

# UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzikální chemie

## Optimalizace procesu niklování

Bakalářská práce

Autor: David Rybář

Vedoucí práce: RNDr. Eva Otyepková, Ph.D.

Studijní program: B 1407 Chemie

Studijní obor: Aplikovaná chemie

Forma studia: Prezenční

**Olomouc 2016**

**PALACKÝ UNIVERSITY IN OLMOUC**

Faculty of Science

Department of Physical Chemistry

## **Optimization of nickel coating process**

Bachelor thesis

Author: David Rybář

Supervisor: Eva Otyepková

Study program: B 1407 Chemistry

Study branch: Applied Chemistry

Form of study: Full-time

**Olomouc 2016**

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou v seznamu použité literatury.

V Olomouci dne.....

.....  
Vlastnoruční podpis

# PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl nejdříve poděkovat své vedoucí bakalářské práce RNDr. Evě Otyepkové, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a ochotný přístup v průběhu vytváření této práce. Dále chci poděkovat mému konzultantovi ve společnosti Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. Bc. Jakubu Havranovi, který mi pomohl se získáním potřebných dat do praktické části této bakalářské práce. V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat samotné společnosti Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. za spolupráci a poskytnutá zařízení, bez kterých bych nebyl schopen tuto bakalářskou práci dokončit. Moje poděkování patří také mé rodině, za jejich podporu v průběhu celého studia.

## **Bibliografická identifikace:**

Jméno a příjmení autora:	David Rybář
Název práce:	Optimalizace procesu niklování
Typ práce:	Bakalářská práce
Pracoviště:	Katedra fyzikální chemie
Vedoucí práce:	RNDr. Eva Otyepková, Ph.D.
Rok obhajoby práce:	2016

### **Abstrakt:**

Tato bakalářská práce je zaměřena na optimalizaci galvanického niklování ve společnosti Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. Hlavním cílem této práce bylo zjištění efektivity niklovací linky při již zavedeném postupu a její následné navýšení. Celková účinnost procesu galvanického niklování byla stanovena na základě změn vstupního napětí do niklovacího systému. Elektrické napětí bylo postupně navyšováno a spolu s ním narůstala také efektivita vylučování niklu na katodu. Navyšování napětí však bylo ukončeno, když došlo ke spálení niklové vrstvy na niklovaných lopatkách. V tomto stádiu byla vyhodnocena nejvyšší hodnota napětí, při které nedochází ke spálení niklového povlaku. Při tomto napětí byla účinnost niklování velmi nízká a bylo potřeba proces zefektivnit.

Za pomoci speciálního nevodivého laku byl následně zamaskován držák, který spolu s niklovanými lopatkami tvořil katodu. Dle následného vyhodnocení bylo zjištěno, že držák způsoboval v důsledku jeho velkého povrchu majoritní ztráty niklu během pokovování. Většina niklu tedy před zamaskováním ulpívala právě na držáku, což zapříčinilo menší distribuci niklu k lopatkám. Díky maskování výrazně stoupla efektivita celého procesu.

Konečným bodem experimentální části této bakalářské práce bylo zjištění jakým způsobem je ovlivněna distribuce niklu na lopatky v závislosti na jejich umístění v držáku. Tento experiment ukázal, že k docílení ještě vyšší efektivity pokovování je potřeba, aby lopatky byly umístovány blíže k okrajům držáku, jelikož právě okraji vstupuje elektrický proud do katody a tím je jeho koncentrace a tak i koncentrace nanášeného niklu v těchto místech největší.

Klíčová slova: nikl, niklování, galvanické pokovování, optimalizace

Počet stran: 56

Počet příloh: 1 CD ROM

Jazyk: čeština

## **Bibliographical identification:**

Author's first name and surname	David Rybář
Title:	Optimalization of nickel coating process
Type of thesis:	Bachelor
Department:	Department of Physical Chemistry
Supervisor:	Eva Otyepková
The year of presentation:	2016

### **Abstract:**

The present bachelor thesis deals with the optimisation of the nickel plating process at Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. The main objective of the thesis is to identify the efficiency of nickel plating line with the good practice used, and its potential increase. The total efficiency of the nickel plating process was determined on the basis of changes of the input voltage in the nickel plating system. With the electric voltage was gradually increased, the efficiency of nickel depositing on the cathode increased as well. Yet, the voltage increase was terminated as the nickel layer on the blades being plated was burnt. At this stage, the highest value of voltage which does not cause the burning of the nickel layer was evaluated. At this voltage, the nickel plating efficiency was rather low, therefore the process required improvement in efficiency.

The holder, which formed the cathode along with the blades, was masked with a special nonconductive varnish. Based on the subsequent evaluation, it was identified that the holder caused major loss of nickel during plating, primarily due to its large area. The major part of nickel before masking adhered to the holder which resulted in a lower distribution of nickel towards the blades. Thanks to the masking, the efficiency of the entire process has considerably risen.

The final stage of the experiment part of the present thesis was the identification of how the individual blade location in the holder influences the nickel distribution to the blades. This experiment demonstrated that the higher efficiency of metal plating requires that the blades should be located closer to the edges of the holder. As the electric current enters the cathode through these edges, they are the very locations where the current concentration as well as the concentration of nickel being plated are the highest.

Keywords: nickel, nickel coating, galvanic coating, optimization

Number of pages: 56

Number of appendices: 1 CD ROM

Language: czech



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>12</b>
2.1	Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o.....	12
2.2	Povrchové úpravy.....	13
2.3	Níkl.....	14
2.3.1	Historie.....	14
2.3.2	Výskyt.....	14
2.3.3	Vlastnosti.....	14
2.3.4	Výroba.....	15
2.3.5	Využití.....	16
2.4	Galvanické pokovování.....	17
2.4.1	Princip - elektrolýza.....	17
2.4.2	Faradayovy zákony elektrolýzy.....	19
2.4.3	Galvanické články.....	20
2.5	Galvanické niklování.....	21
2.5.1	Vlastnosti elektrolyticky vyloučených niklových povlaků.....	22
2.5.2	Vnitřní pnutí.....	22
2.6	Zdroj elektrického proudu.....	23
2.6.1	Elektrický proud.....	23
2.6.2	Rozložení elektrického proudu.....	24
2.7	Anoda.....	26
2.7.1	Efektivita anody.....	27
2.8	Elektrolyt.....	28
2.8.1	Vany.....	29
2.8.2	Typy lázní.....	30
2.8.3	Faktory ovlivňující efektivitu lázní.....	33
2.8.4	Vyhlazování.....	34
2.9	Katoda.....	35
2.9.1	Efektivita katody.....	35
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>36</b>
3.1	Experimentální vybavení.....	36

3.1.1	Chemikálie .....	36
3.1.2	Přístroje a pomůcky .....	36
3.2	Pracovní postup .....	37
3.3	Vyhodnocení .....	40
<b>4</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>SUMMARY .....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>55</b>

# 1 ÚVOD

Neexistuje mnoho průmyslových metod, které by k docílení co největší efektivity daného procesu nevyžadovaly svoji optimalizaci. Právě optimalizací technologických postupů je za pomoci získaných znalostí vyhodnocen a vybrán nejideálnější návrh jak při daném procesu postupovat, aby byla zajištěna jeho co největší účinnost.

Tato bakalářská práce je zaměřena na optimalizaci procesu galvanického niklování a to z pohledu společnosti Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. V této společnosti je využíván proces galvanického niklování jako základní povrchová úprava, která vykazuje vynikající vlastnosti pro následné spojování kovových komponent za pomoci pájení. Niklování také poskytne daným dílům výbornou antikorozi ochranu, vylepší jejich fyzikálně-chemické vlastnosti, zvýší odolnost vůči otěru a ohrusu a také vylepší jejich estetický dojem. Právě proces niklování hraje důležitou roli při prodlužování životnosti kovových materiálů, nejrůznějších strojů a zařízení, které jsou neustále využívány v průmyslové praxi. Celá optimalizace procesu niklování je prováděna na základě změn vstupních parametrů niklovací linky, kdy každá změna vstupní veličiny může ovlivnit jakost konečného produktu a to jak pozitivně, tak i negativně. V potaz se musí brát i ekonomická a časová náročnost procesu, bezpečnost postupu, vliv dané metody na životní prostředí, množství odpadů a spoustu dalších okolností, mezi kterými se právě za pomoci optimalizace vyhledává ten nejlepší kompromis.

## **2 TEORETICKÁ ČÁST**

### **2.1 Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o.**

Společnost Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. (dále HAO) se sídlem v Hlubočkách – Mariánském Údolí se řadí mezi nejvýznamnější producenty součástí leteckých motorů a služeb s nimi spojenými. Tato společnost spadá pod nadnárodní korporaci Honeywell, Inc., která má hlavní sídlo ve Phoenixu v Arizoně, USA. Hlavní prioritou olomoucké pobočky je výroba a oprava statických plechových a žárových částí turbínových leteckých motorů z nerezavějících ocelí. HAO se dále také zabývá výrobou speciálních hliníkových, niklových, kobaltových a titanových slitin pro celou škálu motorů společnosti Honeywell, Inc. Letecké komponenty firmy Honeywell, Inc., nalezneme v produktech známých společností jako je Boeing, Airbus, Cessna, a ve spoustě dalších. [1], [2]

Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. je dynamicky rostoucí společností především díky neustálé snaze vylepšovat výrobní procesy a rozšiřovat objem výroby za pomoci aktivního zapojení a profesního růstu zaměstnanců. V této společnosti je kladen velký důraz na zajištění kvalitního pracovního prostředí, na špičkovou vybavenost pracovišť a samozřejmě také na bezpečnost práce a ochranu životního prostředí. [1], [3]

Společnost Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o., zaujímá ve svém regionu pozici vyhledávaného zaměstnavatele, který nabízí účelovou a zajímavou práci v aktivním kolektivu, kde každodenní činnost jednotlivých zaměstnanců napomáhá k dalšímu růstu a rozvoji společnosti. [1], [2], [3]

## 2.2 Povrchové úpravy

Vzhledem k neustálému rozvoji hospodářství je zapotřebí zvyšování technické úrovně, užitné hodnoty, jakosti a spolehlivosti strojírenských výrobků. Během užívání těchto většinou kovových výrobků je přítomna jejich vzájemná interakce s okolním prostředím a dochází k jejich povrchové degradaci v důsledku opotřebení, koroze a dalších vlivů. Konečná jakost povrchu značně ovlivňuje životnost, provozní spolehlivost a využitelnost těchto výrobků. Využití povrchových úprav tedy hraje významnou roli na výsledné kvalitě daného technického zařízení. Při nedostatečné, resp. nevyhovující povrchové úpravě hrozí větší riziko znehodnocení i jinak technicky perfektní součástky. Úprava povrchu zapříčiňuje a ovlivňuje jak funkčnost strojírenských výrobků, tak i jejich vzhled. Vzhledově nedokonalé zařízení sice může plnit svoji funkci, ovšem jeho prodejnost a bezpečné použití značně klesá a používáním takového zařízení hrozí znehodnocení okolního prostředí. [4]

Budoucnost povrchových úprav jde paralelně s vývojem strojírenství a vzhledem ke stále se ztenčujícím zásobám surovin a přísným normám je obor povrchových úprav nucen neustále úsporně a ekologicky pracovat i myslet. Právě tato realita má za následek neustálý vliv na rozvoj jednotlivých technologií a celého oboru. Z určitého pohledu lze považovat povrchové úpravy za prospěšné i vzhledem k životnímu prostředí, jelikož brzdí destrukční děje kovových produktů a tím vedou k úsporám materiálů a surovin. Pro využívání povrchových úprav jsou důležité znalosti z elektrochemie, fyziky, chemie a materiálového inženýrství. [4]

Prvním typem povrchových úprav kovových materiálů, kdy dochází k odebrání materiálu z povrchu součástky se řadí postupy broušení, leštění, frézování, kuličkování (čištění materiálu za pomoci tryskání malých kulatých částic na jeho povrch) nebo lapování (metoda obrábění, kdy se upravuje drsnost povrchu materiálu). Tento typ úprav se většinou využívá jako korekce materiálu pro navazující úpravy. Druhou metodou jsou postupy založené na působení chemikálií jako je např. brynýrování (moření daného materiálu v kyselině nebo louhu, které má za následek vznik ochranné černé vrstvy magnetitu ( $Fe_3O_4$ ) na daném povrchu). Dalším typem ochrany jsou depozice tenké vrstvy (v řádech  $\mu m$ ) na daný materiál. Mezi tyto metody patří: barvení, lakování nebo pokovování, kdy se na povrch méně odolného materiálu nanáší za pomoci principu elektrolýzy tenká vrstva odolnějšího kovu (chrom, nikl, měď...). [4], [5]

## 2.3 Nikl

### 2.3.1 Historie

První identifikaci niklu (*Ni*) učinil již v roce 1751 Axel Fredrik Cronstedt, ovšem považoval jej za nežádoucí materiál, jež se vyskytoval v nikelinu (*NiAs*) a odtud také vznikl název pro tento kov. Roku 1775 Torbern Olof Bergman upřesnil povahu *Ni* a podařilo se mu jej připravit ve velmi čistém stavu. Následně v roce 1805 Jeremias Benjamin Richter popsal a doplnil vlastnosti niklu, které jsou dnes již velmi dobře známy. Již tenkrát ve své publikaci zmiňoval, že tento kov disponuje odolností vůči korozi, tažností, vysokým bodem tání, odolností vůči oxidaci nebo magnetickými vlastnostmi podobnými železu. [6], [7]

### 2.3.2 Výskyt

V přírodě se nikl nachází velmi ojediněle (0,016%). Vyskytovat se může v ryzí formě, kdy se předpokládá, že směrem do středu Země se bude nalézat ve značném množství. Většinou však bývá vázán na síru (*S*), arsen (*As*) a antimon (*Sb*), a to ve formách milleritu (*NiS*), nikelinu nebo breithauptitu (*NiSb*) a spoustě dalších. [7], [8]

### 2.3.3 Vlastnosti

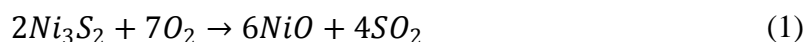
Nikl je stříbrobílý lesklý kov s nádechem do žluta, který disponuje feromagnetickými vlastnostmi, ovšem menšími než má železo (*Fe*). Opomenout nelze také jeho dobrou kujnost a tažnost spolu s vynikající leštitelností a schopností jej válcovat, vytahovat v dráty nebo svářet. Dle drsnosti jeho povrchu může být matný až zrcadlově lesklý. V celistvém (neporušeném) stavu je nikl za laboratorní teploty (20 °C) značně odolný vůči vodě i vzduchu. Při kontaktu s ředěnými kyselinami je nikl rozpouštěn pomaleji než železo, ovšem ve zředěné kyselině dusičné (*HNO<sub>3</sub>*) je rozpustný. Další fyzikálně-chemické vlastnosti niklu jsou shrnuty do následující tabulky 1. [7], [8], [9], [10], [11], [12]

**Tab. 1) Vlastnosti niklu**

Atomové číslo	28
Molární hmotnost	58,71
Hustota	8,908 g·cm <sup>-3</sup>
Teplota tání	1453 °C
Teplota varu	2913 °C
Elektrická vodivost	1,4×10 <sup>7</sup> S/m
Tepelná vodivost	90,9 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Měrný elektrický odpor	69,3 nΩ·m
Pevnost v tahu	1100 – 1500 MPa
Tažnost	3 – 8 %
Tvrdość galvanicky vyloučeného niklu	350 – 550 HV
Standardní elektrodový potenciál	-0,25 V
Atomový poloměr	124 pm
Elektronegativita	1,91

### 2.3.4 Výroba

K výrobě niklu je nejvíce využíván garnierit, tedy křemičitan hořečnato-nikelnatý ((Ni, Mg)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>OH), ale i železný minerál pyrrhotin (Fe<sub>n</sub>S<sub>n+1</sub>), který většinou obsahuje 3–5 % niklu. Celkové zpracování a obecně metalurgie niklu závisí na tom, z jakého druhu rudy se vychází. Převážně bývá daná ruda převedena na disulfid trinitku (Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>), který je pražen na vzduchu za tvorby oxidu nikelnatého (NiO) a následně redukován za pomoci uhlíku na kov dle chemických rovnic 1 a 2.



Nikl disponující velmi vysokou jakostí lze připravit tzv. karbonylovým procesem, kdy oxid uhelnatý reaguje s niklem při teplotě 50 °C a normálním tlaku (dle rovnice 3) nebo se směsí sulfidů niklu a mědi při vyšším tlaku za vzniku těkavého tetrakarbonyl niklu (Ni(CO)<sub>4</sub>).



Ze vzniklého tetrakarbonyl niklu je následně tepelným rozkladem získán kov o čistotě 99,90 – 99,99 % podle rovnice 4. [8]



### 2.3.5 Využití

Již v době před naším letopočtem bylo využíváno niklu společně s mědí k ražení mincí, které obsahovaly až 21 % niklu a mince pocházející z Německa z období před první světovou válkou disponovaly až 25 % niklu. V současné době má nikl nespočet důležitých aplikací a řadí se mezi nejuniverzálnější kovy, co se využití týče. Tento kov je využíván nejen k vytváření kvalitních slitin (například tzv. nové stříbro – odolné stříbrobílé slitiny o procentovém zastoupení niklu v rozmezí 10 – 20 %, mědi 40 – 70 % a zinku 5 – 40 %) nebo ochranných vrstev, ale své vlastnosti dále uplatní například v elektrotechnickém průmyslu a hraje také důležitou roli ve výpočetní technice. Velmi čistý nikl je v dnešní době také využíván k výrobě domácího nářadí popř. laboratorních nástrojů (kleště, kelímky, kopisti apod.). Celosvětově největší odbyt niklu je pro výrobu nerezavějících ocelí, kdy jeho přídavkem do těchto materiálů vznikají velmi pevné a tažné oceli. Některé slitiny niklu (např. nikelin – 31 % *Ni*, 56 % *Cu* a 13 % *Zn* nebo konstantan – 40 % *Ni* a 60 % *Cu*) jsou vzhledem ke své malé elektrické vodivosti využívány k výrobě elektrických odporů. Dále se niklu využívá k výrobě kvalitních baterií, kuproniklu nebo katalyzátorů (ve formě *NiO* nebo prášku jako tzv. Raneyova niklu, který je hojně využíván v organické chemii převážně pro syntézy). Nelze opomenout také využití elektrolytických roztoků na bázi niklu pro galvanické pokovování. [7], [10]

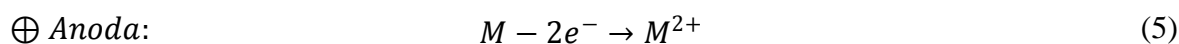


## 2.4 Galvanické pokovování

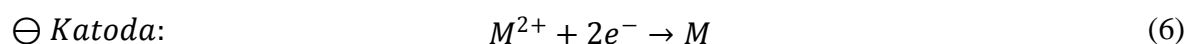
Hlavní podstata galvanického vylučování kovů je založena na elektrochemických dějích, a to hlavně na elektrolýze a na procesech, které probíhají v galvanických člancích. Technologie galvanického pokovování je využívána převážně pro ochranu a zlepšení fyzikálně-chemických vlastností kovových materiálů. Nanesením velmi tenké vrstvy daného (odolného) kovu je zajištěna výborná protekce proti korozi, obrusu, otěru atd. Dále je galvanického pokovování využíváno také k docílení lepší estetiky daného materiálu. Mezi nejvýznamnější a nejpoužívanější metody pokovování patří zinkování, niklování, mědění a chromování. [4]

### 2.4.1 Princip - elektrolýza

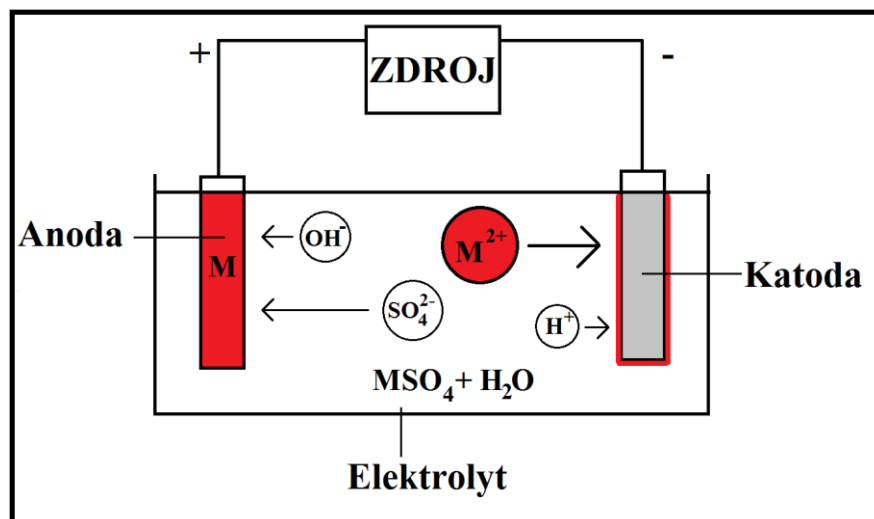
Během rozpouštění anorganické soli (např.:  $MCl_2$ ;  $MSO_4$ , kde  $M = Zn, Cu, Ni\dots$ ) ve vodě probíhá její elektrolytická disociace, kdy záporné ionty nesou přebytečné elektrony ( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ) a kladně nabití ionty mají elektronový deficit ( $M^{2+}$ ). Při zavedení stejnosměrného proudu za pomoci zdroje a elektrod do tohoto roztoku (elektrolytu) nastane vyloučení záporně nabitých iontů ( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ) na kladné elektrodě a ionty nesoucí kladný náboj ( $M^{2+}$ ) budou vyloučeny na elektrodě záporné. Elektrody jsou děleny podle typu reakce, které na nich probíhají na katodu a anodu. Anodou nazýváme kladnou elektrodu, na které během vylučování záporně nabitých iontů dochází k jejich oxidaci.



Katodou pak nazýváme zápornou elektrodu, na které dochází k redukci kladně nabitých iontů.



V konečné fázi elektrolýzy roztoku je na katodě vytvořena vrstva z iontů kovu ( $M$ ) pocházejících z anody. Zjednodušené schéma principu galvanického pokovování je znázorněno v následujícím obrázku 1.



**Obr. 1)** Schéma principu a uspořádání systému pro galvanické pokovování

Kontinuálně probíhající elektrolýza roztoku mezi dvěma nerozpustnými elektrodami (např. *Au* nebo *Pt*) by sice zapříčinila vylučování jednotlivých složek soli z elektrolytu, ale jen do doby, než by byly vyčerpány a v důsledku toho by byl průchod elektrického proudu zastaven vlivem velkého odporu čisté vody. Z tohoto důvodu se využívají při galvanickém pokovování rozpustné elektrody (anody), z téhož kovu, jež má být z roztoku vylučován. Tyto anody při zapojení elektrického proudu do obvodu začnou poskytovat a do elektrolytu uvolňovat kladně nabitě částice daného kovu. [4]

Při uvolňování kladně nabitých částic do elektrolytu přetrvává v anodě z daného kovu obdobné množství záporných elektronů, které se během reakce na katodě spotřebovaly k vybití kationtů. Ve skutečnosti tedy při elektrolýze neklesá koncentrace kovové soli v roztoku, protože spotřebované kvantum kovu je okamžitě doplněno obdobným množstvím kovu uvolněného z anody. [4]

## 2.4.2 Faradayovy zákony elektrolýzy

Principy galvanického pokovování vycházejí z tzv. Faradayových zákonů elektrolýzy, které z pohledu elektrochemie odrážejí kvantum vylučovaného kovu v důsledku probíhající elektrolýzy.

**1. Faradayův zákon elektrolýzy** praví, že: „Množství vyloučené látky účinkem elektrického proudu je přímo úměrné velikosti elektrického náboje prošlého elektrolytem.“

A zmíněnou definici vystihuje vztah:

$$m = A \cdot Q = A \cdot I \cdot t \quad (7)$$

kde:  $m$  - množství látky vyloučené účinkem elektrického proudu [g]

$A$  - elektrochemický ekvivalent, jež je charakteristický pro každou látku [ $\text{kg} \cdot \text{C}^{-1}$ ]

$Q$  - elektrický náboj [C]

$I$  - elektrický proud [A]

$t$  - čas [s]

**2. Faradayův zákon elektrolýzy** říká, že: „Elektrochemický ekvivalent je přímo úměrný molární hmotnosti dané látky.“ A vztah mezi těmito veličinami vypadá takto:

$$A = \frac{M}{nF} \quad (8)$$

kde:  $M$  - molární hmotnost látky [g/mol]

$n$  - počet elektronů potřebných k přenesení jedné molekuly dané látky

$F$  - tzv. Faradayova konstanta [ $F = 96\,485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]

Elektrochemický ekvivalent pro nikl ( $M = 58,69 \text{ g/mol}$ ;  $n = 2$ ) je při dosazení do tohoto vztahu roven přibližně  $304,141 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{C}^{-1}$ .

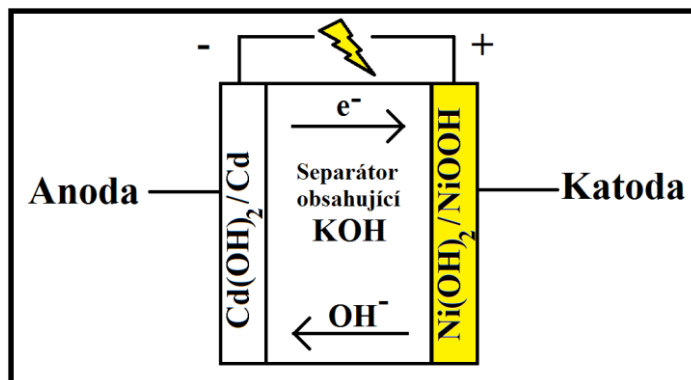
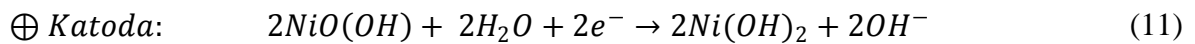
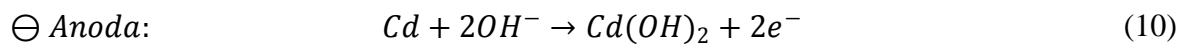
1. Faradayův zákon pro **nikl** lze poté definovat jako:

$$m = 304,141 \cdot 10^{-6} \cdot I \cdot t \quad (9)$$

Kdy vztah ovšem počítá se 100% účinností elektrického proudu. [4], [13], [14]

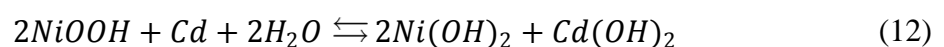
### 2.4.3 Galvanické články

Opačný proces vzhledem ke galvanickému pokovování probíhá u galvanických článků, kde na základě oxidačně redukčních procesů je generován elektrický proud. Elektrody galvanických článků mají obrácené znaménko než je tomu při elektrolýze. Tedy na anodě dochází také k oxidaci, ovšem tato elektroda je zde záporným pólem. Katoda je u galvanických článků elektroda, na které dochází k redukci, ovšem disponuje pólem kladným. Příkladem může být nikl-kadmiový akumulátor, kde záporná elektroda (anoda) je tvořena kadmíem ( $Cd$ ), které v průběhu vybíjení akumulátoru přechází na hydroxid kademnatý ( $Cd(OH)_2$ ). Kladnou elektrodu (katodu) tvoří oxid-hydroxid niklitý ( $NiO(OH)$ ), který při vybíjení článku reaguje na hydroxid nikelnatý ( $Ni(OH)_2$ ). Obě tyto elektrody jsou od sebe odděleny separátorem, který obsahuje hydroxid draselný ( $KOH$  o koncentraci 4,5–7,5 mol/l) a slouží jako vodivé prostředí pro výměnu iontů. Při sestavení takového systému dochází k dílčím reakcím (rovnice 10 a 11) za současného generování elektrického proudu. Takto sestavený článek disponuje průměrným napětím 1,3 V. [4], [15]



**Obr. 2)** Schéma principu nikl-kadmiového galvanického článku

Celková reakce článku je poté pro vybíjení ( $\rightarrow$ ) a nabíjení ( $\leftarrow$ ) článku:

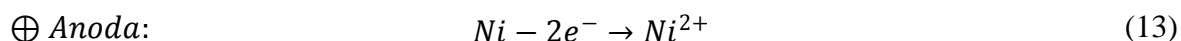


Hlavní výhodou nikl-kadmiového článku je jeho odolnost vůči ztrátě kapacity při delším ponechání ve vybitém stavu. [16], [17]

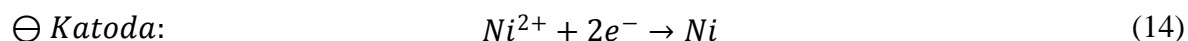
## 2.5 Galvanické niklování

Technologie galvanického niklování zažila během posledních pěti desetiletí velký rozmach. V průmyslovém odvětví je tento proces již poměrně dlouhou dobu využíván jak pro dekorativní (např. k renovaci automobilových veteránů), tak i pro funkční aplikace. Galvanické niklování je komerčně velmi významný proces, což dokazuje také hodnota přesahující 150 000 tun celosvětově naneseného niklu ročně. Touto hodnotou zaujímá galvanické pokovování 12 % v celosvětové spotřebě niklu. Z tohoto množství je přibližně 80 % využito k dekorativním účelům a zbylých 20 % k funkčním aplikacím (především pro ochranu železných, zinkových a měděných komponentů). [10], [13], [14], [18]

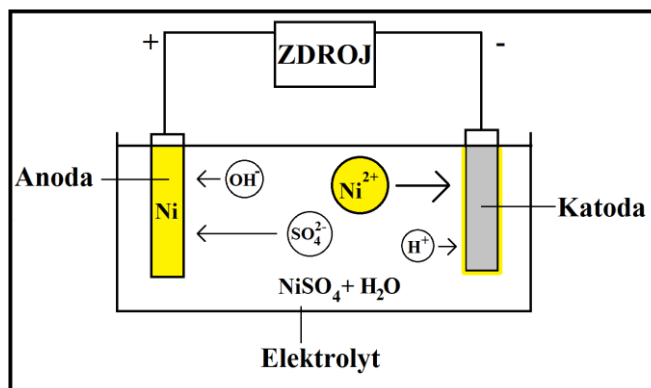
Proces niklování se řídí obecnými pravidly pro galvanické pokovování, jak bylo vysvětleno v předchozí kapitole (2.4.1). U galvanického niklování dochází k uvolňování nikelnatých iontů ( $Ni^{2+}$ ) z povrchu anody do elektrolytu.



Opačný proces, jak již bylo také zmíněno v předchozí kapitole (2.4.1), probíhá na katodě, kde dochází k adsorpci nikelnatých iontů na její povrch za vzniku kovového niklu.



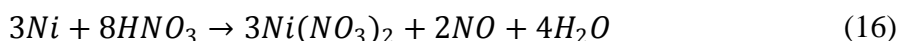
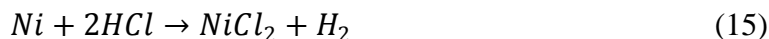
Elektrolyt je v případě galvanického niklování tvořen roztokem nikelnatých solí ( $NiCl_2, NiSO_4$ ), které poskytují nikelnaté ionty, ale hlavně tvoří vodivé médium pro přenos  $Ni^{2+}$  iontů mezi elektrodami. [4], [13]



Obr. 3) Schéma znázorňující princip galvanického niklování

### 2.5.1 Vlastnosti elektrolyticky vyloučených niklových povlaků

Při laboratorní teplotě jsou niklové povlaky velmi odolné vůči interakci s atmosférickými vlivy a vodou. Během jejich zahřívání vzniká lehký žlutý nádech. Při interakci s ředěnou kyselinou chlorovodíkovou ( $HCl$ ) nebo dusičnou ( $HNO_3$ ) jsou tyto povlaky pozvolna rozpouštěny za vzniku příslušné nikelnaté soli dané kyseliny:



a při užití koncentrovanější kyseliny dusičné dochází k jejich pasivaci (vznik vrstvy  $NiO$ ). Niklované komponenty disponují značnou odolností proti opotřebení a při vytvoření mohutnějších vrstev niklu (10  $\mu m$  a více) skvěle odolávají korozi. Nevýhoda niklových povlaků spočívá v jejich malé odolnosti vůči nabíhání, tedy procesu, kdy dochází ke zmatnění povlaku při dlouhodobější expozici v atmosféře. Řešení této problematiky spočívá v následném chromování niklové vrstvy (je-li lesk vyžadován pro dekorativní účely). Jakost niklového povlaku je závislá především na tloušťce vrstvy, neporéznosti, krystalické struktuře, rovnoměrné tloušťce povlaku a na přilnavosti. [9], [19]

### 2.5.2 Vnitřní pnutí

Při niklování může vzniknout nežádoucí defekt na povlaku, kdy v důsledku elektrokrytalizace popř. zanesením nečistot (zejména vodíku) do povlaku je vytvořeno vnitřní pnutí materiálu. Tohle pnutí může mít charakter jak kompresní tak dilatační. Při kompresním pnutí může za určitých podmínek docházet ke smršťování povlaku s jeho následným popraskáním. Dilatační pnutí má efekt opačný, kdy může dojít k expandování povlaku. Vnitřní pnutí u lázní na bázi niklu disponuje širokou škálou hodnot. Wattsova lázeň (viz dále v kapitole 2.8) bez přidaných aditiv vykazuje hodnotu dilatačního pnutí povlaku o velikosti 125 – 185 MPa. Menšího vnitřního pnutí může být dosaženo využitím např. Nikl-sulfamátu ( $Ni(NH_2SO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ) jako elektrolytu. [13]

## 2.6 Zdroj elektrického proudu

### 2.6.1 Elektrický proud

Dříve se jako zdroje elektrického proudu vyžívalo nízkonapětového dynama. V současné době je ke generaci elektrického proudu využíváno usměrňovačů s následným vyhlazováním proudu. U galvanického pokovování jsou vyžadovány zdroje s nízkým stejnosměrným napětím a velkým proudem. Rozptyl potřebného napětí se pohybuje od 4 do 15 V a podle mohutnosti zařízení disponují zdroje proudem v rozmezí od 50 do 12000 A. K dosažení co nejmenších ztrát je důležité umístění zdrojů blízko galvanických van a náležitě dimenzovaný rozvod elektrického proudu. [4], [20], [21]

Celý systém sestavený pro galvanické niklování uzavírá elektrický obvod, pro který platí Ohmův zákon. Tento zákon poukazuje na vztah mezi elektrickým proudem, napětím a elektrickým obvodem a je znám ve tvaru:

$$U = R \cdot I \quad (17)$$

kde:  $U$  – elektrické napětí [V]

$R$  – elektrický odpor [ $\Omega$ ]

$I$  – elektrický proud [A]

Elektrický proud, jakožto parametr zdroje má významný vliv na tloušťku nanesené niklové vrstvy a průměrnou vrstvu  $T$  lze zjistit ze vztahu:

$$T = \frac{m}{\rho_{Ni} \cdot S} \quad (18)$$

kde:  $T$  – průměrná tloušťka niklového povlaku (vynásobením výsledné hodnoty 10000x bude získána nanesená vrstva v mikrometrech [ $\mu\text{m}$ ])

$m$  – hmotnost spotřebovaného niklu [g]

$\rho_{Ni}$  – hustota niklu [ $8,907 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]

$S$  – niklovaná plocha [ $\text{cm}^2$ ]

Za hmotnost  $m$ , lze dosadit 1. Faradayův zákon elektrolýzy vztažený pro nikl (rovnice 9 str. 19), a poté vztah pro tloušťku nanesené niklové vrstvy vypadá takto:

$$T = \frac{304,141 \cdot 10^{-6} \cdot I \cdot t}{\rho_{\text{Ni}} \cdot S} \quad (19)$$

kde poměr elektrického proudu  $I$  vztaženého na jednotku plochy  $S$  je fyzikální veličina známá jako proudová hustota  $J$  [ $\text{A} \cdot \text{dm}^{-2}$ ]. Vztah pro průměrnou tloušťku niklové vrstvy vyjádřený s proudovou hustotou poté bude vypadat takto:

$$T = \frac{304,141 \cdot 10^{-6} \cdot t}{\rho_{\text{Ni}}} \cdot J \quad (20)$$

Průměrná tloušťka niklové vrstvy tedy závisí na proudové hustotě a čase, zatímco hmotnost naneseného niklu závisí na elektrickém proudu a čase. Teoreticky a v ideálním případě by měla být tloušťka niklové vrstvy ve všech místech pokovovaného materiálu stejná. Prakticky je však tato skutečnost téměř vzácná. K pochopení rozložení niklové vrstvy je zapotřebí brát v potaz rozložení elektrického proudu v niklovacím systému. Distribuce elektrického proudu a tím i niklu je ovlivněna především tvarem komponenty, jež má být poniklována, ale také umístěním anod v elektrolytu. Obecně lze říci, že proudová hustota bude větší na částech komponenty, jež jsou umístěny blíže k anodě a z důvodu většího elektrického odporu bude proudová hustota na odvrácené straně materiálu od anody menší. Tato skutečnost tedy udává fakt, že část materiálu blíže k anodě bude disponovat větší vrstvou niklu než část odvrácená. [13], [14]

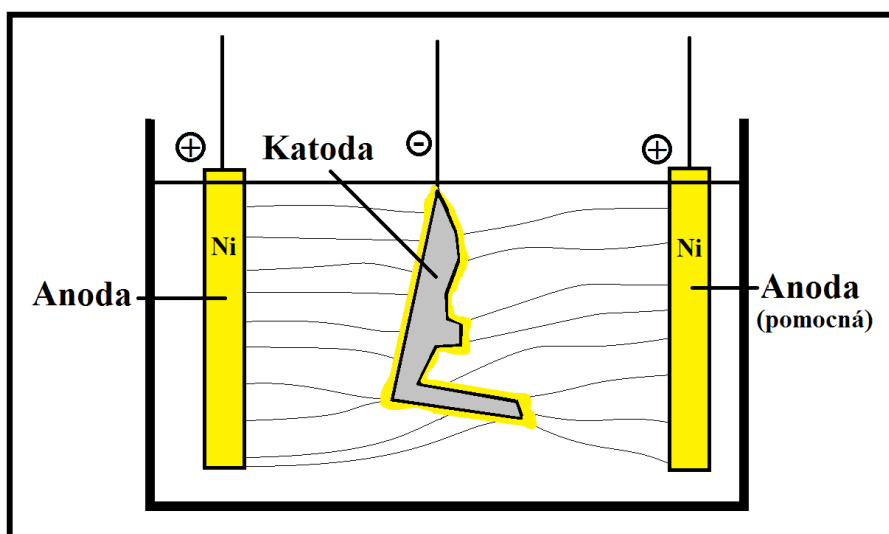
## 2.6.2 Rozložení elektrického proudu

Tloušťka niklové vrstvy v konkrétním bodě komponenty je závislá na proudové hustotě v daném místě. Při nemíchání lázně bývá proudová hustota nastavena na hodnotu v rozmezí od 0,5 do 3,5  $\text{A}/\text{dm}^2$  (při míchání až 18  $\text{A}/\text{dm}^2$ ) a je regulována pomocí vstupního proudu elektronicky v závislosti na velikosti komponenty. [13], [18]

Proudová hustota je závislá především na složitosti tvaru komponenty, na vzdálenosti dílu od anody, ale také na umístění niklované komponenty v držáku. Proudová hustota bude největší v místech komponenty umístěných blíže anodě z důvodu menšího odporu a kratší vzdálenosti mezi anodou a katodou. Na odvrácených stranách od anody



bude poté proudová hustota vlivem odporu menší. Lze tedy říci, že části komponenty umístěny blíže k anodě budou disponovat větší tloušťkou nanesené vrstvy, než části od anody odvrácené. Ke kompenzaci tohoto faktu je využíváno pomocných anod, které jsou umístěny blíže ke katodě a ze strany, jež disponuje menší proudovou hustotou. Proudová hustota je také více koncentrována na hranách a výčnělcích komponenty (viz obrázek 4). Důležitou roli také hraje umístění anody vzhledem ke katodě v systému a poloha je volena tak, aby vzdálenost mezi elektrodami byla přímá, a co možná nejkratší. [13]



**Obr. 4)** Rozložení elektrického proudu během galvanického pokovování

## 2.7 Anoda

Hlavní úlohou anod v niklovacích lázních a obecně při galvanickém pokovování je zajistit vedení elektrického proudu od zdroje do elektrolytu. Anoda dále slouží jako poskytovatel nikelnatých iontů, jež se z anody uvolňují do lázně a prostupují elektrolytem směrem ke katodě. Při galvanickém niklování hraje umístění a velikost anody (anod) v systému klíčovou roli. Umístění anod se volí tak, aby bylo dosaženo přibližně stejnoměrné distribuce náboje. Vhodně nainstalované anody by měly být rozmístěny na tyčovém držáku vedle sebe tak, aby byly přímo naproti materiálu k pokovování. K zabránění nadbytečného toku náboje ke spodní části komponent, je žádoucí, aby anody byly rozměrově mírně kratší, než jsou díly samotné. Zároveň je potřeba umístit anody co nejdále od hran komponent, k zamezení toku náboje primárně k těmto hranám. Důležité je také mít daný díl zavěšen spíše ve středu držáku než posunut k jeho vrchní nebo spodní části, aby byla dráha od anody ke katodě co nejkratší a přímá. U tvarově rozmanitějších komponent je nezbytné pro navýšení proudové hustoty použít pomocných anod, jež vylepšují rozložení elektrického proudu v elektrolytu. [4], [13]

Anody jsou většinou tvořeny titanovými koši (viz obrázek 6 na str. 27) zabalenými v bavlněném nebo syntetickém vaku, zabraňujícím případnému uvolňování kousků niklu do elektrolytu. Do těchto košů jsou umísťovány malé kousky (nazývané pelety, 25 x 25 mm) velmi čistého (až 99,95 %) niklu (viz obrázek 5 na str. 27). Zbylou část složení niklových pelet tvoří kobalt popř. palladium k dosažení vyššího stupně světlosti. Anoda také obsahuje procentuálně malý díl síry (0,02 %), jež snižuje její potenciál vůči elektrolytu a anoda uvolňuje nikelnaté ionty při menším napětí ve srovnání s anodami bez síry. Titan je zvolen z důvodu jeho odolnosti v silně oxidujícím prostředí, a to i v přítomnosti  $Cl^-$  iontů, které niklovací lázeň obsahuje. Dalším typem anod jsou anody nerozpustné, jež neposkytují nikelnaté ionty. Tento druh anod se využívá například pro pokovování vnitřních částí (např. trubek), kdy je zapotřebí dostat niklovou vrstvu do hlubších a méně přístupných částí komponent. Při procesu galvanického niklování s užitím nerozpustných anod a v přítomnosti chloridových iontů v elektrolytu může docházet k uvolňování chlóru na povrchu anody a tudíž musí být zajištěna potřebná ventilace nad lázní. Pokud lázeň neobsahuje chloridové ionty, jsou vhodným materiálem pro vytvoření anody například olověné pláty. V přítomnosti chloridových iontů se volí i nerozpustné grafitové popř. platinové materiály. [4], [13], [14], [18]



**Obr. 5)** Drobné kousky (pelety) niklu sloužící k naplnění anodického koše. [archiv HAO]



**Obr. 6)** Prázdný titanový koš, který po naplnění peletami funguje jako anoda. [13]

### **2.7.1 Efektivita anody**

Za ideálních podmínek je účinnost rozpouštění anody 100%. Reálné ztráty elektrického proudu vlivem odporu anody jsou ve srovnání s účinností katody (viz kapitola 2.9.1 Efektivita katody) zanedbatelné. Pokud je ovšem pH elektrolytu příliš vysoké mohou být  $OH^-$  ionty zbavovány náboje přednostně před uvolňováním nikelnatých iontů a za těchto podmínek se anoda jeví pasivní a uvolňování niklu z jejího povrchu je téměř zastaveno. Z tohoto důvodu je nutno dbát na vhodné rozmezí hodnot pH elektrolytu. [14]

## 2.8 Elektrolyt

Roztoky niklovací lázně jsou založeny popř. odvozeny od principu, jež vymyslel v roce 1916 profesor Oliver P. Watts. Wattsova lázeň obsahovala síran nikelnatý, chlorid nikelnatý a kyselinu boritou. Wattsova lázeň vykazuje nejlepší vlastnosti pro niklování při zvýšené teplotě a umožňuje pracovat i při větší proudové hustotě. Základní složení této lázně je uvedeno v následující tabulce 2. [13]

*Tab. 2) Vlastnosti základní Wattsovy lázně [13]*

Síran nikelnatý ( $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ )	240 – 300 g·l <sup>-1</sup>
Chlorid nikelnatý ( $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ )	30 – 90 g·l <sup>-1</sup>
Kyselina boritá ( $H_3BO_3$ )	30 – 45 g·l <sup>-1</sup>
Teplota lázně	40 – 60 °C
pH	3,5 – 4,5
Proudová hustota	2 – 7 A·dm <sup>-2</sup>
Rychlost pokovování	25 – 85 μm·h <sup>-1</sup>

Hlavní úloha síranu nikelnatého v lázni je poskytovat nikelnaté ionty, které jsou příčinou vodivosti tohoto roztoku. Této úloze napomáhá také chlorid nikelnatý, který navíc podporuje rozpouštění anody, zvyšuje konduktivitu lázně a tím snižuje požadavky na vstupní napětí zdroje. Elektrolyzou čistě nikelnaté soli je prudce zvyšována hodnota pH, kdy dochází k tvorbě zásaditých solí popř. hydroxidů. Z tohoto důvodu je v lázni přítomna kyselina boritá, jež působí jako pufr a hraje tedy významnou roli při udržování daného pH elektrolytu. Pokud ovšem koncentrace kyseliny borité klesne pod 15 g/l může docházet ke spálení popř. popraskání poniklované plochy. Ovšem při koncentraci nad 125 g/l většinou dochází ke zdrsnění a tvorbě mikrostruktur na povlaku. Do lázní se většinou přidávají i přísady, které zabraňují tvorbě pórů, jako jsou smáčedla (např. alkalická sůl arsensulfonové kyseliny). [9], [13], [21], [22]

## 2.8.1 Vany

Nádoby obsahující elektrolyt se nazývají „vany“. Vany jsou přizpůsobeny jak konstrukčně, tak materiálově, složení daného elektrolytu. Musí vykazovat jak chemickou tak i fyzikální odolnost a musí vyhovovat danému technologickému procesu. Materiály splňující potřebné parametry jsou polypropylen, polyvinylchlorid, polyvinylidifluorid popř. nerezová ocel. K menší výrobě lze využít van kameninových nebo pro větší komponenty van betonových s dlaždicemi pojenými asfaltovými smolami. Udržování teploty lázně je uskutečněno elektricky za pomoci článků ponořených do lázně. Lázně navíc bývají zespod míchány proudícím vzduchem. [4], [20]

Komplex van s lázněmi umístěných v řadě vedle sebe, spolu s dopravníkem a vnějším elektrickým zdrojem je nazýván **niklovací linka**. Tato linka neobsahuje pouze niklovací vanu, ale využívá také van pro odmaštění, moření a oplach, kterým je daná komponenta vystavena před samotnou niklovací lázní. Odmaštění, moření a oplach je nedílnou součástí celého systému, jelikož upravují komponenty na niklování tak, aby bylo docíleno co nejlepší přilnavosti jejich povrchu.



**Obr. 7)** *Soustava jednotlivých van tvořících niklovací linku.* [archiv HAO]

Jednotlivé komponenty určené k niklování jsou do van ponořeny za pomoci závěsů na dopravníku, které přenášejí na díly katodový proud. Závěsy musí disponovat dostatečnou vodivostí, aby nedocházelo k nežádoucím ztrátám elektrického proudu. Důležitou roli při galvanickém pokovování hraje také způsob zavěšení komponenty. Musí být dosaženo co nejlepšího rozložení elektrického proudu v závislosti na tvaru dílu. [4]



Obr. 8) Dopravník sloužící k přesunu komponenty do jednotlivých lázní. [archiv HAO]

## 2.8.2 Typy lázní

Jednotlivé druhy lázní bývají označovány dle roztoku soli, která je nositelem nikelnatých iontů. Elektrolyty na bázi niklu bývají zbarveny do zelena z důvodu značné koncentrace  $Ni^{2+}$  iontů. Mezi nejvýznamnější a nejrozšířenější lázně využívány ke galvanickému niklování se řadí:

- **Chloridové lázně**

Nositelem kovu v tomto druhu lázně je výhradně chlorid nikelnatý. Tento druh lázně poskytuje obecně pevnější a jemnější niklovanou vrstvu, a pro provoz díky její větší vodivosti lze pracovat při stejném proudu s nižším napětím, což vede k úspoře elektrické

energie. Chloridové lázně podléhají více korozi než standardní Wattsova lázeň, a proto musí být části niklovací linky zvoleny z vhodného materiálu, aby se degradace materiálu eliminovala. Další nevýhody těchto lázní spočívají v horší skladovatelnosti chloridu nikelnatého, povlaky z těchto lázní disponují vyšším vnitřním pnutím a také v jejich ceně, jež je vyšší než při užití síranových lázní. Využití chloridových lázní není značné, jelikož mechanické vlastnosti vyloučeného povlaku jsou poměrně špatné. [9], [13]

- **Nikl-sulfamátové lázně**

Hlavní složkou této lázně je sulfamát nikelnatý ( $Ni(NH_2SO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ), který disponuje vynikající rozpustností ve vodě a proto lze připravit lázeň s vysokým obsahem kovu. Tento druh lázní se využívá zejména pro funkční aplikace niklu. Při využití organických aditiv lze upravit výslednou kvalitu povlaku např. při užití naftalentrisulfonové kyseliny je nanesen povlak s velmi nízkou hodnotou vnitřního pnutí. K dosažení co nejmenšího vnitřního pnutí by měl být u tohoto typu lázně také udržován obsah chloridů v minimálním množství popř. využít jako alternativu bromidy. Sulfamátové lázně velmi citlivě reagují na jejich znečištění. Musí se tedy využívat velmi čistých chemikálií a lázeň musí být kontinuálně filtrována. Využití těchto lázní dříve spočívalo v gramofonovém průmyslu. V současné době bývá jejich vlastností využíváno k tvorbě větších vrstev povlaku. Náklady na tento druh lázně jsou poněkud vyšší, než je tomu u síranových. [9], [13]

- **Síranové lázně**

Čistě síranové lázně jsou využívány k procesu niklování, kdy je užito nerozpustných anod, kde absence chloridu eliminuje uvolňování toxického chlóru na anodě. V praxi je však pod pojmem síranová lázeň myšlen elektrolyt, jehož maticí je síran nikelnatý a tato lázeň disponuje alespoň minimálním obsahem chloridů. Lázně tohoto typu vylučují jemnozrnné matné povlaky a jsou charakteristické malým vnitřním pnutím. Při zvýšení koncentrace chloridů v této lázni a zároveň při přidání malých množství organických leskotvorných přísad však lze dosáhnout výsledného lesklého povrchu. Hlavní výhody těchto lázní spočívají v jejich jednoduché údržbě (méně korodují) a přísada síranu nikelnatého je levnější než např. chlorid nikelnatý. [9], [10], [13], [18]



**Obr. 9)** *Elektrolyt na bázi síranu nikelnatého jakožto nositel zeleně zbarvených  $Ni^{2+}$  iontů bývá pro galvanické niklování využíván nejčastěji. [archiv HAO]*

- **Fluoroboritanové lázně**

Zdroj nikelnatých iontů je zde fluoroboritan nikelnatý ( $Ni(BF_4)_2$ ), ze kterého lze vytvořit lázeň s vysokou koncentrací kovu (120 g/l). Tento fakt umožňuje provoz s většími proudovými hustotami než u lázní síranových. Vrstvy niklu z fluoroboritanových lázní jsou svými vlastnostmi srovnatelné s lázněmi síranovými. Jejich nevýhodou jsou značné ekonomické náklady na suroviny a neutralizace odpadních vod je komplikovanější. [9]

- **Speciální typy lázní**

Dalšími typy lázní jsou například lázně **nikl-seal**, což jsou lázně obsahující nevodivé tuhé části, které jsou vylučovány spolu s niklem. Tyto částičky po následném chromování vytváří mikroporézní povlak, který vylepšuje korozní ochranu. **Saténové niklování** je obdobné jako nikl-seal, ovšem disponuje větším obsahem tuhých částí (15 %) a výsledný matný povlak získává saténový nádech. Důležitým typem lázní je také lázeň pro **černé niklování**, které slouží k dekorativním účelům, pro potřeby optického průmyslu nebo jako úprava solárních panelů disponující antireflexními vlastnostmi. Tento druh lázní ovšem neposkytuje významnou antikorozi ochranu. [9], [23]



### 2.8.3 Faktory ovlivňující efektivitu lázni

- **Throwing power**

Faktory ovlivňující distribuci niklu na katodu (vodivost elektrolytu, polarizace a efektivita katody) se nazývají „throwing power“. Throwing power (TP) většinou bývá stanovena experimentálně. Elektrolyty, které vykazují kladnou hodnotu TP jsou schopny určitým způsobem regulovat distribuci povlaku na katodě. Negativní hodnotou TP disponují například elektrolyty na bázi chromu, kdy rozložení povlaku je závislé na tvaru komponenty a zároveň na složení lázně, která zde hraje významnou roli. Elektrolyty na bázi niklu spadají do spodní části kladných hodnot TP. Lázně, které jsou určeny pro dekorativně lesklé povlaky, vykazují lehce negativní hodnotu TP. Obecně lze říci, že rozložení elektrického proudu je primárně závislé na geometrii komponenty. Throwing power může být do určité míry kompenzována snížením proudové hustoty, zvýšením teploty a pH lázně popř. zvětšením elektrické vodivosti elektrolytu a vzdálenosti mezi elektrodami. [13]

- **Teplota**

Změna teploty elektrolytu ovlivňuje výslednou jakost niklové vrstvy, throwing power i vnitřní pnutí. Dále také barvu povrchu, tvrdost popř. je-li teplota vysoká může docházet k opálení niklové vrstvy. Při teplotě niklovací lázně nad 70 °C také dochází k pomalejšímu uvolňování nikelnatých iontů na povrch katody. Obecně lze říci, že při galvanickém pokovování by měla být teplota lázně v rozmezí od 38 do 60 °C, která by se měla udržovat v rozmezí  $\pm 2$  °C od stanovené teploty. [13], [18]

- **Hodnota pH**

Vhodné rozmezí pH má vliv stejně jako teplota na throwing power, vnitřní pnutí, barvu povrchu, ale dále také ovlivňuje efektivitu katody, množství nečistot v lázni a tedy celkově hraje důležitou roli při výsledných fyzikálně – chemických vlastnostech povrchu. Navzdory využívání kyseliny borité jako pufru, udržujícího konstantní hodnotu pH, je alkalita roztoku nežádaně v průběhu procesu zvyšována. Tento proces alkalizace bývá regulován okyselením niklovací lázně. V průběhu procesu niklování může docházet také ke zvyšování kyselosti lázně. Tento jev se vyskytuje v důsledku užití nerozpustných anod, kdy se anoda nerozpouští a nikelnaté ionty jsou čerpány pouze z elektrolytu a nejsou

paralelně doplňovány z anody. Kyselost lázně je také pomalu navyšována vlivem odpařování vody z elektrolytu. [13]

Při galvanickém niklování je koncentrace nikelnatých iontů v roztoku a pH elektrolytu pomalu a nevyžádaně navyšována v důsledku probíhajícího procesu. Rychlost zvyšování koncentrace nikelnatých iontů v elektrolytu závisí na rozdílu efektivit katody (90-97 % viz kapitola 2.9.1. Efektivita katody) a anody (100 %). Katoda tedy v podstatě nestíhá přijímat nikelnaté ionty. V tomto důsledku je zvyšující se koncentrace nikelnatých iontů závislá na složení elektrolytu a ne na typu rozpouštěné anody. [13], [14]

- **Míchání**

Proces míchání lázně elektrolytu je důležitý zejména pro odstraňování malých bublin, které se v průběhu elektrolýzy usazují na katodě a způsobují hrubost výsledného povrchu. Míchání má také za následek rovnoměrné rozložení teploty v celé lázni, jelikož ohřívací zařízení elektrolytu není umístěno po celé ploše niklovací nádoby. Míchání bývá uskutečněno buď za pomoci zavádění vzduchu do spodní části nádoby popřípadě za pomoci pohybů katody. Při míchání vzduchem bývá umístěno plastové potrubí cca 5 cm ode dna lázně pod katodou. [9], [13]

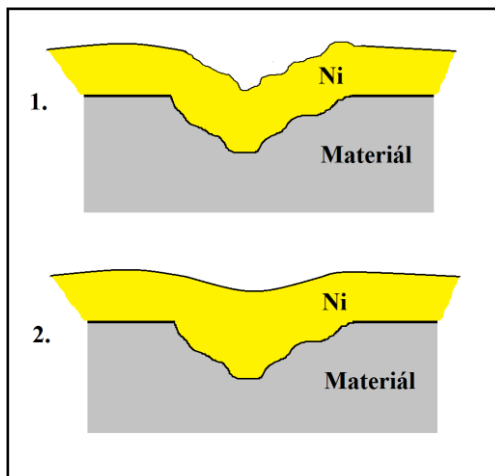
- **Filtrace**

Filtrování elektrolytu je důležité k udržení čistoty celého roztoku. Zajišťuje odfiltrovávání nerozpustných nečistot v podobě nežádoucích částic v elektrolytu. Lázně by měly být přefiltrovány v celém svém objemu minimálně 2x za hodinu. K filtraci je využíváno filtračních aparátů, jež jsou složeny z filtračních elementů (např. vinuté svíčky z polyesteru nebo koláče z aktivního uhlí), čerpadla, hadic a armatur. [9], [13], [20]

## **2.8.4 Vyhlazování**

Vyhlazování při užití galvanického niklování lze definovat jako schopnost elektrolytu zarovnat povrch (vyhladit hrubosti popř. drobné nerovnosti, defekty a škrábnutí) upravovaného materiálu. Nejlepší schopnost vyhlazovat materiál mají lázně poskytující světlé niklové povlaky. Tyto lázně většinou obsahují organická aditiva (močovina, benzoát sodný, thiazol...), která jsou během niklování primárně adsorbována na hroty a vyvýšenější místa povrchu niklovaného materiálu a tím zabraňují proudění

elektrického proudu na tyto části. Elektrický proud je poté více orientován spíše do vrypů, škrábanců a důlků a zapříčiňuje primární distribuci niklu do těchto míst. Wattsova lázeň (bez příslušných organických aditiv) na rozdíl od nikl-sulfamátové lázně nevykazuje schopnost vyhlazování. [13], [24]



**Obr. 10)** Schopnost elektrolytu vyhlazovat povrch materiálu 1. Wattsova lázeň, 2. Nikl-sulfamátová lázeň

## 2.9 Katoda

Konečným článkem celého procesu galvanického niklování je katoda, která přijímá redukované  $Ni^{2+}$  ionty. Tyto ionty jsou distribuovány na katodu v závislosti na jejím tvaru, velikosti a rozložení elektrického proudu v systému, na vlastnostech anody a elektrolytu. Vhodný materiál pro niklování musí být samozřejmě elektricky vodivý, jelikož uzavírá celý obvod systému. Nejčastějším materiálem tvořící katodu bývá litina, slitina, ocel, mosaz, ale i samotný zinek nebo měď. [13]

### 2.9.1 Efektivita katody

Během galvanického niklování se může navíc od reakce, kdy nikl přechází ze stavu  $Ni^{2+}$  do formy  $Ni^0$ , vyskytnout na katodě proces uvolňování vodíku. Takovýto vodík vytváří malé bubliny plynu na povrchu katody. Plyn na katodě snižuje její vodivost a zabraňuje přijímání nikelnatých iontů. Katoda tedy v podstatě „nestíhá“ paralelně přijímat veškeré ionty z anody a zaostává za ní. Tento fakt snižuje efektivitu procesu galvanického niklování z 100 % na 90 – 97 %. Nižší procentová hodnota efektivit je obvykle detekována u niklování za účelem dosažení co největšího lesku povrchu spolu s dosažením co nejtenčí niklové vrstvy. [13], [14]

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Praktická část této bakalářské práce byla provedena na niklovací lince ve společnosti Honeywell Aerospace Olomouc, s. r. o. a z důvodu zachování výrobních praktik nejsou uvedeny veškeré informace.

### 3.1 Experimentální vybavení

#### 3.1.1 Chemikálie

Kyselina sírová ( $H_2SO_4$ , čistota 95 %,  $M_r = 98,08$  g/mol, lach:ner), hydroxid sodný ( $NaOH$ , pevný a chemicky čistý,  $M_r = 40,00$  g/mol, lach:ner), síran nikelnatý hexahydrát ( $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ , chemicky čistý,  $M_r = 262,85$  g/mol, dodavatel Brenntag), chlorid nikelnatý hexahydrát ( $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ , chemicky čistý,  $M_r = 237,69$  g/mol, dodavatel Brenntag), kyselina chlorovodíková ( $HCl$ , p.p.,  $M_r = 36,46$  g/mol, lach:ner), kyselina dusičná ( $HNO_3$ , koncentrace 65%,  $M_r = 63,01$  g/mol, lach:ner), maskovací lak (*Enplate Stop-off, no.1; maskant pro povrchové úpravy, Enthone*)

#### 3.1.2 Přístroje a pomůcky

Niklovací linka společnosti HAO skládající se z dopravníku, z vany pro elektrolytické odmaštění (*materiál: ocel, objem vany: 2,95 m<sup>3</sup>, EKOL*), z oplachových van (*materiál: polypropylen, objem vany: 1,5 m<sup>3</sup> + 1,6 m<sup>3</sup>, EKOL*), z mořící vany (*materiál: polypropylen, objem vany: 1,55 m<sup>3</sup>, EKOL*), z nickel-strike vany (*materiál: polypropylen, objem vany: 2,96 m<sup>3</sup>, EKOL*), z vany pro samotné niklování (*materiál: polypropylen, objem vany: 2,96 m<sup>3</sup>, EKOL*) a ze zdroje elektrického proudu (*s možností regulovat vstupní napětí, EKOL*). Analytické váhy (*s přesností na desetiny miligramu, OHAUS Discovery DV214C*), atmosférická pec (*elektricky vytápěná, HV VMD Grygov*), lopatky difuzoru turbínového leteckého motoru k poniklování (*materiál: superslitina niklu, hmotnost: cca 57 g, množství: 23*), niklové pelety (*velmi čistý nikl, rozměry: 2,5 mm x 2,5 mm x 1 mm*), držák lopatek (*materiál: titan, rozměr 1,11 m x 1,11 m*), digitální stopky, pistole se stlačeným vzduchem

## 3.2 Pracovní postup

Celý postup pro niklování všech 23 lopatek při daných hodnotách vstupního napětí byl vždy uskutečněn dle následujících kroků:

1. Nejprve bylo provedeno **vážení lopatek** za pomoci analytických vah s přesností vážení na desetiny miligramu. Po celou dobu vážení bylo pracováno v gumových rukavicích, aby se zamezilo případnému znečištění lopatek. Všechny lopatky byly naskládány do řady na čistý stůl a následně byly zváženy vždy v pořadí 1 → 23. Tento postup se opakoval celkem 3x a ze získaných hodnot pro jednotlivé lopatky byl vypočítán aritmetický průměr a tato hodnota byla přiřazena k jednotlivým lopatkám. Následně byly lopatky uchyceny podle pořadí vážení vedle sebe na titanový držák, který byl poté uchycen na dopravník za pomoci háků.
2. Za pomoci ovladače na dopravníku byl držák spolu s lopatkami přemístěn nad vanu s lázní pro **odmaštění**. Poté byl držák s lopatkami ponořen do této lázně tak, aby veškeré lopatky byly pod hladinou roztoku. V této lázni byla předem nastavena teplota na 55 °C. Ihned po ponoření bylo zapnuto míchání lázně za pomoci vzduchu a byly zapnuty stopky. Po uplynutí 5 minut byl držák s lopatkami vyjmut z lázně. Tato lázeň obsahovala hydroxid sodný o koncentraci v rozmezí 40 – 60 g/l a jejím účelem bylo zbavit lopatky případného zbytkového znečištění z výroby.
3. Opět za pomoci ovladače na dopravníku byla celá katoda přemístěna nad lázeň pro **dvojitý oplach**. Držák s lopatkami byl ponořen do první oplachové lázně, bylo zapnuto vzduchové čerání a byl stopován čas. Po uplynutí 30 sekund byla katoda vyjmuta a přesunuta do vedlejší druhé oplachové lázně a postup se opakoval jako v případě první oplachové lázně. Tyto lázně obsahovaly pouze demineralizovanou vodu a účelem těchto dvou lázní bylo očistit lopatky od chemikálie z předchozí lázně a zároveň zabránit znečišťování lázní následujících.
4. Po vytažení držáku s lopatkami z oplachových lázní byl držák přesunut nad lázeň, kde probíhá **moření**. Do této lázně byla katoda ponořena na dobu 30 sekund za současného vzduchového míchání. Lázeň pro moření obsahovala kyselinu chlorovodíkovou o koncentraci v rozmezí 190 – 230 g/l. Ponoření lopatek do této

lázně bylo uskutečněno za účelem zbavení lopatek zbytků oxidů železa, případně dalších kovů. Po vytažení katody byl držák s lopatkami přesunut k dalšímu dvojitému oplachu.

5. **Dvojitý oplach** byl proveden analogicky a ze stejných důvodů podle bodu 3.
6. Po vytažení katody z druhé oplachové lázně byly lopatky s držákem přesunuty nad lázeň s názvem **nickel strike** (někdy též nazýváno „nickel flash“). Do této lázně byla katoda ponořena na dobu 4 minuty za současného čeření vzduchem. Tato lázeň obsahovala směs chloridu nikelnatého o koncentraci v rozmezí 52 – 78 g/l a kyseliny chlorovodíkové o koncentraci 110 – 150 g/l. Nickel strike je lázeň, kde dochází k vytvoření velmi tenké drsné pórovité vrstvy niklu na povrchu lopatek, která funguje jako mezivrstva na níž se poté provádí samotné niklování. Tato vrstva vytváří vynikající vlastnosti pro přilnavost během samotného galvanického niklování. Po vytažení lopatek následoval další dvojitý oplach.
7. **Dvojitý oplach** byl proveden analogicky a ze stejných důvodů podle bodu 3.
8. Následovalo přemístění katody z dvojitého oplachu nad lázeň, kde probíhá samotné galvanické niklování. Tato lázeň měla předem nastavenou teplotu na 45 °C. Do titanových košů tvořících anodu byly předem nasypány niklové pelety až po okraj košů. Po ponoření katody do této lázně bylo zapnuto čeření lázně vzduchem a na zdroji u lázně byla nastavena hodnota požadovaného vstupního napětí. Při tomto napětí byl na zdroji vygenerován patřičný elektrický proud, který byl přiřazen a zapsán k danému napětí pro následné vyhodnocení. Byla elektronicky nastavena doba niklování na 32 minut a po uplynutí tohoto časového intervalu byla katoda vytažena. Tato lázeň obsahovala síran nikelnatý o koncentraci 75 – 95 g/l a přídavek kyseliny sírové k udržení stálého rozmezí pH lázně 2 - 2,5. V této lázni dochází k samotnému nanesení niklové vrstvy na povrch katody tedy ke galvanickému niklování. Po ukončení niklování byl držák s lopatkami přemístěn k poslednímu oplachu.

9. **Dvojitý oplach** – proveden analogicky, dle bodu 3.

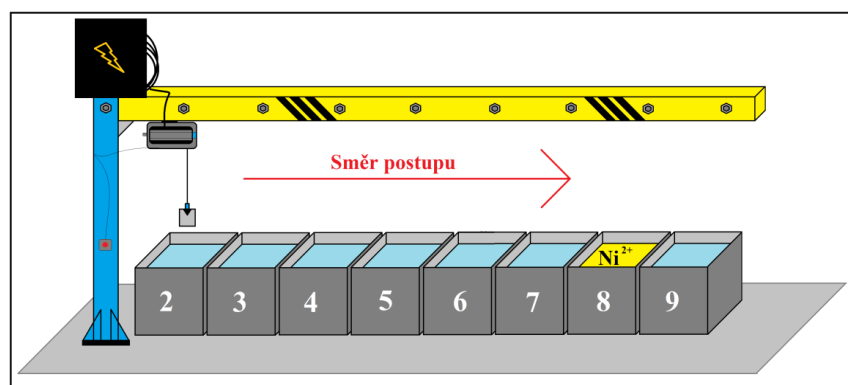
10. Po posledním dvojitém oplachu byly lopatky za pomoci dopravníku vytaženy a přesunuty na konec dráhy dopravníku, kde probíhalo **sušení lopatek**. To bylo uskutečněno za pomoci pistole, do které je přiváděn pod tlakem vzduch. Sušení bylo prováděno do doby, než byly lopatky vizuálně kompletně suché. Poté byly usušené lopatky postupně sundány z držáku a umístěny opět v dané řadě vedle sebe na stůl.

11. Následovala **vizuální kontrola** jakosti niklového povlaku na lopatkách. Byla kontrolována celistvost a neporušenost nanesené vrstvy. Pokud byla některá z lopatek nevyhovující (došlo ke spálení) byl k patřičné lopatce připsán tento defekt. Po zkontrolování všech lopatek byly přesunuty k atmosférické peci.

12. Poté byla provedena **kontrola přilnavosti**, kdy byly lopatky zasunuty do atmosférické pece předem zahřáté na 250 °C a při této teplotě byly lopatky v peci ponechány po dobu 15 minut. Po vytažení lopatek z pece byly ihned ponořeny do nádoby s vodou o laboratorní teplotě. Po vychladnutí lopatek a jejich vyjmutí z nádoby byla opět provedena opět vizuální kontrola dle kroku 11.

13. Předposledním krokem bylo opětovné **vážení lopatek**, které bylo uskutečněno stejným způsobem jako v kroku 1. Vážení lopatek po galvanickém niklování bylo uskutečněno pro následné vyhodnocení hmotnosti naneseného niklu na jednotlivých lopatkách.

14. Posledním krokem celého pracovního postupu bylo konečné **odniklování lopatek** v nádobě s kyselinou dusičnou o koncentraci 430 – 470 g/l. Tento krok byl prováděn za laboratorní teploty po dobu přibližně 8 hodin. Po vytažení lopatek z nádoby byly opláchnuty ve vodě a usušeny pro jejich opětovné použití



**Obr. 11)** Schéma postupu namáčení lopatek do jednotlivých van, jež je uskutečněno za pomoci dopravníku.

### 3.3 Vyhodnocení

Niklování bylo uskutečněno pro vstupní napětí 3 V; 4,5 V; 5 V; 6 V; 7 V; a následně bylo provedeno pro každou hodnotu napětí vyhodnocení se zjištěním efektivity. Nejprve byla po niklování zkontrolována přilnavost niklové vrstvy za pomoci ohřátí lopatek v atmosférické peci s jejich následným zchlazením. Následně byla vypočítána hmotnost naneseného niklu v gramech na jednotlivé lopatky dle vztahu:

$$m_{Ni} = m_{po} - m_{před} \quad (21)$$

kde  $m_{po}$  - hmotnost lopatky po niklování [g]

$m_{před}$  - hmotnost lopatky před niklováním [g]

Poté byla vypočítána teoretická hmotnost niklu [g], jež by měla být vyloučena na katodu při 100% účinnosti. K tomu byl využit 1. Faradayův zákon elektrolýzy vztažený pro nikl s využitím proudu, který byl v závislosti na nastaveném napětí odečten ze zdroje:

$$m_{Ni} = 304,141 \cdot 10^{-6} \cdot I \cdot t \quad (9)$$

Následně v závislosti na hmotnosti naneseného niklu na všech lopatkách byla procentuálně porovnána teoretická a skutečná hmotnost vyloučeného niklu a byla určena efektivita [%].



Byla také určena průměrná tloušťka nanesené niklové vrstvy na jednotlivých lopatkách. Pro zachování potřebných fyzikálně-chemických vlastností by měla vždy být tato tloušťka minimálně 5  $\mu\text{m}$ . Pokud byla výsledná hodnota nižší byl výsledek niklování považován za nezdařený a nevyhovující. Tloušťka byla vypočtena na základě skutečné hmotnosti naneseného niklu v závislosti na ploše lopatky (61  $\text{cm}^2$ ) a hustotě niklu (8,907  $\text{g}\cdot\text{cm}^3$ ) dle vztahu:

$$T = \frac{m}{\rho \cdot S} \quad (18)$$

kde po vynásobení získané hodnoty 10000x obdržíme průměrnou tloušťku niklové vrstvy na lopatce v  $\mu\text{m}$ . Jako poslední byla zjištěna doba niklování, která by byla potřeba pro niklování lopatek po optimalizaci. Před optimalizací byla doba nastolena společností na 32 minut a parametr pro minimální tloušťku niklové vrstvy 5  $\mu\text{m}$ . Bylo vycházeno ze vztahu pro tloušťku niklové vrstvy v závislosti na skutečné efektivitě při znalosti plochy všech lopatek (1401  $\text{cm}^2$ ):

$$T = \frac{304,141 \cdot 10^{-6} \cdot I \cdot t}{\rho \cdot S} \cdot 0,737 \quad (19)$$

Po úpravě :

$$t = \frac{T \cdot \rho \cdot S}{304,141 \cdot 10^{-6} \cdot I \cdot 0,737}$$

kde: t – čas [s]

T – tloušťka niklové vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]

$\rho$  – hustota niklu [8,907  $\text{g}\cdot\text{cm}^3$ ]

S – plocha lopatek [ $\text{cm}^2$ ]

I – elektrický proud [A]

## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Následující tabulky obsahují hodnoty dosažené efektivity procesu galvanického niklování a jejich ztráty při daných vstupních napětích zdroje. V tabulkách jsou uvedeny hmotnosti jednotlivých lopatek před a po jejich niklování a je zde vždy uveden jejich hmotnostní rozdíl. Tabulky také obsahují vypočtenou hodnotu průměrné tloušťky niklového povlaku na jednotlivých lopatkách a jsou v nich také zahrnuty hodnoty elektrického proudu a odporu vztahující se k danému napětí. Dále je v tabulkách uvedena teoretická hmotnost niklu, která by měla být dohromady na lopatkách nanесena a také skutečná, tedy zvážená hmotnost nanесeného niklu na všech lopatkách.

Barevně rozlišené hodnoty tloušťky niklové vrstvy na jednotlivých lopatkách představují **vyhovující** nebo **nevyhovující** niklovou vrstvu z pohledu její velikosti.

V případě výskytu červeného textu **spálená** se jedná o opět nevyhovující lopatku ovšem z pohledu opálení niklové vrstvy.

**Tab. 3) Výsledky pro napětí zdroje 3 V**

Lopatka	váha lopatky [g]	váha lopatky po niklování [g]	rozdíl [g]	tloušťka vrstvy [μm]
1	57.2598	57.4853	0.2255	4.15
2	57.1504	57.3834	0.2330	4.29
3	56.2811	56.4637	0.1826	3.36
4	57.1986	57.3752	0.1766	3.25
5	57.4356	57.6125	0.1769	3.26
6	56.4387	56.6270	0.1883	3.47
7	57.0039	57.1999	0.1960	3.61
8	56.6951	56.8930	0.1979	3.64
9	57.3683	57.5500	0.1817	3.34
10	57.4813	57.6701	0.1888	3.47
11	57.1192	57.3544	0.2352	4.33
12	56.6053	56.7734	0.1681	3.09
13	57.2807	57.5232	0.2425	4.46
14	57.2668	57.4424	0.1756	3.23
15	57.2732	57.4823	0.2091	3.85
16	56.7551	56.9409	0.1858	3.42
17	57.1889	57.3689	0.1800	3.31
18	57.0090	57.2448	0.2358	4.34
19	56.9330	57.1492	0.2162	3.98
20	57.1702	57.4057	0.2355	4.33
21	57.7065	57.9246	0.2181	4.01
22	57.3237	57.5314	0.2077	3.82
23	56.8260	57.0425	0.2165	3.98

napětí [V]	3
proud [A]	72
odpor [Ω]	0.042

teoretická hmotnost [g]	42.0445
skutečná hmotnost [g]	4.6734
<b>účinnost [%]</b>	<b>11.1</b>
ztráty [%]	88.9

**Tab. 4) Výsledky pro napětí zdroje 4,5 V**

Lopatka	váha lopatky [g]	váha lopatky po niklování [g]	rozdíl [g]	tloušťka vrstvy [μm]
1	57.2649	57.6252	0.3603	6.63
2	57.1564	57.4523	0.2959	5.45
3	56.2855	56.5791	0.2936	5.40
4	57.2033	57.4740	0.2707	4.98
5	57.4403	57.7241	0.2838	5.22
6	56.4432	56.7398	0.2966	5.46
7	57.0097	57.2829	0.2732	5.03
8	56.6999	56.9695	0.2696	4.96
9	57.3725	57.6508	0.2783	5.12
10	57.4872	57.7715	0.2843	5.23
11	57.1230	57.4328	0.3098	5.70
12	56.6098	57.0728	0.4630	8.52
13	57.2863	57.6296	0.3433	6.32
14	57.2712	57.5757	0.3045	5.60
15	57.2781	57.5755	0.2974	5.47
16	56.7606	57.0422	0.2816	5.18
17	57.1938	57.4903	0.2965	5.46
18	57.0135	57.2996	0.2861	5.27
19	56.9382	57.2078	0.2696	4.96
20	57.1746	57.4423	0.2677	4.93
21	57.7243	57.9870	0.2627	4.84
22	57.3337	57.6115	0.2778	5.11
23	56.8371	57.1376	0.3005	5.53

napětí [V]	4.5
proud [A]	100
odpor [Ω]	0.045

teoretická hmotnost [g]	58.3951
skutečná hmotnost [g]	6.8668
<b>účinnost [%]</b>	<b>11.8</b>
ztráty [%]	88.2

**Tab. 5) Výsledky pro napětí zdroje 5 V**

Lopatka	váha lopatky [g]	váha lopatky po niklování [g]	rozdíl [g]	tloušťka vrstvy [μm]
1	57.2565	57.7175	0.4610	8.48
2	57.1480	57.5273	0.3793	6.98
3	56.2792	56.6408	0.3616	6.66
4	57.1961	57.5844	0.3883	7.15
5	57.4337	57.8014	0.3677	6.77
6	56.4378	56.7877	0.3499	6.44
7	57.0009	57.3809	0.3800	6.99
8	56.6919	57.0799	0.3880	7.14
9	57.3663	57.7505	0.3842	7.07
10	57.4770	57.8767	0.3997	7.36
11	57.1203	57.5698	0.4495	8.27
12	56.6041	57.1561	0.5520	10.16
13	57.2778	57.7480	0.4702	8.65
14	57.2656	57.6369	0.3713	6.83
15	57.2714	57.6081	0.3367	6.20
16	56.7535	57.1014	0.3479	6.40
17	57.1883	57.5454	0.3571	6.57
18	57.0067	57.3575	0.3508	6.46
19	56.9294	57.2985	0.3691	6.79
20	57.1678	57.5241	0.3563	6.56
21	57.7012	58.0550	0.3538	6.51
22	57.3216	57.7034	0.3818	7.03
23	56.8251	57.2628	0.4377	8.06

napětí [V]	5
proud [A]	121
odpor [Ω]	0.041

teoretická hmotnost [g]	70.6580
skutečná hmotnost [g]	8.9939
<b>účinnost [%]</b>	<b>12.7</b>
ztráty [%]	87.3

**Tab. 6) Výsledky pro napětí zdroje 6 V**

Lopatka	váha lopatky [g]	váha lopatky po niklování [g]	rozdíl [g]	tloušťka vrstvy [μm]
1	57.2607	57.8855	0.6248	11.50
2	57.1518	57.6697	0.5179	9.53
3	56.2820	56.7441	0.4621	8.51
4	57.1995	57.6566	0.4571	8.41
5	57.4364	57.8728	0.4364	8.03
6	56.4393	56.8366	0.3973	7.31
7	57.0053	57.4169	0.4116	7.58
8	56.6962	57.1730	0.4768	8.78
9	57.3693	58.0031	0.6338	11.67
10	57.4826	58.0680	0.5854	10.77
11	57.1199	57.5226	0.4027	7.41
12	56.6060	57.0716	0.4656	8.57
13	57.2821	57.7163	0.4342	7.99
14	57.2675	57.6886	0.4211	7.75
15	57.2743	57.6654	0.3911	7.20
16	56.7566	57.1192	0.3626	6.67
17	57.1900	57.5507	0.3607	6.64
18	57.0101	57.4866	0.4765	8.77
19	56.9344	57.3873	0.4529	8.34
20	57.1709	57.6365	0.4656	8.57
21	57.7100	58.3422	0.6322	11.64
22	57.3258	57.8812	0.5554	10.22
23	56.8275	57.3459	0.5184	9.54

napětí [V]	6
proud [A]	142
odpor [Ω]	0.042

teoretická hmotnost [g]	82.9210
skutečná hmotnost [g]	10.9422
<b>účinnost [%]</b>	<b>13.2</b>
ztráty [%]	86.8

**Tab. 7) Výsledky pro napětí zdroje 7 V**

Lopatka	váha lopatky [g]	váha lopatky po niklování [g]	rozdíl [g]	tloušťka vrstvy [μm]
1	57.2357	58.0843	0.8486	15.62
2	57.1415	57.8422	0.7007	12.90
3	56.8335	57.4545	0.6210	11.43
4	57.2154	57.8124	0.5970	10.99
5	57.0024	57.5738	0.5714	10.52
6	57.2824	57.8366	0.5542	10.20
7	56.9132	57.4704	0.5572	10.26
8	56.7938	57.4434	0.6496	11.96
9	57.2212	58.0708	0.8496	15.64
10	57.4369	58.2247	0.7878	14.50
11	56.8947	57.5226	0.6279	11.56
12	57.1024	57.7412	0.6388	11.76
13	57.2145	57.7163	0.5018	9.24
14	57.2631	57.8223	0.5592	10.29
15	57.1004	57.6235	0.5231	9.63
16	56.8878	57.3923	0.5045	9.29
17	57.0019	57.4872	0.4853	8.93
18	57.1478	57.7741	0.6263	11.53
19	56.9987	57.5782	0.5795	10.67
20	57.2496	57.8741	0.6245	11.49
21	57.4718	58.3247	0.8529	15.70
22	57.3365	58.1101	0.7736	14.24
23	56.9854	57.7140	0.7286	13.41

napětí [V]	7
proud [A]	167
odpor [Ω]	0.042

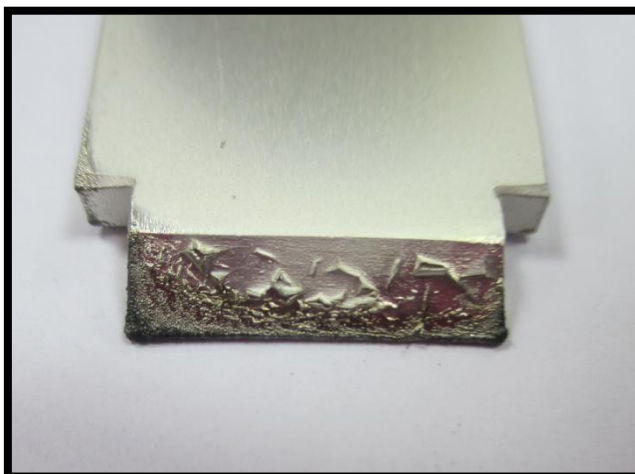
teoretická hmotnost [g]	97.5198
skutečná hmotnost [g]	14.7631
<b>účinnost [%]</b>	<b>15.1</b>
ztráty [%]	84.9

Při porovnávání jednotlivých hodnot v tabulkách 3 až 7 lze pozorovat vzrůstající efektivitu procesu. Při napětí 3 V byla hodnota efektivnosti velmi malá (11,1 %) a po vypočtení průměrné tloušťky nanesené niklové vrstvy žádná z lopatek nedisponovala minimální tloušťkou 5  $\mu\text{m}$  a tudíž byly všechny vyhodnoceny jako nevyhovující.

Během niklování při napětí 4,5 V byla účinnost lehce vyšší (11,8 %) než při 3 V a většina lopatek již vyhovovala tloušťkou nanesené niklové vrstvy.

Při niklování o hodnotách napětí 5 a 6 V efektivita stále rostla. U obou dvou hodnot napětí bylo dosaženo vyhovující tloušťky niklového povlaku na všech lopatkách a všechny vyhovovaly přílnavostí i vzhledem.

I když efektivita niklování při napětí 7 V vzrostla na 15,1 % nebylo možno tohle napětí využít, jelikož došlo ke spálení niklové vrstvy na téměř všech lopatkách. Přesně dle teorie byl elektrický proud (167 A) příliš velký a koncentrován do hran a hrotů a v těchto místech došlo ke spálení niklové vrstvy.



**Obr. 12)** Spálená niklová vrstva vlivem velké koncentrace elektrického proudu na hranách lopatky. [archiv HAO]

Niklování při elektrickém napětí 7 V tedy již nevyhovovalo požadavkům na kvalitu nanesené vrstvy. Z tohoto důvodu byla prvotní účinnost niklovací linky stanovena dle předchozí hodnoty napětí tedy 6 V a ta vykazovala hodnotu pouhých 13,2 %. Ztráty o velikosti 86,8 % byly ovšem neakceptovatelné a tudíž po následné diskuzi bylo rozhodnuto o následném niklování se „zamaskovaným“ držákem, který by mohl způsobovat výrazné ztráty v důsledku ulpívání niklu na jeho povrchu. Vzhledem ke snížení celkového (vodivého) obsahu niklované plochy v důsledku maskování držáku bylo napětí pro následné niklování odhadnuto a sníženo z výsledných 6 V na 4 V. Maskování držáku bylo provedeno v celé jeho ponořené ploše (6096  $\text{cm}^2$ ) za pomoci maskovacího laku.

**Tab. 8) Výsledky pro 4 V s maskováním**

Lopatka	váha lopatky [g]	váha lopatky po niklování [g]	rozdíl [g]	tloušťka vrstvy [μm]
1	57.2546	59.0835	1.8289	33.66
2	57.1455	58.4975	1.3520	24.88
3	56.2776	57.4694	1.1918	21.94
4	57.1941	58.3231	1.1290	20.78
5	57.5332	58.5301	0.9969	18.35
6	56.5348	57.5438	1.0090	18.57
7	56.9984	58.0990	1.1006	20.26
8	56.6904	57.7346	1.0442	19.22
9	57.3647	58.4876	1.1229	20.67
10	57.4748	58.7662	1.2914	23.77
11	57.1163	58.5778	1.4615	26.90
12	56.6017	58.3267	1.7250	31.75
13	57.2750	59.6563	2.3813	43.83
14	57.2636	59.2023	1.9387	35.68
15	57.2694	58.6837	1.4143	26.03
16	56.7497	58.0768	1.3271	24.43
17	57.1852	58.4740	1.2888	23.72
18	57.0050	58.2249	1.2199	22.45
19	56.9278	58.1387	1.2109	22.29
20	57.1660	58.4126	1.2466	22.94
21	57.6986	59.0123	1.3137	24.18
22	57.3199	58.7560	1.4361	26.43
23	56.8220	58.6422	1.8202	33.50

napětí [V]	4
proud [A]	74
odpor [Ω]	0.054

teoretická hmotnost [g]	43.2124
skutečná hmotnost [g]	31.8508
<b>účinnost [%]</b>	<b>73.7</b>
ztráty [%]	26.3

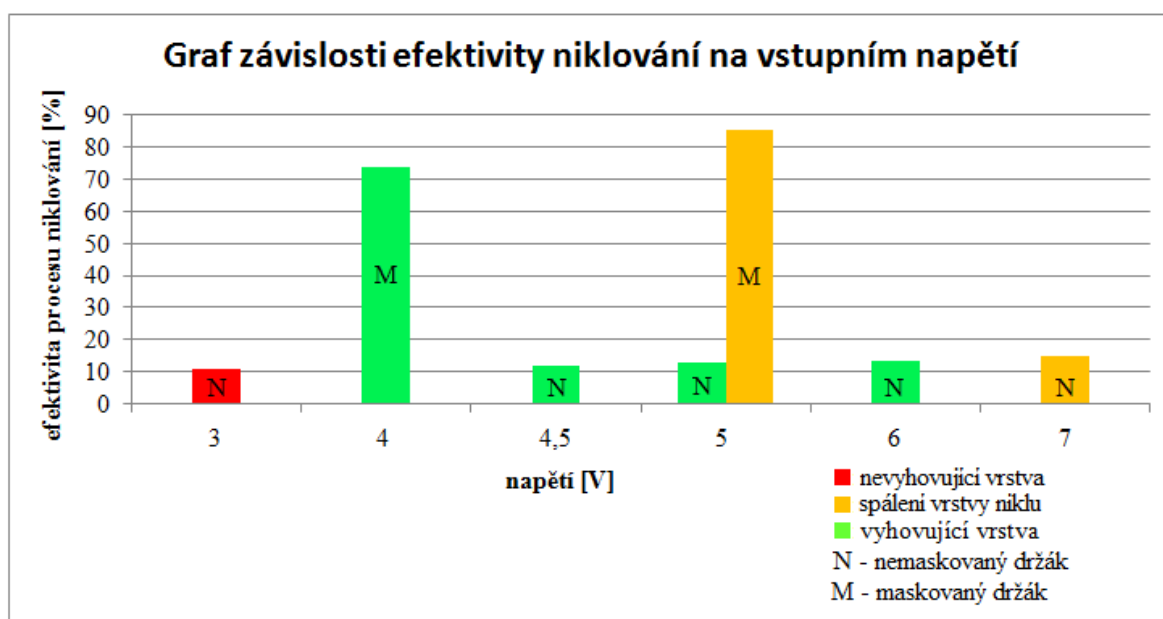
**Tab. 9) Výsledky pro 5 V s maskováním**

Lopatka	váha lopatky [g]	váha lopatky po niklování [g]	rozdíl [g]	tloušťka vrstvy [μm]
1	57.2556	59.7102	2.4546	45.18
2	57.1466	58.9865	1.8399	33.86
3	56.2783	57.9671	1.6888	31.08
4	57.1949	58.7650	1.5701	28.90
5	57.4330	58.9945	1.5615	28.74
6	56.4356	58.0113	1.5757	29.00
7	56.9997	58.5900	1.5903	29.27
8	56.6913	58.2340	1.5427	28.39
9	57.3654	59.0249	1.6595	30.54
10	57.4761	59.3523	1.8762	34.53
11	57.1168	59.2047	2.0879	38.43
12	56.6024	59.0404	2.4380	44.87
13	57.2760	60.5687	3.2927	60.60
14	57.2646	59.9233	2.6587	48.93
15	57.2705	59.3184	2.0479	37.69
16	56.7510	58.6119	1.8609	34.25
17	57.1856	58.9884	1.8028	33.18
18	57.0060	58.7022	1.6962	31.22
19	56.9288	58.6412	1.7124	31.52
20	57.1664	58.9976	1.8312	33.70
21	57.6998	59.5555	1.8557	34.15
22	57.3208	59.3552	2.0344	37.44
23	56.8232	59.4372	2.6140	48.11

napětí [V]	5
proud [A]	91
odpor [Ω]	0.055

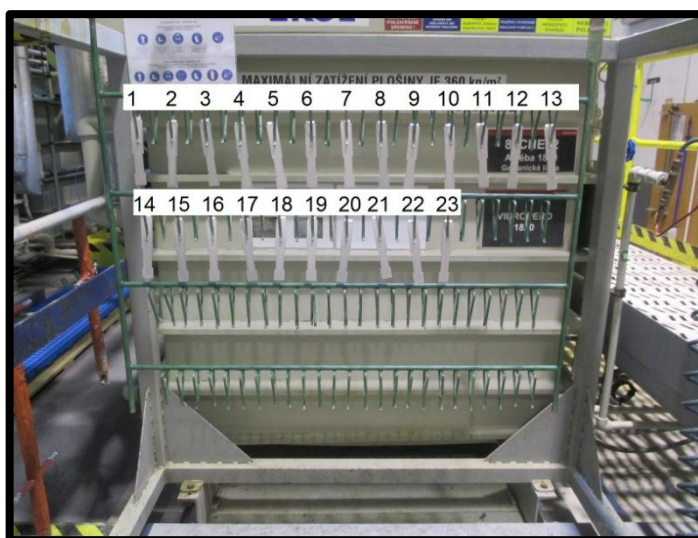
teoretická hmotnost [g]	53.1395
skutečná hmotnost [g]	45.2921
<b>účinnost [%]</b>	<b>85.2</b>
ztráty [%]	14.8

Z tabulek 8 a 9 je zřejmé, že efektivita niklování při zamaskovaném držáku rapidně stoupla. Maximální přípustné napětí při maskovaném držáku je 4 V. Při niklování se zamaskováním při 5 V totiž došlo ke spálení niklové vrstvy na úplně všech lopatkách. Finální efektivita niklovací linky je tedy 73,7 %. Výsledek efektivy niklování při všech hodnotách napětí jsou shrnuty do následujícího grafu:



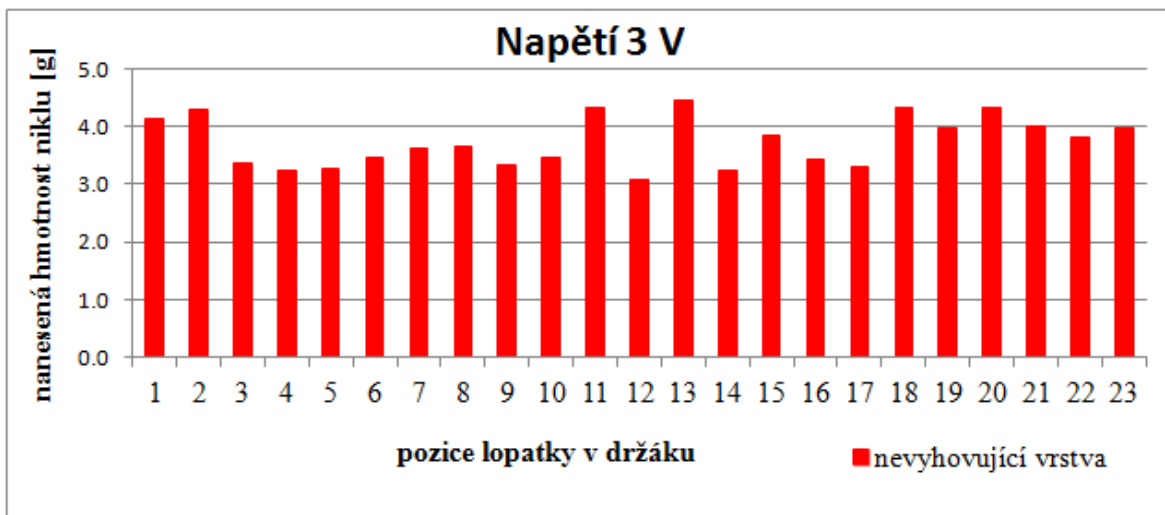
**Obr. 13)** Graf vykreslující závislost efektivy niklování při daném napětí.

Následně bylo vyhodnoceno množství naneseného niklu v závislosti na umístění daných lopatek v držáku za účelem zjištění nejvhodnější pozice na držáku. Grafické vyhodnocení bylo uskutečněno pro napětí, při kterých nedošlo ke spálení niklové vrstvy.

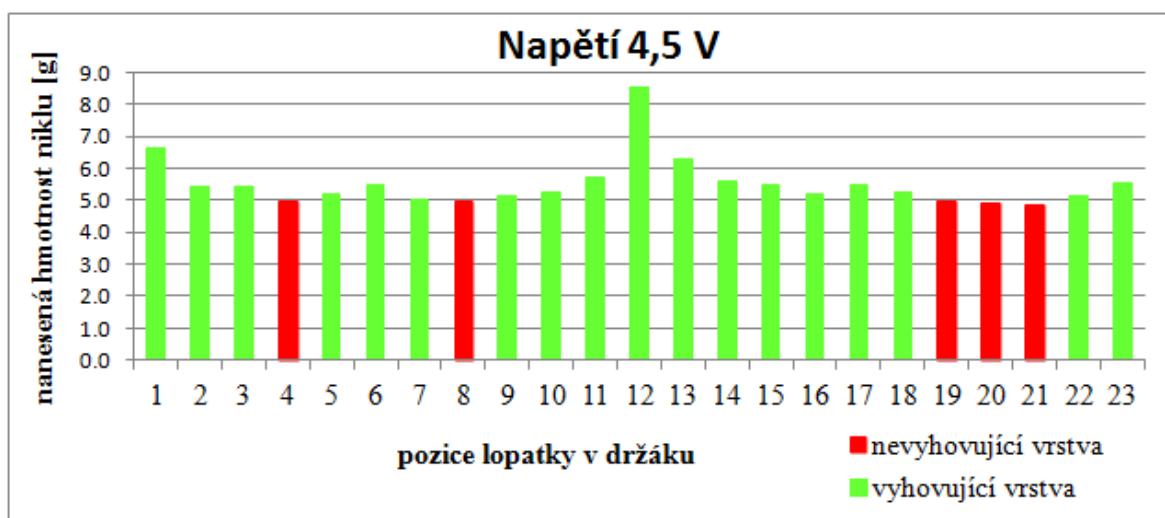


**Obr.14)** Čísla lopatek v pozicích, v jakých byly navěšeny na držák. [archiv HAO]

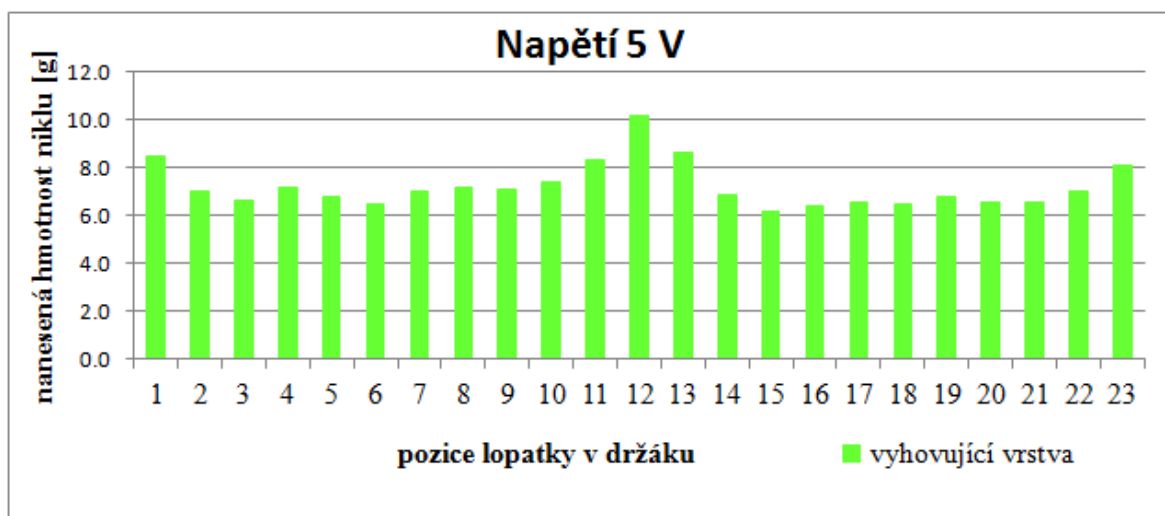




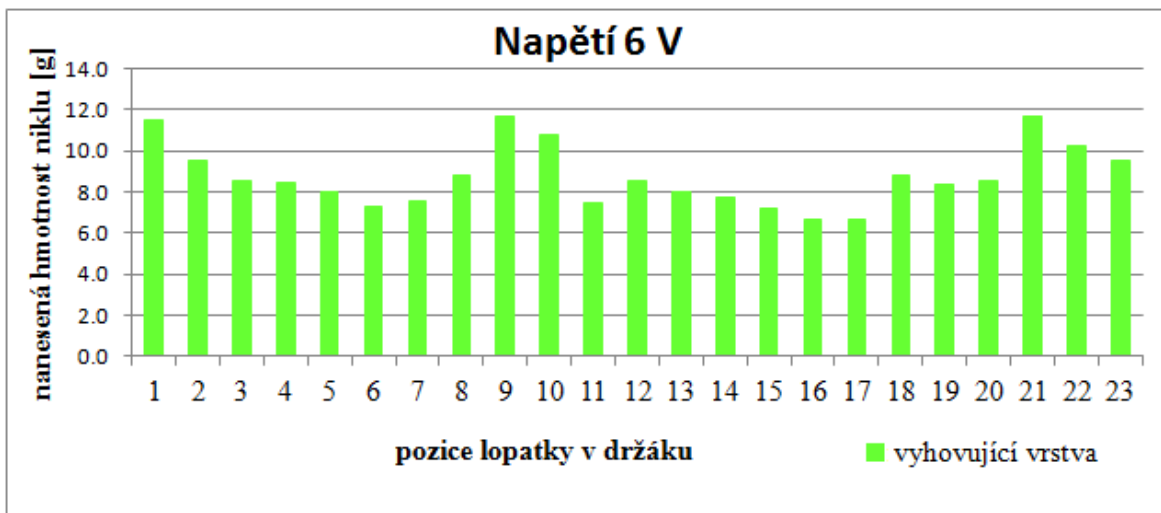
Obr. 15) Graf závislosti nanesené hmotnosti niklu na pozici lopatky při napětí 3 V.



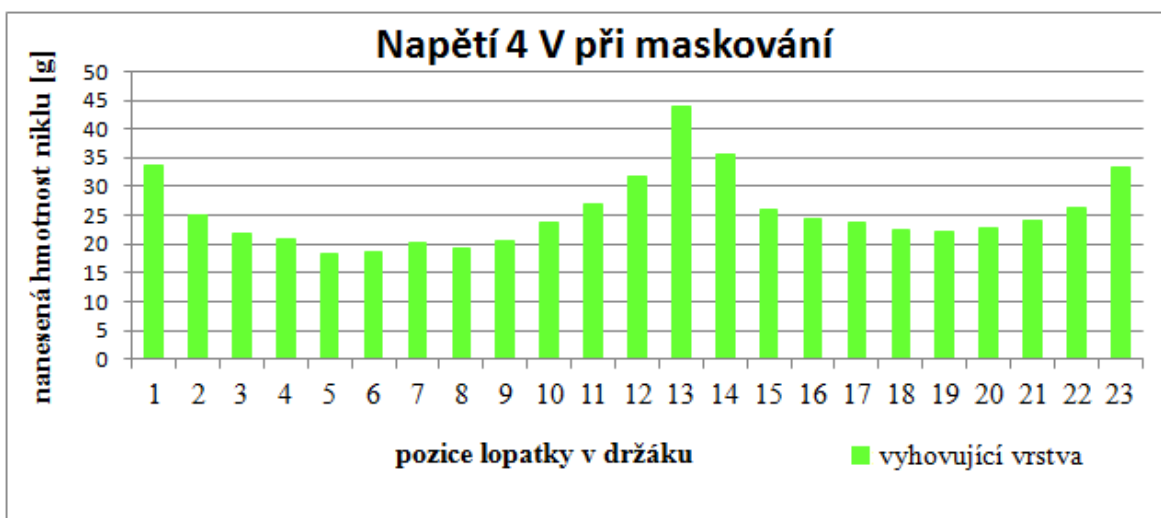
Obr. 16) Graf závislosti nanesené hmotnosti niklu na pozici lopatky při napětí 4,5 V.



Obr. 17) Graf závislosti nanesené hmotnosti niklu na pozici lopatky při napětí 5 V.



Obr. 18) Graf závislosti nanesené hmotnosti niklu na pozici lopatky při napětí 6 V.



Obr. 19) Graf závislosti nanesené hmotnosti niklu na pozici lopatky při napětí 4 V s maskováním držáku.

Z jednotlivých grafů vyplývá, že největším množstvím nanesené niklové vrstvy disponovaly ty lopatky, které byly umístěny blíže ke krajům držáku. V případě první řady lopatek se tedy jednalo o lopatky 1, 2, 12 a 13. Lopatky byly v krajních částech držáku poniklovány více, jelikož v těchto částech vstupuje do katody (držáku) elektrický proud a tudíž jsou tyto lopatky vystaveny větší intenzitě elektrického proudu. Tento fakt má za následek skutečnost, že distribuce niklu bude na tyto lopatky lepší, než na lopatky umístěny spíše ve středu držáku.

Pokud by bylo počítáno s optimalizovanou efektivitou 73,7 % a s minimální potřebnou tloušťkou nanesené niklové vrstvy (5  $\mu\text{m}$ ) byla by možnost značně redukovat dobu samotného niklování. Pro tento konkrétní díl (lopatky), kdy byla hodnota niklování stanovena společností na 32 minut při napětí 4,5 V by byla po optimalizaci se

zamaskovaným držákem potřebná hodnota pouze 6 minut a 16 sekund při 4 V. Z rozdílu efektivit těchto dvou napětí (před optimalizací 4,5 V a po optimalizaci 4 V) lze získat orientační procentovou ztrátu, kterou způsobuje nezamaskovaný držák. Takto obdržíme přibližnou hodnotu 60,5 % vyloučeného niklu na držáku. Se zamaskovaným držákem tedy byla z původní hodnoty efektivit 13,2 % obdržena průměrná efektivita niklování lopatek 73,7 %. Zbylé ztráty činí tedy 26,3 %. Tyto konečné ztráty v sobě zahrnují efektivitu katody, anody, odpor a složení lázně a odpor celého niklovacího obvodu. Lze tedy říci, že uskutečněnou optimalizací byla zredukována větší část ztrát. Účinnost niklovacího systému by bylo možno ještě navýšit, kdyby byly veškeré lopatky věšeny pouze na okrajové části držáku, kde je dle vyhodnocení největší koncentrace elektrického proudu. Následnou a poněkud zdoluhavou optimalizací, kdy by bylo zapotřebí optimalizovat zbylé výše zmíněné ztrátové části niklovacího systému by bylo možné efektivitu galvanického niklování ve společnosti Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. ještě zvýšit.

## 5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na zjištění a následné zvýšení efektivity procesu galvanického niklování ve společnosti Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. Nejdříve byla na základě praktického vyhodnocení zjištěna účinnost niklovací linky v závislosti na vstupním napětí. Bylo použito vstupních napětí do niklovacího systému o velikostech 3 V, 4,5 V, 5 V, 6 V a 7 V. Nejlepší hodnoty efektivity bylo dosaženo při maximálním napětí 6 V, kdy byla účinnost niklovací linky stanovena na pouhých 13,2 %. Při napětí 7 V sice efektivita procesu dosahovala hodnoty 15,1 %, ovšem při tomto napětí došlo ke spálení niklové vrstvy na většině lopatek a z tohoto důvodu byl takovýto postup vyhodnocen jako nevyhovující.

V důsledku velmi malé hodnoty efektivity bylo za potřebí eliminovat ztráty vyloučeného niklu na držáku lopatek, který spolu s lopatkami tvořil katodu. Po zamaskování držáku za pomoci speciálního laku byla vytvořena nevodivá vrstva, která zabraňovala velkým ztrátám niklu. Při zamaskovaném držáku byla distribuce elektrického proudu a tím i nikelnatých iontů koncentrována převážně na lopatky, což mělo za následek zvýšení efektivity celého procesu. Během maskování držáku byl použit stejný postup pro niklování jako bez zamaskování. Nejprve bylo nastaveno vstupní napětí o velikosti 4V, kdy hodnota účinnosti niklovací linky vystoupala na 73,7 %. Následným zvýšením napětí na 5 V bylo dosaženo dokonce hodnoty 85,2 %, kdy ale došlo ke spálení niklové vrstvy na úplně všech lopatkách. Výsledná efektivita po optimalizaci za pomoci maskování držáku tedy byla 73,7 %.

Byla také zjištěna distribuce elektrického proudu na lopatky v závislosti na jejich umístění v držáku. Pro všechny hodnoty vstupního napětí bylo rozložení elektrického proudu velmi podobné. Největší koncentrace elektrického proudu a tím i niklu byla soustředěna na ty lopatky, které byly umístěny spíše ke krajům držáku. Tento výsledek byl zapříčiněn skutečností, že elektrický proud vstupuje do katody právě z okrajů držáku a tudíž je zde koncentrace niklu na lopatkách nejvyšší. Tedy při umístění komponent k niklování pouze okrajům držáku by bylo možno dosáhnout ještě vyšší efektivity než výsledných 73,7 %.

## 6 SUMMARY

The present bachelor thesis focuses on the identification and subsequent increase in efficiency of the nickel plating process at Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. Initially, the practical evaluation identified efficiency of the nickel plating line as a function of input voltage. The values of input voltage used in the nickel plating system were as follows: 3 V, 4.5 V, 5 V, 6 V, and 7 V. The most favourable efficiency was achieved with the maximum voltage of 6 V where the nickel plating line efficiency was determined at 13.2 %. With 7 V, the process efficiency reached 15.1 %, but this voltage eventually led to burning of the nickel layer in the majority of blades. Therefore this procedure was evaluated as inadequate.

As a result of very low efficiency, it was necessary to eliminate the loss of nickel deposit on the blade holder which, apart from the blades, formed the cathode. When the holder was masked with a special varnish, a nonconductive layer was established to prevent excessive loss of nickel. With the holder masked, the distribution of current as well as nickelous ions was concentrated in blades which led to an increased efficiency of the entire process. During masking of the holder, the nickel plating process was identical to the one used without masking. Initially, the input voltage was set to 4 V, and the efficiency value of the nickel plating line increased to 73.7 %. With the input voltage increased to 5 V, the efficiency value reached even 85.2 % but the nickel layer burnt on every single blade. Final efficiency after the optimisation, in the form of the holder masking, was 73.7 %

The distribution of electric current in the blades was also identified to depend on the blade locations in the holder. The current distribution was very similar for all values of input voltage. The highest concentration of electric current, and thereby of nickel, was found in the blades which were located close to the edges of the holders. This result is due to the fact that electric current enters the cathode on the edges of the holders, therefore the highest nickel concentration is seen particularly in these blades. In conclusion, if the components to be nickel plated are placed only on the edges of the holders, the final efficiency might be even higher than 73.7 %.

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<b>A</b> – elektrochemický ekvivalent	<b>Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub></b> – dusičnan nikelnatý
<b>Au</b> – zlato	<b>Ni(OH)<sub>2</sub></b> – hydroxid nikelnatý
<b>C</b> – uhlík	<b>Ni<sup>2+</sup></b> - nikelnaté ionty
<b>Cd</b> – kadmium	<b>Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub></b> - disulfid trinitku
<b>Cd(OH)<sub>2</sub></b> – hydroxid kademnatý	<b>NiCl<sub>2</sub></b> – chlorid nikelnatý
<b>Cl<sup>-</sup></b> – chloridové ionty	<b>NiO</b> – oxid nikelnatý
<b>CO</b> – oxid uhelnatý	<b>NiO(OH)</b> – oxid-hydroxid niklitý
<b>Cu</b> – měď	<b>NO</b> – oxid dusnatý
<b>e<sup>-</sup></b> – elektron	<b>OH<sup>-</sup></b> – hydroxidové ionty
<b>F</b> – Faradayova konstanta (96 485 C·mol <sup>-1</sup> )	<b>Pt</b> – platina
<b>H<sup>+</sup></b> – vodíkový kationt	<b>Q</b> – elektrický náboj
<b>H<sub>2</sub></b> – vodík	<b>R</b> – elektrický odpor
<b>HAO</b> – Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o.	<b>S</b> – plocha
<b>HCl</b> – kyselina chlorovodíková	<b>SO<sub>2</sub></b> – oxid siřičitý
<b>HNO<sub>3</sub></b> – kyselina dusičná	<b>t</b> – čas
<b>I</b> – elektrický proud	<b>T</b> – tloušťka
<b>J</b> – proudová hustota	<b>U</b> – elektrické napětí
<b>KOH</b> – hydroxid draselný	<b>Zn</b> – zinek
<b>m</b> – hmotnostní množství látky	<b>ρ<sub>Ni</sub></b> – hustota niklu [8,907 g·cm <sup>-3</sup> ]
<b>M</b> – kov	
<b>M</b> – molární hmotnost	
<b>M<sup>2+</sup></b> - dvoumocné ionty kovu	
<b>MSO<sub>4</sub></b> – kovová sůl kyseliny sírové	
<b>n</b> – počet elektronů	
<b>Ni</b> – nikl	
<b>Ni(CO)<sub>4</sub></b> – tetrakarbonyl niklu	

## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] P. Hajdíková, “Spolupráce firmy Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. se školami a její vliv na nábor nových zaměstnanců,” Univerzita Palackého v Olomouci, 2012.
- [2] D. Velichová, “Talent management ve firmě Honeywell Aerospace, a.s.,” Univerzita Palackého v Olomouci, 2011.
- [3] Honeywell International Inc., “Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o.” [Online]. Available: <http://www.honeywell.com/>. [Accessed: 27-Nov-2015].
- [4] V. Kraus, *Povrchy a jejich úpravy*. Západočeská univerzita, Plzeň, 2000. ISBN 80-7082-668-1
- [5] Wikipedie, “Povrchová úprava.” [Online]. Available: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Povrchov%C3%A1\\_%C3%BAprava](https://cs.wikipedia.org/wiki/Povrchov%C3%A1_%C3%BAprava). [Accessed: 19-Jan-2016].
- [6] R. Parkinson, “Nickel Plating and Electroforming - Essential Industries for today and the future,” Toronto, 2001.
- [7] H. Remy, *Anorganická chemie - II. díl*, vol. 2. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1972. ISBN 80-7184-663-5
- [8] F. A. Cotton and G. Wilkinson, *Anorganická chemie*, 1. vydání. Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1973.
- [9] V. Ruml and M. Soukup, *Galvanické pokovování*, 1. vydání. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1981. ISBN 04-614-81
- [10] F. Kristofory, *Elektrochemické povlakování 3. díl. Niklování, mědění, chromování, pokovení méně obvyklých materiálů, závěsy pro galvanotechniku*. Ostrava: Ostrava: VŠB - TUO, 2005. ISBN 80-248-0913-3
- [11] J. Kameníček, *Anorganická chemie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009. ISBN 978-80-244-2387-6
- [12] D. Nicholls, *The Chemistry of IRON, COBALT and NICKEL*. Oxford: Pergamon Press, 1975. ISBN 0-08-018874-5
- [13] I. Rose and C. Whittington, *Nickel plating handbook*. Brussels: Nickel institute,

Belgium, 2014.

- [14] J. R. Davis, *Nickel, Cobalt, and Their Alloys*. ASM International, 2000. ISBN 0-87170-685-7
- [15] F. Beck and P. Rüetschi, “Rechargeable batteries with aqueous electrolytes,” *Electrochim. Acta*, vol. 45, pp. 2467–2482, 2000. ISBN 0013-4686
- [16] A. K. Shukla, S. Venugopalan, and B. Hariprakash, “Nickel-based rechargeable batteries,” *J. Power Sources*, vol. 100, no. 1–2, pp. 125–148, 2001. ISBN 0378-7753
- [17] Wikipedie, “Nikl-kadmiový akumulátor.” [Online]. Available: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-kadmiov%C3%BD\\_akumul%C3%A1tor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-kadmiov%C3%BD_akumul%C3%A1tor). [Accessed: 13-Apr-2016].
- [18] W. Wood, *Metals handbook, Vol. 5, Surface cleaning, finishing, and coating*. American Society for Metals. Handbook Committee, ASM Surface Treating and Coating Division Council, 1982. ISBN 0871700115
- [19] “Periodická tabulka - Nikl,” 2009. [Online]. Available: <http://www.prvky.com/28.html>. [Accessed: 16-Dec-2016].
- [20] T. Janda, “Analýza zařízení pro galvanizovny,” Vysoké učení technické v Brně, 2009.
- [21] Z. Samec, *Elektrochemie*. Praha: Univerzita Karlova v Praze - nakladatelství Karolinum, 1999. ISBN 80-7184-948-0
- [22] J. M. Lee, K. K. Jung, and J. S. Ko, “Formation of nickel microcones by using an electrodeposition solution containing H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>,” *Curr. Appl. Phys.*, vol. 16, no. 3, pp. 261–266, 2016. ISSN 15671739
- [23] S. Somasundaram, A. M. Pillai, A. Rajendra, and A. K. Sharma, “High emittance black nickel coating on copper substrate for space applications,” *J. Alloys Compd.*, vol. 643, pp. 263–269, 2015. ISSN 09258388
- [24] E. Schmitz, S. Quinaia, J. Garcia, and M. Lopes, “Influence of commercial organic additives on the nickel electroplating,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, p. 15, 2016.