8

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	11	Nerovnoměrně vyloučený povlak, obsahuje nečistoty, dochází k odlupování povlaku.
2	10	
3	10	
4	11	
5	11	
6	13	

Statistiky		
Sřřední hodnota	11	[μm]
Sm. odchylka	0,91	
Úsečka 7	26	

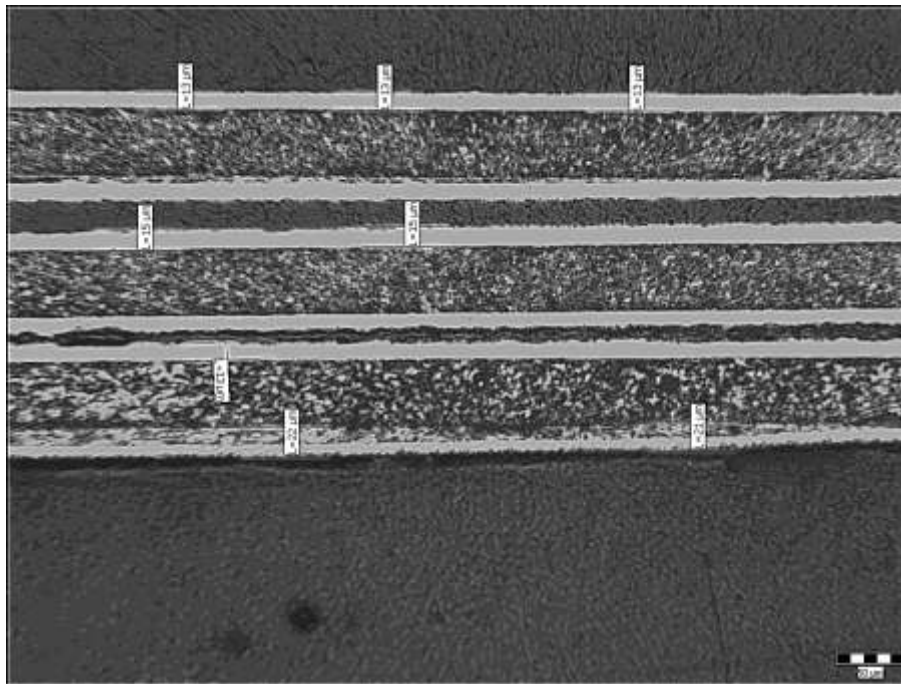


Obr. 16 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 9
(M 100 : 1)

Tab. 39 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 9

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	13	Povlak je rovnoměrně vyloučený, mezi povlakem a vzorkem jsou nečistoty.
2	13	
3	13	
4	15	
5	12	
6	14	

Statistiky		
Sřední hodnota	13,3	[μm]
Sm. odchylka	0,9	
Úsečka 7	22	

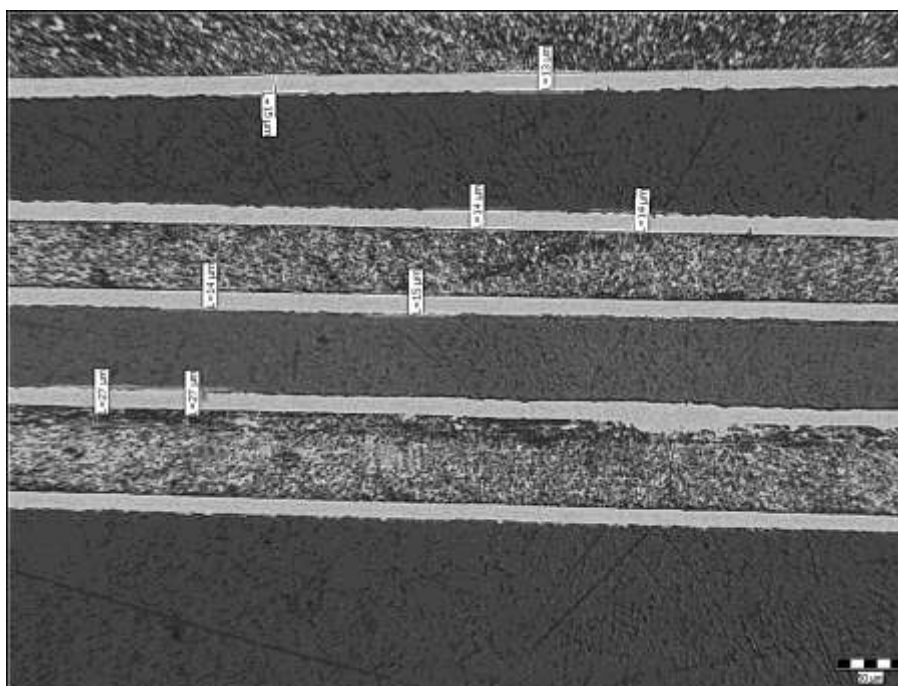


Obr. 17 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 10
(M 100 : 1)

Tab. 40 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 10

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	13	Povlak je hrbolatý, rovnoměrně vyloučený, méně výrazný přechod počáteční vrstvy vylučování
2	13	
3	13	
4	15	
5	15	
6	13	

Statistiky		
Sřední hodnota	13,6	[μm]
Sm. odchylka	1,5	
Úsečka 7	22	

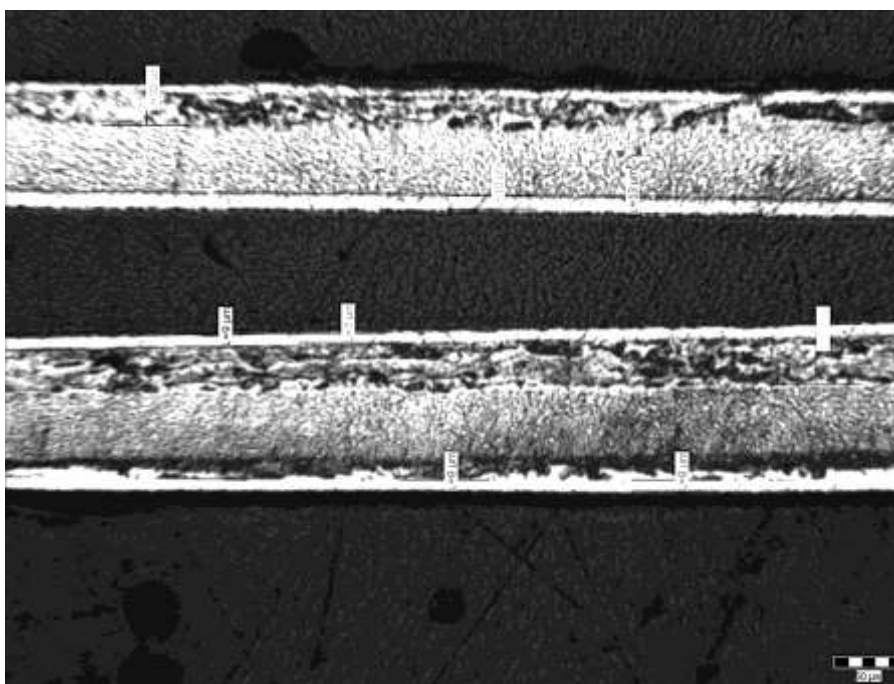


Obr. 18 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 11
(M 100 : 1)

Tab. 41 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 11

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	15	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií
2	13	
3	14	
4	14	
5	15	
6	14	

Statistiky		
Sřední hodnota	14,1	[μm]
Sm. odchylka	0,82	
Úsečka 7	27	



Obr. 19 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 12
(M 100 : 1)

Tab. 42 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 12

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	9	Povlak je nerovnoměrně vyloučený, obsahuje nečistoty, špatná přilnavost
2	7	
3	8	
4	8	
5	13	
6	10	

Statistiky		
Sřední hodnota	9,1	[μm]
Sm. odchylka	1,95	
Úsečka 7	43	

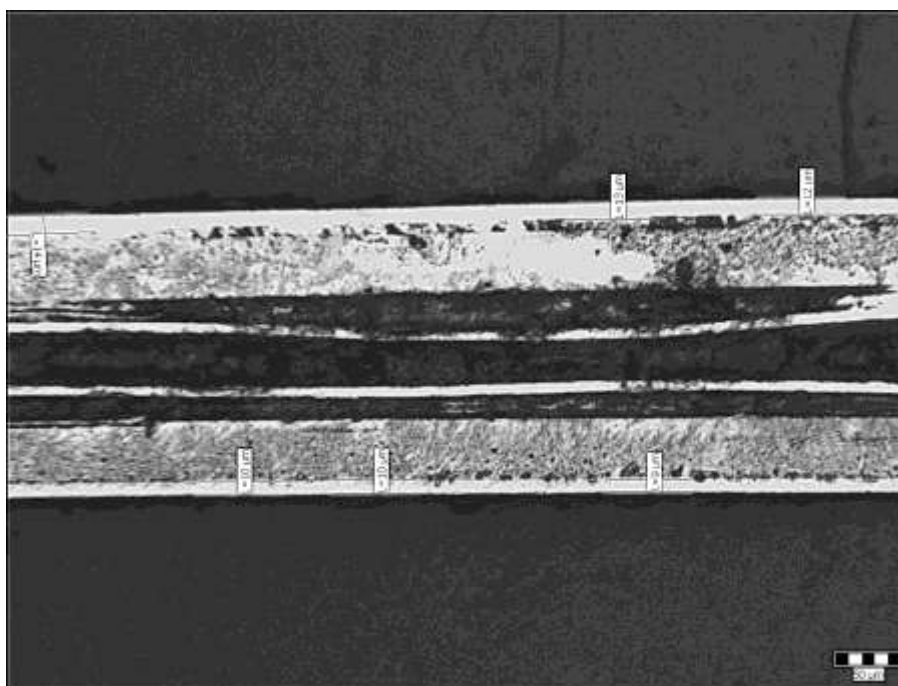


Obr. 20 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 13
(M 100 : 1)

Tab. 43 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 13

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	11	Povlak je rovnoměrně vyloučený, hladký, bez anomálií
2	11	
3	10	
4	10	
5	10	
6	11	

Statistiky		
Sřední hodnota	10,5	[μm]
Sm. odchylka	0,5	
Úsečka 7	31	

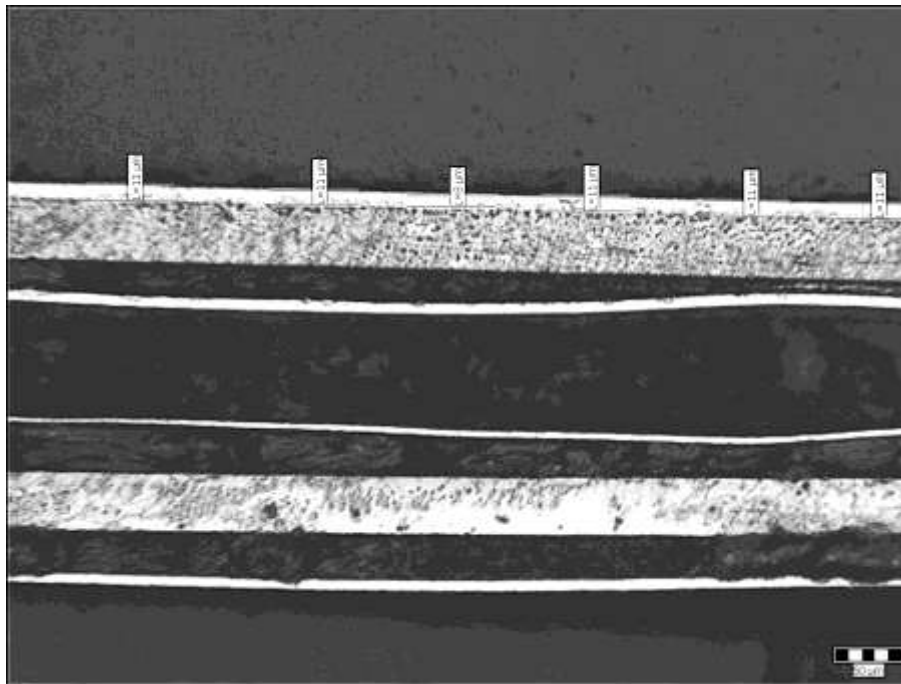


Obr. 21 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 14
(M 100 : 1)

Tab. 44 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 14

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	11	Mezi povlakem jsou nečistoty, špatná přilnavost povlaku.
2	10	
3	12	
4	14	
5	9	
6	13	

Statistiky		
<i>Sřední hodnota</i>	11,3	<i>[μm]</i>
<i>Sm. odchylka</i>	1,8	
<i>Úsečka 7</i>	19	

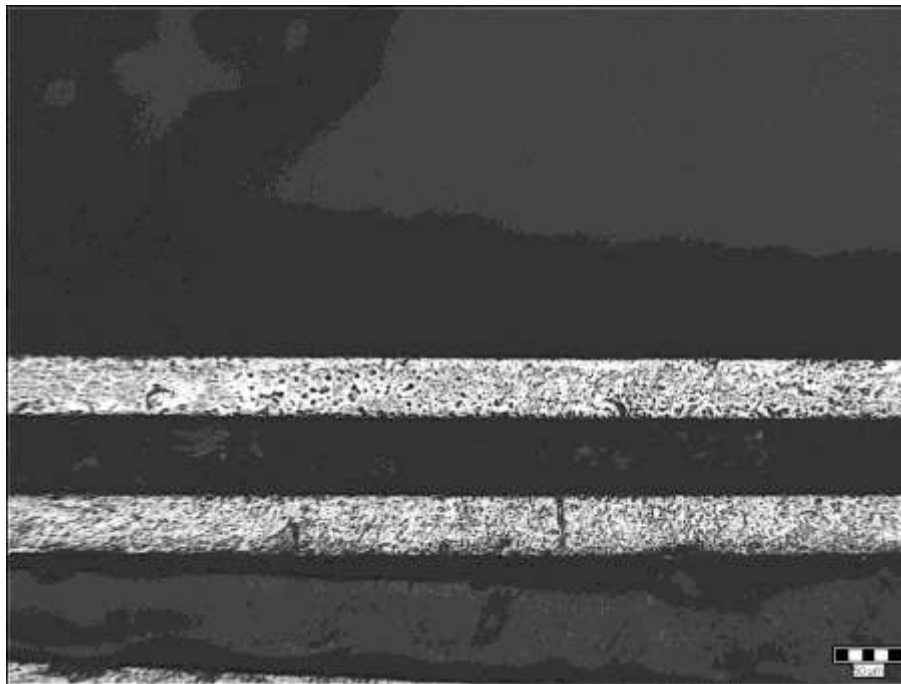


Obr. 22 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 15
(M 100 : 1)

Tab. 45 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 15

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	11	Povlak je nerovnoměrně vyloučený, drobné nečistoty mezi povlakem a vzorkem.
2	11	
3	11	
4	8	
5	11	
6	11	

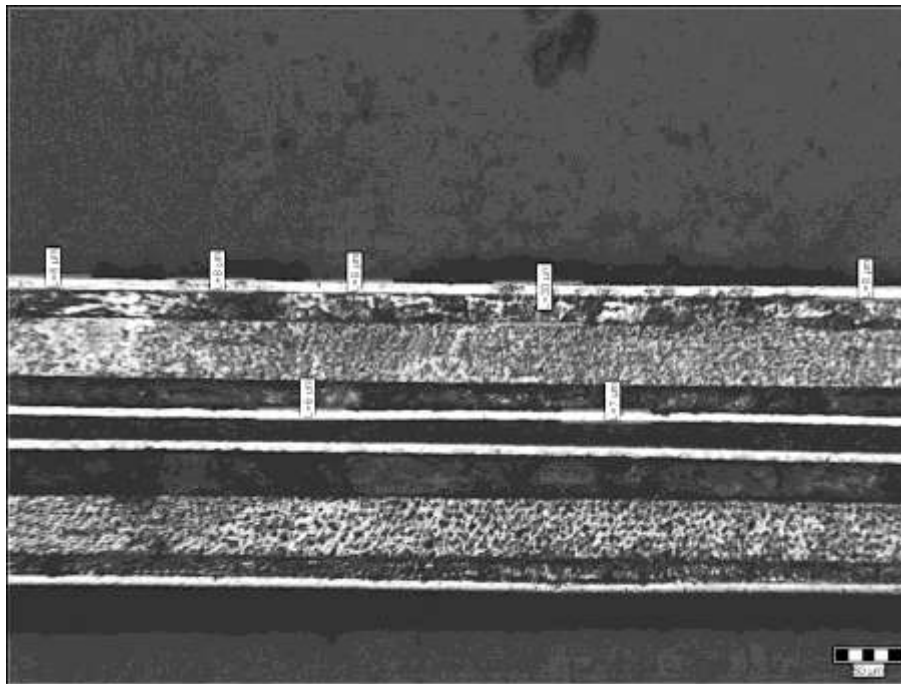
Statistiky		
<i>Střední hodnota</i>	10,5	[μm]
<i>Sm. odchylka</i>	1,1	
<i>Usečka 7</i>	35	



Obr. 23 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 16
(M 100 : 1)

Tab. 46 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 16

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	0	U tohoto povlaku nedošlo k vylučování Ni-Fe
2	0	
3	0	
4	0	
5	0	
6	0	

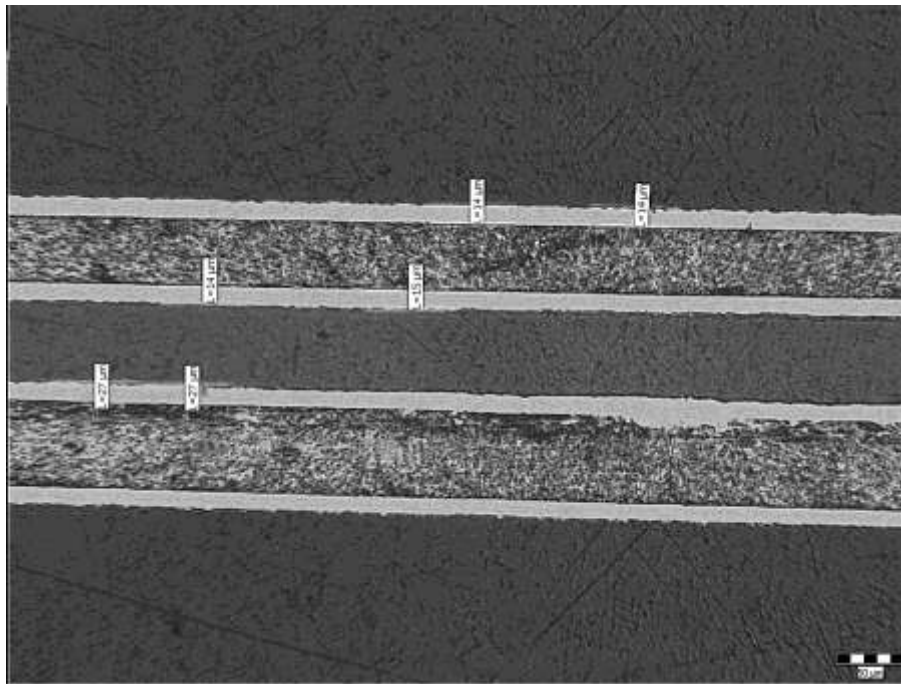


Obr. 24 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 17
(M 100 : 1)

Tab. 47 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 17

<i>Číslo měření</i>	<i>Hodnota [μm]</i>	<i>Popis</i>
1	9	V povlaku jsou nečistoty, povlak je rovnoměrně vyloučený.
2	8	
3	8	
4	9	
5	7	
6	7	

<i>Statistiky</i>		
<i>Střední hodnota</i>	8	<i>[μm]</i>
<i>Sm. odchylka</i>	0,7	
<i>Úsečka 7</i>	28	

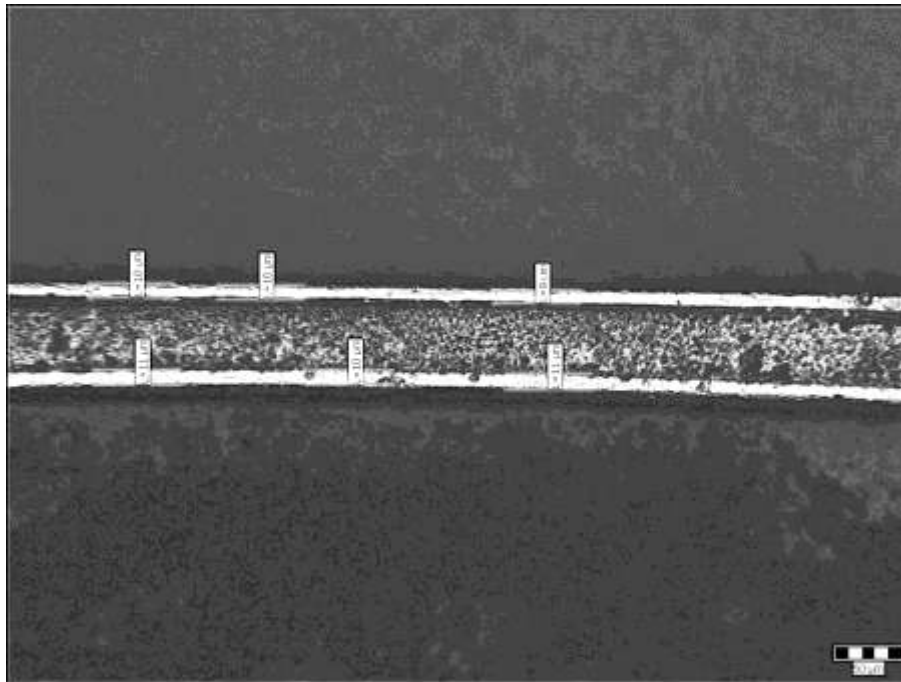


Obr. 25 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 18
(M 100 : 1)

Tab. 48 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 18

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	10	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálii, drobné nečistoty mezi povlakem a vzorkem.
2	10	
3	8	
4	9	
5	8	
6	9	

Statistiky		
Sřední hodnota	9	[μm]
Sm. odchylka	0,8	
Usečka 7	22	

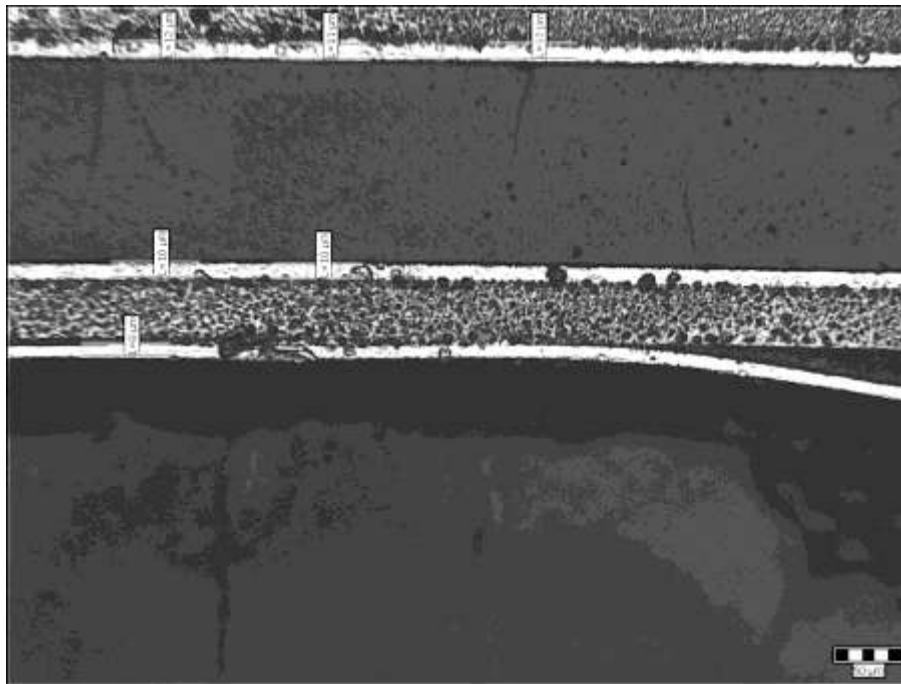


Obr. 26 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 19
(M 100 : 1)

Tab. 49 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 19

<i>Číslo měření</i>	<i>Hodnota [μm]</i>	<i>Popis</i>
1	10	Povlak obsahuje drobné nečistoty, rovnoměrně vyloučený.
2	10	
3	9	
4	11	
5	10	
6	11	

<i>Statistiky</i>		
<i>Střední hodnota</i>	10,2	<i>[μm]</i>
<i>Sm. odchylka</i>	0,7	
<i>Usečka 7</i>	0	

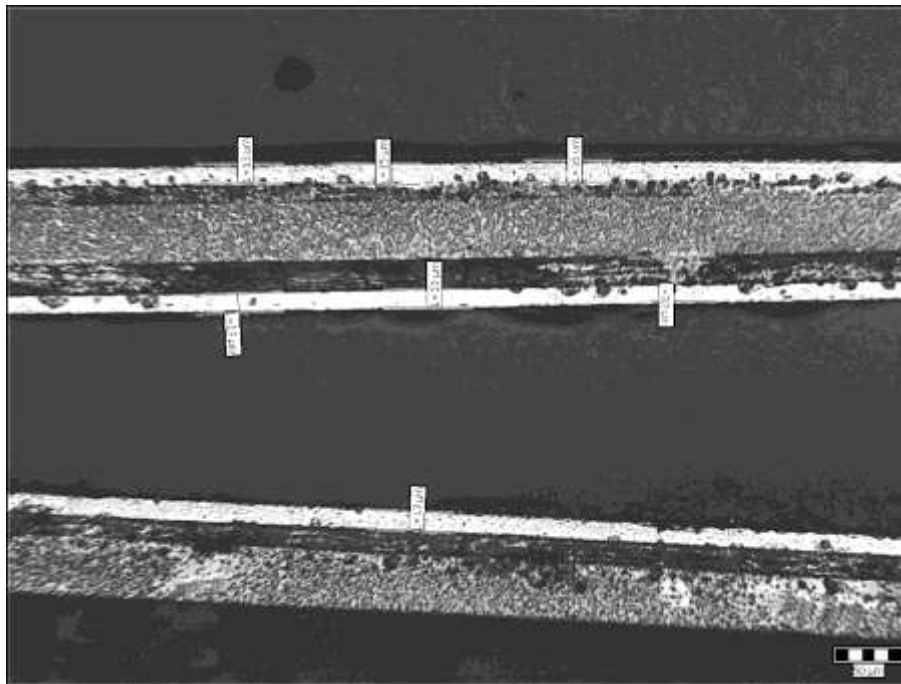


Obr. 27 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 20
(M 100 : 1)

Tab. 50 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 20

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	12	Vyloučený povlak obsahuje drobné nečistoty jak mezi povlakem a vzorkem, tak i v samotném povlaku, rovnoměrně vyloučený
2	11	
3	11	
4	10	
5	10	
6	8	

Statistiky		
Sřední hodnota	10,3	[μm]
Sm. odchylka	1,2	
Usečka 7	0	

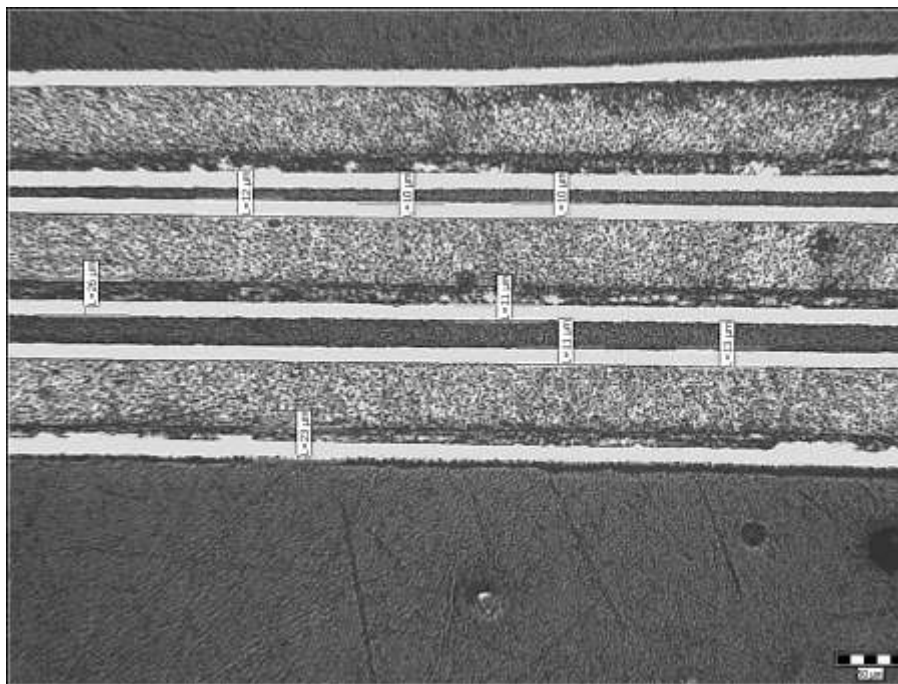


Obr. 28 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 21
(M 100 : 1)

Tab. 51 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 21

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	13	Povlak obsahuje nečistoty mezi vzorkem a povlakem, rovnoměrně vyloučený.
2	15	
3	16	
4	13	
5	13	
6	13	

Statistiky		
Sřední hodnota	13,8	[μm]
Sm. odchylka	1,2	
Úsečka 7	32	

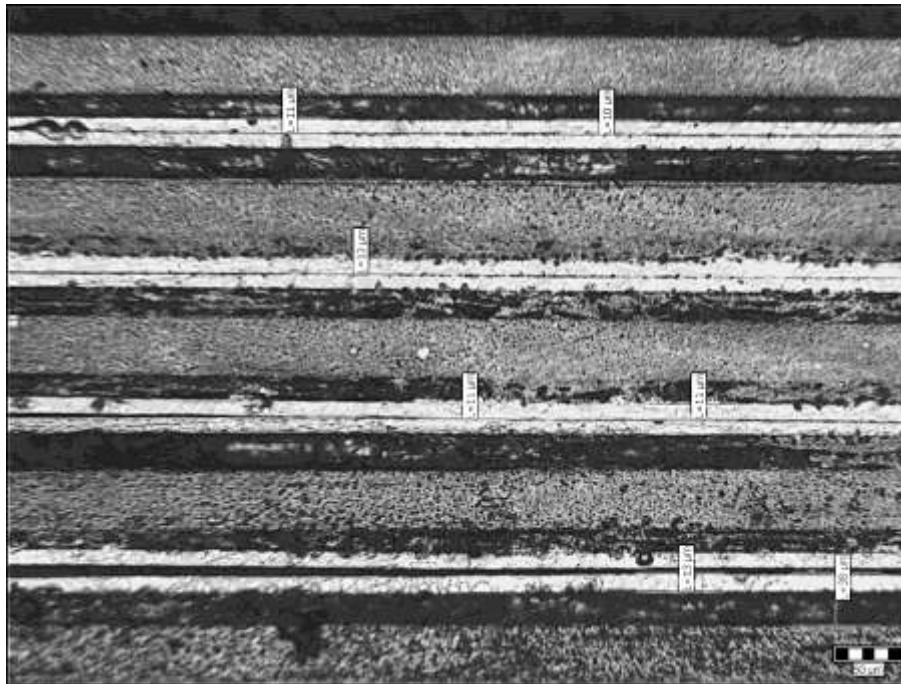


Obr. 29 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 22
(M 100 : 1)

Tab. 52 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 22

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	9	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií, čistý, výrazná vrstva počátku vylučování
2	11	
3	11	
4	8	
5	8	
6	10	

Statistiky		
Sřední hodnota	8	[μm]
Sm. odchylka	2,1	
Úsečka 7	20	

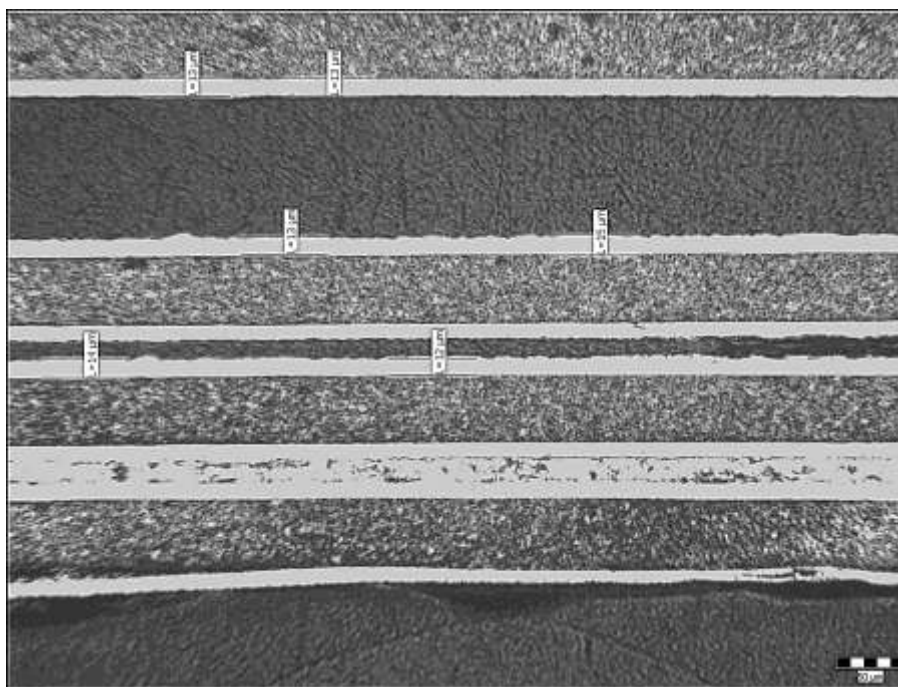


Obr. 30 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 23
(M 100 : 1)

Tab. 53 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 23

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	11	Povlak je rovnoměrně vyloučený, drobné nečistoty mezi povlakem a vzorkem.
2	13	
3	11	
4	13	
5	11	
6	10	

Statistiky		
<i>Střední hodnota</i>	11,5	<i>[μm]</i>
<i>Sm. odchylka</i>	0,95	
<i>Úsečka 7</i>	38	



Obr. 31 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 24
(M 100 : 1)

Tab. 54 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 24

Číslo měření	Hodnota [μm]	Popis
1	11	Povlak je rovnoměrně vyloučený, bez anomálií, bez vzniku počáteční vrstvy vylučování
2	13	
3	11	
4	12	
5	10	
6	14	

Statistiky		
Sřední hodnota	11,8	[μm]
Sm. odchylka	1,34	
Úsečka 7	28	



Vzorek bez Ni-Fe povlaku:



*Obr. 32 Metalografie vzorku č. 25 bez povlaku
(M 100 : 1)*



4.4 Parametry vylučování, naměřené a vypočítaných hodnot

Tab. 55 Vzorky č. 1 až 4 vypočítané, naměřené hodnoty

Číslo Vzorku	Parametry vylučování		Naměřené hodnoty		Vypočítané hodnoty			
	[A/dm ²]	[°C]	t [min]	Δl [μm]	Teoret. Tloušťka [μm]	σ [MPa]	η[%]	δμm [min]
1.	1	60	38	-66,6	8,4	210,6	80,4	43,0
			39	-68,1	8,6	215,4		
			40	-69,8	8,8	220,8		
			41	-71,3	9,1	225,5		
			42	-73,1	9,3	231,2		
			43	-74,7	9,5	236,3		
			44	-76,3	9,7	241,3		
2.	3	60	10	-40,1	6,6	130,0	74,9	14,1
			11	-50	7,3	150,8		
			12	-60,3	7,9	190,9		
			13	-60,3	8,6	190,9		
			14	-70,2	9,3	220,8		
			15	-70,4	9,9	230,4		
			16	-70,5	10,6	230,7		
3.	5	60	4,4	-28,4	4,9	89,8	93,5	6,3
			5,4	-33,9	6,0	107,2		
			6,4	-38,8	7,1	122,7		
			7,4	-44	8,2	139,2		
			8,4	-49,3	9,3	155,9		
			9,4	-54,5	10,4	172,4		
			10,4	-59,6	11,5	188,5		
11,4	-62,2	12,6	196,7					
4.	7	60	2	-13,4	3,1	42,4	94,2	4,1
			3	-18,6	4,6	58,8		
			4	-24,5	6,2	77,5		
			5	-30,2	7,7	95,5		
			6	-36,0	9,3	113,9		
			7	-41,5	10,8	131,3		
			8	-46,5	12,4	147,1		
2	-13,4	13,9	42,4					



Tab. 56 Vzorky č. 5 až 8 vypočítané, naměřené hodnoty pro

Číslo Vzorku	Parametry vylučování		Naměřené hodnoty		Vypočítané hodnoty			
	[A/dm ²]	[°C]	t [min]	Δl [μm]	Teoret. Tloušťka [μm]	σ [MPa]	η [%]	δμm [min]
5.	1	40	38	-82,6	8,4	261,3	88,1	39,2
			39	-84,4	8,6	266,9		
			40	-86,8	8,8	274,5		
			41	-88,4	9,1	279,6		
			42	-89,9	9,3	284,3		
			43	-92	9,5	291,0		
			44	-94	9,7	297,3		
			45	-94,2	9,9	297,9		
6.	3	40	10	-40,6	6,6	128,4	93,9	11,3
			11	-43,6	7,3	137,9		
			12	-49,1	7,9	155,3		
			13	-51,8	8,6	163,8		
			14	-55,1	9,3	174,3		
			15	-58,4	9,9	184,7		
			16	-63,4	10,6	200,5		
			17	-64,2	11,3	203,1		
7.	5	40	4,4	-28,6	4,9	90,5	97,8	6,0
			5,4	-33,3	6,0	105,3		
			6,4	-38,9	7,1	123,0		
			7,4	-45,1	8,2	142,6		
			8,4	-51,2	9,3	161,9		
			9,4	-56,9	10,4	180,0		
			10,4	-62,9	11,5	198,9		
			11,4	-65,3	12,6	206,5		
8.	7	40	2	-17,1	3,1	54,1	93,7	4,1
			3	-28,4	4,6	89,8		
			4	-39,1	6,2	123,7		
			5	-49,7	7,7	157,2		
			6	-59,2	9,3	187,2		
			7	-67,8	10,8	214,4		
			8	-76,5	12,4	242,0		
			2	-79,5	13,9	251,5		



Tab. 57 Vzorky č. 9 až 12 vypočítané, naměřené hodnoty

Číslo Vzorku	Parametry vylučování		Naměřené hodnoty		Vypočítané hodnoty			
	[A/dm ²]	[°C]	t [min]	Δl [μm]	Teoret. Tloušťka [μm]	σ [MPa]	η [%]	δμm [min]
9.	1	25	38	-61,4	8,4	194,2	94,5	36,6
			39	-62,7	8,6	198,3		
			40	-64	8,8	202,4		
			41	-65,3	9,1	206,5		
			42	-66,5	9,3	210,3		
			43	-67,8	9,5	214,4		
			44	-69,3	9,7	219,2		
			45	-70,7	9,9	223,6		
10.	3	25	10	-65,6	6,6	207,5	90,5	11,7
			11	-71,1	7,3	224,9		
			12	-76,2	7,9	241,0		
			13	-81,2	8,6	256,8		
			14	-86,1	9,3	272,3		
			15	-90,5	9,9	286,2		
			16	-95,1	10,6	300,8		
			17	-96,3	11,3	304,6		
11.	5	25	4,4	-68,8	4,9	217,6	87,9	6,7
			5,4	-81,7	6,0	258,4		
			6,4	-94,3	7,1	298,3		
			7,4	-107,2	8,2	319,1		
			8,4	-119,5	9,3	358,0		
			9,4	-130,1	10,4	385,5		
			10,4	-138,9	11,5	409,3		
			11,4	-137,6	12,6	415,2		
12.	7	25	2	-10,1	3,1	31,9	59,9	6,5
			3	-14,1	4,6	44,6		
			4	-18,9	6,2	59,8		
			5	-24,1	7,7	76,2		
			6	-28,8	9,3	91,1		
			7	-33,1	10,8	104,7		
			8	-36,7	12,4	116,1		
			2	-39,1	13,9	123,7		



Tab. 58 Vzorky č. 13 až 16 vypočítané, naměřené hodnoty

Číslo Vzorku	Parametry vylučování		Naměřené hodnoty		Vypočítané hodnoty			
	[A/dm ²]	[°C]	t [min]	Δl [μm]	Teoret. Tloušťka [μm]	σ [MPa]	η [%]	δμm [min]
13.	1	25	38	-98,4	8,4	311,2	89,3	38,7
			39	-98,2	8,6	310,6		
			40	-98,4	8,8	311,2		
			41	-99,9	9,1	316,0		
			42	-99,1	9,3	313,4		
			43	-99,0	9,5	313,1		
			44	-101,7	9,7	321,7		
			45	-88,5	9,9	279,9		
14.	3	25	10	-23,8	6,6	75,3	80,4	13,1
			11	-26,1	7,3	82,6		
			12	-28,7	7,9	90,8		
			13	-31,9	8,6	100,9		
			14	-35	9,3	110,7		
			15	-37,7	9,9	119,2		
			16	-40,6	10,6	128,4		
			17	-42,2	11,3	133,5		
15.	5	25	4,4	-14,5	4,9	45,9	71,7	8,2
			5,4	-18,2	6,0	57,6		
			6,4	-21,4	7,1	67,7		
			7,4	-24,6	8,2	77,8		
			8,4	-26,5	9,3	83,8		
			9,4	-28,7	10,4	90,8		
			10,4	-31,1	11,5	98,4		
			11,4	-33,3	12,6	105,3		
16.	7	25	2	0	3,1	0,0	45,2	11,4
			3	0,9	4,6	-2,8		
			4	1,1	6,2	-3,5		
			5	1,4	7,7	-4,4		
			6	2,1	9,3	-6,6		
			7	2,6	10,8	-8,2		
			8	2,6	12,4	-8,2		
			2	2,4	13,9	-7,6		



Tab. 59 Vzorky č. 17 až 20 vypočítané, naměřené hodnoty

Číslo Vzorku	Parametry vylučování		Naměřené hodnoty		Vypočítané hodnoty			
	[A/dm ²]	[°C]	t [min]	Δl [μm]	Teoret. Tloušťka [μm]	σ [MPa]	η [%]	δμm [min]
17.	1	40	38	98,7	8,4	312,2	91,9	37,6
			39	99,2	8,6	313,8		
			40	100,6	8,8	318,2		
			41	101	9,1	319,5		
			42	104,4	9,3	330,2		
			43	104,6	9,5	330,8		
			44	104,7	9,7	331,2		
			45	104,8	9,9	331,5		
18.	3	40	10	-4,1	6,6	13,0	99,5	10,5
			11	-5,2	7,3	16,4		
			12	-5,6	7,9	17,7		
			13	-5,8	8,6	18,3		
			14	-6,0	9,3	19,0		
			15	-6,2	9,9	19,6		
			16	-6,2	10,6	19,6		
			17	-6,3	11,3	19,9		
19.	5	40	4,4	2,7	4,9	-8,5	97,3	6,0
			5,4	3,8	6,0	-12,0		
			6,4	5,1	7,1	-16,1		
			7,4	5,6	8,2	-17,7		
			8,4	6,4	9,3	-20,2		
			9,4	7,6	10,4	-24,0		
			10,4	8,8	11,5	-27,8		
			11,4	9	12,6	-28,5		
20.	7	40	2	2,5	3,1	-7,9	92,6	4,2
			3	4,2	4,6	-13,3		
			4	5,8	6,2	-18,3		
			5	7,4	7,7	-23,4		
			6	8,9	9,3	-28,1		
			7	10,4	10,8	-32,9		
			8	11,5	12,4	-36,4		
			2	11,5	13,9	-36,4		



Tab. 60 Vzorky č. 21 až 24 vypočítané, naměřené hodnoty

Číslo Vzorku	Parametry vylučování		Naměřené hodnoty		Vypočítané hodnoty			
	$[A/dm^2]$	$[^{\circ}C]$	$t [min]$	$\Delta l [\mu m]$	Teoret. Tloušťka $[\mu m]$	σ $[MPa]$	η [%]	$\delta\mu m$ $[min]$
21.	1	60	38	95,6	8,4	302,4	91,0	38,0
			39	96	8,6	303,6		
			40	97,4	8,8	308,1		
			41	98,7	9,1	312,2		
			42	99,3	9,3	314,1		
			43	100,1	9,5	316,6		
			44	101,3	9,7	320,4		
			45	101	9,9	319,5		
22.	3	60	10	-2,7	6,6	8,5	91,5	11,5
			11	-3,3	7,3	10,4		
			12	-4,2	7,9	13,3		
			13	-3,8	8,6	12,0		
			14	-4	9,3	12,7		
			15	-3,9	9,9	12,3		
			16	-4	10,6	12,7		
			17	-3,9	11,3	12,3		
23.	5	60	4,4	-0,5	4,9	1,6	97,6	6,0
			5,4	-0,7	6,0	2,2		
			6,4	-1	7,1	3,2		
			7,4	-1,3	8,2	4,1		
			8,4	-1,3	9,3	4,1		
			9,4	-1,6	10,4	5,1		
			10,4	-1,9	11,5	6,0		
			11,4	-1,9	12,6	6,0		
24.	7	60	2	0	3,1	0,0	99,2	3,8
			3	0,2	4,6	-0,6		
			4	1,1	6,2	-3,5		
			5	1,3	7,7	-4,1		
			6	1,2	9,3	-3,8		
			7	1,5	10,8	-4,7		
			8	1,9	12,4	-6,0		
			2	1,2	13,9	-3,8		

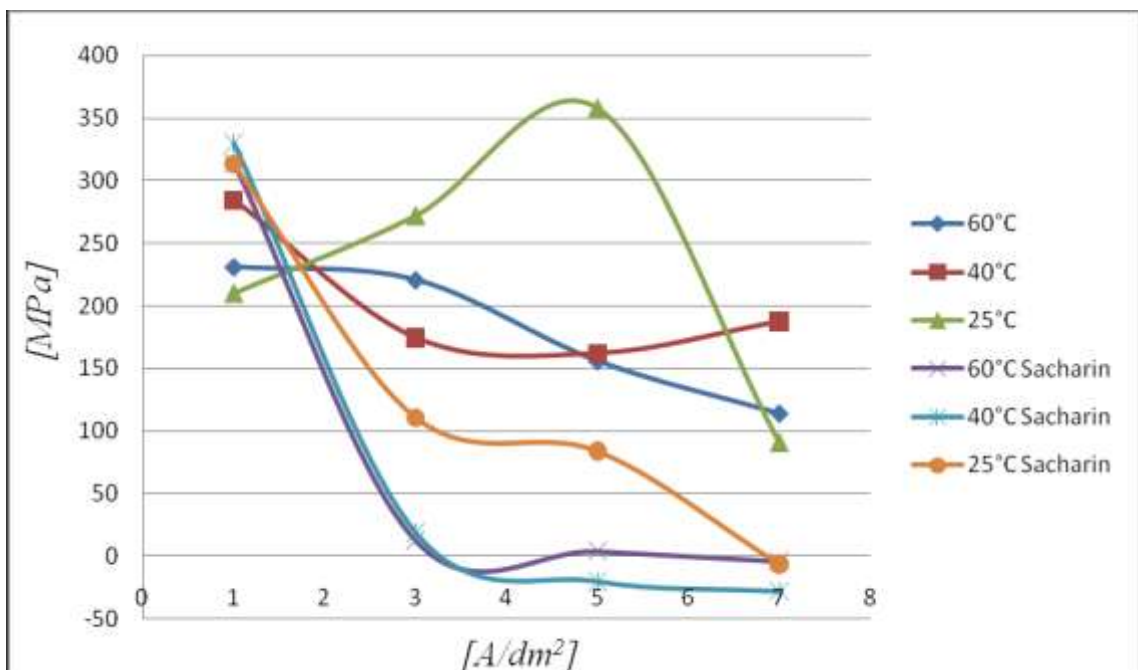


5 Shrnutí a diskuze

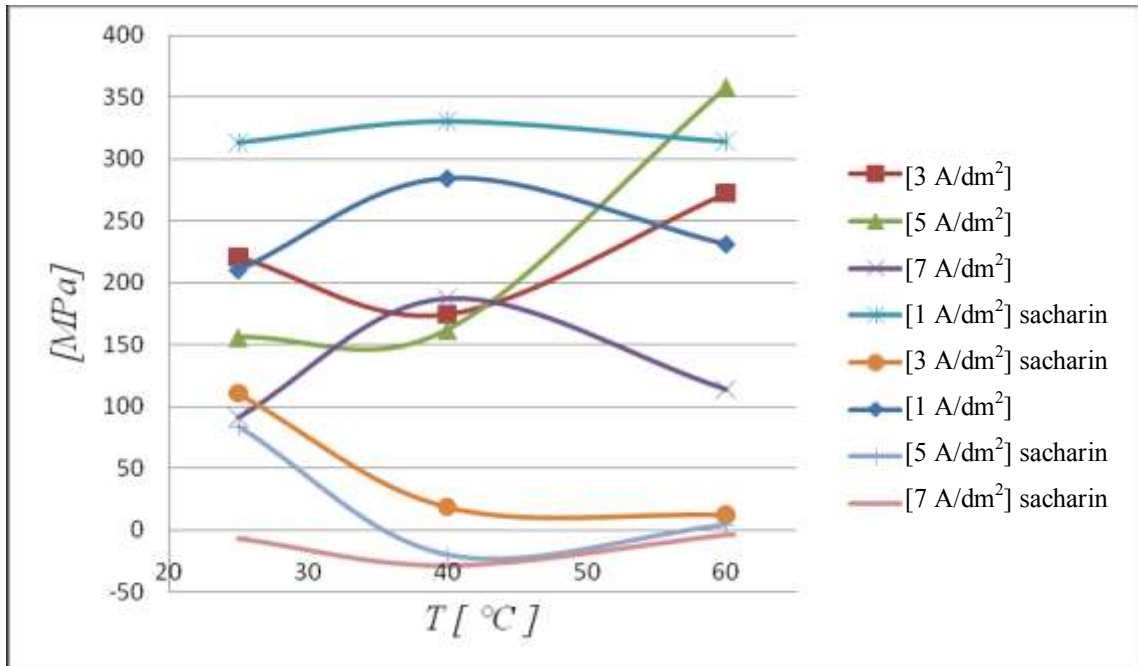
Praktická část byla realizována přípravou lázně, vylučováním povlaků na pásky zkušebních vzorků samotného IS - metru. Naměřené hodnoty použité pro výpočty a stanovení grafických znázornění utváří celkovou představu vlivu a závislosti na podmínkách vylučování a umožňují snazší orientaci celkového zhodnocení. Po pokovení všech vzorků následovala jejich vizuální makroskopická dokumentace a kontrola, mikroskopická kontrola, vyhodnocení kvality vyloučeného povlaku, rovnoměrnosti a přilnavosti v návaznosti na nastavené podmínky vylučování.

5.1.1 Závislosti proudové hustoty, teploty na vnitřním napětí

Závislost teploty na vnitřním napětí dosahovala velmi dobrých vlastností u vzorků č. 18, 19, 20 povlakovaných při teplotě 40 °C, 3, 5 a 7 A/dm² s obsahem sacharinu, kde se vnitřní napětí pohybovalo v rozmezí od 20 do -30 MPa. Tyto povlaky se vyznačovaly velmi dobrými vizuálními vlastnostmi a tloušťkou vyloučené vrstvy 9 - 10 μm. Podobnými vlastnostmi disponoval vzorky č. 22, 23, 24 vylučovaný při teplotě 60 °C a proudové hustotě 3, 5, 7 A/dm² se sacharinem.



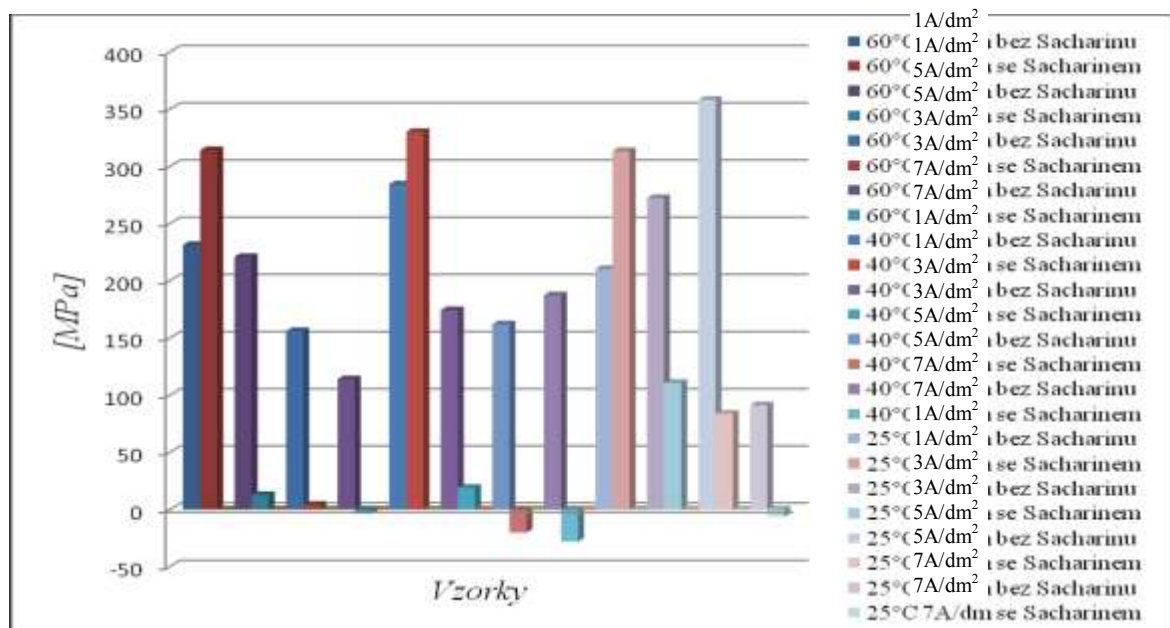
Graf 2 Závislosti vnitřního napětí na proudové hustotě



Graf 3 Závislost vnitřního napětí na teplotě

5.1.2 Závislost vnitřního napětí na obsahu sacharinu

Při porovnání vzorků se sacharinem a bez za stejných podmínek vylučování bylo vnitřní napětí u proudových hustot 1 A/dm^2 vždy větší než bez sacharinu. Při proudových hustotách 3, 5, 7 A/dm^2 s přidavkem sacharinu vždy došlo ke značnému snížení vnitřního napětí oproti vzorkům vyloučených v lázních bez sacharinu. U vzorků vyloučených při teplotě 40 °C a 5, 7 A/dm^2 přešlo tahové napětí na tlakové.

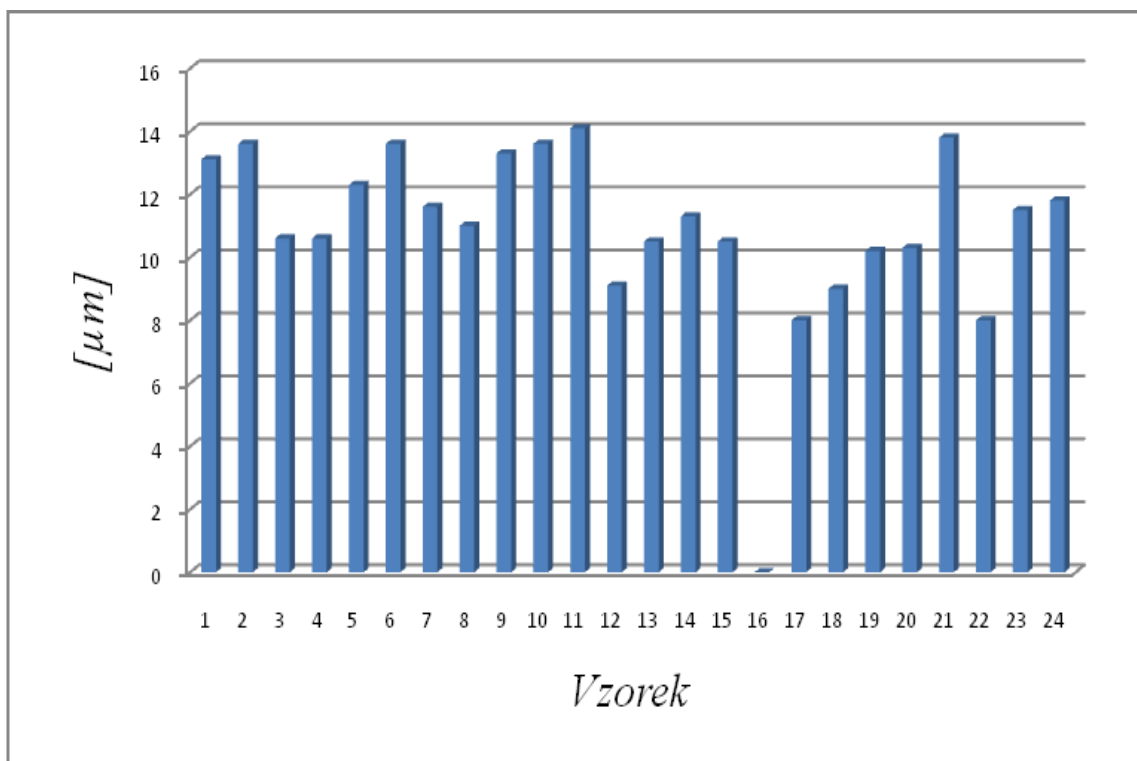


Graf 4 Závislost vnitřního napětí na obsahu Sacharinu



5.1.3 Tloušťka vyloučené Ni-Fe vrstvy

Největší střední hodnoty tloušťky vyloučené vrstvy dosahoval vzorek č. 11 s hodnotou 14,1 μm , vylučování probíhalo při 25°C a proudové hustotě 5A/dm² s vysoký leskem. Docházelo k odlupování povlaku na hranách z důvodu velmi vysokých vnitřních napětí. V rozmezí tloušťek 13,8 až 13,1 μm se pohybovaly vzorky č. 21, 2, 6, 10, 9, 1. U vzorku č. 16 nedošlo k vyloučení vrstvy, důvodem mohla být chyba zapojení při elektrolýze, proto byla tato hodnota vynechána.



Graf 5 Graf tloušťky nanesené vrstvy



6 Závěr

Experimentální část dokumentuje vliv proměnných parametrů na galvanicky vyloučenou vrstvu slitinového povlaku Ni-Fe. Proměnnými parametry vylučování byly čas, proudová hustota a teplota lázně.

Pro vylučování Ni-Fe povlaků se jeví dle experimentálních šetření doplnění lázně o přídavek sacharinu jako přínosné, došlo ke snížení napětí vyloučeného povlaku a to v návaznosti na rostoucí proudovou hustotu. U povlaků, které byly vylučované při proudové hustotě nízké 1 A/dm^2 přídavek sacharin vnitřní napětí zvyšoval.

Z ekonomického hlediska by podle zjištěných výsledků bylo vhodné při zachování velmi dobrých vzhledových i mechanických vlastností mimo běžně používaných teplot lázně $60\text{ }^\circ\text{C}$, volit teplotu lázně $40\text{ }^\circ\text{C}$ a proudovou hustotu 3 A/dm^2 s obsahem sacharinu. Povlaky vyloučené při teplotě $40\text{ }^\circ\text{C}$ se po vizuální a fyzikálně mechanické stránce jeví jako adekvátní náhrada povlaků vyloučených při provozní teplotě $60\text{ }^\circ\text{C}$.

Pokles mezi těmito teplotami je cca 33%, tento se patrně projeví na množství spotřebované energie, která je nutná k ohřevu a provozu lázně. Vlivem velké účinnosti u Ni-Fe slitin (až 98%) nedochází k velkému úniku par do ovzduší, a proto není nutná častá regenerace lázně.

Povlaky vylučované při nastavení pracovní teploty lázně $25\text{ }^\circ\text{C}$ jsou po vizuální stránce naprosto nevyhovující alternativou, docházelo k praskání povlaku, ztrátě přilnavosti a v neposlední řadě se povlak na ploše zkušebního pásku vylučoval nerovnoměrně.



Seznam obrázků

<i>Obr. 1 IS-metr</i>	28
<i>Obr. 2 Elektronické váhy Mettler Toledo</i>	29
<i>Obr. 3 Struers CitoVac</i>	30
<i>Obr. 4 Vzorky č. 1 až 6 vizuální kontrola povlaku</i>	48
<i>Obr. 5 Vzorky č. 7 až 12 vizuální kontrola povlaku</i>	49
<i>Obr. 6 Vzorky č. 13 až 18 vizuální kontrola povlaku</i>	49
<i>Obr. 7 Vzorky č. 19 až 24 vizuální kontrola povlaku</i>	50
<i>Obr. 8 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 1</i>	51
<i>Obr. 9 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 2</i>	52
<i>Obr. 10 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 3</i>	53
<i>Obr. 11 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 4</i>	54
<i>Obr. 12 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 5</i>	55
<i>Obr. 13 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 6</i>	56
<i>Obr. 14 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 7</i>	57
<i>Obr. 15 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 8</i>	58
<i>Obr. 16 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 9</i>	59
<i>Obr. 17 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 10</i>	60
<i>Obr. 18 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 11</i>	61
<i>Obr. 19 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 12</i>	62
<i>Obr. 20 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 13</i>	63
<i>Obr. 21 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 14</i>	64
<i>Obr. 22 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 15</i>	65
<i>Obr. 23 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 16</i>	66
<i>Obr. 24 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 17</i>	67
<i>Obr. 25 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 18</i>	68
<i>Obr. 26 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 19</i>	69
<i>Obr. 27 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 20</i>	70
<i>Obr. 28 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 21</i>	71
<i>Obr. 29 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 22</i>	72
<i>Obr. 30 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 23</i>	73
<i>Obr. 31 Metalografie vyloučené vrstvy vzorek č. 24</i>	74
<i>Obr. 32 Metalografie vzorku č. 25 bez povlaku</i>	75



Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Vzorek č.1, čas a délkové změny pásku při 42 minutách</i>	31
<i>Tab. 2 Vzorek č. 2, čas a délkové změny pásku při 14 minutách</i>	31
<i>Tab. 3 Vzorek č. 3, čas a délkové změny pásku při 8:40 minutách</i>	32
<i>Tab. 4 Vzorek č. 4, čas a délkové změny pásku při 6 minutách</i>	32
<i>Tab. 5 Vzorek č. 5, čas a délkové změny pásku při 42 minutách</i>	33
<i>Tab. 6 Vzorek č. 6, čas a délkové změny pásku při 14 minutách</i>	33
<i>Tab. 7 Vzorek č. 7, čas a délkové změny pásku při 8:40 minutách</i>	34
<i>Tab. 8 Vzorek č. 8, čas a délkové změny pásku při 6 minutách</i>	34
<i>Tab. 9 Vzorek č. 9, čas a délkové změny pásku při 42 minutách</i>	35
<i>Tab. 10 Vzorek č. 10, čas a délkové změny pásku při 14 minutách</i>	35
<i>Tab. 11 Vzorek č. 11, čas a délkové změny pásku při 8:40 minutách</i>	36
<i>Tab. 12 Vzorek č. 12, čas a délkové změny pásku při 6 minutách</i>	36
<i>Tab. 13 Vzorek č. 13, čas a délkové změny pásku při 42 minutách, 2g/l sacharinu</i>	37
<i>Tab. 14 Vzorek č. 14, čas a délkové změny pásku při 14 minutách, 2g/l sacharinu</i>	37
<i>Tab. 15 Vzorek č. 15, čas a délkové změny pásku při 8:40 minutách, 2g/l sacharinu</i>	38
<i>Tab. 16 Vzorek č. 16, čas a délkové změny pásku při 6 minutách, 2g/l sacharinu</i>	38
<i>Tab. 17 Vzorek č. 17, čas a délkové změny pásku při 42 minutách, 2g/l sacharinu</i>	39
<i>Tab. 18 Vzorek č. 18, čas a délkové změny pásku při 14 minutách, 2g/l sacharinu</i>	39
<i>Tab. 19 Vzorek č. 19, čas a délkové změny pásku při 8:40 minutách, 2g/l sacharinu</i>	40
<i>Tab. 20 Vzorek č. 20, čas a délkové změny pásku při 6 minutách, 2g/l sacharinu</i>	40
<i>Tab. 21 Vzorek č. 21, čas a délkové změny pásku při 42 minutách, 2g/l sacharinu</i>	41
<i>Tab. 22 Vzorek č. 22, čas a délkové změny pásku při 14 minutách, 2g/l sacharinu</i>	41
<i>Tab. 23 Vzorek č. 23, čas a délkové změny pásku při 8:40 minutách, 2g/l sacharinu</i>	42
<i>Tab. 24 Vzorek č. 24, čas a délkové změny pásku při 6 minutách, 2g/l sacharinu</i>	42
<i>Tab. 26 Hmotnost povlaku u vzorku č. 1 - 6</i>	43
<i>Tab. 28 Hmotnost povlaku u vzorku č. 13 - 18</i>	43
<i>Tab. 25 Hmotnost povlaku u vzorku</i>	43
<i>Tab. 27 Hmotnost povlaku u vzorku</i>	43
<i>Tab. 29 Vzorky č. 1 - 12, identifikační tabulka povlaků</i>	46
<i>Tab. 30 Vzorky č. 13 - 24, identifikační tabulka povlaků</i>	47
<i>Tab. 31 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 1</i>	51
<i>Tab. 32 Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 2</i>	52



<i>Tab. 33</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 3</i>	53
<i>Tab. 34</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 4</i>	54
<i>Tab. 35</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 5</i>	55
<i>Tab. 36</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 6</i>	56
<i>Tab. 37</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 7</i>	57
<i>Tab. 38</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 8</i>	58
<i>Tab. 39</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 9</i>	59
<i>Tab. 40</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 10</i>	60
<i>Tab. 41</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 11</i>	61
<i>Tab. 42</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 12</i>	62
<i>Tab. 43</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 13</i>	63
<i>Tab. 44</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 14</i>	64
<i>Tab. 45</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 15</i>	65
<i>Tab. 46</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 16</i>	66
<i>Tab. 47</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 17</i>	67
<i>Tab. 48</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 18</i>	68
<i>Tab. 49</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 19</i>	69
<i>Tab. 50</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 20</i>	70
<i>Tab. 51</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 21</i>	71
<i>Tab. 52</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 22</i>	72
<i>Tab. 53</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 23</i>	73
<i>Tab. 54</i> <i>Tloušťka vyloučené vrstvy, vzorek č. 24</i>	74
<i>Tab. 55</i> <i>Vzorky č. 1 až 4 vypočítané, naměřené hodnoty</i>	76
<i>Tab. 56</i> <i>Vzorky č. 5 až 8 vypočítané, naměřené hodnoty pro</i>	77
<i>Tab. 57</i> <i>Vzorky č. 9 až 12 vypočítané, naměřené hodnoty</i>	78
<i>Tab. 58</i> <i>Vzorky č. 13 až 16 vypočítané, naměřené hodnoty</i>	79
<i>Tab. 59</i> <i>Vzorky č. 17 až 20 vypočítané, naměřené hodnoty</i>	80
<i>Tab. 60</i> <i>Vzorky č. 21 až 24 vypočítané, naměřené hodnoty</i>	81



Seznam grafů

<i>Graf 1 Vliv Závislosti teploty zpracování na tvrdosti HV 10 a pevnosti v tahu [3]</i>	21
<i>Graf 2 Závislosti vnitřního napětí na proudové hustotě</i>	82
<i>Graf 3 Závislost vnitřního napětí na teplotě</i>	83
<i>Graf 4 Závislost vnitřního napětí na obsahu Sacharinu</i>	83
<i>Graf 5 Graf tloušťky nanesené vrstvy</i>	84



Seznam použité odborné literatury

- [1] RUML, V., SOUKUP, M. *Galvanické pokovování*. vyd. Praha: SNTL, 1981.
- [2] KRISTOFORY, F. *Renovace strojních součástí galvanickými povlaky*. Disertační práce. Ostrava: VŠB-TUO. Fakulta strojní. 1992, 187 s.
- [3] MOHYLA, M. *Technologie povrchových úprav kovů*. 3. vyd., Ostrava: VŠB-TUO Fakulta strojní, 2005. 156 s.
- [4] KRISTOFORY, F. *Studium vlastností galvanických povlaků k ochraně strojních součástí proti opotřebení*. Habilitační práce. Ostrava: VŠB-TUO. Fakulta strojní. 2000, 86s.
- [5] KRISTOFORY, F. *Stávající poznatky k povlakům Fe-Ni*, Ostrava: VŠB-TUO Fakulta strojní, 2006
- [6] BARTL, D; MUDROCH, O. *Technologie chemických a elektrochemických povrchových úprav*. I. díl. Praha, SNTL, 1956, 448 s.
- [7] CYRUS, Z., CHOCHOLOUŠEK, J., KRISTOFORY, F. A VÍTEK, J. *Kurz galvanizérů I*. Učební texty a návody do cvičení. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1996, 144 s.
- [8] KANIA, P. *Vlastnosti galvanických povlaků na bázi niklu a slitinových povlaků*, Doktorská dizertační práce. VŠB-TU Ostrava 2002, 107s.
- [9] KRAUS, V. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita. Strojní fakulta, 2000, 216s.
- [10] POVRCHÁŘI.[online].[2010].
URL:http://www.povrchari.cz/kestazeni/200903_povrchari.pdf
- [11] SAFRANEK, W. H. *Nickel Alloys*. In [i] *The Properties of Electrodeposited Metals and Alloys*. [i] 2nd. Ed., AESF Orlando, Florida 1986, p. 326
- [12] STRAUCH, A. *Galvanotechnisches Fachwissen*. Leipzig: VEB Deutscher Verlag Fur Grundstoffindustrie, 1987, 511s.
- [13] KLAPKA, V. *Chemické vylučování kovů*. Sborník textů, VŠB-TU Ostrava, 1995
- [14] NEJEDLÝ, P., VÍTEK, J., KRISTOFORY, F. *Příprava a údržba elektrolytů*. Sborník textů, VŠB-TU Ostrava 1995
- [15] LANDA, V. Galvanisch abgeschiedene dicke Nickel-Eisen-Schichten und ihre Eigenschaften, *Metelloberfleche*, 38, 1984, 103 s.