



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta strojní  
Ústav strojírenské technologie**

**Anodická oxidace hliníkových slitin v leteckém průmyslu**

**Anodic oxidation of aluminium alloys in the aerospace industry**

**Bakalářská práce**

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství  
Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství  
Vedoucí práce: Ing. Jan Kudláček, Ph.D.  
  
Autor práce: Jan Wasserbauer



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
Fakulta strojní  
Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Wasserbauer**

Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**

Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

Název tématu česky: **Anodická oxidace hliníkových slitin v leteckém průmyslu**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na třech nejběžnějších technologiích anodické oxidace provést testy korozní odolnosti v solné komoře s maximální možnou dobou expozice.

Na nově zaváděné technologii provést kromě korozního testu také test váhový a test přilnavosti.

Cíl bakalářské práce:

Na základě provedení čtyř různých testů korozní odolnosti rozdílných povrchových úprav vyhodnotit výsledky a porovnat parametry těchto technologií.



## **Prohlášení o samostatném zpracování práce a úplnosti citací použitých pramenů**

Prohlašuji, že jsem práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

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

V Neratovicích, dne: 20.7.2016

.....  
Podpis studenta



## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Kudláčkovi, Ph.D. za výborné vedení práce, cenné rady a připomínky při zpracování bakalářské práce.



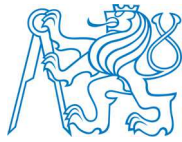
**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ**

Obor:	Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství
Název bakalářské práce:	Anodická oxidace hliníkových slitin v leteckém průmyslu
Autor bakalářské práce:	Jan Wasserbauer
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Zuzana Tatíčková
Rozsah bakalářské práce:	Počet stran: 77
	Počet obrázků: 65
	Počet grafů: 4
	Počet tabulek: 27
	Počet příloh: 1 CD

**Anotace:** Povrchová ochrana dílů v leteckém průmyslu je nedílnou součástí téměř každého dílu, který je montován na letoun. Jako jedna z mnohých povrchových ochran ze slitin hliníku je aplikována anodická oxidace.

Tématem této bakalářské práce je porovnání 4 druhů technologií anodických oxidací z hlediska korozní odolnosti, ekologického hlediska, technologické a energetické náročnosti. V této bakalářské práci byly porovnávány dvě technologie anodické oxidace, které jsou v praxi dlouhodobě používány a další dvě, které se začaly aplikovat v posledních letech za účelem environmentálního aspektu.

**Klíčová slova:** Anodická oxidace, koroze, povlak, technologický postup, zkouška.



**CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

Field of study:	Technology, material and economics in engineering
Bachelor thesis:	Anodic oxidation of aluminium alloys in the aerospace industry
Author:	Jan Wasserbauer
Supervisor:	Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
Consultant:	Ing. Zuzana Tatíčková
Extend of bachelor thesis:	Number of pages: 77 Number of pictures: 65 Number of graphs: 4 Number of tables: 27 Number of attachments: 1CD

**Abstract:** Surface protection of parts in the aerospace industry is an integral part of almost every component, which is installed on the aircraft. Anodizing is applied as one of many surface protection of aluminium alloys.

The theme of this bachelor thesis is the comparison of four kinds of technologies anodic oxidation in terms of corrosion resistance, environmentally, technology and energy efficiency. This bachelors thesis compares are two technologies of anodic oxidation, which are commonly used in practice and the other two, which started recently being applied for the purpose of environmental aspect.

**Keywords:** Anodic oxidation, corrosion, coating, technological procedure, test.



## Obsah

1. REACH	2
1.1. Porozumět nařízení REACH	2
1.2. Jak nařízení REACH funguje?	3
1.3. Důsledky nařízení REACH pro společnosti	3
2. Teoretický přehled problematiky	5
2.1. Technologie anodické oxidace	5
2.2. Princip procesu anodické oxidace	6
2.3. Vlastnosti eloxační vrstvy	7
2.4. Technologický postup dle dílenské praxe obr. č. 2 – detailní postup jednotlivých technologií je uveden v praktické části této práce	8
3. Koroze materiálů	9
3.1. Definice koroze	9
3.2. Chemická koroze kovů	9
3.3. Hlavní činitelé ovlivňující korozi	9
3.3.1. Stav materiálu	10
3.3.2. Stav korozního prostředí	10
3.3.3. Konstrukce výrobku	11
3.4. Volba ochrany kovů proti korozi	11
3.4.1. Volba materiálu a ovlivnění jeho odolnosti úpravou složení	11
3.4.2. Úprava korozního prostředí	12
3.4.3. Úprava konstrukce a výrobní technologie	12
3.4.4. Elektrochemická ochrana	12
3.4.5. Ochranné povlaky	13
3.4.6. Kombinace metod ochrany proti korozi	13
3.5. Koroze hliníku a hliníkových slitin	13
3.5.1. Korozní charakteristika	13
3.5.2. Vliv chemického složení na odolnost proti korozi	14
4. Technologie jednotlivých anodických oxidací	15
4.1. Značení povrchové ochrany	15
4.2. Anodická oxidace v kyselině chromové	15
4.2.1. Popis vlastností technologie	15
4.2.2. Technologické parametry anodické oxidace:	16
4.2.3. Chemické složení lázně:	16
4.3. Anodická oxidace v kyselině sírové	17
4.3.1. Popis vlastností technologie	17
4.3.2. Technologické parametry anodické oxidace:	17
4.3.3. Chemické složení lázně:	18
4.4. Anodická oxidace v kyselině borité	18
4.4.1. Popis vlastností technologie	18
4.4.2. Technologické parametry anodické oxidace:	18
4.4.3. Chemické složení lázně:	19
4.5. Anodická oxidace v kyselině vinné	19
4.5.1. Popis vlastností technologie	19
4.5.2. Technologické parametry anodické oxidace:	19
4.5.3. Chemické složení lázně:	20
5. Procesní zkoušky	21
5.1. Všeobecně	21
5.2. Vizuální kontrola povlaku	21
5.3. Kontrola tloušťky povlaku	21
5.4. Váhový test	22
5.5. Korozní zkouška	23
5.6. Zkouška přilnavosti nátěru	23



5.6.1.	Řezný nástroj.....	24
5.6.2.	Postup zkoušky .....	24
5.6.3.	Počet stanovení.....	24
5.6.4.	Ruční řezání nátěru.....	25
5.6.5.	Odstranění uvolněného nátěru.....	25
5.6.6.	Vyhodnocení a vyjádření výsledků.....	26
5.6.7.	Postup pro přípravu a vyhodnocení metalografického vyhodnocení [19].....	27
6.	Experimentální část .....	30
6.1.	Cíle práce .....	30
6.2.	Popis experimentální části.....	30
6.3.	Příprava testovacích vzorků .....	30
6.3.1.	Specifikace materiálu .....	30
	AMS-QQ-A-250/4, 2024-T3 .....	30
6.3.2.	Specifikace materiálu .....	31
	ASNA 3129, 7075-T6 .....	31
6.4.	Přístrojové vybavení.....	32
6.4.1.	Anodizační linka .....	32
6.4.2.	Laboratorní galvanický stůl .....	33
6.4.3.	Solná komora .....	34
6.4.4.	Přístroj na měření anodizačních povlaků.....	35
6.4.5.	Zařízení na řezání vzorků pro metalografický výbrus .....	36
6.4.6.	Mikroskop .....	36
6.4.7.	Řezný nástroj.....	37
6.5.	Technologické postupy .....	37
6.5.1.	Anodická oxidace v kyselině chromové .....	37
6.5.2.	Anodická oxidace v kyselině sírové .....	41
6.5.3.	Anodická oxidace v kyselině borité .....	44
6.5.4.	Anodická oxidace v kyselině vinné.....	47
6.6.	Vyhodnocení zkoušek.....	54
6.6.1.	Výsledek zkoušky po anodické oxidaci v kyselině chromové.....	54
6.6.2.	Výsledek zkoušky po anodické oxidaci v kyselině sírové .....	56
6.6.3.	Výsledek zkoušky po anodické oxidaci v kyselině borité .....	58
6.6.4.	Výsledek zkoušky po anodické oxidaci v kyselině vinné .....	59
7.	Technicko-ekonomické zhodnocení anodických oxidací.....	63
7.1.	Vyhodnocení zkoušek korozní odolnosti .....	63
7.2.	Porovnání tlouštěk anodických povlaků.....	64
7.3.	Vyhodnocení váhového testu .....	64
7.4.	Vyhodnocení zkoušky přilnavosti základního laku .....	64
7.5.	Ekonomické zhodnocení .....	65
8.	Závěr.....	67
9.	Seznam zdrojů a použité literatury .....	68
9.1.	Literatura .....	68
9.2.	Normy .....	69





## Úvod

V leteckém průmyslu je známo několik druhů technologií anodické oxidace slitin hliníku. Každá má své klady i zápory a každá má své specifické použití v praxi.

Nejznámější anodickou oxidací je eloxování v kyselině sírové. Tento proces, kromě veliké korozní odolnosti umožňuje po aplikaci pigmentů a konečného utěsnění různé barevné povrchy (černý, modrý, červený, atd.). Toto je velice výhodné, zvláště u dílů, které slouží jako označení na letounech. Další velice rozšířenou anodickou oxidací je eloxování v kyselině chromové. Tato povrchová ochrana se také vyznačuje vysokou korozní odolností, ale roztok pro anodickou oxidaci obsahuje šestimocný chrom, který je vysoce toxický, a tudíž Evropská Unie pomocí regulace REACH vyvíjí snahu na omezení této chemikálie.

V návaznosti na problém se šestimocným chromem byla do praxe zavedena anodická oxidace ve směsi kyseliny sírové a borité. Jako první tuto technologii ve svých specifikacích uplatnila americká firma Sikorsky. Evropa šla jiným směrem a to anodickou oxidací v kyselině vinné. Za poslední 3 roky bylo zřejmé, že Severní Amerika půjde cestou kyseliny borité a Evropa cestou kyseliny vinné. V roce 2014 se situace změnila a firma Sikorsky implementovala i kyselinu vinnou do svých specifikací společně s firmami Boeing a Embraer.

V této práci je uvedeno porovnání výše uvedených technologií z hlediska maximální korozní odolnosti při zkoušce v solné mlze. Z ekonomického hlediska porovnání nákladů na provoz technologií. I když je v leteckém průmyslu používáno více druhů materiálu, porovnání bylo provedeno na materiálu řady 2000 a materiálu řady 7000, které jsou nevíce používané.



# 1. REACH

## 1.1. Porozumět nařízení REACH

REACH je nařízení Evropské unie, jehož cílem je zlepšit ochranu lidského zdraví a životního prostředí před riziky, která mohou představovat chemické látky v době, kdy se stále zvyšuje konkurenční soupeření mezi podniky chemického průmyslu v EU. Rovněž podporuje alternativní metody pro hodnocení rizik látek s ohledem na snížení počtu zkoušek na zvířatech. [4]

Obecně platí nařízení REACH pro všechny chemické látky; nikoliv pouze pro ty, které jsou používány v průmyslových postupech, ale rovněž v každodenním životě, například v čistících přípravcích, barvách a předmětech, jako jsou oděvy, nábytek a elektrická zařízení. Nařízení se proto týká většiny společností v rámci EU. [4]

Pro společnosti vyplývá z nařízení REACH důkazní břemeno. Pro splnění požadavků nařízení musí společnosti zjistit a řídit rizika v souvislosti s látkami, které vyrábějí a uvádějí na trh. Společnosti musí agentuře ECHA prokázat, jak lze bezpečně látky používat, a musí informovat uživatele o opatření k řízení rizik. [4]

Pokud nelze rizika řídit, mohou orgány různými způsoby omezit použití látek. V dlouhodobém horizontu by měly být nejnebezpečnější látky nahrazeny látkami méně nebezpečnými. [4]

Akronym REACH vznikl z počátečních písmen slov Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, což znamená registrace, hodnocení, povolování a omezování chemických látek. Stejnomené nařízení vstoupilo v platnost dne 1. června 2007. [4]



## **1.2. Jak nařízení REACH funguje?**

Nařízení REACH stanovuje postupy pro shromažďování a hodnocení údajů o vlastnostech a rizicích látek. [4]

Společnosti musí registrovat „své“ látky. Aby tak mohly učinit, musí spolupracovat s dalšími společnostmi, které registrují stejnou látku. [4]

Agentura ECHA přijímá a hodnotí jednotlivé žádosti o registraci z hlediska jejich souladu a členské státy EU hodnotí vybrané látky s cílem objasnit počáteční obavy ohledně lidského zdraví nebo životního prostředí. Orgány a vědecké komise agentury ECHA zhodnotí, zdali je možné řídit rizika související s látkami. [4]

Orgány mohou nebezpečné látky zakázat, pokud jsou jejich rizika neřiditelná. Mohou se rovněž rozhodnout omezit používání látky nebo je alespoň podrobit předchozímu povolovacímu postupu. [4]

## **1.3. Důsledky nařízení REACH pro společnosti**

Nařízení REACH ovlivňuje široké spektrum společností v mnoha odvětvích, a dokonce i ty, u nichž by se nepředpokládala souvislost s chemickými látkami. [4]

Obecně mohou podniky podle nařízení REACH hrát jednu z následujících rolí:

**Výrobce:** Pokud vyrábíte chemické látky pro vlastní použití nebo pro dodávání jiným osobám (i pokud se jedná o vývoz), budou pro vás pravděpodobně vyplývat z nařízení REACH některé důležité povinnosti. [4]

**Dovozce:** Pokud cokoliv kupujete ze zemí mimo EU/EHP, budou pro vás pravděpodobně vyplývat z nařízení REACH některé povinnosti. Může se jednat o jednotlivé chemické látky, směsi určené pro další prodej nebo konečné výrobky, jakými jsou oděvy, nábytek nebo plastové výrobky. [4]



Uživatelé: Většina společností používá chemické látky, v některých případech i bez povědomí o této skutečnosti. Pokud pracujete s jakýmkoli chemickými látkami v průmyslu nebo profesní činnosti, musíte zkontrolovat své povinnosti. Z nařízení REACH pro vás mohou vyplývat některé povinnosti. [4]



## 2. Teoretický přehled problematiky

### 2.1. Technologie anodické oxidace

Mezi nejvýznamnější povrchové úpravy hliníku a jeho slitin patří anodická oxidace – eloxování (elox, eloxal – elektrolytická oxidace Al). Eloxované vrstvy mají dobrou korozní odolnost, otěruvzdornost i tvrdost a jsou dobře vybarvitelné. [1]

Při procesu anodické oxidace se na povrchu hliníku a jeho slitin vytváří ve vhodných lázních vrstva oxidu hlinitého  $Al_2O_3$  působením stejnosměrného (méně často střídavého) proudu. Katoda je tvořena elektrodou z olova, hliníku, titanu nebo korozivzdorné oceli. Je popsána řada technologií i lázní a to na bázi kyseliny šťavelové, citrónové, borité, chromové a sírové, která je používána nejčastěji. Podle charakteru procesu a následných vlastností rozlišujeme eloxování ozdobně-ochranné a tvrdé. [1]

Struktura anodicky oxidovaného povrchu hliníku je tvořena z bezpórovité tenké vrstvy na rozhraní s kovem a postupně rostoucí podstatně silnější pórovité vrstvy na povrchu. Celková tloušťka ozdobně ochranné vrstvy  $Al_2O_3$  se pohybuje od 5 do 20  $\mu m$ , tvrdé vrstvy dosahují tloušťek až 100  $\mu m$ . Mikropóry ve vrstvě  $Al_2O_3$  mají průměr 0,01 až 0,02  $\mu m$  a jejich četnost i rozměry závisí na parametrech anodické oxidace a lázní (poměr délky a průměru pórů se pohybuje od 250 do 1000 : 1). Pórovitost vrstvy má podstatný vliv především na operace praní i utěšňování a zásadní na vybarvování vrstvy. [1]

Ozdobně – ochranné vrstvy se dají vybarvovat řadou rozdílných metod. Které poskytují vybarvení s odlišnými vlastnostmi. Nejběžnější je absorpční probarvení pórů anorganickými nebo organickými pigmenty. Po samotné anodické oxidaci a důkladném vyprání resp. po následném vybarvení je nutné provést utěsnění pórů, operací při které se oxid hlinitý  $Al_2O_3$  mění na böhmit  $Al_2O_3 \cdot H_2O$  s větším objemem.

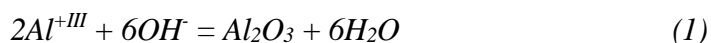
Anodická oxidace je konverzní povrchová úprava. Oxid hlinitý má však větší objem než čistý hliník a proto roste vrstva  $Al_2O_3$  i částečně nad původní rozměr součásti a to cca o 33% (2/3 tloušťky je konverzní, tedy do materiálu a 1/3 představuje nárůst rozměru). [1]

Anodická vrstva je elektricky nevodivá a má dobré izolační vlastnosti (průrazné napětí tloušťky 1  $\mu m$  je 20 až 40 V. [1]



## 2.2. Princip procesu anodické oxidace

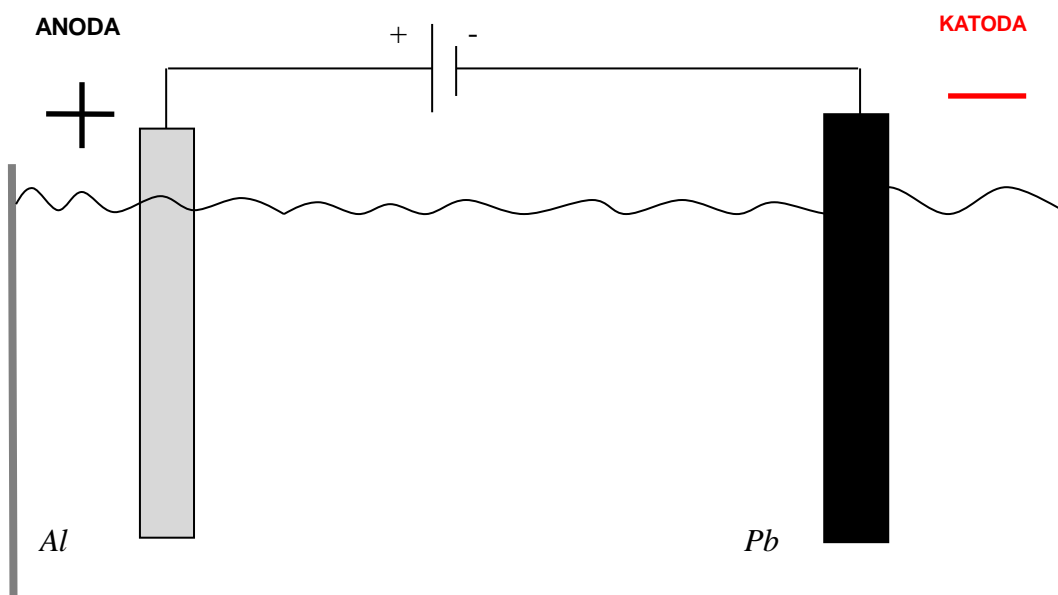
Při anodické oxidaci se využívá vysoké afinity hliníku ke kyslíku, respektive přirozeného sklonu hliníku k povrchové oxidaci. Jedná se o elektrolytický proces probíhající jak při stejnosměrném, tak střídavém proudu. Průchodem proudu lázní vhodného složení (roztoky kyseliny sírové, chromové nebo šřavelové) dochází k disociaci lázně. Na povrchu substrátu, který je zapojen jako anoda, pak dochází k oxidaci povrchu a vytváří se na ni stabilní vrstva podle chemické rovnice (1), [2]:



Souběžně se vznikem anodické vrstvy dochází k jejímu zpětnému rozkladu (2):



Díl určený k anodické oxidaci je v elektrolytické lázni zapojen jako anoda jak je zobrazeno na *obr. č. 1*, dochází ke tvorbě rovnoměrné kompaktní vrstvy oxidu, který je výrazně tvrdší a chemicky odolnější než kov sám a zlepšuje tak mechanické a chemické vlastnosti eloxovaných výrobků. [2].



*Obr. č.1: Zapojení elektrolytické lázně*



### 2.3. Vlastnosti eloxační vrstvy

#### **Hustota:**

Jelikož jde o pórovitou vrstvu, mění se hustota vrstvy a její tloušťkou podle složení materiálu a podle parametrů anodické oxidace (při vyšších teplotách a delších dobách oxidace jsou vrstvy pórovitější. [1])

#### **Pórovitost:**

Průměr pórů (0,01 až 0,02  $\mu\text{m}$ ) eloxační vrstvy závisí na způsobu anodické oxidace. Navíc k této primární pórovitosti, která je tím nižší, čím vyšší je napětí při anodické oxidaci, přistupuje i sekundární pórovitost, která vzniká rozpouštěním části vrstvy (závisí především na teplotě lázně) a navíc pórovitost strukturální, která vzniká rozpouštěním některé složky slitiny. Čím je vrstva pórovitější, tím se lépe vybarvuje. Při běžných eloxačních podmínkách činí pórovitost asi 20 až 30 % objemu (vzájemná vzdálenost primárních pórů je přibližně shodná s jejich průměrem). [1])

#### **Tvrдость:**

Vlastní tvrdost oxidu hlinitého je velmi vysoká a pohybuje se mezi stupněm 7 až 8 Moosovy stupnice tvrdosti. Při ozdobně-ochranném eloxování je mikrotvrдость vrstev nižší cca 250 až 300 HV, při tvrdém eloxování mikrotvrдость vrstev dosahuje hodnot 400 až 800 HV. Tvrдость směrem od hliníku k povrchu klesá a do značné míry ji ovlivňuje teplota lázně. S klesající teplotou lázně tvrdost vrstvy roste. [1])

#### **Tloušťka vrstvy:**

Tento parametr eloxované vrstvy do značné míry ovlivňuje korozní odolnost. Tloušťka eloxované vrstvy roste se vzrůstající proudovou hustotou, vzrůstajícím napětím, s klesající teplotou a s nižší koncentrací elektrolytu. Tloušťku eloxované vrstvy  $h$  [ $\mu\text{m}$ ] lze určit dle vztahu (3), [1])



$$h = 0,4 \cdot \eta \cdot I \cdot t \cdot s^{-1} \quad (3)$$

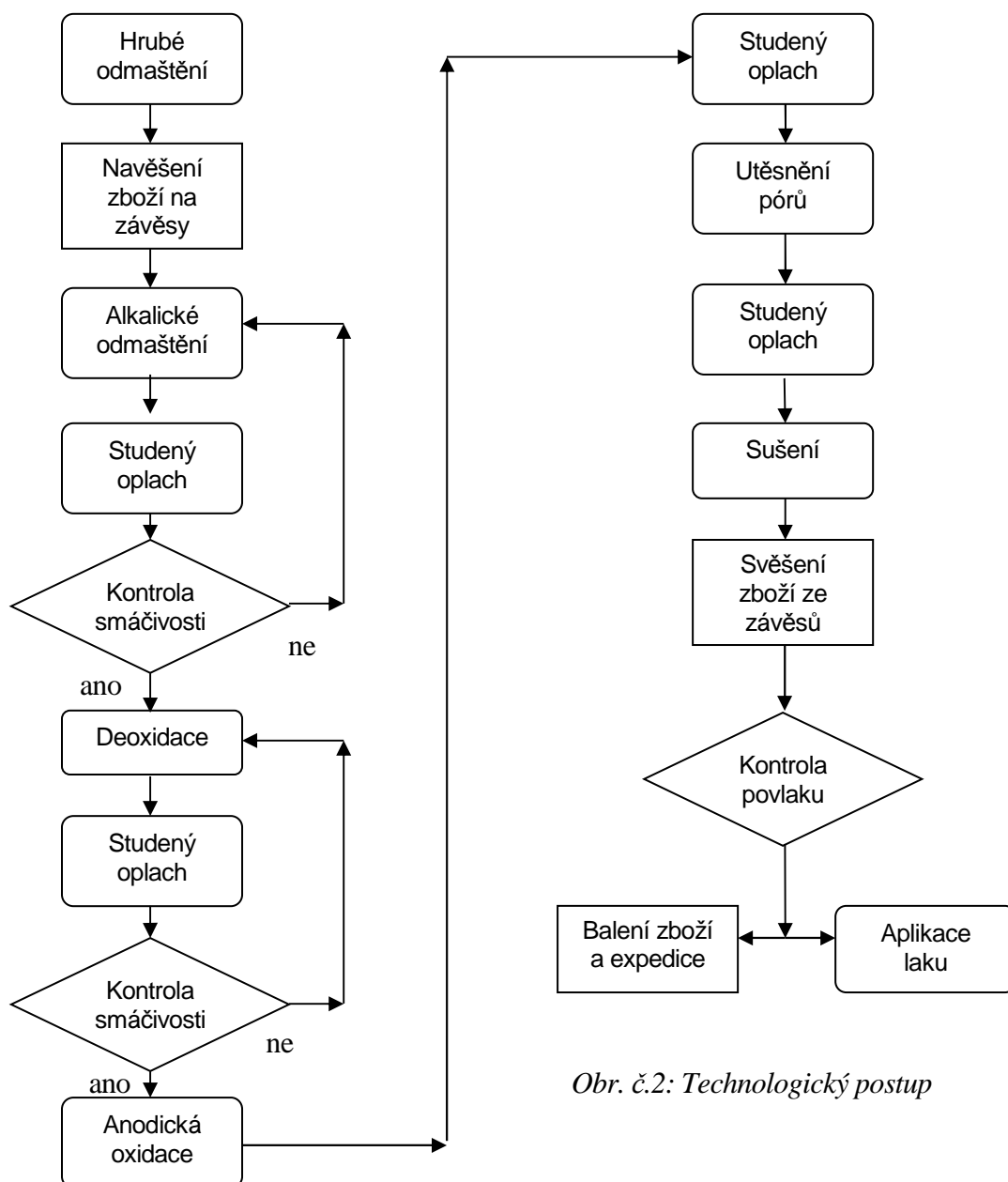
$\eta$  - stupeň účinnosti lázně (0,6 až 0,7)

$I$  – hodnota stejnosměrného proudu [A]

$t$  – doba anodické oxidace [min.]

$s$  – plocha zboží [dm<sup>2</sup>]

## 2.4. Technologický postup dle dílenské praxe obr. č. 2 – detailní postup jednotlivých technologií je uveden v praktické části této práce



Obr. č.2: Technologický postup





### 3. Koroze materiálů

#### 3.1. Definice koroze

Pod pojmem koroze materiálu shrnujeme děje vedoucí k jeho rozrušování, u nichž má působení chemických pochodů rozhodující význam. Rozrušování materiálů fyzikálními vlivy nazýváme eroze, obraze, opotřebení. Korozi můžeme definovat jako znehodnocování materiálů způsobené chemickým nebo fyzikálně-chemickým působením prostředí [13].

Korozi se nevyhne žádný materiál, na který bude působit reakce prostředí. Prostředí, které má vliv na korozi je velmi různorodé. Nejvíce, kde se s korozí můžeme setkat, je zemská atmosféra, kde jsou výrobky korozi exponované. Jako další korozní prostředí můžeme jmenovat přírodní vody, zejména mořské, které působí velmi agresivně na plavidla, automobily a letadla [14].

#### 3.2. Chemická koroze kovů

K chemické korozi patří koroze v plynech a neelektrolytech., která probíhá v elektricky nevodivých prostředích. Tato oxidace kovu a redukce oxidující složky probíhají souběžně. Produkty korozní reakce tvoří vrstvu korozních zplodin na těch místech, kde dochází k reakci. V případě plynných nebo kapalných produktů reakce, probíhá koroze stejnou rychlostí při rozdílných teplotách a lze ji vyjádřit vztahem (4) kde  $m$  je korozní změna [mm/rok] [15,16].

$$m = k_t \times t \quad (4)$$

$k_t$  = konstanta závislá na teplotě

$t$  = čas

#### 3.3. Hlavní činitelé ovlivňující korozi

Na vznik a na průběh korozního pochodu působí řada faktorů. Na průběh koroze nemá vliv pouze jeden faktor, ale jediný činitel může ovlivnit několik pochodů nebo stavů. Tyto stavy mohou souviset přímo nebo nepřímo s reakcí kovu s prostředím. Tento rozhodující působící faktor, který způsobuje korozi je ovšem velmi těžko určit v daných podmínkách [17].



Faktory, které ovlivňují korozi:

- a) Stav materiálu
- b) Stav korozního prostředí
- c) Konstrukce výrobku nebo zařízení [17].

### **3.3.1. Stav materiálu**

Údaje ohledně korozní odolnosti materiálu se vztahují na kov nebo slitinu, která odpovídá svým chemickým složením příslušné normě nebo technickým podmínkám. Korozní odolnost materiálu může ovlivnit obsah nečistot, struktura materiálu a stav jeho povrchu. Nečistoty kovového materiálu mohou být dvojího druhu. Jednak je možné považovat za nečistoty všechny složky, které nejsou záměrnými legovacími přísadami. Jedná se o síru v oceli, železo v různých slitinách (hliník, hořčík) apod. Druhým typem nečistot jsou látky, které se dostávají do povrchových vrstev při jeho zpracování nebo použití. Jsou to okuje, vměstky, méně ušlechtilé kovy atd. [17].

Vliv nečistot lze již pozorovat v počáteční fázi začínající koroze, kde ovlivňují její charakter. Materiály jsou na vliv nečistot různě citlivé. Dalšími vlivy, které ovlivňují korozi materiálu je jeho struktura, orientace jednotlivých krystalů a energetické poměry v krystalové mřížce [17].

Dalším faktorem, který má vliv na průběh koroze je drsnost povrchu. Drsné povrchy snáze reagují s prostředím než hladké. Drsnější povrch má větší aktivní plochu a tím se zvyšuje možnost výskytu koroze na povrchu materiálu, zejména při vytváření vlhkosti. Vlhkost se na drsnějším materiálu udržuje daleko déle, než na hladkém povrchu [17].

### **3.3.2. Stav korozního prostředí**

Korozní prostředí se uplatňuje nejen svým chemickým složením, ale i teplotou, tlakem a relativním pohybem ve vztahu k povrchu kovového materiálu. Se zvyšující teplotou prostředí se vytvářejí podmínky pro urychlení koroze. Tlak kapalného korozního prostředí svým mechanickým účinkem ve spojení s korozním účinkem urychluje strukturální napadení kovu. Pohyb korozního prostředí jak kapalného tak plynného je velmi častým činitelem,



který se při korozi uplatňuje. Urychlení transportních pochodů, jež je s ním spojeno, vede obvykle ke zvýšení koroze [17].

### **3.3.3. Konstrukce výrobku**

Konstrukce výrobku je jedním z faktorů ovlivňujících korozi materiálu, kde je důležitá skladba materiálu, aby se nevytvořily podmínky tvorby koroze. K nejčastějším vlivům této skupiny patří kontakt s jiným materiálem, konstrukční uspořádání některé části zařízení a mechanické namáhání, jakému je určitá část výrobku vystavena. Z elektrochemické koroze plyne, že každé přímé elektricky vodivé spojení dvou kovů, které jsou ponořeny do elektrolytu, představuje potencionální korozní člunek, v němž bude urychleny koroze kovu méně ušlechtilého. Negativně také může působit i kontakt s nevodivým materiálem, jako je např. dřevo [17].

## **3.4. Volba ochrany kovů proti korozi**

Korozi lze u materiálů zabránit nebo alespoň zpomalit. Způsoby ochrany materiálů lze rozdělit na následující kategorie [13].

- 1) Volba materiálu a ovlivnění jeho odolnosti úpravou složení
- 2) Úprava korozního prostředí
- 3) Úprava konstrukce a výrobní technologie
- 4) Elektrochemická ochrana
- 5) Ochranné povlaky
- 6) Kombinace metod ochrany proti korozi [13]

### **3.4.1. Volba materiálu a ovlivnění jeho odolnosti úpravou složení**

Vzhledem k tomu, že rozdílní kovové korodují různou rychlostí při stejných korozních podmínkách, je důležité, jako primární činnost pro snížení možnosti korozního napadení je volba vhodného konstrukčního materiálu. Při volbě materiálu je možné využívat specifické vlastnosti materiálů jako je termodynamická stálost, schopnost snadné a účinné pasivace nebo vytváření tlustších vrstev korozních zplodin se schopností účinné ochrany. Zlepšení



vlastnosti materiálů je možné úpravou složení kovů pro zkvalitnění pasivovatelnosti (např. přísady ušlechtilých prvků do pasivovaných kovů a slitin) [14].

### **3.4.2. Úprava korozního prostředí**

Dobré korozní ochrany lze také dosáhnout změnou složení korozního prostředí a to dvěma způsoby. Jedním z nich je odstranění korozně aktivní složky ze systému. Druhý spočívá v přísadě takových látek, který průběh koroze zpomalí. V kapalinách, které mohou způsobovat korozní napadení, se velmi často používá inhibitorů koroze. Jsou to látky, které brzdí průběh koroze. Inhibitory působí nejrůznějšími mechanismy, např. že povrch kovu pasivují svými oxidačními schopnostmi, případně blokují povrch kovu nebo brzdí průběh některé dílčí korozní reakce [13].

### **3.4.3. Úprava konstrukce a výrobní technologie**

Je-li z analýzy systému kov – prostředí – korozní podmínky zřejmé, že korozní rozrušení kovu úzce souvisí s některými specifickými rysy zařízení, je možné zasáhnout do korozního procesu změnou konstrukce nebo změnou technologie. Koroze zmenšuje podle charakteru napadení průřez materiálu nebo zhoršuje jeho mechanické vlastnosti. Při konstrukci strojů a zařízení je tedy třeba uvažovat tyto změny během koroze. Volí se materiály, u kterých k podobným změnám nedochází, nebo se při použití kovů vhodně dimenzují průřezy součástí a zařízení. V druhém případě se tedy zvětšuje průřez materiálu z hlediska pevnosti zařízení o průřez, který bude znehodnocen korozi během provozu a který bývá označován jako přídavek na korozi [13].

### **3.4.4. Elektrochemická ochrana**

V některých případech koroze v elektrolytech je třeba využít jako způsob elektrochemické ochrany:

- a) Katodická ochrana
- b) Anodická ochrana

Funkce katodické ochrany je složitá z toho důvodu, že katodickými elektrochemickými reakcemi je ovlivněno složení korozního prostředí, které je v bezprostředním kontaktu s



katodicky polarizovaným chráněným kovem, z tohoto důvodu může napomáhat brzdění koroze nebo účinnost ochrany snížit nebo ji úplně zrušit.

Anodická ochrana je zvláště vhodná pro kovy, pro které je typické použití v pasivním stavu. Anodická ochrana využívá oxidačního účinku anodické polarizace [13].

### **3.4.5. Ochranné povlaky**

Mezi nejrozsáhlejší metodou protikoroze je povrchová ochrana dílů. V případě hliníku a jeho slitin se jedná zejména o anodické oxidace různých typů nebo konverzní povlaky, které jsou pro zvýšení korozní odolnosti ještě lakovány několika vrstvami laku. Princip povrchové ochrany není založen pouze na izolaci dílu od korozního prostředí. Mechanismus jejich ochranného působení je velmi rozmanitý od možnosti změny vlastností korozních zplodin přes účinnost elektrochemickou až po schopnost inhibovat korozi změnou složení pronikajícího prostředí [13].

### **3.4.6. Kombinace metod ochrany proti korozi**

Pro mnohé korozní systémy je vhodná kombinace dvou nebo více metod protikoroze ochrany. V technické praxi jsou kombinované protikoroze ochrany zcela běžné. Nutná je především kombinace metody ochrany volbou vhodného materiálu a ochranným povlakem. Důvody této kombinace často vyplývají z obtížnosti vytvořit pro některé součásti vhodné ochranné vrstvy z důvodů rozměru, tvaru atd. [14].

## **3.5. Koroze hliníku a hliníkových slitin**

Hliník a jeho slitiny jsou jako konstrukční materiály velmi výhodné, proto je jejich použití v praxi velmi rozšířené hlavně v leteckém průmyslu. Vedle příznivých korozních vlastností jsou hlavními přednostmi malá hustota a s tím související hmotnost, zdravotní nezávadnost, dobrá elektrická a tepelná vodivost a snadná obrobitelnost. Množství slitin hliníku je značně široké a to dovoluje připravit materiály různých mechanických vlastností podle požadavků jednotlivých použití i při zachování vhodných vlastností z hlediska korozní odolnosti [18].

### **3.5.1. Korozní charakteristika**

Hliník je velmi reaktivní a lehce oxidovaný prvek. I když má velkou chemickou reakční schopnost, chová se často jako korozně stálý kov v důsledku ochranného účinku oxidické



vrstvy. Její vlastnosti a odolnost jsou proto většinou rozhodující pro praktické použití hliníku a jeho slitin [14].

Dobrá korozní odolnost hliníku a jeho slitin je tedy hlavně v atmosférických podmínkách. Dobrá korozní odolnost má ale řadu omezení, při jejichž překročení dochází k významné korozní degradaci hliníku [18].

Hliník je neušlechtilý kov. Tomu nasvědčuje negativní elektronový potenciál (standardní potenciál hliníku je roven  $-1,663\text{V}$  a leží mezi Mg s potenciálem  $-2,63\text{V}$  a Ti s potenciálem  $-1,54\text{V}$ ). Předpokládá se, že ponorem do elektrolytu dochází k anodickému rozpouštění hliníku a vzniku  $\text{Al}^{3+}$  a současně také vzniká  $\text{Al}^+$ , který následně reaguje s vodou. Z definice koroze plyne, že její příčinou jsou samovolně probíhající děje mezi materiálem a prostředím [18].

### **3.5.2. Vliv chemického složení na odolnost proti korozi**

Korozní odolnost hliníku se většinou zvyšuje se stoupající čistotou hliníku. Vliv nečistot na chemickou stálost závisí především na prostředí. Z toho důvodu je těžké seřadit prvky podle škodlivosti do určitého pořadí. Jejich vliv závisí na tom, zda jsou přítomny v tuhém roztoku nebo ve formě heterogenních částic. Tyto fáze vyloučené na hranicích zrn jsou zvláště nebezpečné, protože jsou ušlechtilější než kovový základ, proto se nerozpouštějí v elektrolytu a vyvolávají anodické rozpouštění okolní kovové hmoty. Příměsi s výjimkou Mn jsou vůči hliníku katodické. Podstata příznivého působení Mn je v tom, že vytváří fázi  $\text{MnAl}_6$ , která váže Fe na intermetalid  $(\text{MnFe})\text{Al}_6$ . Ten vytváří při tavení strusku, jejíž odstranění znamená vyloučení negativního vlivu Fe na korozi hliníku [17,18].



## 4. Technologie jednotlivých anodických oxidací

### 4.1. Značení povrchové ochrany

Nejvíce používanou specifikací je norma MIL-A-8625 [5], na kterou se odkazuje většina tuzemských i zahraničních výrobců. Tato norma specifikuje všechny druhy anodických oxidací.

Typ I	anodická oxidace v kyselině chromové, konvekční povlakování z kyseliny chromové
Typ IB	anodická oxidace v kyselině chromové s nízkým napětím, $22 \pm 2V$
Typ IC	bezchromová anodická oxidace, bezchrom. alternativa za typ I, IB
Typ II	anodická oxidace v kyselině sírové, konvekční povlakování z kyseliny sírové
Typ IIB	anodická oxidace v kyselině sírové s tenkým povlakem, bezchromová alternativa za typ I a typ IB
Typ III	tvrdé anodické povlakování

Tato práce bude zaměřena na tyto typy anodických oxidací:

Typ IB	anodická oxidace v kyselině chromové s nízkým napětím, $22 \pm 2V$
Typ II	anodická oxidace v kyselině sírové, konvekční povlakování z kyseliny sírové
Typ IC	anodická oxidace v kyselině borité a kyselině vinné

### 4.2. Anodická oxidace v kyselině chromové

#### 4.2.1. Popis vlastností technologie

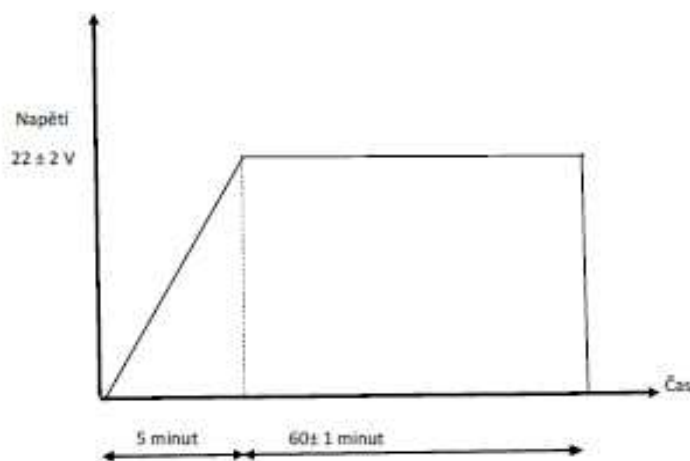
Technologie anodické oxidace v kyselině chromové je jedinečná ve své velmi malé tloušťce povlaku, který se pohybuje max. do 5  $\mu\text{m}$ . Přesto si zachovává velmi dobré protikorozní vlastnosti. Tato technologie usnadňuje konstruktérům volbu tolerování rozměrů,



aniž by se rozměry musely chránit před povrchovou ochranou, či jinak dodatečně obrábět, nebo ochraňovat konverzním povlakem.

#### 4.2.2. Technologické parametry anodické oxidace:

- Napětí:  $22 \pm 2 \text{ V}$ , náběhová křivka  $4 \text{ V} \cdot \text{min}^{-1}$ , graf č.1
- Doba anodizace: 30 – 60 minut
- Teplota:  $35 \pm 2,2 \text{ }^\circ\text{C}$  [10]



Graf č. 1: Náběhová křivka anodické oxidace v kyselině chromové

#### 4.2.3. Chemické složení lázně:

Oxid chromový celkový:  $30,5 - 107,5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$

Oxid chromový volný:  $30,5 - 52 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$

pH: max. 0,9

Nečistoty:

NaCl: max.  $0,2 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$

Sírany: max.  $0,5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$  [10]





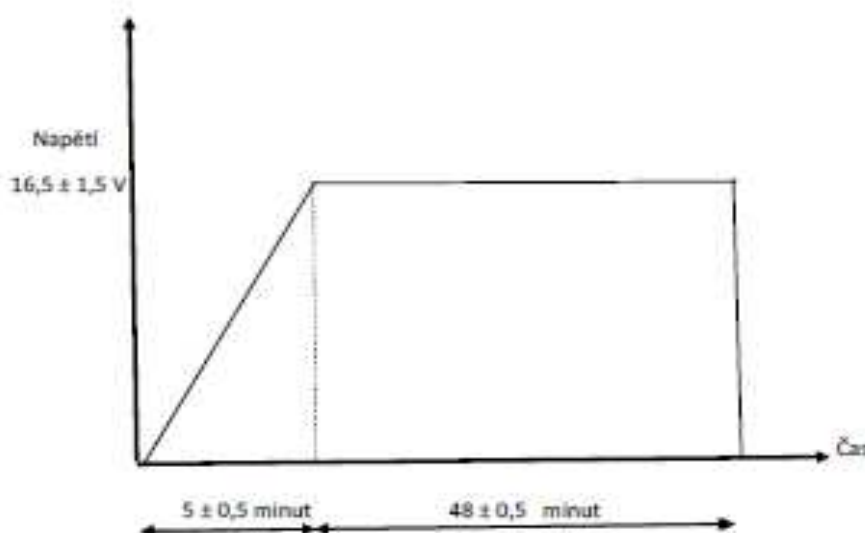
### 4.3. Anodická oxidace v kyselině sírové

#### 4.3.1. Popis vlastností technologie

Anodická oxidace v kyselině sírové je nejrozšířenější povrchová ochrana hliníku a jeho slitin. Kromě velmi dobré protikorozní odolnosti lze povrch dobarvit roztokem pigmentů s následným utěsněním pórů. Nevýhodou této technologie je možnost únavy materiálu u namáhaných dílů a také větší tloušťka povlaku, která dosahuje až 30 mikronů. Z konstrukčního hlediska je nutné počítat s tímto nárůstem a tolerované rozměry dodatečně obrábět, nebo je před anodickou oxidací vhodným způsobem chránit a poté dodatečně opatřovat konverzním povlakem.

#### 4.3.2. Technologické parametry anodické oxidace:

- Napětí: 15 – 18 V, náběhová křivka  $3 \text{ V} \cdot \text{min}^{-1}$ , graf č.2
- Doba anodizace: dle požadované tloušťky, max. 60 minut
- Teplota: 20 – 22 °C [8]



Graf č. 2: Náběhová křivka anodické oxidace v kyselině sírové



#### 4.3.3. Chemické složení lázně:

Kyselina sírová:	165 – 200 g.l <sup>-1</sup>
Nečistoty:	
Hliník:	max. 20 g.l <sup>-1</sup>
Cl- jako NaCl:	max. 200 ppm
F- jako NaF:	max. 225 ppm [8]

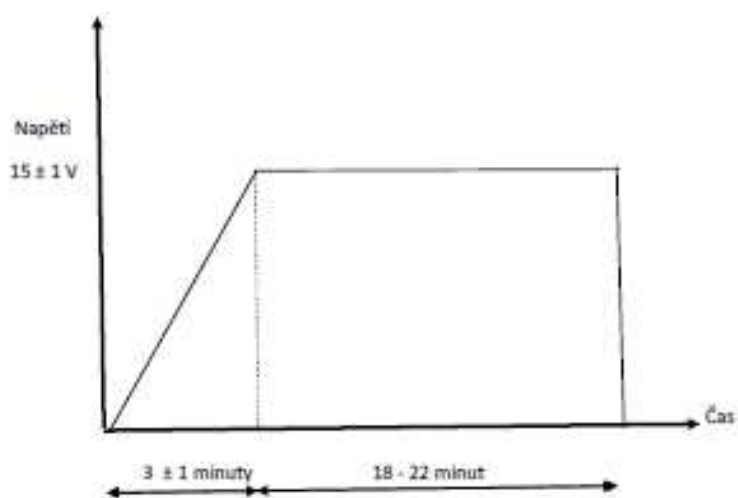
#### 4.4. Anodická oxidace v kyselině borité

##### 4.4.1. Popis vlastností technologie

Anodická oxidace v kyselině borité je v podstatě směs složená z kyseliny sírové s 0,5% přídavkem kyseliny borité. Jedná se o ekologickou náhradu za anodické oxidace s použitím šestimocného chromu. Bohužel tato technologie je pomalu vytlačována jinou náhradou a to anodickou oxidací v kyselině vinné.

##### 4.4.2. Technologické parametry anodické oxidace:

- Napětí: 14 – 16 V, náběhová křivka 5 V.min<sup>-1</sup>, graf č.3
- Doba anodizace: 18 - 22 minut
- Teplota: 24,5 – 28,8 °C [9]



Graf č. 3: Náběhová křivka anodické oxidace v kyselině borité



#### 4.4.3. Chemické složení lázně:

Kyselina sírová:	30,5 – 52 g.l <sup>-1</sup>
Kyselina boritá:	5,2 – 10,7 g.l <sup>-1</sup>
Nečistoty:	
Hliník:	max. 20 g.l <sup>-1</sup>
Cl- jako NaCl:	max. 200 ppm
F- jako NaF:	max. 225 ppm [9]

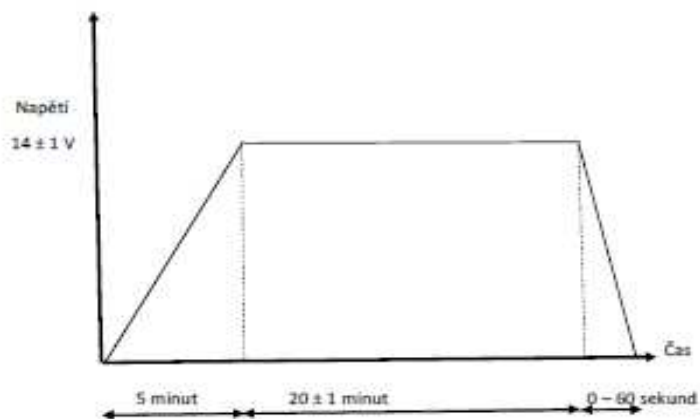
### 4.5. Anodická oxidace v kyselině vinné

#### 4.5.1. Popis vlastností technologie

Anodická oxidace v kyselině vinné je povrchová ochrana, kterou začíná zavádět do svých specifikací většina výrobců letadel. Jedná se také o ekologickou náhradu za anodické oxidace s použitím šestimocného chromu. Tato technologie vyžaduje zvýšenou údržbu udržování lázně za účelem odstranění organických nečistot. Do technologie předpravy materiálu jsou také vkládány navíc operace alkalického nebo kyselého moření.

#### 4.5.2. Technologické parametry anodické oxidace:

- Napětí: 14 V, náběhová křivka 3 V.min<sup>-1</sup>, graf č.4
- Doba anodizace: 19 - 21 minut
- Teplota: 36 – 39 °C [11]



Graf č. 4: Náběhová křivka anodické oxidace v kyselině vinné

#### 4.5.3. Chemické složení lázně:

Kyselina vinná: 72 - 88 g.l<sup>-1</sup>

Kyselina sírová: 36 - 44 g.l<sup>-1</sup>

Nečistoty:

Hliník: 0,5 - 5 g.l<sup>-1</sup>

chloridy: max. 100 ppm [11]



## **5. Procesní zkoušky**

### **5.1. Všeobecně**

Anodická oxidace patří mezi tzv. Speciální procesy. Speciální procesy ve výrobě jsou takové procesy, jejichž jakost nemůže být verifikována konečnou kontrolou a které vyžadují speciální odpovědnosti při řízení před a v průběhu operace, pokud se zajišťuje jakost [3].

Systémy řízení jakosti mohou být velmi efektivní při adekvátním zajištění správného provádění procesu, ale obvykle jsou požadovány ještě speciální požadavky a speciální řízení procesu [3].

K takovým speciálním požadavkům patří procesní zkoušky, které indikují, zdali je proces prováděn správně a zaručuje potřebnou jakost povrchové ochrany.

Kromě laboratorních analýz provozních lázní se provádí kontrola vzhledu povlaku a tloušťka povlaku na eloxovaných dílech.

Dalším kontrolním článkem jsou periodické zkoušky, předepsané danou specifikací a prováděné na vzorcích (parametry vzorků budou uvedeny dále u každé zkoušky).

### **5.2. Vizuální kontrola povlaku**

Povlak anodické vrstvy musí být spojitý, hladký, musí dobře lpět, být vzhledově jednotný, bez drobných oblastí, volných vrstviček, prasklin, rýh a dalších vad, které by snižovaly praktickou upotřebitelnost eloxovaných dílů a sestav [4].

Odlišnosti ve vzhledu anodického povlaku, vyplývající z přirozené nejednotnosti základního kovu u některých dílů, jako je např. přítomnost svaru, dílu obsahujících lité nebo strojně obráběné povrchy a z rozdílů ve velikosti zrn ve výkovicích, nesmí být důvodem k vyřazení anodického povlaku. Malé barevné změny, vyvolané odkapáváním nebo stékáním utěšňovacího roztoku z konstrukčních šterbin v daném dílu, jsou přípustné [4].

### **5.3. Kontrola tloušťky povlaku**

Tloušťka povlakovaného materiálu je definována jako vzdálenost mezi povrchem povlaku a jeho fázovou hranicí se základním materiálem. Zkouška se provádí nedestruktivní metodou vířivými proudy. Minimální požadavek na tloušťku eloxované vrstvy dle MIL-A-8625 [4] je 1  $\mu\text{m}$ . Výsledek měření je nutné vypočítat jako průměr z nejméně pěti měření.



## 5.4. Váhový test

Hmotnost anodického povlaku se musí stanovit dle normy ASTM B 137-95 [6].

Postup zkoušky:

- a. Zkušební vzorky se musí zvážit, a to bezprostředně po eloxování, ještě před barvením a utěšňováním. K tomu se musí použít analytické váhy nebo jiné přístroje, jejichž citlivost je nejméně 10 procent čisté hmotnosti anodického povlaku na zkušebním vzorku. Vzorky se musí před vážením očistit a sušit po dobu nejméně 30 minut při teplotě  $93^{\circ} \pm 6^{\circ}\text{F}$  ( $200^{\circ} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ) a pak nechat vychladnout na teplotu místnosti.
- b. Bezprostředně po vážení se musí povlak ze zkušebního vzorku odstranit, a to ponořením do roztoku kyseliny fosforečné a kyseliny chromové na dobu nejméně 5 minut (nepřekračovat dobu 6 min) při teplotě  $100^{\circ} \pm 6^{\circ}\text{F}$  ( $212^{\circ} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ). Složení roztoku musí být následující:  
Kyselina fosforečná, 85 % - 35 mililitrů  
Kyselina chromová ( $\text{CrO}_3$ ) - 20 gramů  
Voda, zbylý objem do 1 000 mililitrů
- c. Zkušební vzorek se musí z roztoku vyjmout, omýt v destilované vodě, osušit a zvážit. Ponoření vzorku na 5 minut do roztoku se musí opakovat tak dlouho, dokud se povlak zcela neodstraní, což se pozná podle toho, že hmotnost vzorku zůstává konstantní. Poté, co se v 1 litru roztoku rozpustilo 5 gramů anodického povlaku, se musí použitý odstraňovač galvanických povlaku vyřadit.
- d. Po posledním vážení se musí přesně určit celková plocha povrchu zkušebního vzorku.
- e. Objemová hmotnost povlaku se musí určit tak, že se od hmotnosti vzorku v miligramech před odstraněním povlaku odečte jeho hmotnost v miligramech po



odstranění povlaku a získaný výsledek se podělí plochou povrchu ve čtverečních stopách [6].

### **5.5. Korozní zkouška**

Odolnost proti korozi se musí určovat na utěsněných zkušebních panelech o rozměrech 7,62 x 25,4 cm a tloušťce 0,08 cm.

Zkušební vzorky, se musí omýt v destilované nebo neionizované vodě, měkkým hadrem utřít do sucha a pak podrobit zkoušce v 5-ti procentní solné mlze podle dokumentu ASTM B 117-11 [7] s tou výjimkou, že důležitý povrch musí být odkloněn od svislice o 6 stupňů. Vzorky je nutné takto exponovat po dobu 336 hodin.

Po provedení zkoušky solnou mlhou, se musí zkušební vzorky vizuálně prohlédnout a stanovit, zda jsou splněny všechny dále uvedené podmínky:

- a. Zkušební vzorky nesmí na celkové zkušební ploše 968 cm<sup>2</sup>, složené z pěti nebo více zkušebních kusů, vykazovat dohromady více než 15 izolovaných důlku od koroze o průměru ne větším než 0,08 cm. Plochy do vzdálenosti 0,15 cm od identifikačního označení, od okrajů a od stop po kontaktech elektrod, jež zůstaly na povrchu po zpracování, se z toho musí vyloučit [7].
- b. Zkušební vzorky nesmí na celkové ploše 193 cm<sup>2</sup> od jednoho nebo více zkušebních kusů vykazovat více než 5 izolovaných důlku od koroze o průměru ne větším než 0,08 cm. Plochy do vzdálenosti 0,15 cm od identifikačního označení, od okrajů a od stop po kontaktech elektrod, jež zůstaly na povrchu po zpracování, se z toho musí vyloučit [7].
- c. Kromě požadavku uvedených v bodě (a) a (b), nesmí zkušební vzorky vykazovat nepravidelné tmavě šedé plošky (kolečka, pruhy nebo skvrny) [7].

### **5.6. Zkouška přilnavosti nátěru**

Zkouška přilnavosti nátěrů se provádí dle specifikace ČSN EN ISO 2409 [12].



### 5.6.1. Řezný nástroj

Je důležité zajistit, aby řezný nástroj vytvořil řez předepsaného profilu V skrz celou tloušťku nátěru a aby řezné hrany byly v dobrém stavu.

Ve všech případech se přednostně doporučuje řezný nástroj s jedním ostřím. Řezný nástroj s více ostřímí není vhodný pro nátěry o velké tloušťce (přes 120 mikrometrů), pro tvrdé nátěry, kde je nátěr nanesen na měkký podklad.

Řezné nástroje jsou vhodné pro ruční použití, které je obvyklejší, mohou však být rovněž vloženy do motorem poháněného zařízení, kterým získává stejnoměrnější řez [12].

### 5.6.2. Postup zkoušky

Zkouška se provádí při teplotě  $23 \pm 2$  °C a relativní vlhkosti  $50 \pm 5$  %.

Zkušební vzorky se bezprostředně před zkouškou kondicionují při teplotě  $23 \pm 2$  °C a relativní vlhkosti  $50 \pm 5$  °C. po dobu nejméně 16 hodin.

V každém směru mřížky musí být šest řezů.

Vzdálenost mezi řezy musí být v obou směrech stejná a závisí na tloušťce nátěru a typu podkladu:

do 60 μm:	vzdálenost 1 mm pro tvrdé podklady (např. kov a plasty)
do 60 μm:	vzdálenost 2 mm pro měkké podklady (např. dřevo a sádrové výrobky)
61 μm až 120 μm:	vzdálenost 2 mm pro tvrdé i měkké podklady
121 μm až 250 μm:	vzdálenost 3 mm pro tvrdé i měkké podklady

Mřížková zkouška není vhodná pro nátěry o celkové tloušťce větší než 250 μm [12].

### 5.6.3. Počet stanovení

Při běžných zkouškách se provede pouze jedno stanovení.

Pokud se požaduje vyšší preciznost, zkouška se provede na nejméně na třech různých místech vzorku. Pokud si výsledky neodpovídají (rozdíly jsou větší než o jeden klasifikační stupeň), zkouška se zopakuje na jiných třech místech. Pokud je to nezbytné, použijí se jiné vzorky [12].





#### 5.6.4. Ruční řezání nátěru

Zkušební vzorek se umístí na pevný rovný povrch, aby se zabránilo jakékoliv deformaci vzorku během zkoušky.

Před zkouškou se ostří řezného nástroje prohlédne a přebroušením nebo výměnou se zajistí jeho dobrý stav.

Řezy se provedou ručně předepsaným postupem.

Pokud je vzorek ze dřeva nebo z podobného materiálu, provedou se řezy pod úhlem přibližně 45° ke směru vláken.

Řezný nástroj se drží ostřím kolmo k povrchu zkušebního vzorku. Stejným tlakem na řezný nástroj a s pomocí vhodné distanční šablony se do nátěru rovnoměrnou rychlostí směrem ke zkoušejícímu provede šest řezů. Každý řez musí přesahovat oba krajní z řezů k němu kolmých přibližně o 1 mm až 2 mm, aby vznikly zřetelné průsečky. Všechny řezy musí zanechat v podkladu stopu nebo vryp, ale hloubka jejich průniku do podkladu musí být co nejmenší.

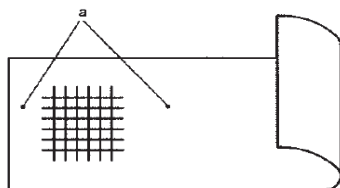
Pokud v důsledku tvrdosti nátěru není možné proniknout k podkladu, musí se zkouška prohlásit za neplatnou.

Opakováním tohoto postupu se vytvoří šest dalších navzájem rovnoběžných řezů křížících původní řezy pod úhlem 90°, takže vznikne mřížka.

Z oblasti řezů se odstraní veškerý uvolněný nátěr [12].

#### 5.6.5. Odstranění uvolněného nátěru

- Vzorek se podél každé z úhlopříček mřížky v obou směrech několikrát lehce otře měkkým štětcem.
- Střed pásky se přiloží na mřížku rovnoběžně s jednou sérií řezů dle obrázku *obr. č.3* a páska se uhladí po celé ploše mřížky.

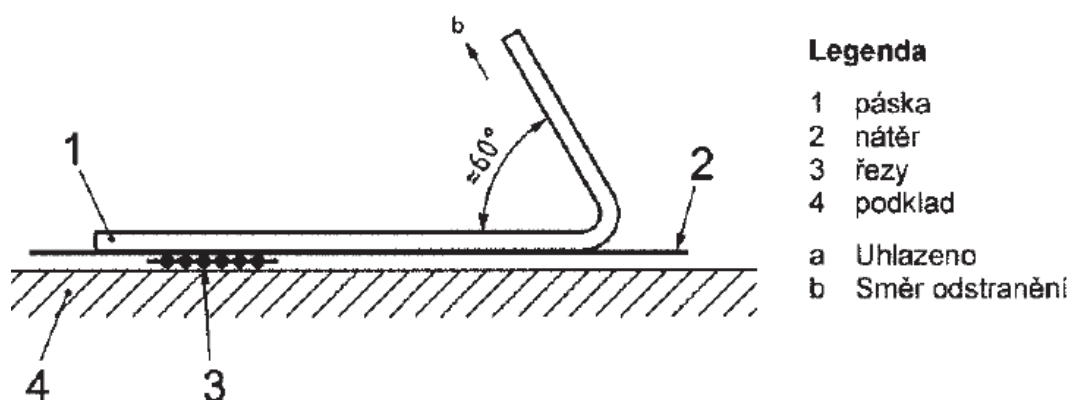


Poloha lepicí pásky vzhledem k mřížce

*Obr. č.3: Poloha pásky*



- c) Aby se zajistil dobrý kontakt s nátěrem, páska se pevně přetře špičkou prstu nebo nehtem.
- d) Po 5 minutách od připevnění pásky se páska odstraní tak, že se volný konec uchopí a rovnoměrně se za něj táhne po dobu 0,5 s až 1,0 s pod úhlem co nejblíže 60° obr. č. 4.



**Poloha bezprostředně před odstraněním z mřížky**

*Obr. č.4: Poloha pásky při odtržení*

- e) Stlačeným vzduchem nebo dusíkem se odstraní veškerý uvolněný nátěr [12].

#### **5.6.6. Vyhodnocení a vyjádření výsledků**

Oblast řezů ve zkoušeném nátěru se při dobrém osvětlení podle ISO 13076 pozorně prohlédne prostým okem nebo s korekcí zrakových vad, popř. lupou. Během prohlížení se vzorek otáčí tak, aby nebyl pozorován a osvětlen pouze z jednoho směru. Zkušební plocha se porovnáním s tabulkou vyhodnotí a oklasifikuje dle *tab. č. 1* [12].



**Tabulka 1 – Klasifikace výsledků zkoušek**

Klasifikace	Popis	Vzhled povrchu plochy s mřížkovým řezem, na které se vyskytlo odlupování (Příklad pro šest rovnoběžných řezů)
0	Hrany řezů jsou zcela hladké; žádný čtverec mřížky není poškozen	-
1	Malé kousky povlaku odloupnuty v místech křížení řezů. Poškozená plocha je menší než 5 %	
2	Povlak se odlupuje podél řezů a/nebo v místech křížení řezů. Poškozená plocha je větší než 5 %, ale menší než 15 %	
3	Povlak se odlupuje podél řezů ve velkých pásech částečně nebo zcela, a/nebo se odlupuje částečně nebo zcela na různých místech čtverců. Poškozená plocha je větší než 15 %, ale menší než 35 %	
4	Povlak se odlupuje podél řezů ve velkých pásech zcela a/nebo některé čtverce jsou odloupnuty částečně nebo zcela. Poškozená plocha je větší než 35 %, ale menší než 65 %	
5	Jakýkoliv stupeň odlupování, který nemůže být klasifikován ani stupněm 4	-

*Tabulka 1: Klasifikace výsledků zkoušky*

### 5.6.7. Postup pro přípravu a vyhodnocení metalografického vyhodnocení

#### a) Řezání vzorků

K řezání vzorků je použita rozbrušovací pila Setocom 50. Označíme část dílu, která se bude řezat a která se bude následně brousit a leštit. Podle typu materiálu, který budeme řezat, zvolíme vhodný řezací kotouč. Přesvědčíme se, že je řezací kotouč dobře upevněn a nevykazuje vady. Nasadíme řezný kotouč a upevníme vzorek. Navolíme vhodný řezací program a provedeme řez. Vizuálně zkontrolujeme odříznutý vzorek [19].

#### b) Upevnění vzorků

Upevnění vzorků pro metalografického vyhodnocení je důležité pro zachování hran vzorků a umožňuje následnou manipulaci se vzorkem v průběhu přípravy výbrusů. K upevnění vzorků se používají plastické hmoty, které je možno rozdělit do dvou tříd.

- Hmoty pro zalévání zastudena (epoxidové pryskyřice, metakryláty apod.)



- Hmoty pro zalisování zatepla, při použití tlaku (pryskyřice fenolové, akrylové, epoxidové apod.) [19].

c) Zalítí vzorků za studena

Vzorek před fixací zbavit nečistot a mastnoty omytím v technickém benzínu nebo organických rozpouštědel. Odstranit otřepy po řezání. K zalévání použít formy ze silikonové gumy tvaru válcových kalíšků. Vzorek položit na dno zalévací formy, do jejího středu. Připravit zalévací hmotu podle návodu výrobce. Zalévací hmotu lijeme do formičky se vzorkem do výšky formy. Doba vytvrzení hmoty 8 – 60 minut při teplotě okolí [19].

- d) Broušení je základní operace při přípravě dokonalého povrchu metalografických výbrusů bez škrábanců a zaoblených hran. Provádí se v několika krocích v přímé závislosti na postupném zvyšování čísla zrnitosti použitého brusného materiálu. Broušení provádíme na poloautomatickém zařízení Tegramin 25 pro dosažení zaručené reprodukovatelnosti výsledků. Umístíme zalité vzorky do unášedce vzorků pracovní hlavy přístroje. Vybereme vhodný režim pro broušení. Po uplynutí nastaveného cyklu, opláchneme broušené vzorky a vyměníme brusné médium. Tento postup opakujeme do dosažení posledního kroku brousícího cyklu. Po posledním broušení vyjmeme vzorky a očistíme teplou vodou, vysušíme tlakovým vzduchem a opláchneme lihem [19].

e) Leštění

Leštění metalografických výbrusů zajistí dokonalý povrch jednotlivých výbrusů, které se následně hodnotí na metalografickém mikroskopu v leštěném nebo později naleptaném stavu. Leštění se provádí na stejném zařízení Tegramin 25. K předleštění se používá diamantová leštící pasta o zrnitosti 6 – 9  $\mu\text{m}$ . K leštění se používají diamantové pasty o zrnitosti 1 – 3  $\mu\text{m}$  [19].

f) Leptání mikrovýbrusů

Leptání povrchu vzorků slouží k vyvolání struktury vyšetřovaného materiálu pro nejrůznější účely jako např. vyvolání struktury po tepelném zpracování, po chemicko-tepelné úpravě povrchu dílů, pro vyvolání směru toku vláken výrobků, vyvolání velikosti zrna atp.



K přípravě leptadel používáme chemikálie čistoty pro chemickou analýzu a destilovanou vodu [19].

Leptání povrchu vzorku provádíme v co nejkratší době po vyleštění jeho povrchu. Koncentrace příslušného leptadla k danému účelu je uvedena v příslušné tabulce ASTM E 407. Leptání provádíme obvykle při pokojové teplotě  $23 \pm 5$  °C, ve specifických případech leptadlo ohříváme asi na 40 °C. V průběhu leptání vzorkem v leptadle pohybujeme, nebo můžeme zajistit jeho míchání pomocí magnetického míchadla. Doba leptání se volí podle intenzity vývinů a intenzity zbarvení leptaného povrchu vzorku. Bezprostředně po dokončení leptání vzorek omyjeme čistým alkoholem a osušíme tlakovým vzduchem [19].



## 6. Experimentální část

### 6.1. Cíle práce

1. Provedení anodické oxidace
2. Vyhodnocení zkoušek solné komory
3. Technicko-ekonomické zhodnocení anodických oxidací

### 6.2. Popis experimentální části

- a) Bakalářská práce byla zaměřena na korozní odolnost dvou druhů materiálů po aplikaci různých anodických povlaků. Nastříhané vzorky byly anodicky oxidovány a změřena tloušťka anodické vrstvy. Následovně byly vzorky vystaveny působení 5% mlhy roztoku chloridu sodného v solné komoře. Působení v solné komoře bylo ukončeno po identifikaci prvního korozního bodu. K přesnému stanovení tloušťky anodické vrstvy bylo použito metalografického výbrusu.
- b) Vyhodnocení korozní odolnosti bylo provedeno u všech čtyřech druhů anodických oxidací. V případě kyseliny vinné byl také proveden váhový test a zkouška přilnavosti základního laku. Tyto dvě zkoušky byly provedeny z důvodu zavádění nové technologie.

### 6.3. Příprava testovacích vzorků

Pro testování materiálů byly vybrány dva druhy hliníkové slitiny bez plátování:

#### 6.3.1. Specifikace materiálu

AMS-QQ-A-250/4, 2024-T3, (ČSN 42 4203, AlCu4Mg1)

Chemické složení *tab. č. 2*:

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
Max. [%]	0,5	0,5	4,9	0,9	1,8	0,1	-	0,25	0,15
Min. [%]	-	-	3,8	0,3	1,2	-	-	-	-

*Tab. č.2: Chemické složení materiálu 2024*

**Rozměry vzorků pro zkoušku solnou mlhou:**

Anodická oxidace v kyselině borité, chromové a sírové - 254 x 76 x 1 mm

Anodická oxidace v kyselině vinné – 125 x 80 x 1 mm

**Rozměry vzorků pro váhový test:**

Test byl prováděn pouze u anodické oxidace v kyselině vinné - 76 x 76 x 1 mm

**Rozměry vzorků pro zkoušku přilnavosti:**

Zkouška byla prováděna pouze u anodické oxidace v kyselině vinné - 125 x 80 x 1 mm

**6.3.2. Specifikace materiálu**

ASNA 3129, 7075-T6, (ČSN 42 4222, AlZn6Mg2Cu)

Chemické složení *tab. č. 3*:

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ti+Zr
Max. [%]	0,4	0,5	2,0	0,3	2,9	0,28	6,1	0,2	0,25
Min. [%]	-	-	1,2	-	2,1	0,18	5,1	-	-

*Tab. č.3: Chemické složení materiálu 7075*

**Rozměry vzorků pro zkoušku solnou mlhou:**

Pro všechny anodické oxidace jsou rozměry vzorků stejné – 125 x 80 x 1 mm

**Rozměry vzorků pro váhový test:**

Test byl prováděn pouze u anodické oxidace v kyselině vinné - 76 x 76 x 1 mm

**Rozměry vzorků pro zkoušku přilnavosti:**

Zkouška byla prováděna pouze u anodické oxidace v kyselině vinné - 125 x 80 x 1 mm



## 6.4. Přístrojové vybavení

### 6.4.1. Anodizační linka

Anodizační linka *obr. č 5* je plně automatická, nevratná s maximální nosností závěsu 300 kg. Linka obsahuje odmašťovací vanu, deoxidační vanu, tři anodizační vany, utěšňovací vanu a šest oplachových van. Oplachy jsou vždy dvou stupňové pro větší úsporu vody a kvalitnější oplach. Na konci linky je umístěny sušárna. Vany, které jsou ohřívány, mají uzavíratelná víka s pneumatickým ovládním.

Každá anodizační vana je vybavena výměníkem tepla a zdrojem napětí s maximální kapacitou 60 voltů a 1500 ampér. Objem každé vany činí 11 800 dm<sup>3</sup>. Pro anodizaci jsou používány olověné katody. Závěsy, na kterých je zavěšováno zboží, jsou hliníkové. Na lince jsou eloxovány díly tvářené i obráběné a různých rozměrů. Z těchto důvodů se používají univerzální závěsy ve tvaru spirály. Míchání lázně je zajišťováno stlačeným vzduchem z centrálního rozvodu.

Na lince je možno použít až 100 technologických programů s různým typem eloxu, délky pobytu ve vanách, či různých teplot. V závislosti na použitém technologickém programu mohou být v lince spuštěny až tři závěsy zboží najednou.

Detailní uspořádání linky je zobrazeno na *obr. č .6*.



*Obr. č.5: Automatická anodizační linka*





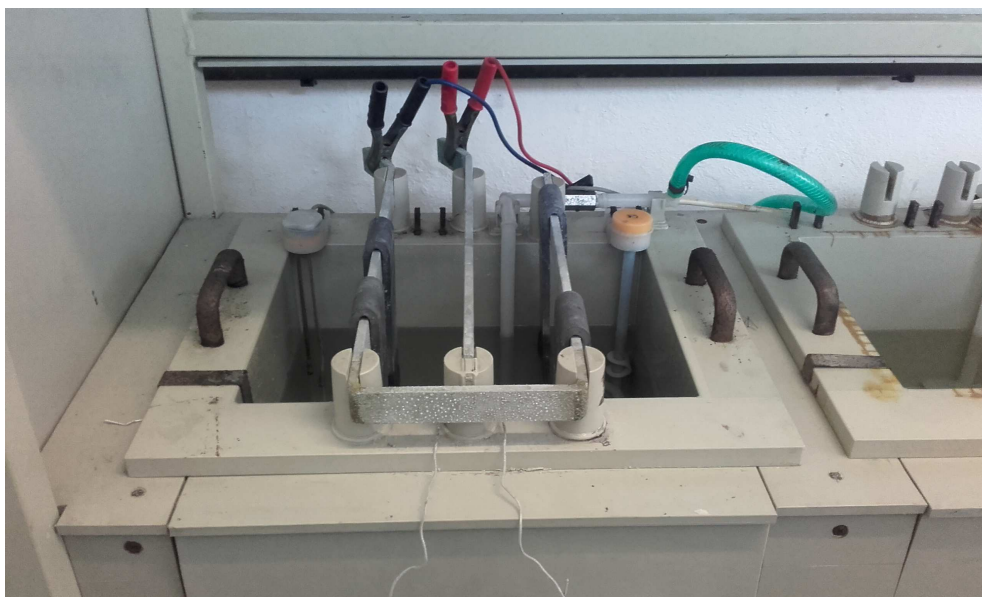
Alkalické odmaštění
Oplach 1°
Oplach 2°
Deoxidace Turco Smut GO4 ( nepoužito)
Deoxidace Turco Smut NC
Oplach 1°
Oplach 2°
Anodická oxidace v kyselině chromové
Anodická oxidace v kyselině sírové
Anodická oxidace v kyselině borité
Oplach 1°
Oplach 2°
Utěsnění
Sušárna

*Obr. č.6: Uspořádání anodizační linky*

#### **6.4.2. Laboratorní galvanický stůl**

Laboratorní galvanický stůl je určen především k ověřování technologických postupů, laboratorním zkouškám a zavádění nových technologií. Galvanický stůl se skládá ze šesti van o objemu 30 litrů, samostatného zdroje stejnosměrného proudu do maximálního zatížení 60 voltů. Dále je k dispozici elektrický ohřev lázně. Míchání je zajišťováno stlačeným vzduchem z centrálního rozvodu. Stejně jako v případě eloxační linky, jsou pro anodickou oxidaci použity olověné katody.

V případě anodické oxidace v kyselině vinné byla použita pouze jedna vana *obr. č. 7* a všechny ostatní operace byly prováděny na automatické anodické lince.



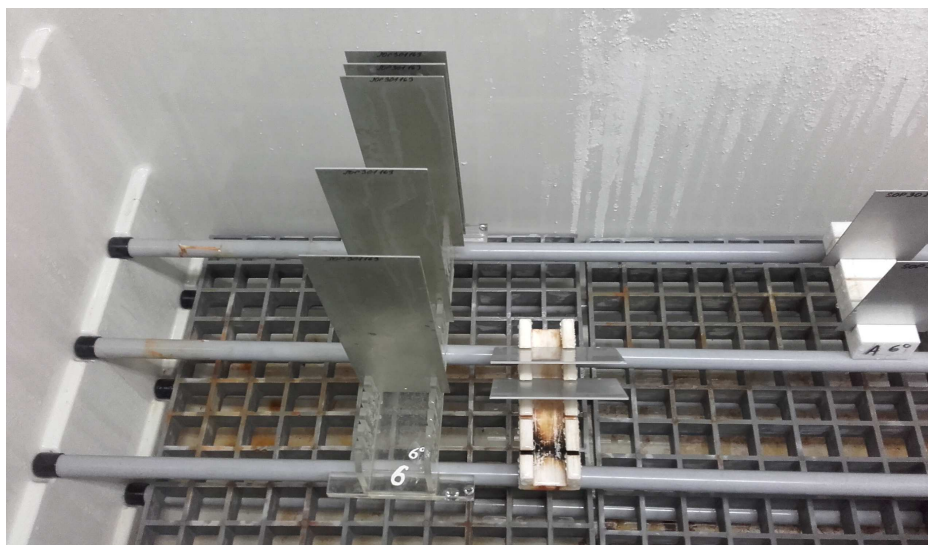
*Obr. č.7: Laboratorní galvanický stůl*

#### **6.4.3. Solná komora**

Pro korozní zkoušku byla použita solná komora typ Liebisch S 100 M-TR o rozměrech 2600 x 1120 x 1210 mm a objemu 1000 litrů *obr. č.8*. Všechny vzorky byly v solné komoře vystaveny stejným podmínkám. Solná mlha o koncentraci 5% NaCl. Teplota prostředí  $35 \pm 2$  °C a pH 6,5 – 7,2. Vstupní přetlak nastaven v rozmezí 0,3 – 0,4 MPa. Odklonění 6° od svislice bylo u všech vzorků nastaveno také za stejných podmínek *obr. č.9*.



*Obr. č.8: Solná komora Liebisch S 100 M-TR*



Obr. č.9: Založení vzorků v solné komoře

#### 6.4.4. Přístroj na měření anodizačních povlaků

Pro běžné měření tloušťky vrstvy anodického povlaku se používá nedestruktivní metoda. Dle specifikace MIL-A-8625 [5] byla pro měření vybrána metoda vířivých proudů. Jelikož anodické vrstvy se pohybují v jednotkách mikrometrů, byl použit přístroj Fischer Dualscope FMP-40 a měřicí sonda FD13H obr. č.10..



Obr. č.10: Fischer Dualscope FMP-40



#### 6.4.5. Zařízení na řezání vzorků pro metalografické vyhodnocení

Vzorky, které byly určeny pro metalografický výbrus, byly nařezány na zařízení Secotom – 50 *obr. č. 11.*

##### Parametry řezání:

Typ řezného kotouče 50A20

Rychlost řezání 3000 ot..min.<sup>-1</sup>

Rychlost posuvu 0,25 mm.s<sup>-1</sup>

Délka řezu 76 mm



*Obr. č.11: Secotom - 50*

#### 6.4.6. Mikroskop

K porovnání vyhodnocení tloušťky anodické vrstvy jsem provedl také měření pomocí mikroskopu Keyence VHX-5000 *obr. č.12.*



*Obr. č.12: Mikroskop Keyence VHX-5000*



### 6.4.7. Řezný nástroj

K vyhodnocení zkoušky přilnavosti jsem zvolil metodu suché pásky dle specifikace ČSN EN ISO 2409 [12]. K provedení řezu jsem použil více řezný nástroj *obr. č.13* se šesti noži s mezerou mezi jednotlivými noži 1 mm.

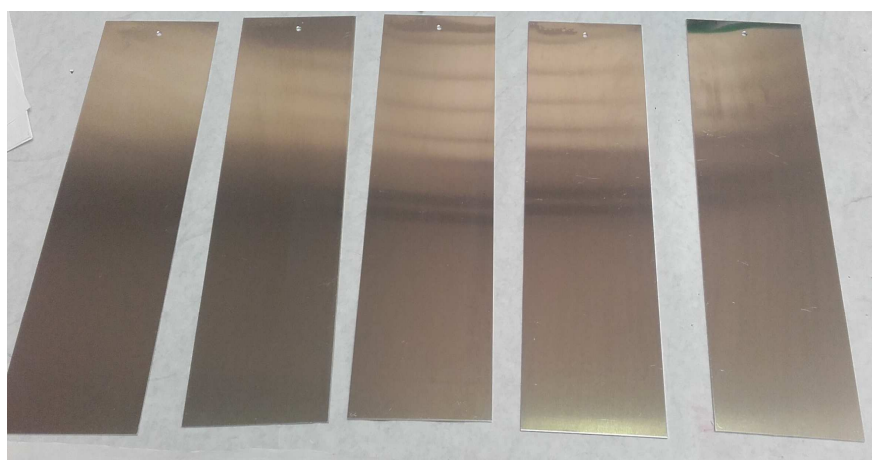


*Obr. č.13: Řezný nástroj*

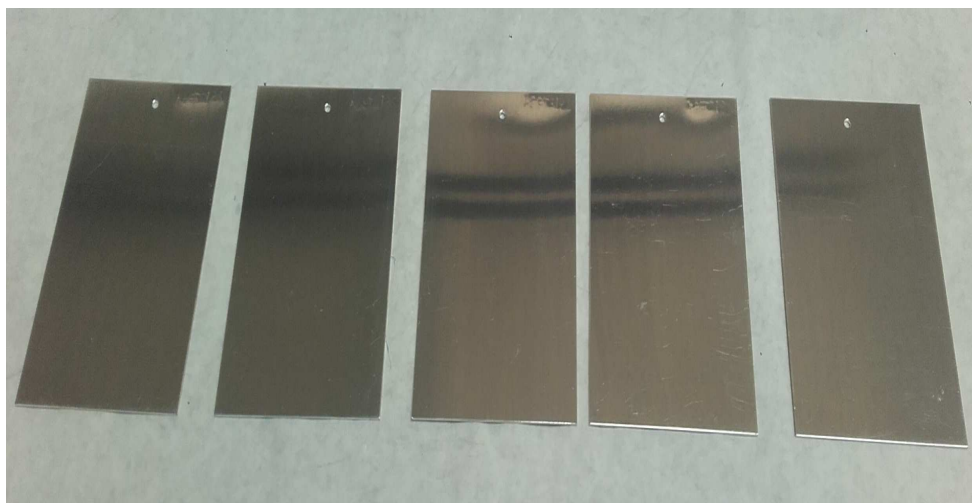
## 6.5. Technologické postupy

### 6.5.1. Anodická oxidace v kyselině chromové

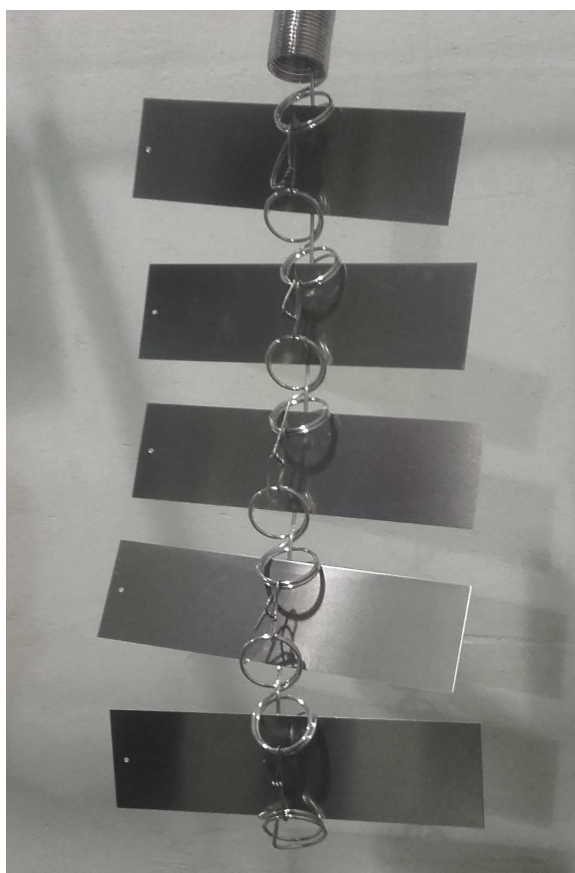
Připravené vzorky z materiálu 2024 *obr. č.14* a 7075 *obr. č.15* byly odmaštěny metyl etyl ketonem a zavěšeny do hliníkové spirály *obr. č.16*. Pro korozní zkoušku bylo anodizováno 5 kusů vzorků od každého materiálu. Jelikož pro korozní zkoušku je vyžadováno utěsnění povlaku, byly vzorky utěsněny v horké demineralizované vodě.



*Obr. č.14: Vzorky mat. 2024 před eloxem*



*Obr. č.15: Vzorky mat. 7075 před eloxem*



*Obr. č.16: Zavěšené vzorky do spirály*



Anodická oxidace v kyselině chromové byla provedena podle technologického postupu *tab. č.4:*

	Čas [minuty]	Teplota [°C]	Napětí [V]
Alkalické odmaštění	12	55	-
Oplach 1°	2	-	-
Oplach 1°	4	-	-
Deoxidace	8,5	-	-
Oplach 1°	5	-	-
Oplach 1°	6	-	-
Anodická oxidace v kyselině chromové	60	35,1	22
Oplach 1°	2	-	-
Oplach 1°	4	-	-
Utěsnění v demineralizované vodě	25	90,5	-
Sušení	12,5	40,1	-

*Tab. č.4: Technologický postup anodické oxidace v kyselině chromové*

Chemické složení lázní dle *tab. č. 5,6 a 7:*

Alkalické odmaštění	Koncentrace
Turco 4215 NC-LT	54,7 g.l <sup>-1</sup>
Cl <sup>-</sup>	79 ppm
pH	8,7

*Tab. č.5: Chem. složení lázně alkal. odmaštění*

Deoxidace	Koncentrace
Turco Smut NC	19,4 %
Rychlost leptání	1,1 μm/str
Cl <sup>-</sup>	< 10 ppm
Al	0,043 g.l <sup>-1</sup>

*Tab. č.6: Chem. složení lázně deoxidace*



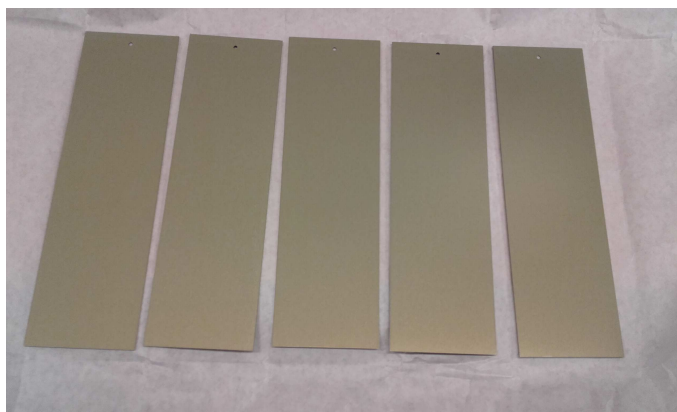
Anodická oxidace v kyselině chromové	Koncentrace
Oxid chromový celkový	61,5 g.l <sup>-1</sup>
Oxid chromový volný	43,2 g.l <sup>-1</sup>
pH	0,58
Cl <sup>-</sup>	< 10 ppm
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	78 mg.l <sup>-1</sup>
Al	2,21 g.l <sup>-1</sup>

Tab. č.7: Chemické složení lázně kyseliny chromové

Na závěr technologického postupu byla na vzorcích provedena vizuální kontrola povlaku. Povlak byl souvislý bez poškození a napálených míst. Dále byla změřena tloušťka anodické vrstvy tab. č.8 a obr.č.17,18 přístrojem Fischer Dualscope FMP-40. Měření bylo provedeno na pěti bodech každého vzorku a výsledná hodnota byla vyhodnocena jako průměr naměřených hodnot.

č. vzorku Materiál	1	2	3	4	5	Průměr ze všech vzorků
2024	2,3	2,2	2,6	2,5	2,4	<b>2,4</b>
7075	2,7	3,3	3,0	2,8	3,2	<b>3,0</b>

Tab. č.8: Tloušťky eloxu kyseliny chromové



Obr. č.17: Vzorky z mat. 2024 po eloxu v kyselině chromové

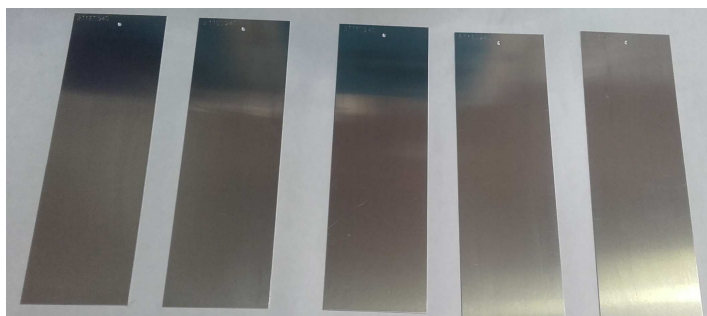




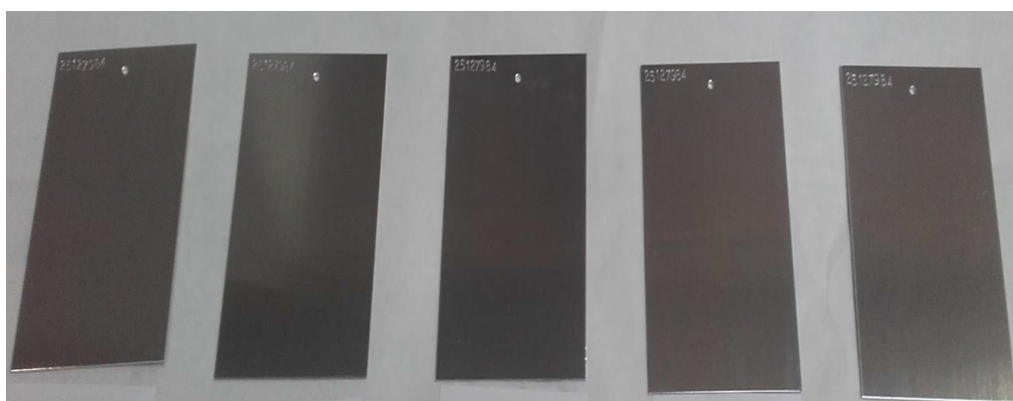
*Obr. č.18: Vzorky z mat. 7075 po eloxu v kyselině chromové*

### **6.5.2. Anodická oxidace v kyselině sírové**

Stejně jako v případě anodické oxidace kyseliny chromové byly vzorky z materiálu 2024 *obr. č.19* a 7075 *obr. č.20* odmaštěny metyl etyl ketonem a zavěšeny do hliníkové spirály. Anodizováno bylo také 5 kusů vzorků od každého materiálu a na závěr byl povlak utěsněn v horké demineralizované vodě.



*Obr. č.19: Vzorky mat. 2024 před eloxem*



*Obr. č.20: Vzorky mat. 7075 před eloxem*



Anodická oxidace v kyselině sírové byla provedena podle technologického postupu *tab. č. 9*:

	Čas [minuty]	Teplota [°C]	Napětí [V]
Alkalické odmaštění	12	55,1	-
Oplach 1°	2	-	-
Oplach 1°	4	-	-
Deoxidace	8,5	-	-
Oplach 1°	2	-	-
Oplach 1°	4	-	-
Anodická oxidace v kyselině sírové	48	20,2	16,5
Oplach 1°	5	-	-
Oplach 1°	5	-	-
Utěsnění v demineralizované vodě	25	90,8	-
Sušení	15	40,1	-

*Tab. č.9: Technologický postup anodické oxidace v kyselině sírové*

Chemické složení lázně dle *tab. č.5,6 a 10*:

Anodická oxidace v kyselině sírové	Koncentrace
Kyselina sírová	191,5 g.l <sup>-1</sup>
Al	5,04 g.l <sup>-1</sup>
Cl <sup>-</sup>	< 10 ppm
F <sup>-</sup>	2 ppm

*Tab. č.10: Chemické složení lázně kyseliny sírové*



Na závěr technologického postupu byla na vzorcích provedena vizuální kontrola povlaku. Povlak byl souvislý bez poškození a napálených míst. Dále byla změřena tloušťka anodické vrstvy *tab. č.11* a *obr.č.21,22* přístrojem Fischer Dualscope FMP-40. Měření bylo provedeno na pěti bodech každého vzorku a výsledná hodnota byla vyhodnocena jako průměr naměřených hodnot.

č. vzorku Materiál	1	2	3	4	5	Průměr ze všech vzorků
2024	11,4	12,1	12,4	12,3	11,5	<b>11,9</b>
7075	32,2	31,6	31,4	30,8	31,3	<b>31,5</b>

*Tab. č.11: Tloušťky eloxu kyseliny sírové*



*Obr. č.21: Vzorky z mat. 2024 po eloxu v kyselině sírové*

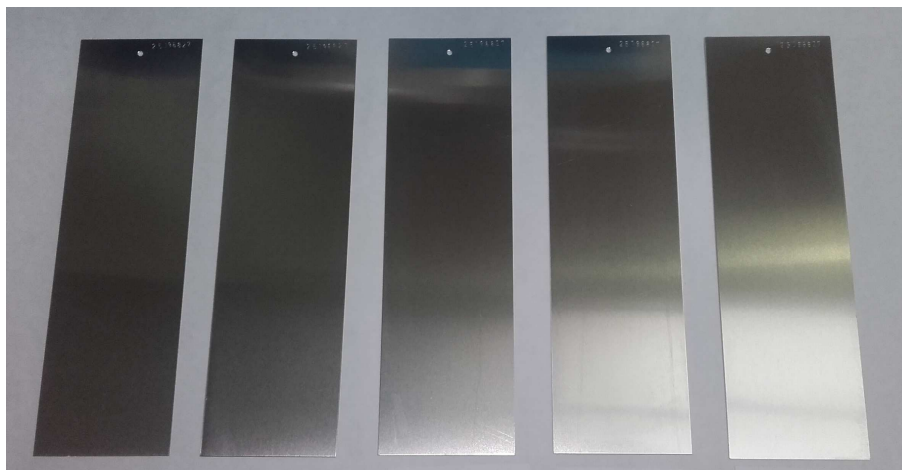


*Obr. č.22: Vzorky z mat. 7075 po eloxu v kyselině sírové*



### 6.5.3. Anodická oxidace v kyselině borité

I v případě anodické oxidace v kyselině borité byl použit stejný postup jako v předešlých případech byly vzorky z materiálu 2024 obr. č.23 a 7075 obr. č.24 odmaštěny metyl etyl ketonem a zavěšeny do hliníkové spirály. Anodizováno bylo také 5 kusů vzorků od každého materiálu a na závěr byl povlak utěsněn v horké demineralizované vodě.



*Obr. č.23: Vzorky mat. 2024 před eloxem*



*Obr. č.24: Vzorky mat. 7075 před eloxem*



Anodická oxidace v kyselině borité byla provedena podle technologického postupu *tab. č.12:*

	Čas [minuty]	Teplota [°C]	Napětí [V]
Alkalické odmaštění	12	54,8	-
Oplach 1°	2	-	-
Oplach 1°	4	-	-
Deoxidace	7	-	-
Oplach 1°	4	-	-
Oplach 1°	8	-	-
Anodická oxidace v kyselině borité	22,5	28,1	15,0
Oplach 1°	2	-	-
Oplach 1°	4	-	-
Utěsnění v demineralizované vodě	25,2	90,5	-
Sušení	120	Teplota místnosti	-

*Tab. č.12: Technologický postup anodické oxidace v kyselině borité*

Chemické složení lázní dle *tab. č .5,6 a 13:*

Anodická oxidace v kyselině borité	Koncentrace
Kyselina sírová	43,0 g.l <sup>-1</sup>
Kyselina boritá	8,16 g.l <sup>-1</sup>
Al	4,18 g.l <sup>-1</sup>
Cl <sup>-</sup>	< 10 ppm
F <sup>-</sup>	2 ppm

*Tab. č.13: Chemické složení lázně kyseliny borité*



Na závěr technologického postupu byla na vzorcích provedena vizuální kontrola povlaku. Povlak byl souvislý bez poškození a napálených míst. Dále byla změřena tloušťka anodické vrstvy *tab. č.14* a *obr.č.25,26* přístrojem Fischer Dualscope FMP-40. Měření bylo provedeno na pěti bodech každého vzorku a výsledná hodnota byla vyhodnocena jako průměr naměřených hodnot.

č. vzorku Materiál	1	2	3	4	5	Průměr ze všech vzorků
2024	1,8	1,6	2,4	2,3	1,9	<b>2,0</b>
7075	3,2	3,6	3,5	3,8	3,3	<b>3,5</b>

*Tab. č.14: Tloušťky eloxu kyseliny borité*



*Obr. č.25: Vzorky z mat. 2024 po eloxu v kyselině borité*



*Obr. č.26: Vzorky z mat. 7075 po eloxu v kyselině borité*



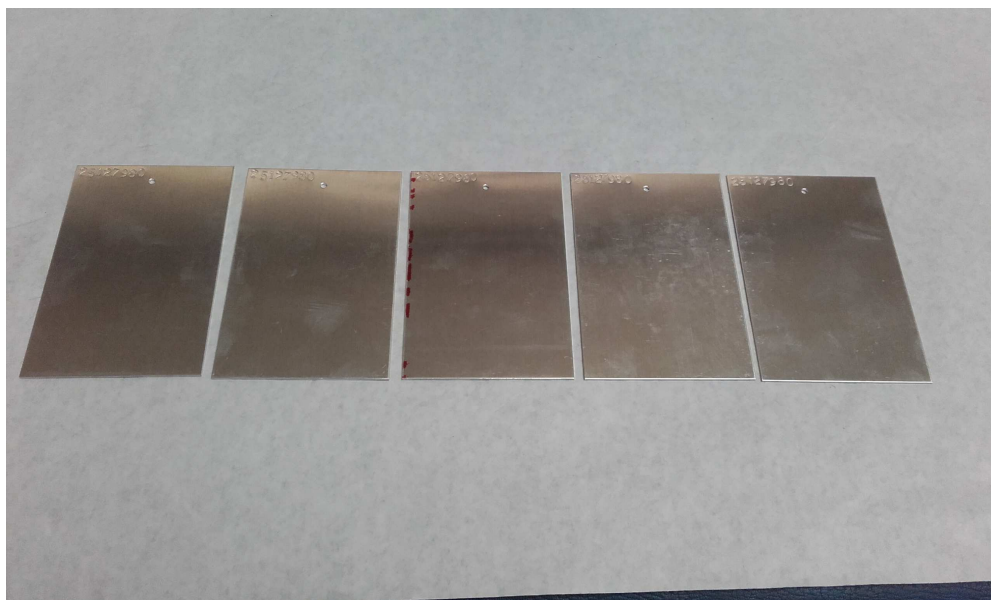
#### 6.5.4. Anodická oxidace v kyselině vinné

Jelikož vzorky pro anodickou oxidaci v kyselině vinné nebyly kompletně zpracovávány v automatické lince, byla anodizace pro korozní zkoušku provedena na dvě dávky pro každý materiál (2 + 3 vzorky). Protože se jedná o technologii, která je nově zaváděna, byly připojeny ke korozní zkoušce další dva testy. Váhový test a zkouška přilnavosti základního laku. V těchto případech byly vzorky již anodizovány společně, protože pro testy jsou vyžadovány 3 kusy.

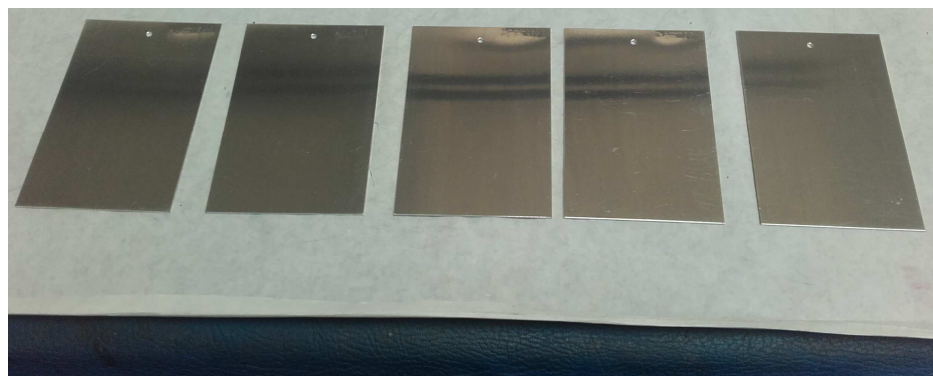
V průběhu zpracování vzorků jsem použil anodickou linku, kromě anodické oxidace, která byla provedena v galvanickém stole. U váhového testu a zkoušky přilnavosti není vyžadováno utěsnění, z tohoto důvodu byl proces ukončen závěrečným oplachem a sušením.

##### a) Vzorky pro korozní zkoušku

V případě anodické oxidace v kyselině vinné byly také použity vzorky z materiálu 2024 obr. č.27 a 7075 obr. č.28. Vzorky byly odmaštěny metyl etyl ketonem a zavěšeny do hliníkové spirály. Anodizováno bylo celkem 5 kusů vzorků od každého materiálu.



*Obr. č.27: Vzorky mat. 2024 před eloxem*



Obr. č.28: Vzorok mat. 7075 před eloxem

Anodická oxidace v kyselině vinné byla provedena podle technologického postupu tab. č.15:

	Čas [minuty]	Teplota [°C]	Napětí [V]
Alkalické odmaštění	15	55,1	-
Oplach 1°	5	-	-
Oplach 1°	5	-	-
Deoxidace	8	-	-
Oplach 1°	5	-	-
Oplach 1°	5	-	-
Anodická oxidace v kyselině vinné	25	37,1	14,0
Oplach 1°	5	-	-
Oplach 1°	5	-	-
Utěsnění v demineralizované vodě	25,0	90,1	-
Sušení	15	40,6	-

Tab. č.15: Technologický postup anodické oxidace v kyselině vinné

Chemické složení lázni dle tab. č.5,6 a 16:





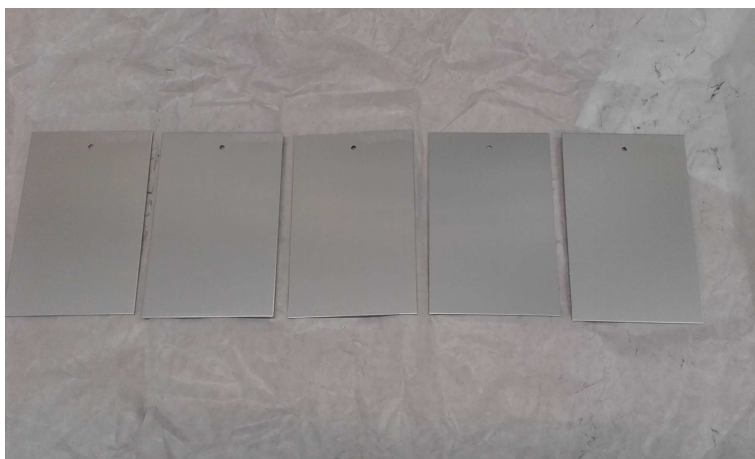
Anodická oxidace v kyselině vinné	Koncentrace
Kyselina sírová	41,2 g.l <sup>-1</sup>
Kyselina vinná	79,2 g.l <sup>-1</sup>
Al	1,2 g.l <sup>-1</sup>
Cl <sup>-</sup>	< 10 ppm

Tab. č.16: Chemické složení lázně kyseliny vinné

Na závěr technologického postupu byla na vzorcích provedena vizuální kontrola povlaku. Povlak byl souvislý bez poškození a napálených míst. Dále byla změřena tloušťka anodické vrstvy tab. č.17 a obr.č.29,30 přístrojem Fischer Dualscope FMP-40. Měření bylo provedeno na pěti bodech každého vzorku a výsledná hodnota byla vyhodnocena jako průměr naměřených hodnot.

č. vzorku Materiál	1	2	3	4	5	Průměr ze všech vzorků
2024	3,9	2,7	3,3	4,1	2,8	<b>3,4</b>
7075	4,8	5,3	4,7	5,6	4,5	<b>5,0</b>

Tab. č.17: Tloušťky eloxu kyseliny vinné



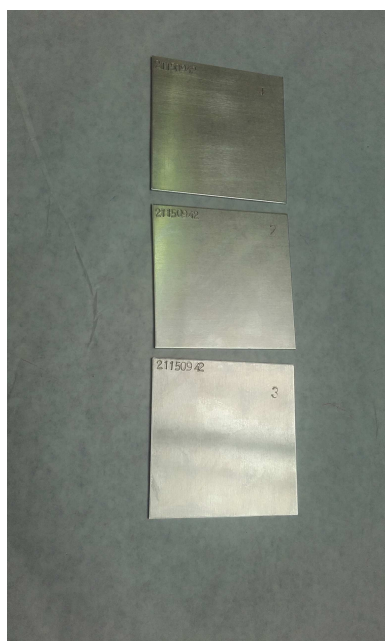
Obr. č.29: Vzorky z mat. 2024 po eloxu v kyselině vinné



*Obr. č.30: Vzorky z mat. 7075 po eloxu v kyselině vinné*

b) Vzorky pro váhový test

Pro váhový test anodické oxidace v kyselině vinné byly také použity vzorky z materiálu 2024 obr. č.31 a 7075 obr. č.32.. Vzorky byly odmaštěny metyl etyl ketonem a zavěšeny do hliníkové spirály. Anodizovány byly celkem 3 kusy vzorků od každého materiálu.



*Obr. č.31: Vzorky pro váhový test mat.2024 Obr. č.32: Vzorky pro váhový test mat.7075*



Anodická oxidace v kyselině vinné byla provedena podle technologického postupu *tab. č.18*:

	Čas [minuty]	Teplota [°C]	Napětí [V]
Alkalické odmaštění	15	55,3	-
Oplach 1°	5	-	-
Oplach 1°	5	-	-
Deoxidace	8	-	-
Oplach 1°	5	-	-
Oplach 1°	5	-	-
Anodická oxidace v kyselině vinné	25,2	37,3	14,2
Oplach 1°	5	-	-
Oplach 1°	5	-	-
Sušení	16,2	41,2	-

*Tab. č.18: Technologický postup anodické oxidace v kyselině vinné*

Chemické složení lázní pro elox v kyselině vinné bylo stejné dle *tab. č.5,6 a 16*.

Na závěr technologického postupu byla na vzorcích provedena vizuální kontrola povlaku. Povlak byl souvislý bez poškození a napálených míst. Dále byla změřena tloušťka anodické vrstvy *tab. č.19 a obr.č.33* přístrojem Fischer Dualscope FMP-40. Měření bylo provedeno na pěti bodech každého vzorku a výsledná hodnota byla vyhodnocena jako průměr naměřených hodnot.

č. vzorku Materiál	1	2	3	4	5	Průměr ze všech vzorků
2024	4,5	2,7	4,2	4,1	3,6	<b>3,8</b>
7075	4,9	5,4	6,0	4,8	4,2	<b>5,1</b>

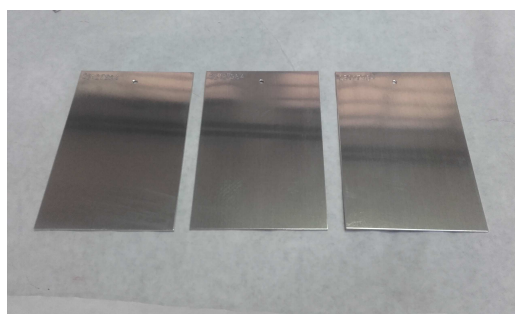
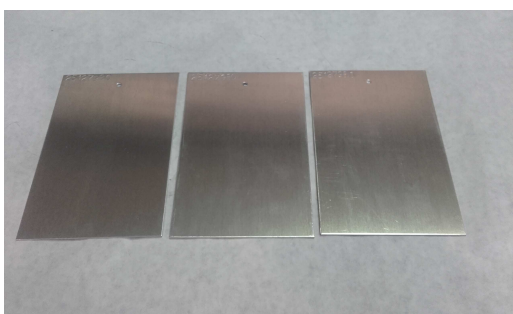
*Tab. č.19: Tloušťky eloxu kyseliny vinné*



*Obr. č.33: Vzorky po eloxu v kyselině vinné*

c) Vzorky pro zkoušku přilnavosti základního laku

Pro zkoušku přilnavosti základního laku anodické oxidace v kyselině vinné byly rovněž použity vzorky z materiálu 2024 *obr. č.34* a 7075 *obr. č.35*. Vzorky byly odmaštěny metyl etyl ketonem a zavěšeny do hliníkové spirály. Anodizovány byly celkem 3 kusy vzorků od každého materiálu.



*Obr. č.34: Vz. Mat.2024 po elox. v kys.vinné*    *Obr.č.35: Vz. Mat.7075 po elox. v kys.vinné*

Anodická oxidace v kyselině vinné byla provedena podle techn. postupu *tab. č .18*:

Chemické složení lázně pro elox v kyselině vinné bylo stejné dle *tab. č .5,6 a 16*.

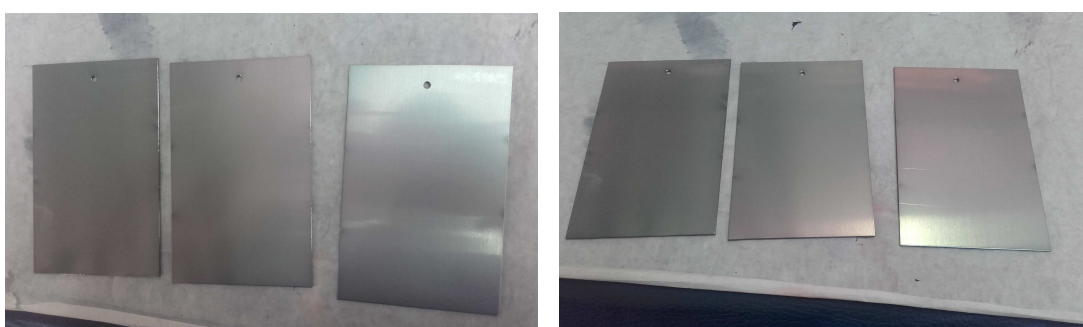
Na závěr technologického postupu byla na vzorcích provedena vizuální kontrola povlaku. Povlak byl souvislý bez poškození a napálených míst a změřena tloušťka anodické vrstvy *tab. č .20* a *obr.č.36,37* přístrojem Fischer Dualscope FMP-40. Měření bylo provedeno na



pěti bodech každého vzorku a výsledná hodnota byla vyhodnocena jako průměr naměřených hodnot.

č. vzorku Materiál	1	2	3	4	5	Průměr ze všech vzorků
2024	4,2	3,2	3,9	4,0	2,8	<b>3,6</b>
7075	4,8	5,5	5,1	5,2	4,3	<b>5,0</b>

Tab. č.20: Tloušťky eloxu kyseliny vinné



Obr. č.36: Vz.po eloxu kys.vinné mat.2024 Obr. č.37: Vz.po eloxu kys.vinné mat.7075

Specifikace APII 02-01-002 [11] předepisuje pro zkoušku přilnavosti aplikovat základní barvu Aerowave 2001. Jedná se dvousložkovou epoxidovou základní barvu s míchacím poměrem 3:1.

Barva byla aplikována při teplotě 21°C a relativní vlhkosti 50,5 %. Po aplikaci barvy byl lak vytvrzen v peci při teplotě 80°C po dobu 30 minut.

Na vzorcích byla opět provedena vizuální kontrola obr.č.38,39 a změřena tloušťka základní barvy tab. č .21. Měření bylo provedeno na pěti bodech každého vzorku a výsledná hodnota byla vyhodnocena jako průměr naměřených hodnot.

č. vzorku Materiál	1	2	3	Průměr ze všech vzorků
2024	17,5	19,6	19,1	<b>18,7</b>
7075	18,4	18,1	19,3	<b>18,6</b>

Tab. č.21:Tloušťka základní barvy



*Obr. č.38: Vzorok po aplikaci základní barvy mat. 2024*

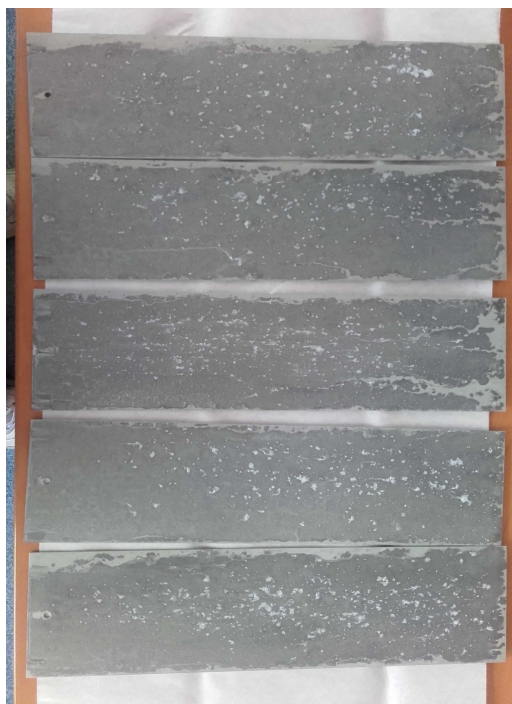


*Obr. č.39: Vzorok po aplikaci základní barvy mat. 7075*

## **6.6. Vyhodnocení zkoušek**

### **6.6.1. Výsledek zkoušky po anodické oxidaci v kyselině chromové**

Korozní zkouška v anodické oxidaci v kyselině chromové splnila požadovaný limit vystavení vzorků v solné mlze v minimálním čase 336 hodin dle MIL-A-8625 [5] pro oba druhy materiálů. Vystavení v solné mlze bylo ukončeno po expozici 1440 hodin při identifikaci prvního korozního bodu. Obrázky *obr.č.40,41* pro materiál 2024 a obrázky *obr.č.42,43* pro materiál 7075. Vzorok byly opláchnuty pod tekoucí vodou a vysušeny stlačeným vzduchem. Korozní body jsou zvýrazněny v barevném ohraničení.



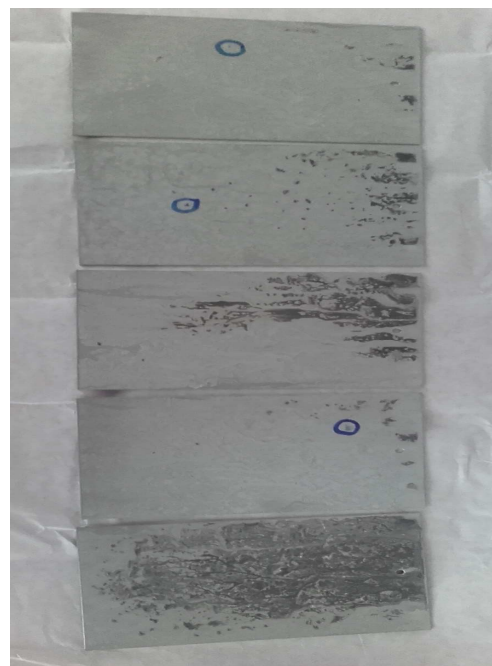
*Obr. č.40: Vz. mat.2024 po ex. 1440 hodin*



*Obr. č.41: Vz. mat.2024 po ex. 1440 hodin*



*Obr. č.42: Vz. mat.7075 po ex. 1440 hodin*

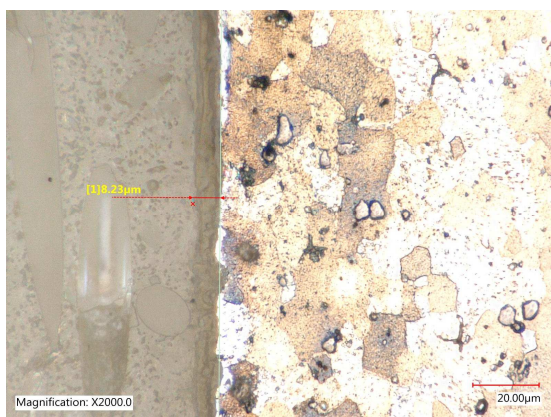


*Obr. č.43: Vz. mat.7075 po ex. 1440 hodin*

Po vyhodnocení korozní zkoušky byl proveden na jednom vzorku od každého materiálu metalografický výbrus za účelem vyhodnocení tloušťky anodického povlaku a porovnání měření tloušťky s metodou nedestruktivní. Mikroskopem Keyence VHX5000 bylo při



zvětšení 2000 x naměřena tloušťka anodické vrstvy 8,23  $\mu\text{m}$  pro materiál 2024 *obr.č.44*. V případě materiálu 7075 byly hodnota anodické vrstvy naměřena 7,6  $\mu\text{m}$  *obr.č.45* při zvětšení 1000 x.



*Obr. č.44: Tloušťka eloxu mat.2024*



*Obr. č.45: Tloušťka eloxu mat.7075*

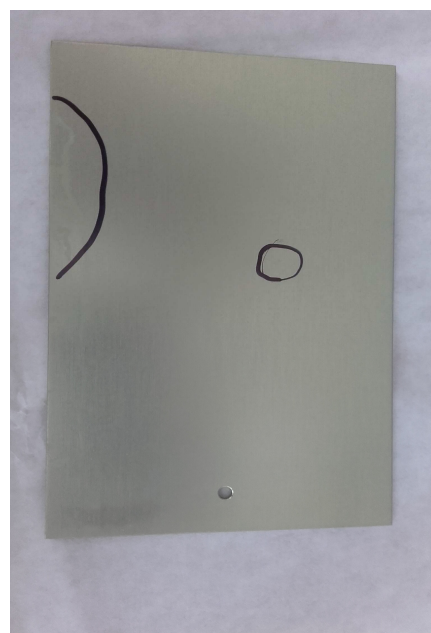
### 6.6.2. Výsledek zkoušky po anodické oxidaci v kyselině sírové

Korozní zkouška v anodické oxidaci v kyselině sírové také splnila požadovaný limit vystavení vzorků v solné mlze v minimálním čase 336 hodin dle MIL-A-8625 [5] pro oba druhy materiálů. Vystavení v solné mlze bylo ukončeno po expozici 629 hodin při identifikaci prvního korozního bodu pouze pro materiál 7075 *obr.č.47,48*. V případě materiálu 2024 nebyla expozice přerušena, jelikož po **4071 hodinách** nebyl identifikován žádný korozní bod *obr.č.46*. Vzorky byly opláchnuty pod tekoucí vodou a vysušeny stlačeným vzduchem. Korozní body jsou zvýrazněny v barevném ohraničení.



*Obr. č.46: Vzorek mat 2024 bez přerušlení expozice po 4071 hodinách*





Obr. č.47: Vz. mat.7075 po ex. 629 hodin      Obr. č.48: Vz. mat.7075 po ex. 629 hodin

Po vyhodnocení korozní zkoušky byl proveden na jednom vzorku na materiálu 7075 metalografický výbrus za účelem vyhodnocení tloušťky anodického povlaku a porovnání měření tloušťky s metodou nedestruktivní. Mikroskopem Keyence VHX5000 bylo při zvětšení 500 x naměřena tloušťka anodické vrstvy 41,6  $\mu\text{m}$  pro materiál 7575 obr.č.49. V případě materiálu 2024 metalografický výbrus proveden nebyl z důvodu pokračování expozice vzorků v solné mlze.



Obr. č.49: Tloušťka eloxu mat.7075

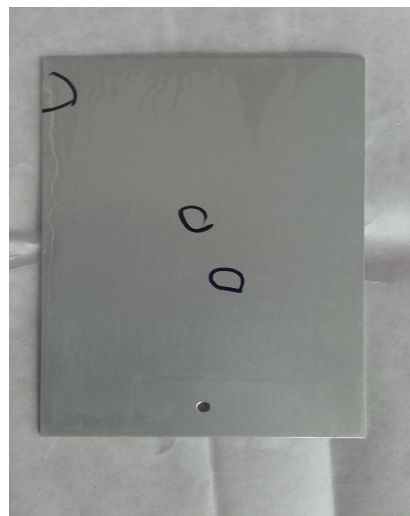


### 6.6.3. Výsledek zkoušky po anodické oxidaci v kyselině borité

Korozní zkouška v anodické oxidaci v kyselině borité splnila rovněž požadovaný limit vystavení vzorků v solné mlze v minimálním čase 336 hodin dle MIL-A-8625 [5] pro oba druhy materiálů. Vystavení v solné mlze bylo ukončeno po expozici 1661 hodin pro materiál 2024 po identifikaci prvního korozního bodu *obr.č.50,51*. Pro materiál 7075 byla expozice ukončena po 1181 hodinách *obr.č.52,53*. Vzorky byly opláchnuty pod tekoucí vodou a vysušeny stlačeným vzduchem. Korozní body jsou zvýrazněny v barevném ohraničení.



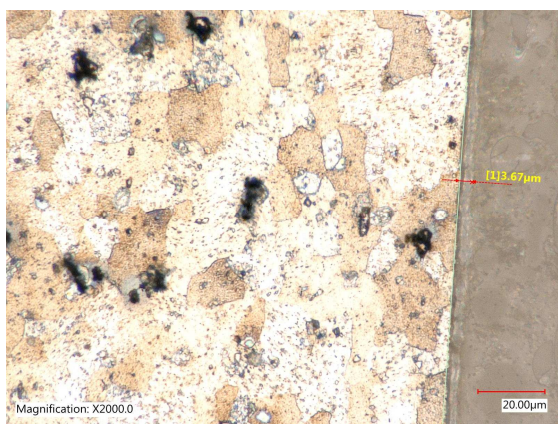
*Obr. č.50:Vz. mat.2024 po ex. 1661hodin Obr. č.51:Vz. mat.2024 po ex. 1661hodin*



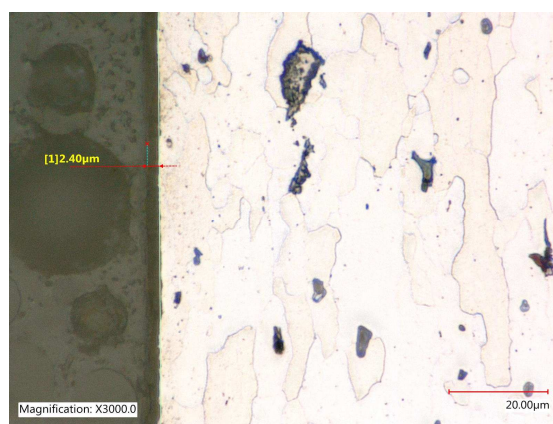
*Obr. č.52:Vz. mat.7075 po ex. 1181hodin Obr. č.53:Vz. mat.7075 po ex. 1181hodin*



Po vyhodnocení korozní zkoušky byl proveden na jednom vzorku od každého materiálu metalografický výbrus za účelem vyhodnocení tloušťky anodického povlaku a porovnání měření tloušťky s metodou nedestruktivní. Mikroskopem Keyence VHX5000 bylo při zvětšení 2000 x naměřena tloušťka anodické vrstvy 3,67  $\mu\text{m}$  pro materiál 2024 *obr.č.54*. V případě materiálu 7075 byly hodnota anodické vrstvy naměřena 2,4  $\mu\text{m}$  *obr.č.55* při zvětšení 3000 x.



*Obr. č.54: Tloušťka eloxu mat.2024*

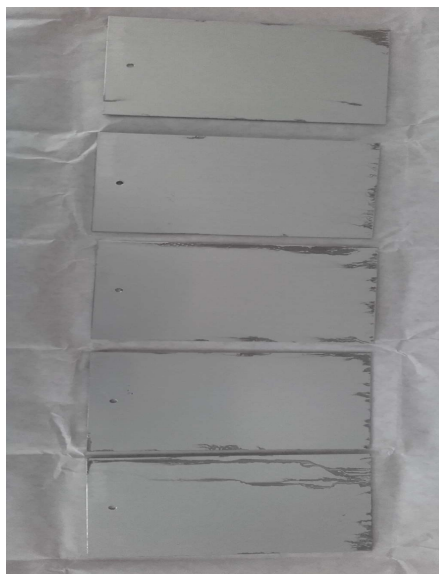


*Obr. č.55: Tloušťka eloxu mat.7075*

#### **6.6.4. Výsledek zkoušky po anodické oxidaci v kyselině vinné**

##### a) Korozní zkouška

I Korozní zkouška nově zaváděné anodické oxidace v kyselině vinné splnila rovněž požadovaný limit vystavení vzorků v solné mlze v minimálním čase 336 hodin dle MIL-A-8625 [5] pro oba druhy materiálů. Vystavení v solné mlze bylo ukončeno po expozici 1008 hodin pro oba materiály po identifikaci prvního korozního bodu *obr.č.56,57,58 a 59*. Vzorky byly opláchnuty pod tekoucí vodou a vysušeny stlačeným vzduchem. Korozní body jsou zvýrazněny v barevném ohraničení.



*Obr. č.56: Vz. mat.2024 po ex. 1008 hodin*



*Obr. č.57: Vz. mat.2024 po ex. 1008 hodin*

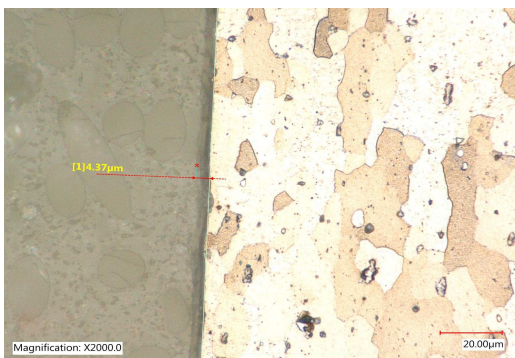


*Obr. č.58: Vz. mat.7075 po ex. 1008 hodin*



*Obr. č.59: Vz. mat.7075 po ex. 1008 hodin*

Po vyhodnocení korozní zkoušky byl proveden na jednom vzorku od každého materiálu metalografický výbrus za účelem vyhodnocení tloušťky anodického povlaku a porovnání měření tloušťky s metodou nedestruktivní. Mikroskopem Keyence VHX5000 bylo při zvětšení 2000 x naměřena tloušťka anodické vrstvy 4,37  $\mu\text{m}$  pro materiál 2024 *obr.č.60*. V případě materiálu 7075 byla hodnota anodické vrstvy naměřena 10,29  $\mu\text{m}$  *obr.č.61* při zvětšení 2000 x.



Obr. č.60: Tloušťka eloxu mat.2024



Obr. č.61: Tloušťka eloxu mat.7075

## b) Váhový test

Váhový test byl proveden dle specifikace ASTM B 137 [6]. Na vzorcích byly provedena anodická oxidace bez utěsnění. Vzorky byly zváženy a následně byl odstraněn povlak. Vzorky byly opět zváženy a hmotnost povlaku vypočtena dle vzorce (5). Všechny hodnoty jsou zaznamenány v *tab.22* pro materiál 2024 a v *tab.23* pro materiál 7075. Oba dva výsledky jsou vyhovující a splňují požadavek specifikace AIPI 02-01-002 [11] min. 22 mg.dm<sup>-2</sup>.

$$Hmotnost = \frac{\text{Počáteční váha vzorku} - \text{Konečná váha vzorku}}{\text{Plocha vzorku}} \cdot 1000 \quad (5)$$

Vzorek č.	Počáteční váha vzorku [g]	Konečná váha vzorku [g]	Plocha vzorku [dm <sup>2</sup> ]	Hmotnost [mg/dm <sup>2</sup> ]
1	25,80345	25,73876	1,2044	53,7092
2	25,87737	25,81455	1,2060	52,0895
3	25,83648	25,77312	1,2060	52,5373
<b>Průměr</b>				<b>52,78</b>

Tab. č.22: Výsledek váhového testu pro mat. 2024

Vzorek č.	Počáteční váha vzorku [g]	Konečná váha vzorku [g]	Plocha vzorku [dm <sup>2</sup> ]	Hmotnost [mg/dm <sup>2</sup> ]
1	25,94999	25,85938	1,2073	75,0548
2	25,70001	25,60823	1,2054	76,1415
3	25,82754	25,73767	1,2057	74,5381
<b>Průměr</b>				<b>75,24</b>

Tab. č.23: Výsledek váhového testu pro mat. 7075



c) Zkouška přilnavosti základní laku

Zkouška přilnavosti základního laku byla provedena dle ČSN EN ISO 2409 [12] a splnila požadavek klasifikace 0 dle *tab. I* pro oba dva typy materiálů. Na každý vzorek bylo řezným nástrojem provedeno šest řezů a následně dalších šest řezů vedených kolmo na sebe. Tím se vytvořila mřížka. Tyto mřížky byly vyříznuty na každý vzorek tři. Na vyřezané mřížky byla přilepena páska 3M250 a přitlačena pomocí dlaně. Po odtržení pásky nedošlo k žádnému odtržení barvy od základního materiálu *obr.č.62,63,64 a 65*.



*Obr. č.62: Test přilnavosti pro mat. 2024*



*Obr. č.63: Test přilnavosti pro mat. 2024*



*Obr. č.64: Test přilnavosti pro mat. 7075*



*Obr. č.65: Test přilnavosti pro mat. 7075*



## 7. Technicko-ekonomické zhodnocení anodických oxidací

### 7.1. Vyhodnocení zkoušek korozní odolnosti

Dle dosažených výsledků *tab. č.24* lze konstatovat, že všechny zkoušky použitých technologií byly vyhovující.

Z tabulky *tab. č.24* je zřejmé, že z hlediska korozní odolnosti má nejlepší výsledek anodická oxidace v kyselině sírové u materiálu 2024, kde zkouška nebyla ukončena a vzorky jsou nadále vystaveny solné mlze. Velmi nízkou korozní odolnost u anodické oxidace v kyselině sírové pro materiál 7075 přičítám přítomnosti vměstků ve vzorku, což je v poslední době častý problém při výběru vzorků pro periodické zkoušky a následné vyhodnocení. Dalším důkazem přítomnosti vměstků je nejvyšší dosažená tloušťka anodického povlaku. V tomto případě byla nejvyšší ze všech eloxů 31,5  $\mu\text{m}$ . Při takto silné anodické vrstvě by k identifikaci korozního bodu mělo dojít podstatně dříve.

Shodně nejnižší výsledky korozní odolnosti u obou materiálů vykazuje anodická oxidace v kyselině vinné. Přestože specifikace stanoví minimální odolnost v solní mlze 336 hodin a to při přibližně stejné tloušťce anodického povlaku.

Typ anodizace	Materiál vzorku	Stav vzorků	Počet hodin v solné komoře
Elox v kyselině chromové	2024	ukončeno	1440
	7075	ukončeno	1440
Elox v kyselině sírové	2024	založeno v sol. komoře	více než 4071, stále založeno
	7075	ukončeno	629
Elox v kyselině borité	2024	ukončeno	1661
	7075	ukončeno	1181
Elox v kyselině vinné	2024	ukončeno	1008
	7075	ukončeno	1008

*Tab. č .24: Výsledek korozních zkoušek*



## 7.2. Porovnání tloušťky anodických povlaků

Výsledky porovnání destruktivní a nedestruktivní metody měření anodického povlaku jsou dosti rozdílné *tab. č.25* Nejnižší rozdíl byl naměřen u anodické oxidace kyseliny borité. Celkově lze konstatovat, že povlaky povrchových ochranných jsou pro přesné měření nedestruktivní metodou velmi tenké a povlak u jednotlivých eloxů není souvislý. To dokazuje také metalografické vyhodnocení jednotlivých vzorků.

Typ anodizace	Materiál vzorku	Tloušťka eloxu nedestruktivně [ $\mu\text{m}$ ]	Tloušťka eloxu destruktivně [ $\mu\text{m}$ ]
Elox v kyselině chromové	2024	2,4	8,2
	7075	3,0	7,6
Elox v kyselině sírové	2024	11,9	x
	7075	31,5	41,6
Elox v kyselině borité	2024	2,0	3,7
	7075	3,5	2,4
Elox v kyselině vinné	2024	3,4	4,4
	7075	5,0	10,3

*Tab. č.25: Tloušťky anodické vrstvy*

## 7.3. Vyhodnocení váhového testu

Výsledek váhového testu pro materiál 2024 byl naměřen  $52,78 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-2}$ . Tato hodnota překračuje více než 2 krát požadovaný limit  $22 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-2}$  a je vyhovující dle specifikace AIPI 02-01-002 [11].

Výsledek váhového testu pro materiál 7075 byl naměřen  $75,24 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-2}$ . Tato hodnota překračuje více než 3 krát požadovaný limit  $22 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-2}$  a je také vyhovující dle specifikace AIPI 02-01-002 [11].

## 7.4. Vyhodnocení zkoušky přilnavosti základního laku

Se zkouškou přilnavosti základního laku nebyl v průběhu zpracování vzorků vůbec žádný problém a výsledek 0 dle *tab.1* dokazuje, že přilnavost mezi anodickým povlakem kyseliny vinné a základním lakem je velmi dobrá.





## 7.5. Ekonomické zhodnocení

Přestože jsou jednotlivé technologie velmi podobné, jsou vidět patrné rozdíly, ke kterým lze přihlídnout při výběru vhodné anodické oxidace pro ochranu dílů v leteckém průmyslu.

Protože předúprava jednotlivých technologií je přibližně stejná, je porovnání zaměřeno na ceny eloxační lázně:

1. Lázeň pro anodickou oxidaci v kyselině chromové je složena pouze z oxidu chromového. Při ceně 105 Kč/kg, koncentrace 65 g.l<sup>-1</sup> a objemu vany 11 800 m<sup>3</sup> činí cena náplně 80 535 Kč.
2. Lázeň pro anodickou oxidaci v kyselině sírové je složena také pouze z jednoho komponentu a to kyseliny sírové. Při ceně 14 Kč/kg, koncentrace 195 g.l<sup>-1</sup> a objemu vany 11 800 m<sup>3</sup> činí cena náplně 32 214 Kč.
3. Lázeň pro anodickou oxidaci v kyselině borité je složena ze dvou komponentů a to kyseliny sírové a kyseliny borité. Lázeň má ze všech technologií nejnižší koncentraci. Při ceně 14 Kč/kg, koncentrace 43 g.l<sup>-1</sup> a objemu vany 11 800 m<sup>3</sup> je cena za kyselinu sírovou 7 103 Kč. Při ceně 118 Kč/kg, koncentrace 8,16 g.l<sup>-1</sup> a objemu vany 11 800 m<sup>3</sup> je cena za kyselinu boritou 11 328 Kč. Celkem cena náplně činí 18 431 Kč.
4. Lázeň pro anodickou oxidaci v kyselině vinné je složena také ze dvou komponentů a to kyseliny sírové a kyseliny vinné. Při ceně 14 Kč/kg, koncentrace 41,2 g.l<sup>-1</sup> a objemu vany 11 800 m<sup>3</sup> je cena za kyselinu sírovou 6 804 Kč. Při ceně 275 Kč/kg, koncentrace 79,2 g.l<sup>-1</sup> a objemu vany 11 800 m<sup>3</sup> je cena za kyselinu vinnou 256 850 Kč. Celkem cena náplně činí 263 654 Kč.

Dle výše cenového zhodnocení je nejvýhodnější lázeň kyseliny borité *tab. č.26.*

Pořadí	Název	Cena [ Kč ]
1	Lázeň kyseliny borité	18 431
2	Lázeň kyseliny sírové	32 214
3	Lázeň kyseliny chromové	80 535
4	Lázeň kyseliny vinné	263 654

*Tab. č.26: Ceny jednotlivých lázní*



Dalším faktorem pro ekonomické zhodnocení lze porovnat pracovní časy jednotlivých technologií, provozní napětí a teploty. Stejně jako při cenovém ohodnocení roztoků je i v tomto případě porovnání zaměřeno pouze na parametry lázní jednotlivých eloxů *tab. č.27*.

Elox v kyselině chromové			Elox v kyselině sírové			Elox v kyselině borité			Elox v kyselině vinné		
Doba [min.]	Teplota [°C]	Napětí [V]	Doba [min.]	Teplota [°C]	Napětí [V]	Doba [min.]	Teplota [°C]	Napětí [V]	Doba [min.]	Teplota [°C]	Napětí [V]
60	36	22	48	20	16	22,5	28	15	25	37	14

*Tab. č.27*

Z tabulky *tab. č.27* je zřejmé, že nejvýhodnější z hlediska parametrů je anodická oxidace v kyselině borité. Doba anodizace je nejkratší, s hodnotou napětí 15 voltů (2. pořadí) a s teplotou 28 °C, která je nejbližší k teplotě okolí. K úspoře energie je nutné připočítat také absenci sušení dílů v sušárně a ponechání dílů k vysušení při pokojové teplotě. Ostatní eloxy jsou náročné na ohřev, nebo naopak chlazení s delší dobou anodizace.



## 8. Závěr

Závěrem mohu konstatovat, že pokud lze volit anodickou oxidaci na základě požadavku korozní odolnosti, jednoznačně nejlepší volba je anodizace v kyselině sírové, která vysoce převyšuje požadavky na korozní odolnost a jedná se o ekologickou technologii. Bohužel je ekonomicky patří mezi náročnější technologie a má konstrukční omezení v podobě silnější anodické vrstvy. To omezuje použití dílů z hlediska tolerovaných rozměrů a pružnosti. Také není vhodná v leteckém průmyslu pro namáhané díly, jelikož zvyšuje únavu materiálu.

Z ekonomického hlediska je nejvýhodnější aplikovat anodickou oxidaci v kyselině borité, která má nejnižší ekonomické náklady, splňuje požadavky protikorozní odolnosti a má nejmenší tloušťku anodického povlaku. Splňuje také požadavek absence šestimocného chromu. Bohužel její použití je v celosvětovém měřítku vytlačováno anodickou oxidací v kyselině vinné.

Kyselina vinná jako náhrada za technologii se šestimocným chromem se ukázala jako ekonomicky nejméně výhodná technologie s nejhorší protikorozní odolností, ale nezvyšuje únavu materiálu a bez přítomnosti šestimocného chromu, splňuje i environmentální aspekt.



## 9. Seznam zdrojů a použité literatury

### 9.1. Literatura

- [1] KREIBICH, Viktor a Vladislava OSTRÁ. Chyby při eloxování hliníku a jeho slitin. *Povrcháři* [online]. 2009, č.3, s.3 – 4 [cit. 2013-03-31]. ISSN 1802-9833.  
Dostupné z: [http://www.povrchari.cz/ke-stazeni/200903\\_povrchari.pdf](http://www.povrchari.cz/ke-stazeni/200903_povrchari.pdf)
- [2] ROZMÁNEK, Miloslav a Vladislava OSTRÁ, Tvrdá anodická oxidace hliníku a jeho slitin. *Povrcháři* [online]. 2008, č.1, s. 4.  
Dostupné z: [http://www.povrchari.cz/kestazeni/200801\\_povrchari.pdf](http://www.povrchari.cz/kestazeni/200801_povrchari.pdf)
- [3] Interpretace určená výrobcům pro prokázání shody s EWF certifikačním schématem pro EN 729, CWS ANB/EWF Doc.487/02, prosinec 2003  
Dostupné z: <http://www.domzo13.cz/dokumenty/487-02cz.pdf>
- [4] ECHA, EUROPEAN CHEMICALS AGENCY, Porozumět nařízení REACH,  
Dostupné z: <http://echa.europa.eu/cs/regulations/reach/understanding-reach>
- [13] BARTONÍČEK, R. a kol., Koroze a protikoroze ochrana kovů, 1. Vydání, Praha: Academia, 1966, 720 s
- [14] SKÝBA, P., Diplomová práce, Hodnocení koroze u vybraných typů hliníkových slitin pro letecký průmysl, BENO 2010
- [15] Koroze Al a jeho slitin, dostupné na:  
<http://147.229.68.79/uete/predmety/SKLM/koroze.pdf?PHPSESSID=c46009ca213ccb7bb1a5e68978ec5344>
- [16] HRUBÝ, V., TULKA, J., Koroze a ochrana materiálů, Brno: Vojenská akademie Brno, 1997, 140 s.
- [17] ČERNÝ, M. A KOLEKTIV, Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů, 1. vydání, Praha SNTL, 1984, 264 s, DT 620.193:669.018.
- [18] MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OCENÁŠEK, V., KORENÝ, R., DRÁPALA, J., SCHNEIDER, H., MIŠKUFOVÁ, A., a kol., Encyklopedie hliníku, Prešov 2005, ISBN80-89041-88-4



## 9.2. Normy

- [5] MIL-A-8625F MILITARY SPECIFICATION, ANODIC COATING FOR ALUMINIUM AND ALUMINIUM ALLOYS, WBDG  
Dostupné z: <http://www.wbdg.org/ccb/FEDMIL/a8625.pdf>
- [6] ASTM B 137-95 (2014) Standard Test Method for Measurement of Coating Mass Per Unit Area on Anodically Coated Aluminum
- [7] ASTM B 117-11 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus
- [8] AVN 36060 Anodická oxidace v kyselině sírové
- [9] AVN 36006 Anodická oxidace v kyselině borité
- [10] AVN 36002 Anodická oxidace v kyselině chromové
- [11] AIPI 02-01-002 Tartaric Sulphuric Anodizing of aluminium alloys
- [12] ČSN EN ISO 2409 Nátěrové hmoty – Mřížková zkouška
- [19] I-41-0276 Metodika metalografické laboratoře