

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

Ústav strojírenské technologie



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Anodická oxidace hliníku a jeho slitin

**AUTOR PRÁCE**

**LEVON AIRAPETIAN**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

**Ing. JAN KUDLÁČEK, Ph.D**

PRAHA 2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro **Levona AIRAPETIANA**

Program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Název: Materiály vhodné pro anodickou oxidaci Al

Název anglicky: Al material suitable for anodizing

### Zásady pro vypracování:

1. Rozbor problematiky technologie anodické oxidace
2. Experimentální ověření eloxovatelnosti materiálů na bázi Al
3. Porovnání experimentálních výsledků s běžně dostupnými prameny

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Kudláček, Ph.D.

Konzultant: Ing. Zuzana Ficková

Datum zadání bakalářské práce: 30. 4. 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 19. 6. 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

*Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou nebo bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové nebo bakalářské práci.*

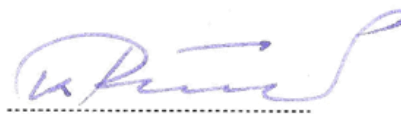
Zadání bakalářské práce převzal dne: 19. 6.



Student



Vedoucí ústavu  
Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE



Děkan  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.

V Praze

dne 30. 4. 2015

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zaměřuje na anodickou oxidaci hliníku a jeho slitin. Jako experimentální materiály byly použity hliníkové materiály různých tříd, vyrobené tvářením. Práce obsahuje údaje o chemickém složení jednotlivých základních materiálů, fotografie jejich mikrostruktury, fotografie anodizovaných vrstev, měření tloušťky vrstev oxidu, fotografie anodizovaných vrstev po barvení a měření barvy.

## **Klíčová slova**

Anodická oxidace, hliník a jeho slitiny, anodizace, vrstva oxidu.

## **Annotation**

This thesis focuses on the anodic oxidation of aluminum and its alloys. As experimental materials, various aluminum materials were used, which were produced by forming. The work contains information about chemical composition of the base materials, photographs of their microstructure, photographs of anodized layers, measurements of thickness of oxide layers, photographs of anodized layers after colouring and measurements of colour.

## **Keywords**

Anodic oxidation, aluminium and its alloys, anodization, oxide layer.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně. Veškerou literaturu a další zdroje, z nichž jsem při zpracování čerpal, v práci řádně cituji a jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

V Praze dne 30. 6. 2015

.....  
Levon Airapetian

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Kudláčkovi, Ph.D a Ing. Zuzaně Fickové za poskytnutí cenných rad a připomínek, vstřícnost a čas strávený konzultacemi. Také bych chtěl poděkovat Ing. Petru Rojkovi za konzultace, vedení a dohled nad mojí prací v laboratoři.

## Obsah

1. Úvod.....	9
2. Cíle práce.....	10
3. Anodická oxidace hliníku a jeho slitin .....	10
3.1 Využívané metody anodické oxidace hliníku a jeho slitin .....	11
3.1.1 Metoda kyseliny sírové H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	12
3.1.2 Metoda kyseliny chromové .....	13
3.1.3 Ostatní používané metody .....	14
3.1.4 Tvrdá anodická oxidace .....	14
3.2 Základní princip procesu .....	15
3.2.1 Základní chemický proces anodizace pro GS metodu .....	16
3.2.2 Fyzikální teorie tvorby anodizované oxidické vrstvy .....	17
3.2.3 Obecné vlastnosti a parametry oxidické vrstvy .....	18
3.3 Technologie anodické oxidace hliníku a jeho slitin .....	22
3.3.1 Mechanická předúprava .....	23
3.3.2 Chemická předúprava .....	23
3.3.3 Anodická oxidace .....	24
3.3.4 Dokončovací úpravy.....	26
3.4 Vliv chemického složení základního materiálu.....	28
3.5 Vady ve vrstvě vytvářené anodickou oxidací .....	28
3.5.1 Nevhodná volba základního materiálu.....	28
3.5.2 Technologické vady .....	28
3.6 Metody materiálového hodnocení anodizovaných oxidických vrstev.....	29
3.6.1 Zkouška mikrotvrdomosti .....	29
3.6.2 Profilová analýza .....	31
3.6.3 Měření tloušťky vrstvy .....	32
4. Experimentální část práce .....	33
4.1 Materiál použitý pro experiment .....	33

<b>4.2</b>	<b>Použitá experimentální technika.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3</b>	<b>Výsledky a diskuze experimentální práce.....</b>	<b>35</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Příprava vzorku pro experiment.....</b>	<b>35</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Pracovní podmínky a výsledky experimentu .....</b>	<b>37</b>
	<b>Závěr.....</b>	<b>42</b>
	<b>Seznam použitých zdrojů: .....</b>	<b>43</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>45</b>
	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>46</b>



## 1. Úvod

Hliník a jeho slitiny jsou poměrně mladým kovem v průmyslové činnosti. Jméno elementu je odvozeno z latiny. alumen - kamenec. [2] První hliník byl vytvořen dánským fyzikem Hansem Oerstedem v roce 1825. Průmyslová výroba byla zavedena až v roce 1886 Francouzem P.L. Heroltem a současně Američanem Ch. M. Hallem. Hliník byl do této doby cennější než zlato, až do zahájení průmyslového způsobu výroby. V roce 1889 Britové, kteří chtěli poctit velkého ruského chemika D.I. Mendělejeva bohatým dárkem, darovali vědci váhy ze zlata a hliníku. [1]

V dnešní době je běžnou metodou výroby hliníku proces Halla-Heroult, který spočívá v rozpuštění oxidu hlinitého  $Al_2O_3$  v tavenině kryolitu  $Na_3AlF_6$  a následující elektrolýze pomocí anody z koksu, nebo grafitové elektrody. Laboratorní metodu pro výrobu hliníku navrhnul Friedrich Wöhler v roce 1827. [1]

Hliník má velké množství výhodných vlastností jako: nízká hmotnost, dobrá tepelná a elektrická vodivost, odolnost proti korozi, dobré tvářecí vlastnosti, a v dnešní době je využíván ve všech výrobních odvětvích, například v dopravě, stavebnictví, letectví a přístrojové technice. Má však také vlastnosti negativní: nízká pevnost a otěruvzdornost. Vlastnosti hliníku lze zlepšovat povrchovými úpravami, nebo tepelným zpracováním, legováním. [2]

Hlavní povrchovou úpravou pro hliník a jeho slitiny je anodická oxidace. Při tomto procesu se vytvoří tenký povlak oxidu, který má dobrou korozní odolnost, barevnost a dekorační efekt, u tvrdého eloxu také vysokou tvrdost díky čemu bude mít nízkou otěruvzdornost.

Ostatní technologie povrchových úprav hliníku a jeho slitin používané ke zlepšení vlastností jsou: chromátování, práškové lakování aj.

Práškové lakování hliníku je efektivní metoda pro získání odolného polymerního povlaku na povrchu. Vrstva práškového laku má nejčastěji tloušťku 60-100  $\mu m$ . Tento způsob úpravy kovových konstrukcí nabízí atraktivní vzhled bez šmouh a prohlubní. Práškové laky mají vysokou elektrickou odolnost, jsou nárazu odolné a chrání povrch výrobku při teplotách od  $-60^{\circ}C$  do  $+150^{\circ}C$ . Tato technologie má řadu výhod: práškový lak nedegraduje na slunci a má jasné syté barvy. [5]

Chromátování hliníku a jeho slitin je proces, při kterém na hliníku a slitinách hliníku vytváří slabě irizující vrstvu s vynikající korozní ochranou a nízkým povrchovým

odporem. Na povrchu hliníkového výrobku se chemickou reakcí vytvoří konverzní chromátová vrstva. Tato vrstva je integrální součástí povrchu kovu. Chromátování se používá jako konečná úprava pro lehké korozní prostředí nebo pod organické povlaky. [11]

Základní technologií je anodická oxidace hliníku a jeho slitin, která se stává perspektivní povrchovou úpravou, protože je závislá na typu materiálu a na jeho čistotě. Teoretická část této práce se zabývá teoretickým popisem procesu anodické oxidace hliníku a jeho slitin. V práci jsou popsány základní metody anodické oxidace hliníku, dále je popsán princip procesu vzniku oxidické vrstvy, technologický proces anodické oxidace hliníku. Teoretická část je zakončena kapitolou s názvem „Metody materiálového hodnocení anodizovaných oxidických vrstev“. Druhá část práce – experimentální – se zaměřuje na materiály vhodné pro anodickou oxidaci hliníku a jeho slitin.

## **2. Cíle práce**

Cílem práce je seznámit se s tématem - Anodická oxidace hliníku a jeho slitin. Práce se zaměřuje na nejpoužívanější metody anodické oxidace hliníku a jeho slitin, základní princip anodické oxidace, vliv chemického složení základního materiálu a na technologii anodické oxidace. Součástí experimentální části práce je analýza 25 vzorků pěti různých hliníkových tříd, které byly anodicky oxidovány; experimentální ověření eloxovatelnosti materiálů na bázi Al; rovnoměrnost a tloušťku vytvořené vrstvy oxidu; diskuze dosažených výsledků a na jejím základě vyvozené závěry.

## **3. Anodická oxidace hliníku a jeho slitin**

Anodická oxidace, nazývaná též eloxování nebo anodizace, je nejrozšířenější povrchová úprava hliníku a jeho slitin a patří mezi povrchové úpravy kovu. Jedná se o proces elektrolytické oxidace povrchu využívající přirozeného sklonu materiálu k oxidaci. Tímto procesem dosahujeme vrstev o tloušťkách řádově desítek mikrometrů, což představuje nárůst ve stovkách až tisících procent oproti vrstvám vznikajícím přirozeně. [12]

Anodická oxidace, má za úkol nejen získání dekorativně ochranných vlastností, ale také zlepšení vlastností tribologických. Toho dosahujeme pomocí technologie tvrdé anodické oxidace. Díky kombinaci příznivých vlastností slitin hliníku a vytváření tvrdých

vrstev lze z tribologického hlediska získat funkční dvojice splňující i nejnáročnější požadavky zdánlivě jen těžko slučitelné. [4,12]

Hliník má tu vlastnost, že se váže na kyslík, čímž vzniká tenká, transparentní oxidová vrstva. V suchém prostředí vzniká tenká oxidová vrstva (tloušťka 0,005 µm až 0,015 µm), ve vlhkém prostředí se v průběhu času tvoří silnější oxidová vrstva, která je v důsledku přítomnosti různých znečištění světle až tmavě šedá. Tyto přírodní oxidové vrstvy chrání hliník proti dalšímu narušení. Ochrana proti korozi naproti tomu zmizí, pokud je oxidová vrstva chemicky narušena kyselým, nebo alkalickým vlivem. Dobrá odolnost proti korozi je také omezena na chemicky neutrální oblast (pH 5 až 8). Ochranné působení oxidové vrstvy je možno značně zvýšit umělým vytvořením velmi odolných oxidových vrstev od několika mikronů až do 150 mikronů. Nejdůležitější důvody pro nanesení takové vrstvy jsou:

- Zvýšení odolnosti proti korozi
- Zvýšení odolnosti proti opotřebování
- Možnost barevného provedení [3,12]

### 3.1 Využívané metody anodické oxidace hliníku a jeho slitin

V průběhu posledních několika desítek let bylo publikováno a/nebo patentováno nezanedbatelné množství elektrolytů pro anodickou oxidaci hliníku a jeho slitin. Nadále jsou tak vyvíjeny nové příměsi umožňující zlepšení a zefektivnění celého procesu. Jedná se o přísady do odmašťovacích lázní (např. Rogal 10, Alficlean 138, aj.), anodizačních lázní (např. Rogal 5, Alfinox 510, aj.) atd. [10]. V běžné technické praxi se však uplatňuje jen několik málo dlouhodobě ověřených variant. Hlavní typy anodizačních metod jsou metoda na bázi kyseliny chromové (TYP I), kyseliny sírové (TYP II) a tvrdá anodická oxidace (TYP III). Příklady značení metod pro anodickou oxidaci jsou uvedeny v tab. 1, jejich základní parametry a použití jsou uvedeny v tab. 2. [10,12].

Tab. 1 Příklady značení metod pro anodickou oxidaci. [4]

Typ elektrolytu	Označení	Typ proudu	Označení
Kyselina sírová $H_2SO_4$	S	Stejnoseměrný	G
Kyselina šťavelová $(COOH)_2$	X	Střídavý	W
Kombinace $(H_2SO_4+(COOH)_2)$	SX		

Tab. 2 Metody anodické oxidace hliníku. [4]

Postup	Tloušťky vrstvy v [μm]	Barva oxidické vrstvy	Oblasti použití
Standardní postup GS+GSX	5-10	bezbarvá	stavebnictví, domácí spotřebiče, nábytek
Standardní postup GS+GSX - organicky barveno	5-25	barevná	stavebnictví, domácí spotřebiče, nábytek, bytová architektura
Standardní postup GS+GSX - elektrolyticky barveno v elektrolytu cínu (dvojstupňová metoda)	5-10	světle bronzová až černá	stavebnictví, domácí spotřebiče, nábytek, bytová architektura
Standardní postup + zvláštní stupeň např. Spektro-Color-metoda elektrolyticky barveno v elektrolytu cínu (dvojstupňový postup)	5-10	světle bronzová až černá + zelené, modré, šedivé, žluté a červené odstíny	stavebnictví, domácí spotřebiče, nábytek, bytová architektura
Tvrdá anodizace	25-200	bezbarvá až šedá	strojírenství, auto. a letecký průmysl
Pásová anodizace	0,2-25	bezbarvá	bytová architektura, elektroprůmysl

### 3.1.1 Metoda kyseliny sírové H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Pro eloxování hliníkových slitin je používán 20 procentní roztok kyseliny sírové. Anodická oxidace se provádí při teplotě 18 až 25°C, při hustotě proudu 1 - 3 A.dm<sup>-2</sup>. Doba trvání procesu je minimálně 10 min. [6]

Při eloxování v elektrolytu na bázi kyseliny sírové mají vrstvy vysokou odolnost proti korozi. To je nejspornější a cenově nejvýhodnější elektrolyt pro eloxování. Proces ale může vyžadovat chlazení a zařízení s odolností vůči kyselinám. V kyselině sírové se nedoporučuje provádět eloxování výrobku s úzkými mezerami, nebo nýtovanými spoji,

jelikož je poté obtížné kyselinu umýt. Pro eloxování výrobků složitého tvaru můžeme použít metodu kyseliny chromové. [6,12]

Tab. 3 Standardní metody v elektrolytu kyseliny sírové - stejnosměrný proud. [4]

Název lázně	Elektrolyt	Teplota [°C]	Napětí [V]	Proudová hustota [A.dm <sup>2</sup> ]	Doba expozice [min]	Tloušťka vrstvy [μm]	Vlastní barva vrstvy
Oxydal	20 hm.% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	18	12-16	1-2	30	15-20	žádná
Anodal and anoxal	20 hm.% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	18	12-16	1-2	30	20-25	žádná

### 3.1.2 Metoda kyseliny chromové

Druhý nejčastěji používaný způsob eloxování hliníkových slitin je eloxování v kyselině chromové, prováděné obdobným způsobem jako v kyselině sírové. Vodivost roztoků kyseliny chromové používaných pro eloxování je podstatně menší, než je elektrická vodivost roztoků kyseliny sírové. Rozpustnost anodických filmů, vytvořených na povrchu hliníkové slitiny v průběhu eloxování v kyselině chromové, je navíc také podstatně menší. V důsledku toho je u eloxování hliníkových slitin v kyselině chromové nutné použít vyšší napětí. [6,10,12]

Tab. 4 Pracovní parametry anodické oxidace - metoda „Bengough - Stuart“. [4]

Název lázně	Elektrolyt	Teplota [°C]	Napětí [V]	Proudová hustota [A/dm <sup>2</sup> ]	Doba expozice [min]	Tloušťka vrstvy [μm]	Vlastní barva vrstvy
Bengough - Stuart	3 hm.% H <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	40	až 50	0,3	30	5	žádná až tmavě hnědá

### 3.1.3 Ostatní používané metody

Jiné metody (např. využití kyseliny šťavelové, kyseliny fosforečné, kyseliny borité) se využívají méně často a uplatňují se pouze ve specializovaných oblastech jako např. v elektrotechnice pro výrobu elektrolytických kondenzátorů, v nanotechnologii, aj.

Množství elektrolytů pro anodickou oxidaci hliníku je poměrně velké. Během posledních desítek let bylo patentováno velké množství různých elektrolytů pro anodickou oxidaci, ale v technické praxi využití těchto metod klesá na několik málo realizovatelných variant. Nejvíce používané metody byly popsány v kapitole 3.1. [11]

Tyto různé varianty technicky možných metod anodické oxidace umožňují realizaci oxidických vrstev s různými vlastnostmi.

Například jen několik z nich:

- rozdíly v tloušťce vrstvy od 0,3 do cca 200  $\mu\text{m}$  v závislosti na metodě,
- vytvoření čiré průhledné vrstvy,
- elektrolytické barvení oxidických vrstev. [12]

### 3.1.4 Tvrdá anodická oxidace

Literatura uvádí až sedm typů tvrdé anodické oxidace v závislosti na složení elektrolytů a provozních podmínek. Nejčastěji používanou metodou v průmyslu je metoda MHC (Martin Hard Coat), která využívá 15÷20 % vodného roztoku kyseliny sírové. Dalšími typy elektrolytů jsou roztoky na bázi kyseliny šťavelové a sulfosalicylové, popřípadě doplněné vhodnými aditivami. Tyto elektrolyty přinášejí možnost vyšší provozní teploty elektrolytu. [4]

Tvrdým eloxováním získává hliníková slitina i značně lepší korozní odolnost oproti obvyklému dekorativnímu eloxování. S rostoucí tloušťkou vrstvy roste i riziko vzniku trhlin, které mohou působit jako kapiláry, čímž odolnost proti korozi klesá. Hlavním účelem eloxování je optimální odolnost proti opotřebení.

Tvrdé oxidické vrstvy mají velmi dobré izolační vlastnosti, čehož se bohatě využívá v elektrotechnice. Průrazné napětí se pohybuje mezi 20÷40  $\text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ . Měrný elektrický odpor vrstvy při teplotě 20 °C je 40.102  $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ , což je srovnatelné s hodnotami skla a porcelánu. Mezi nejvíce sledované parametry vrstev vytvářených tvrdou anodickou oxidací patří především jejich tloušťka a mikrotvrdość. [4,5]



Obr. 1 Pracoviště pro tvrdou anodickou oxidaci hliníku na ČVUT [13]

Na tomto pracovišti se provádí měření pro porovnání vlastností tvrdě eloxovaných vrstev vytvořených za různých pracovních podmínek.

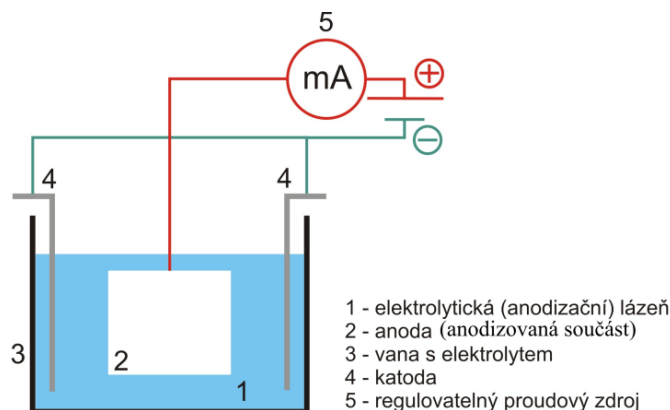
V průběhu eloxování dochází k růstu oxidů, díky kterým je drsnost vyšší. Proto je třeba se starat, aby předúprava povrchu byla co nejlepší a povrch byl co nejhladší. Za podmínek tvrdého eloxování se drsnost povrchu zvýší asi o  $0,25 \div 0,5 \mu\text{m}$  u tvářených slitin, zatímco u slévárenských slitin se toto zvýšení drsnosti pohybuje v rozmezí  $1,25 \div 2,5 \mu\text{m}$ . Pokud se požadují velmi malé konečné drsnosti povrchu, provádí se po eloxování ještě honování povrchu. [4,5]

### 3.2 Základní princip procesu

Anodická oxidace (anglicky anodizing) patří mezi tzv. povrchové úpravy kovů. Jedná se o elektrochemický proces, kdy jsou na povrch kovu zavěšovány předměty na kladném pólu (anodě) stejnosměrného proudu a jsou zde použité nerozpustné katody. Lze eloxovat též proudem střídavým a to tak, že na svorky střídavého proudu se zavěšují dva stejné předměty. Tyto předměty se střídavě eloxují. Jeden předmět slouží jako katoda druhému předmětu a naopak. Výhodou je také možnost vybarvování těchto vrstev průmyslovými barvami do libovolného odstínu, což je výhodné z důvodů jak estetických, tak praktických (např. černění hliníkových součástí optických přístrojů, nebo ploch chladičů). [4,9]

Navíc na rozdíl od organických barviv nanášených pouze na povrch kovu, nemá eloxová vrstva při správném provedení tendenci k odlupování a barvivo je v této vrstvě uzavřeno. Nejznámější a nejrozšířenější je eloxování hliníku, kdy na jeho povrchu vzniká vrstva oxidu hlinitého se strukturou korundu (důvod tvrdosti vrstvy), tloušťka

vrstvy 5 - 25 mikrometrů. Eloxování hliníku je poměrně jednoduchá operace proveditelná i v domácích podmínkách. Při dodržování určitých pravidel lze docílit efektního vzhledu hliníkových dílů. [4,9].



Obr. 2 Schéma zařízení pro anodickou oxidaci. [9]

### 3.2.1 Základní chemický proces anodizace pro GS metodu

V průběhu procesu anodické oxidace, se na katodě omezuje vodík, který odchází ve formě bublinek. Na anodě však probíhají složitější procesy oxidace hliníku. Hlavní reakcí při oxidaci hliníku je tvorba jeho (trojmocného) kationtu, dle rovnice (1) [18]:



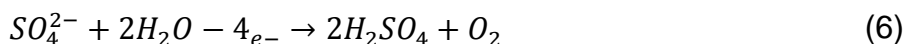
Na katodě pak dochází ke vzniku hydroxidového aniontu ( $\text{OH}^{-}$ ) podle reakce (2 a 3) [18]



Vlivem průchodu stejnosměrného elektrického proudu lázní dochází k disociaci roztoku tvořeného  $\text{H}_2\text{O}$  a 10-27 hm.%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , dle rovnice (4 a 5) [19]:



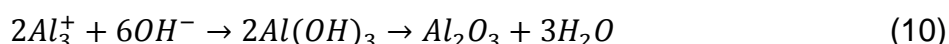
Kladné a záporné ionty jsou přitahovány anodou a katodou, kde přenechávají svůj náboj a vylučují se zpět ve formě molekul  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (6),  $\text{H}_2\text{O}$  (7) a bublin plynu  $\text{O}_2$  (6, 7) a  $\text{H}_2$  (8) [19]:





Na rozhraní oxidu s elektrolytem tak dochází ke vzniku  $O_2^-$  ve formě plynu pomocí jednoduchého rozpadu molekuly vody, nebo vzájemnou interakcí s absorbovaným aniontem ( $Al^{3+}$ ) v elektrolytu. [18].

Na anodě, tj. povrchu anodizované součásti, dochází k oxidaci hliníku za vzniku oxidu hlinitého, a to buď oxidací přímou, nebo přes hydroxidové anionty. V druhém uvedeném případě má hydroxid hlinitý vynikající elektroizolační vlastnosti, které zabraňují průchodu elektrického proudu. Při dalším průchodu elektrického proudu pak dochází k zahřátí a dehydrataci takto vytvořené vrstvy za vzniku  $Al_2O_3$  (9 a 10) [19]:

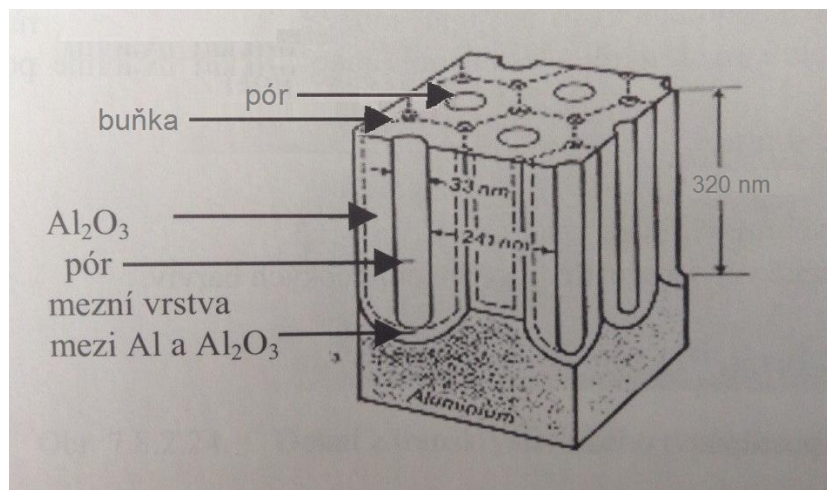


Pro kyselé elektrolyty (např. roztoky s kyselinami sírovou, fosforečnou nebo šťavelovou) je typická tvorba oxidu  $Al_2O_3$  na rozhraní kov-oxid. Vznik a růst oxidické vrstvy, je dán přemísťováním iontů obsahující kyslík ( $O_2^-$ ) a ( $OH^-$ ) z elektrolytu do vrstvy již vzniklého oxidu, a zároveň přemísťováním iontů  $Al^{3+}$  směrem ze základního materiálu do elektrolytu přes vytvořenou vrstvu. Na základě experimentálních prací již bylo zjištěno, že pouze neznatelná část kationtů hliníku se podílí na tvorbě oxidu na rozhraní kov-oxid, nebo oxid-elektrolyt. Jejich zbylá většinová část je pak volně vyjmuta do elektrolytu nebo vyredukována na katodě [18].

### 3.2.2 Fyzikální teorie tvorby anodizované oxidické vrstvy

Samotná oxidická vrstva vzniká během elektrochemického procesu. Vytvořená vrstva oxidu na povrchu základního materiálu se skládá ze dvou vrstev, kdy v průběhu prvních několika sekund anodizace dochází k tvorbě skoro bezpórovité, dielektricky izolační tzv. mezní vrstvy o tloušťce cca 2% celkové tloušťky vzniklé vrstvy oxidu [9], která je pevně spojena se původním materiálem. Na mezní vrstvu navazuje čirá jemně porézní krycí vrstva. Krycí vrstva vzniká při procesu zpětného rozpouštění mezní vrstvy v elektrolytu. Mezní vrstva se zpětně obnovuje při přeměně hliníku na oxid se stejnou rychlostí, s jakou se z ní vytváří krycí vrstva. Schematicky porézní vrstva může být popsána jako pole natěsno uspořádaných hexagonálních buněk oxidu hlinitého, které obsahují v každém středu buňky jeden pór (viz obr. 4) [20]. Buňky jsou orientovány kolmo k povrchu základního materiálu (rovnoběžně se siločarami procházejícího proudu). Velikost buněk závisí na typu použitého elektrolytu a na velikosti napětí [4]. Větší poréznost v krycí vrstvě má pak za následek snížení korozní odolnosti, tvrdosti a

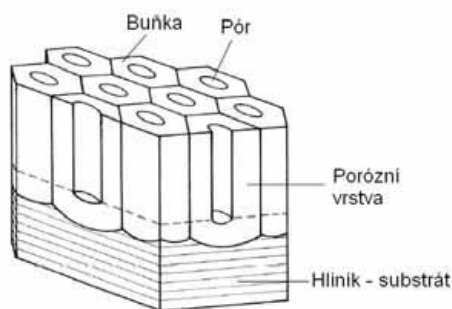
otěruvzdornosti vrstvy. Naopak výhodou se stává relativně snadné vybarvování oxidické vrstvy. Růst oxidické vrstvy je závislý na chemickém složení základního materiálu, jeho předúpravě a podmínkách anodické oxidace. Vytvořená oxidická vrstva se stává dielektrickou, a proto při dosažení určité tloušťky spojené s nárůstem elektrického odporu vrstvy dochází k zastavení jejího růstu [13, 21].



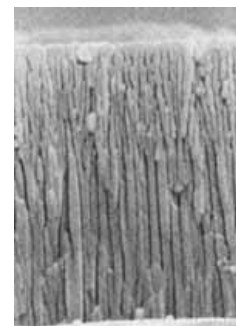
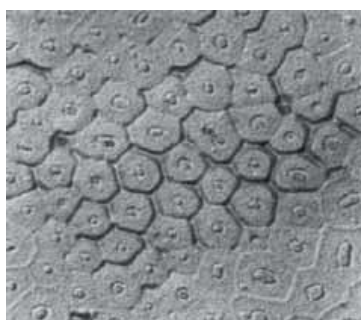
Obr. 3 Idealizovaná struktura anodizované oxidické vrstvy [9]

### 3.2.3 Obecné vlastnosti a parametry oxidické vrstvy

Významnou vlastností vzniklé vrstvy je porozita, která snižuje korozní odolnost a otěruvzdornost. Právě při tvrdé anodické oxidaci lze potlačit zpětný rozklad vznikající vrstvy, snížit tak porozitu a tím zvýšit tvrdost vrstvy. Nižší porozity vrstvy lze dále dosáhnout nižší koncentrací kyseliny v lázni, nebo zvolením vhodného chemického utěsnění pórů. Následující obrázek schematicky znázorňuje oxidickou vrstvu, povrch vrstvy a strukturu vrstvy v podélném řezu.[6,7]



Obr. 4 Schema oxidické vrstvy [7]



Obr. 5,6 Struktura vrstvy v řezu [7]

Pomocí vyšších proudových hustot, typických pro tvrdou anodickou oxidaci, docílíme větší tloušťky vrstvy.

Základní parametry oxidické vrstvy vzniklé při dekorativní a tvrdé anodizaci jsou porovnány v následující tabulce 5: [3,6]

Tab. 5 Srovnání vrstvy při dekorativní a tvrdé anodizaci

Vlastnosti vrstvy	Dekorativní oxidace	Tvrdá oxidace
Tloušťka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]	5-30	50-200
Porozita [%]	25	12

### **Vzhled vrstvy**

Vzhled eloxovaného povrchu je závislý (kromě použité báze elektrolytu) na třídě použité hliníkové slitiny, tj. na legujících prvcích. Zabarvení je markantnější při použití technologie tvrdé anodické oxidace. Vzhled povrchu je také závislý na drsnosti a struktuře povrchu – nerovnosti jsou po anodizaci ještě zvýrazněny.

### **Vady a nedostatky anodizované vrstvy**

Anodická oxidická vrstva vzniká přímo na úkor základního materiálu. Při anodické oxidaci tak nejprve dochází k růstu vrstvy směrem do základního materiálu a původní povrch se mění na souvislou vrstvu oxidu. Při dalším postupném růstu však dochází i k růstu vrstvy na povrchu takto vytvořeného oxidu (viz obr. 7). Základní materiál, mezní a porézní vrstva jsou pevně spojeny a mohou být odstraněny pouze mechanickým poškozením základního materiálu. V průběhu cyklického zatěžování (tah/tlak, ohyb, krut) nedochází k odlupování vytvořené anodizované vrstvy, ale v důsledku výrazného rozdílu v roztažnosti základního materiálu a vrstvy dochází přednostně ke vzniku trhlin a souvislých prasklin na povrchu anodizované vrstvy [4].

### **Tvrдость anodizované vrstvy**

Tvrдость vytvořené vrstvy se pohybuje na stejné úrovni jako standardní tvrдость oxidu hliníového, tj. stupeň 9 na Mohsově stupnici tvrlosti. Vrstvy jsou ale poměrně křehké a náchylné k prasklinám. Tvrдость ovlivňuje základní materiál a pracovní podmínky procesu. Dekorativní anodickou oxidací je možné dosáhnout vrstvy o tvrlosti 250-350 HV, tvrdou anodickou oxidací 300-600 HV. Tvrдость je největší přímo u substrátu, směrem k povrchu klesá. [4]

## Tloušťka vrstvy

Při použití standardních metod anodické oxidace, například metody GS, je požadovaná tloušťka vrstvy nejdůležitějším kritériem pro ochranu oxidické vrstvy proti korozi. Tloušťku oxidické vrstvy lze určit z empirického vztahu (11)

$$h = 0,4 \cdot \eta \cdot I \cdot t \cdot S^{-1} \quad (11)$$

h - tloušťka anodizované vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]

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

I - hodnota stejnosměrného proudu [A]

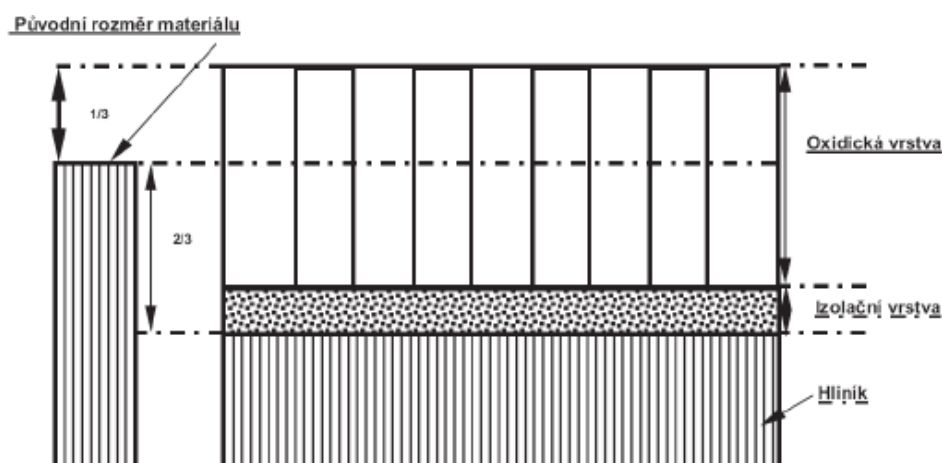
t - doba anodizace [min]

S - plocha součásti [ $\text{dm}^2$ ]

Při standardních technických metodách lze dosáhnout níže uvedených tloušťek vrstev:

- roztok kyseliny chromové: 3 – 6  $\mu\text{m}$ ,
- roztok kyseliny sírové (stejnosměrný proud): 5 – 30  $\mu\text{m}$ ,
- roztok kyseliny šťavelové: 10 – 60  $\mu\text{m}$ ,
- tvrdá anodická oxidace: 40 – 300  $\mu\text{m}$ .

Výrobci dílů musí dávat pozor, aby vytvořená vrstva vzrostla o 1/3 nad původní kovový povrch. Na obr. 7 můžete vidět rozměry vytvořené vrstvy.



Obr. 7 Princip růstu anodizované vrstvy oxidu na povrchu hliníku. [9]

## Porezita anodizované vrstvy

Porezita udává procentuální zastoupení pórů v oxidické vrstvě (pro zjednodušení je uvažovaná vzájemná vzdálenost primárních pórů shodná s jejich průměrem) a je

závislá na provozních podmínkách anodické oxidace. Průchodem střídavého proudu vznikají vrstvy poréznější než při průchodu proudu stejnosměrného. S rostoucím napětím poretita oxidické vrstvy naopak klesá [5,10]. K takto definované primární poretitě přistupuje i poretita sekundární, která vzniká rozpouštěním části anodizované vrstvy do elektrolytu a závisí především na teplotě lázně. K sekundární poretitě také patří tzv. poretita strukturní, která vzniká rozpouštěním některé z přísad ve slitině základního materiálu [7]. Čím je vrstva poréznější, tím lépe se vybarvuje (málo porézní vrstvy jsou tak tmavší a tvrdší).

### **Specifická hmotnost anodizované vrstvy**

Specifická hmotnost anodizované vrstvy je závislá na poretitě vrstvy. Mění se v závislosti na tloušťce vrstvy, jejím chemickém složení a parametrech anodizace. Při zvýšených teplotách elektrolytu a delší době anodické oxidace jsou výsledné vrstvy oxidu poréznější. Specifická hmotnost porézní vrstvy oxidu se pak pohybuje v rozmezí hodnot 2,8-3,2  $g.cm^3$ , mezní vrstva okolo 4  $g.cm^3$ . [7]

### **Korozní odolnost**

Anodickou oxidací vzniká tenká, korozi vysoce odolná vrstva v neutrálním prostředí pH 6,5 až 8. Vytvořená vrstva oxidu chrání v rozmezí uvedeném pH součást před atmosférickými a chemickými vlivy. Korozní odolnost je také závislá na tloušťce oxidické vrstvy. Povlak o tloušťce 20  $\mu m$  je spolehlivou ochranou ve venkovní okolní atmosféře. Povlak o tloušťce více než 10  $\mu m$  pak také slouží jako přijatelná ochrana ve vnitřním prostředí. Tato korozní odolnost však také závisí na druhu dodatečné technologické úpravy anodizované vrstvy. [4,9]

### **Elektrická vodivost**

Vytvořená oxidická vrstva je elektricky nevodivá a má dobré izolační vlastnosti. Průrazové napětí je 20-40  $V.mm^2$  pro vrstvu oxidu o tloušťce 5-10  $\mu m$  [9].

### **Tepelná vodivost**

Tepelná vodivost vytvořené vrstvy oxidu hlinitého po anodizaci je mnohem nižší (cca 20,5-61,5  $W.m^{-1}.K^{-1}$  při teplotě 0-60°C), než vlastní tepelná vodivost základního materiálu ze slitiny hliníku. Čistý hliník má tepelnou vodivost 237  $W.m^{-1}.K^{-1}$  při teplotě okolí 25°C [4].

## Absorpční vlastnosti

Porézní vrstva vytvářená anodickou oxidací má schopnost absorbovat cizí částice jemného složení (< 0,04  $\mu\text{m}$  tj. průměr póru). Toto umožňuje barvení oxidických vrstev organickými a anorganickými barvami, což je příznivou vlastností při dekorativní anodizaci [4].

### 3.3 Technologie anodické oxidace hliníku a jeho slitin

Technologický předpis je zaměřen na anodickou oxidaci hliníku a jeho slitin v přípravných RO GAL. Jedná se o inovovanou technologii, která zajišťuje efektní povrchovou úpravu s dobrou korozní odolností a ochranou proti opotřebením. Tato technologie přinesla vyšší produktivitu, zvýšení kvality, a to hlavně vzhledu, delší životnost lázně, zlepšení hygieny na pracovišti. [4,9]

Technologický proces anodické oxidace se skládá z předúpravy povrchu, vlastního procesu anodizace a dokončovacích operací. (tab. 6)

Tab. 6 Technologický proces anodické oxidace

Proces	Pracovní podmínky	
	Doba [min]	Teplota [°C]
1. Odmašťování s mořícím efektem	3 – 10	40 – 60
2. Oplach průtočný	cca 1	20
3. Vyjasnění v lázni	1 – 2	20
4. Oplach průtočný	1 – 2	20
5. Eloxování – anodická oxidace	5 – 60	18 – 25
6. Oplach průtočný	cca 1	20
7. Vypírání vrstvy	20 – 40	15 – 20
8. Barvení	viz pracovní podmínky stanovené výrobcem barviva	
9. Oplach průtočný	cca 1	20
10. Utěsnění vrstvy	15 – 30	min 96
11. Oplach průtočný	cca 1	20
12. Sušení teplým vzduchem		

### 3.3.1 Mechanická předúprava

Účelem mechanických úprav je především:

- očistit povrch od nečistot
- zajistit podmínky pro dobrou přilnavost příštích vrstev
- vytvořit podmínky pro zvýšení odolnosti proti korozi a opotřebení
- vytvořit povrch odpovídající všem požadavkům
- zlepšit mechanické vlastnosti povrchu

Nejčastěji používané způsoby mechanických úprav povrchu jsou: broušení, leštění a kartáčování. Broušení a leštění mají v povrchových úpravách trochu jiný charakter než při obyčejném broušení. Zde jde především o odstranění nerovností a zlepšení kvality povrchu. Broušení a leštění je nejdražší operací z mechanických úprav, proto ji většinou používáme tam, kde jsou kladeny maximální nároky na jakost povrchu. [12]

### 3.3.2 Chemická předúprava

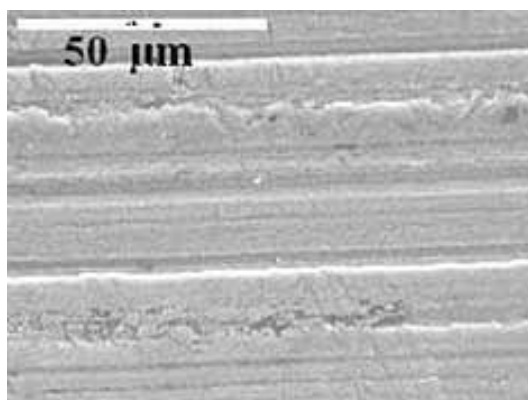
Chemické resp. elektrochemické úpravy povrchu mají význam především v odstraňování nečistot z povrchu materiálů před následujícími úpravami. K těmto úpravám patří technologie odmašťování, moření, odrezování a leštění. [12]

**Odmašťování** je souhrnný název pro odstraňování všech druhů ulpělých nečistot z povrchu, kde jsou vázány buď fyzikální adsorpcí (látky tukového charakteru), nebo adhezními silami (anorganické nečistoty, prach, kovové třísky ap.). Odmašťovací operace lze zhruba rozdělit na tři základní postupy podle druhu probíhajících pochodů a použitých prostředků [12]:

- odmašťování v organických rozpouštědlech
- odmašťování ve vodných alkalických roztocích
- odmašťování emulzní

Podle způsobu aplikace ev. styku s rozpouštědly rozlišujeme:

- odmašťování ponorem
- odmašťování postřikem
- odmašťování v parách
- odmašťování elektrolytické
- odmašťování ultrazvukem
- odmašťování mechanické a tepelné



Obr. 8 Odmaštěný povrch hliníku [12]

**Mořením** nazýváme odstraňování korozních produktů z povrchu kovu chemickým nebo elektrochemickým způsobem. Nejčastěji k moření používáme kyselin a kyselých solí, méně často alkalických činidel.

Hliník a jeho slitiny lze mořit v lázních kyselých (zředěná kyselina sírová, chlorovodíková, fosforečná aj.), nejčastěji pak v lázních alkalických (10 až 15 % hydroxid sodný) po dobu několika vteřin za tepla. Slitiny obsahující měď nebo křemík je třeba po moření vyjasnit ve zředěné kyselině dusičné resp. fluorovodíkové. [12]

### 3.3.3 Anodická oxidace

V samotném procesu anodické oxidace, označovaném také jako eloxace, dochází ke vzniku oxidické vrstvy. Proces anodizace lze rozlišovat podle použitého typu elektrického zdroje, teploty lázně, proudové hustoty nebo druhu použitého elektrolytu. Kombinací uvedených parametrů můžeme také získat vrstvy oxidu s různorodými vlastnostmi [4].

#### Typ elektrického zdroje

Podle typu použitého proudu můžeme proces rozdělit na anodizaci stejnosměrným („G“), střídavým („W“) a pulsujícím proudem.

S využitím střídavého proudu vzniká méně kvalitní tenká vrstva oxidu, která je relativně houževnatá a v důsledku cyklického namáhání není tak náchylná k praskání. Tento typ anodické oxidace se používá například ve šperkařství [4].

V technické praxi je nejvyužívanější proud stejnosměrný. Průchodem stejnosměrného proudu materiálem dochází ke vzniku silné relativně tvrdé oxidické vrstvy, která se v případě anodické oxidace Typ II snadno vybarvuje [9]. V nanotechnologii pro tvorbu nanoporézních struktur nachází uplatnění proud pulsující.



## Elektrolyt

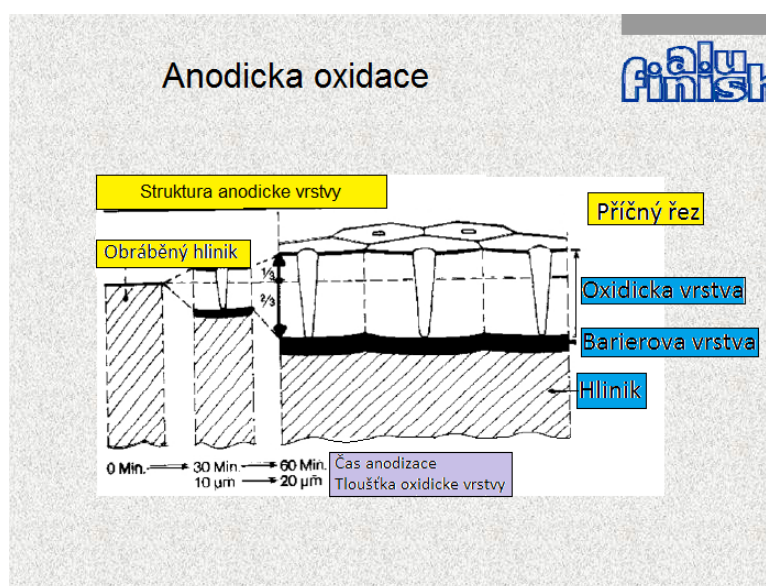
Nejčastěji používanou lázní je 10-27 hm.% roztok kyseliny sírové  $H_2SO_4$  (označení „S“), dále pak 3-10 hm.% roztok kyseliny chromové  $H_2CrO_4$ , 2-10 hm.% roztok kyseliny šťavelové  $(COOH)_2$  a dalších [2, 9]. Použitím roztoku o menší koncentraci kyselin dochází ke vzniku tvrdších oxidických vrstev. K tomu je však zapotřebí také vyšší příkon elektrického proudu a chlazení lázně [15].

## Teplota elektrolytické lázně a proudová hustota

Podle proudové hustoty a teploty rozlišujeme tři základní druhy anodické oxidace. Za vyšší pracovní teploty  $40^\circ C$  a proudové hustoty  $0,3-1 A \cdot dm^{-2}$  vzniká vrstva, která se označuje jako Typ I. Za teplot  $15-25^\circ C$  a proudové hustoty  $1,2-2,5 A \cdot dm^{-2}$  vzniká oxidická vrstva určená pro dekorativní použití a ta se označuje – Typ II. Za nízkých teplot od  $-26$  do  $+15^\circ C$  a vyšších proudových hustot  $2,5-8 A \cdot dm^{-2}$  vzniká tzv. tvrdá anodická vrstva (Typ III), která má velmi dobré mechanické vlastnosti [9, 13].

## Pracovní parametry

Anodizovaná součást se zapojuje jako anoda. Katodou používanou pro anodickou oxidaci bývá většinou hliník, olovo, titan nebo korozivzdorná ocel. Plocha katody a anody by měla být v poměru 1:1,5 - 1:1,2. Elektrolytická lázeň s kyselinou sírovou by měla mít  $pH < 4$ . [2].

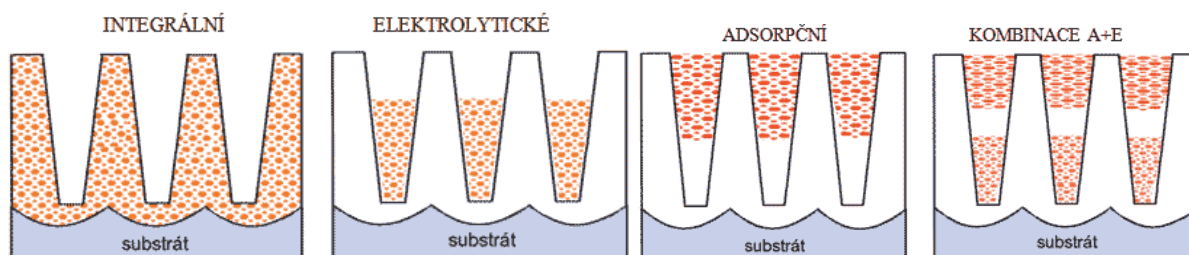


Obr. 9 Schéma anodické oxidace [21]

### 3.3.4 Dokončovací úpravy

#### Barvení

Anodické vrstvy poskytují široké možnosti vybarvení. Určitý barevný odstín lze vytvořit v průběhu procesu anodizace – integrální barvení, nebo v rámci dokončovacích procesů, při kterých je barvivo ukládáno do pórů anodické vrstvy – adsorpční, elektrolytické barvení či jejich kombinace. [16]



Obr. 10 Princip základních druhů barvení anodických vrstev [9]

Integrální barvení se označuje jako jednostupňový postup. Může probíhat ve speciálních elektrolytech, které při vzniku vrstvy způsobují její zabarvení. Druhou možností jsou elektrolyty s legovacími přísadami, jejichž uložení v oxidické vrstvě ve formě zabarvených oxidů vytváří požadovaný odstín. Tímto způsobem barvení dosáhneme odstínů světlostálých. [16]

Elektrolytické vybarvování oxidické vrstvy je nejčastější metodou barvení využívající pórovitosti vrstvy. Po vzniku anodické vrstvy je výrobek umístěn do lázně solí kovů. Tyto soli jsou za přítomnosti střídavého proudu rozkládány a vzniklé ionty kovů se vylučují v pórech vrstvy. Takto vybarvené vrstvy jsou stálé na světle, odolné proti povětrnostním vlivům a vysokým teplotám. Nejčastěji jsou používány soli cínu a niklu. [15,16]

Tab. 7 Přehled solí pro elektrolytické vybarvování

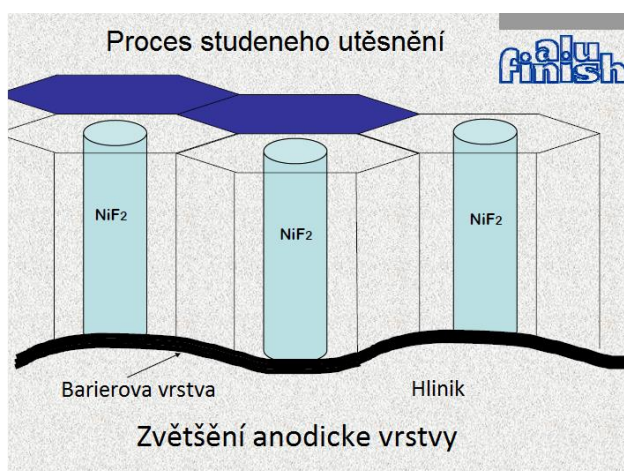
Soli	Barevný odstín
Sn	světle bronzový – černý
Ni	světle bronzový – černý s nádechem do zelena
Co	černý
Cu	červený
Se	červený

Adsorpční barvení využívá stejně jako elektrolytické pórovitosti vrstvy. Provádí se bez přítomnosti proudu v roztocích anorganických, nebo organických látek. V praxi se častěji používají organická barviva, jejichž příprava je jednodušší. Sytějšího výsledného odstínu barvy lze dosáhnout u anodických vrstev s vyšší pórovitostí a tloušťkou, při vyšší koncentraci pigmentu a delší době barvení. Vliv na odstín barvy má také hodnota pH a teplota lázně. [15,16]

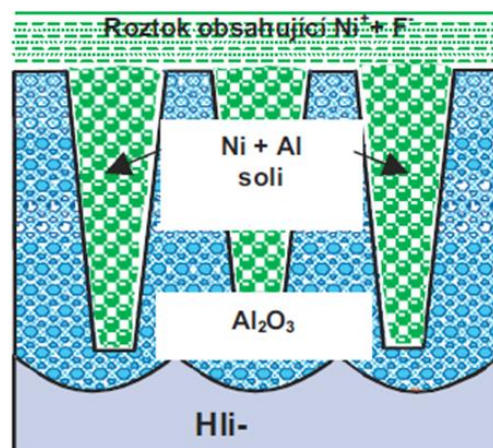
## Utěsnění

Utěsnění (sealing) je finální operací anodizace, při které dochází k uzavření pórovité vrstvy a tím k dosažení optimálních korozních a mechanických vlastností vrstvy. Stejně jako u každého procesu, utěsnění vyžaduje předčištění skládající se z několika proplachů. [20]

Rozlišujeme horké a studené utěsnění. V procesu utěsnění se póry zavírají a barvivo se izoluje od vnějšího prostředí a není k dispozici pro korozivní složky životního prostředí. Správně eloxovaná a utěsněná oxidická vrstva je také velmi odolná proti otěru. Konverze je doprovázena zvýšením objemu a tvoří jakési můstky, které uzavírají póry. Vysvětlením tohoto procesu je to, že oxid hlinitý absorbuje teplou vodu a zvyšuje takovýmto způsobem objem. V případě, že je teplota příliš nízká, vzniká měkký a méně odolný povlak. Je důležité, aby voda v lázni, kde se provádí utěsnění byla velmi čistá. [20]



Obr. 11 Proces studeného utěsnění [21]



Obr. 12 Mechanismus reakce při studeném utěsnění [9]

Studené utěsnění je proces, který probíhá při nižší teplotě než horké utěsnění, kde se pracuje při teplotě 96 °C (viz obr. 11). Vysoké náklady na elektřinu nutí mnoho firem hledat způsoby, jak tyto náklady snížit. Systémy pro studené utěsnění obsahují fluorid a

křemík, který v přítomnosti solí, niklu, a také často vodně-lihové směsi (viz obr. 11). Vodně-lihová rozpouštědla snižují rozpustnost solí a přispívají k ukládání v pórech eloxovaného filmu. Póry se zaplňují solemi niklu, fluoridy nebo silikáty. Typické roztoky pro studené utěsnění obsahují nikl a fluorid. Teplota studeného utěsnění je kolem 30 °C, a čas 0,8 až 1,2 min.  $\mu\text{m}$  V praxi jsou pro výrobu vysoké kvality používány oba tyto procesy postupně, jako první studené utěsnění a pak horké. [20]

### 3.4 Vliv chemického složení základního materiálu

Pro dekorativní anodizaci, u které klademe nejvyšší požadavky na výsledný vzhled, je nezbytný hliník o nejvyšší čistotě (99,99 % Al). Pro vysokou kvalitu anodizace je dostačující hliník komerční čistoty s obsahem přísad do 0,5 hm.%. Naopak veškeré slitiny hliníku nejsou pro anodickou oxidaci vhodné. Maximální koncentrace přísad (legur) pro zajištění bezproblémového procesu u slitin hliníku jsou uvedeny v tab. 8 [14].

Tab. 8 Maximální přípustná koncentrace přísad ve slitinách hliníku pro anodizaci. [14]

Legura	Mg	Zn	Ti	Cr	Si	Cu	Mn	Fe
Obsah [hm.%]	7	10	0,3	0,3	3	5	1	0,5

### 3.5 Vady ve vrstvě vytvářené anodickou oxidací

#### 3.5.1 Nevhodná volba základního materiálu

Pro hladký průběh procesů anodizování musí mít slitina hliníku běžně tyto maximální koncentrace přísad: Mg - 7 hm.%, Zn - 10 hm.%, Ti - 0,3 hm.%, Cr - 0,3 hm.%, Si - 3 hm.%, Cu - 5 hm.%, Mn - 1 hm.%, Fe - 0,5 hm.%. Vady se mohou vyskytovat i při úplném dodržení tohoto chemického složení anodizovaného materiálu, jelikož mohou vznikat již při samotném zpracování v hutích, nebo při strojním opracování a následné mechanické úpravě povrchu. Nevhodnost materiálu pro anodizaci se projeví po operacích moření a vyjasnění. [14]

#### 3.5.2 Technologické vady

Vady vznikající v důsledku nedodržení technologických parametrů jednotlivých operací se projeví zpravidla až po vybarvení součásti a mají za následek především vady ve výsledném vzhledu součásti. Nevhodně vytvořenou vrstvu lze snadno odstranit

mořením a do jisté míry ji opakováním procesu nahradit vrstvou novou [14]. V následujících odstavcích budou krátce popsány nejčastější možné chyby procesu anodizace.

### **Vady po leštění**

Špatným uchycením dochází obvykle ke špatnému odvodu leštících zplodin a mohou tak vznikat nedoleštěná místa. Těmto vadám předcházíme vhodným zavěšením [14].

### **Přemoření povrchu**

Při dlouhém zdržení materiálu v mořící lázni, nebo při opakovaném moření se objevují strukturní nehomogenity materiálu. Míra poškození nezávisí pouze na chemickém složení povrchu materiálu, ale také způsobu předchozího zpracování (válcování, protlačování, aj.) [14].

### **Tenká vrstva**

Tenká vrstva anodizované vrstvy může vzniknout při využití nízké hodnoty proudové hustoty, která musí být vypočítána podle velikosti plochy součásti k anodizaci a ne podle předpokládané velikosti napětí. Ještě jednou příčinou tohoto jevu může být přehřátí lázně s elektrolytem (např. při nedostatečném míchání lázně, kdy již dochází k rozpouštění vrstvy), nebo vada v závěsu součásti (neúplné očištění závěsu (lokální oblast tenké vrstvy), malá přitlačná síla kontaktu upnutí, aj.) [14]

### **Vrstvu oxidu lze setřít**

Příliš vysoká teplota lázně nad 20°C má za následek zvětšení podílu pórů v anodické vrstvě, což při kontaktu může vrstvu porušovat. Příliš vysoká teplota může být způsobena například špatným mícháním lázně. [14]

## **3.6 Metody materiálového hodnocení anodizovaných oxidických vrstev**

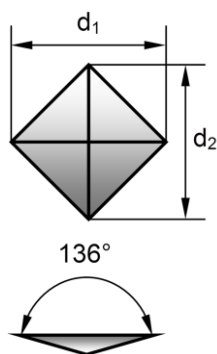
### **3.6.1 Zkouška mikrotvrdosti**

Tvrdost můžeme definovat jako odolnost materiálu proti vniku cizího tělesa. Při zkouškách je vnikací těleso vtlačováno do povrchu testovaného materiálu určitým specifickým zatížením po definovanou dobu a měří se hloubka nebo rozměr

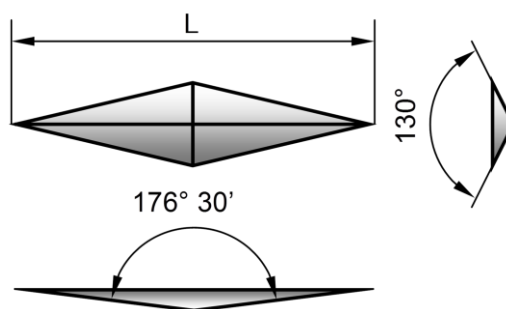
vpichu. Nejpoužívanější, tj. statické zkoušky tvrdosti jsou charakteristické tím, že vnikající těleso tvrdoměru je vtlačováno do povrchu zkušební vzorku monotónně se zvyšující se silou do dosažení předepsaného zatížení, které je pak udržováno na konstantní úrovni po určitou stanovenou dobu. Nejčastějšími metodami měření tvrdosti jsou statické metody podle Brinella, Rockwella, Vickerse a Knoopa. [23]

Tyto zkoušky jsou používány na měření tvrdosti velmi malých předmětů, tenkých vrstev, případně v metalografii na měření tvrdosti jednotlivých strukturních složek. Indentor ve tvaru čtyřbokého jehlanu je do zkušební tělesa vtlačován pod zkušebním zatížením, které působí v kolmém směru stanovenou dobu. Po odlehčení se změří úhlopříčky vtisku. Zkušební zatížení je maximálně 2 N. [23,24]

Vnikající těleso tvoří diamantový jehlan se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° (Vickers, obr. 13) nebo s kosočtvercovou základnou s úhlopříčkami v poměru 7:1 a vrcholovými úhly 130° a 176°30' (Knoop, obr. 14). Podle použitého indentoru určujeme mikrotvrdost buď podle Vickerse nebo podle Knoopa. [23,24]



Obr. 13 Vtisk provedený metodou podle Vickerse [23]



Obr. 14 Vtisk provedený metodou Knoop [24]

U Vickersovy metody se změří velikost úhlopříček  $d_1$  a  $d_2$ , u měření podle Knoopovy metody se změří délka vtisku  $L$ . Výsledná tvrdost se vypočítá pomocí vztahů:

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2}$$

$$KHN = \frac{F}{0,07028 \cdot L^2}$$

$HV$ ... tvrdost podle Vickerse;

$KHN$ ...Knoopovo číslo tvrdosti (*Knoop hardness number*)

$F$ ... zkušební zatížení v [N]

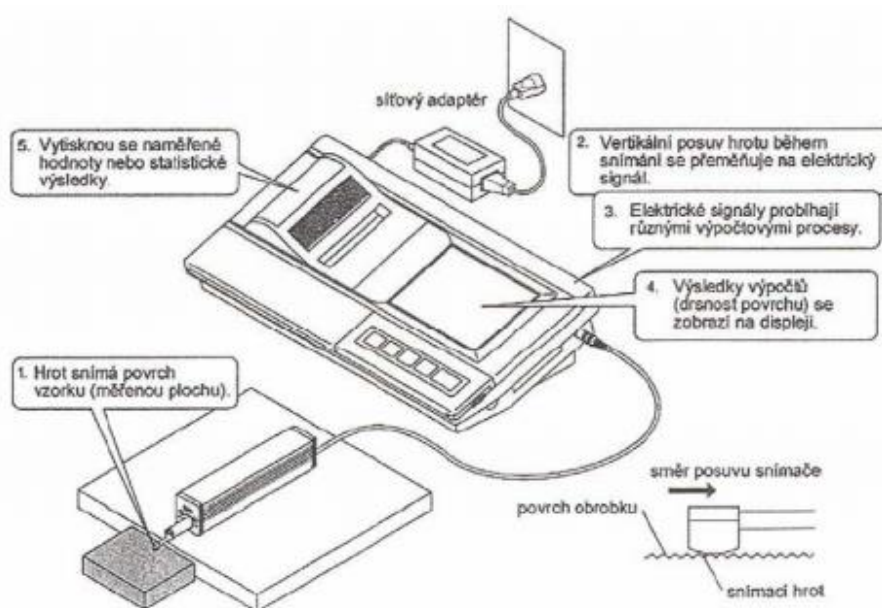
$d$ ... průměrná úhlopříčka vtisku v [mm];  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

$L$ ... délka vtisku v [mm]

### 3.6.2 Profilová analýza

Funkční spolehlivost a zvýšení životnosti komponentu se vztahují k vysoké kvalitě svých funkčních oblastí, tzn. tvarovou a rozměrovou přesností a drsností povrchu. Dokonce i pro progresivní vývoj stavebních materiálů, které mají tendenci se hůř opracovávat, je třeba k zajištění kontinuálního vývoje obráběcích strojů dbát na rozvoj obráběcích strojů, řezných materiálů, měřicí techniky a honotící metody. Základní metodou hodnocení struktury povrchu je profilová metoda, která se měří pomocí profilometru. Je to tzv. dotykový metoda měření. Další způsob, který se v současné době používá při měření povrchové struktury, je metoda bezdotykového měření. [25]

Pro účely měření a vyhodnocení povrchové struktury dotykovým přístrojem je vybrána profilová metoda hodnocení, pokud je povrchový profil tvořený průřezem nerovnosti skutečné plochy s rovinou probíhající kolmo k tomuto povrchu. Z profilu se pomocí přístroje odvodí profil drsnosti (R-profil, DIN 4776) – profil drsnosti je základem pro hodnocení parametru profilu drsnosti povrchu, tzv. R – parametrů. Profil DIN 4776 je základem pro hodnocení parametrů založených na křivce materiálového podílu. [25]



Obr. 15 Schéma dotykového měřicího přístroje Mitutoyo Surftest SJ-301 [25]

Bezdotykové metody měření struktury povrchu, neboli optické, jsou adekvátní alternativou za měření dotykovými profilometry. Při tomto měření nedochází k poškození měřeného povrchu, protože nedochází ke kontaktu dotykového hrotu s

povrchem, což jinak způsobuje u dotykového měření elastickou (někdy i plastickou) deformaci. [25]

### 3.6.3 Měření tloušťky vrstvy

Rozlišujeme dvě metody měření tloušťky vrstev: nedestruktivní a destruktivní. U nedestruktivní metody nedochází k poškození pozorovaného materiálu, zatímco u metod destruktivních je materiál poškozen, nebo v některých případech úplně zničen. [24]

**Nedestruktivní metody** měření tloušťky vrstev zahrnují např. měření magnetickou indukcí, ultrazvukem, atp. Těmito metodami sice změříme tloušťku vrstvy nanesené na původní materiál, nevýhodou však je, že nezjistíme informace o poréznosti laku či prasklinkách, a navíc, pokud jsme pro povrchovou úpravu původního materiálu použili více vrstev laku či pokovení, nemáme jistotu, kolika vrstev se ve skutečnosti měření týkalo, takže naměřené údaje v takovém případě nejsou průkazné. [24]

**Destruktivní metody** stále zůstávají docela přesným způsobem, jak změřit tloušťku nanesené vrstvy. Při použití této metody je nezbytné zkoumaný materiál příčně rozříznout a následně zalít do vhodného média, např. Dentacrylu. Tak si zajistíme kvalitní vzorek, který lze pozorovat pod mikroskopem. Díky tomu máme možnost přesně změřit jednotlivě nanesené vrstvy a sledovat rovněž poréznost, přítomnost trhlin, prasklin, bublin a dalších nežádoucích objektů. V dnešní době se převážně používají vícevrstvé laky s podkladovou vrstvou a přesné určení tloušťky jednotlivých vrstev je možné jedině destruktivní metodou. Tato metoda se také jako jediná užívá při znaleckých posudcích. [24]



## 4. Experimentální část práce

Pro splnění experimentu bylo vytvořeno 25 kusů vzorků různých tříd hliníku a jeho slitin, a to z hlediska chemického složení. Tyto materiály byly anodicky oxidovány v laboratoři anodické oxidace na FS ČVUT v Praze. Všechny podmínky jejich předúpravy, dokončovací operace, teplota a koncentrace anodizační lázně, doba anodizace a velikost proudové hustoty byly stejné. Požadavky na vyhodnocení experimentu:

- 1) Experimentální ověření eloxovatelnosti materiálů na bázi Al.
- 2) Porovnání experimentálních výsledků s běžně dostupnými prameny.

### 4.1 Materiál použitý pro experiment

#### **EN AW 6060**

Třída hliníku 6060 obsahující křemík a hořčík v poměru přibližně potřebném pro tvorbu silicid hořčíku ( $Mg_2Si$ ), který je dělá tepelně zpracovatelnými. Hliníkové slitiny 6060 mají dobrou tvarovatelnost, svařitelnost, obrobitelnost, relativně dobrou odolnost proti korozi a střední pevnost. Chemické složení: slitina  $AlMgSi$

#### **EN AW 5056**

Tato třída hliníku má dobré svařovací vlastnosti a relativně dobrou odolnost proti korozi v mořském prostředí. Nicméně by mělo být omezení na množství studené práce a provozní teploty ( $150^\circ F$ ) povolených pro hliníkové slitiny s vyšším obsahem hořčíku, aby se zabránilo náchylnosti k napětí – koroznímu praskání. Chemické složení: slitina  $AlMg$ .

#### **EN AW 2024**

Mechanické vlastnosti této třídy jsou podobné a někdy i vyšší než u nízkouhlíkové oceli. Nemají tak dobrou odolnost vůči korozi jako většina ostatních slitin hliníku a za určitých podmínek mohou být předmětem mezikrystalové koroze. Jsou ale vhodné pro ty části, které vyžadují dobrou pevnost při teplotách až do  $150^\circ C$  ( $300^\circ F$ ). Hliník třídy 2024 je nejpopulárnější slitinou a je běžně používán ve stavbě letadel. Chemické složení: slitina  $AlCu$ .

#### **EN AW 7075**

Zinek v množství 1 až 8% je hlavním legujícím prvkem ve slitinách hliníku 7075 řady a v kombinaci s menším procentem hořčíku v kalené slitině tvoří středně velmi vysokou pevnost. Vyšší pevnost 7075 hliníkových slitin vykazuje sníženou odolnost

proti koroznímu praskání, a proto jsou často využívány v mírně přestárnutém stavu pro poskytování lepší kombinace pevnosti, odolnosti proti korozi, a lomové houževnatosti. Chemické složení: slitina AlZn.

### **EN AW 1000**

Tato třída hliníku je charakteristická perfektní odolností proti korozi, vysokou tepelnou a chemickou vodivostí, slabými mechanickými vlastnostmi a perfektní zpracovatelností. Mírného zvýšení pevnosti dosáhneme deformačním zpevněním. Železo a křemík jsou hlavními nečistotami. Chemické složení: Al minimálně 99,00% a více.

## **4.2 Použitá experimentální technika**

Měření tloušťky vrstvy po procesu anodické oxidace bylo dokumentováno pomocí elektronického tloušťkoměru povlaků PosiTector 6000, (viz obr. 16.)

Analýza povrchu vzorků po anodické oxidaci byla prokazována pomocí mikroskopu OLYMPUS LEXT, obr. 17.

Měření barvy a lesku se provádělo a bylo dokumentováno pomocí přístroje BYK Gardner, (viz obr 18).



Obr. 16 PosiTector 6000



Obr. 17 Olympus LEXT [26]



Obr. 18 BYK Gardner

## 4.3 Výsledky a diskuze experimentální práce

### 4.3.1 Příprava vzorku pro experiment

Očištěný a mírně odmaštěný se zjištěným povrchem (ve své práci jsem používal technický benzin)

1. **Odmašťovací lázeň** – použití za teploty 55 – 60°C. Odmaštění trvá přibližně 6-10 minut. Po odmaštění následuje oplach – výsledný materiál musí být smáčivý a oplachová voda musí smáčet celý díl. Pro zlepšení odmašťovacího efektu je vhodné vzorkem v lázni pohybovat.
2. **Mořící lázeň** – je silně zásaditá. Doba moření je přibližně 2 minuty a je vhodné s díly pohybovat. Z materiálu se budou uvolňovat oxidy, kvůli čemu bude šumět. Možná je i změna barvy, zaleží na třídě hliníku. Následuje důkladný oplach – další proces je mírně kyselý a silná zásada by ho rychle znehodnotila.
3. **Vyjasnění** – mírně kyselé. Výrobek můžeme vložit do vany až po důkladném opláchnutí. S dílem je vhodné občas zahýbat, aby se barva výrobku srovnala na čistě hliníkovou šedo-stříbrnou. Doba vyjasnění trvá přibližně dvě minuty, pak je vzorek potřeba opláchnout.

Lázně které byly použité pro proces anodické oxidace:

### Odmaštění

Pro odmaštění byla použita lázeň složená z přípravku **Anodal DA – 5**, v objemu  $30\text{ g.l}^{-1}$ . Proces se provádí při  $55 - 60^\circ\text{C}$  a trvá přibližně 3 – 15 min.

### Moření

Pro moření byla použita lázeň na bázi přípravku **Anodal EC – 2**, v objemu  $20\text{ g.l}^{-1}$  + **NaOH** v objemu  $50\text{ g.l}^{-1}$ . Lázeň je vhodná pro moření hliníku a jeho slitin a je schopná očistit i silně znečištěné a zoxidované povrchy.

### Vyjasnění

K vyjasnění součástí byla použita lázeň složená z přípravku **Anodal D – 75** s koncentrací 5% objemu. Tato lázeň má dobrý čistící efekt. Vyřazením kyseliny dusičné se podstatně snižuje koncentrace dusičnanů v odpadních vodách.

### Lázeň pro anodickou oxidaci

Jako elektrolyt pro anodickou oxidaci byla použita lázeň na bázi kyseliny sírové a přípravku **Anodal EE** s koncentrací  $20\text{ ml.l}^{-1}$  +  $\text{H}_2\text{SO}_4$  s koncentrací  $150\text{ g.l}^{-1}$ . Použité přísady zlepšují kvalitu oxidické vrstvy a také pracovní podmínky. Vrstvy z této lázně vykazují vyšší tvrdost a silnější vrstvy.

### Utěsnění

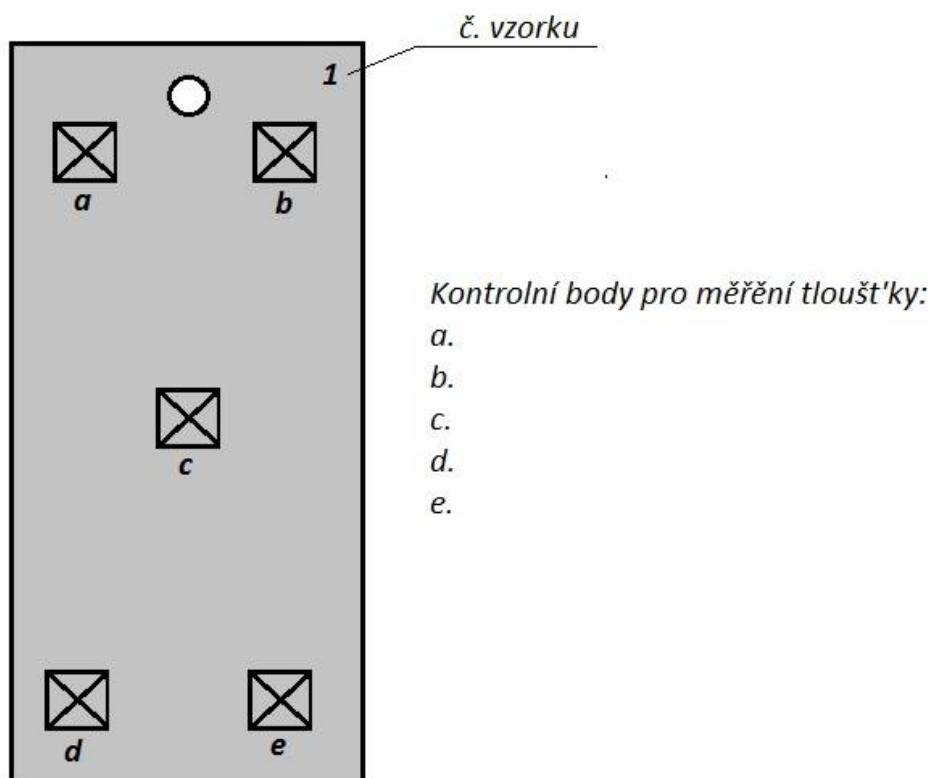
Do technologického postupu bylo zařazeno horké utěsnění vrstvy po barvení v horké vodě při teplotě minimálně  $96^\circ\text{C}$ . Tato lázeň je určena pro horké utěsnění. Hlavním přínosem této lázně je, že póry se zavírají a barvivo zvyšuje odolnost proti korozivním složkám životního prostředí. Doba utěsnění závisí na tloušťce vrstvy oxidu, v provozu odpovídá cca 40 minutám.

### 4.3.2 Pracovní podmínky a výsledky experimentu

Upravované vzorky byly rozděleny do pěti skupin dle tříd:

- 1) 6060, (celkem 6 vzorků),
- 2) 5056, (5 vzorků),
- 3) 2024, (5 vzorků),
- 4) 7075, (5 vzorků),
- 5) 1000, (5 vzorků).

U jednotlivých vzorků byla následně vyhodnocena tloušťka vrstvy na pěti místech vzorku. V každém bodě se měření provádělo 3krát. Pro měření tloušťky vytvořené vrstvy bylo zvoleno pět kontrolních míst (viz obrázek). Místo {a} horní levá strana vzorku, místo {b} horní pravá strana, místo {c} uprostřed, místo {d} dolní levá strana vzorku a místo {e} dolní pravá strana.



Obr. 19 Schema vzorku

Měření bylo provedeno z obou stran vzorku a zaneseno do tabulek, které jsou uvedeny v příloze 2. Poté byl vypočítán aritmetický průměr ( $\bar{\theta}$ ), a směrodatná odchylka ( $\sigma$ ). V tab. 9 – 13, jsou vypsány aritmetické průměry z každého měření podle tříd, z jedné strany vzorků.

I - 6060	Měření tloušťky v [ $\mu\text{m}$ ]				
č.vzorku	a.	b.	c.	d.	e.
0)	15,7	14,7	13,8	14	14,4
1)	15,4	15,2	15,4	13,7	12,3
2)	14	12,9	12,9	10,6	10,4
3)	13,4	13,5	13,7	11,6	12,2
4)	14,1	14,4	14,7	14,9	12,4
5)	16,3	14,6	15	14,5	13,3

tab. 9 Měření AP třídy 6060

II - 5056	Měření tloušťky v [ $\mu\text{m}$ ]				
č.vzorku	a.	b.	c.	d.	e.
1)	20	18	18,3	15,4	15,3
2)	16,8	17,5	14	14,2	14,8
3)	15,4	14,5	14,2	15,7	15,7
4)	15,4	17,3	15,3	15,3	15,4
5)	16,2	15,9	16,3	16,9	14,5

tab. 10 Měření AP třídy 5056

III - 2024	Měření tloušťky v [ $\mu\text{m}$ ]				
č.vzorku	a.	b.	c.	d.	e.
1)	12,9	11	11,2	14,1	11
2)	13	11,2	14	13,8	12,4
3)	11	11,4	11,2	11,4	14,3
4)	12,5	10,8	15	14,1	12,9
5)	10,8	11,3	12,3	14,1	12,7

tab. 11 Měření AP třídy 2024

IV - 7075	Měření tloušťky v [ $\mu\text{m}$ ]				
č.vzorku	a.	b.	c.	d.	e.
1)	15,3	16,1	13,6	14,7	14,9
2)	12,4	12,4	12,8	13,8	15,5
3)	15,2	13,7	14,4	15,3	13
4)	13,6	12,7	13,5	17,2	15
5)	13,6	11,3	13,1	13,8	10,4

tab. 12 Měření AP třídy 7075

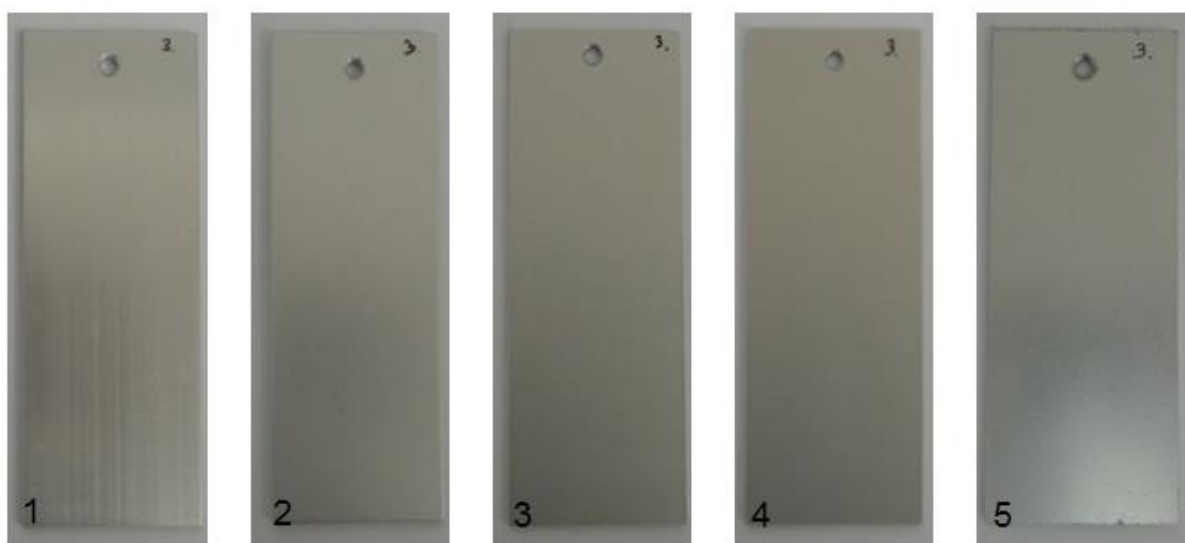
V - 1000	Měření tloušťky v [ $\mu\text{m}$ ]				
č.vzorku	a.	b.	c.	d.	e.
1)	10,5	13,1	12,8	11,7	11,8
2)	12,1	12	11,5	11,4	11,9
3)	10	10,6	10,5	10,6	14,6
4)	11,9	13,8	13,1	13,5	11,7
5)	11	12,6	10,9	10,2	11,9

tab. 13 Měření AP třídy 1000

Z tabulek 9 – 13 je vidět, že ve vytvořené vrstvě nejsou chyby (tloušťka vrstvy pod 10  $\mu\text{m}$ ). Pokud kvalitu vrstvy posuzujeme z hlediska tloušťky vytvořené vrstvy, můžeme konstatovat, že všechny vzorky mají dobrý výsledek. Pokud kvalitu vrstvy posuzujeme z hlediska její rovnoměrnosti tak je vidět ( viz příloha 1 ), že:

- U vzorků číslo: 3 a 2 materiál třídy 6060, je vrstva vlnitá v dolní části vzorku, což ukazuje na špatně obrobený, nebo nedostatečně odmaštěný materiál.
- U vzorku číslo 4 třídy 5056, je vidět malé prohloubení v dolní části. Důvodem je poškození původního vzorku.
- Všech 5 vzorků třídy 1000 má poškozené hrany horní a spodní, tudíž můžeme konstatovat, že vzorky byly poškozeny při obrábění, konkrétně při řezání materiálu.

Vyfocené vzorky po ukončení procesu anodické oxidace. Z každé třídy je vybrán vzorek číslo 3 pro srovnání. Fotografie ostatních vzorků jsou umístěny v příloze 1.



Obr. 20 Vzorky po anodické oxidaci

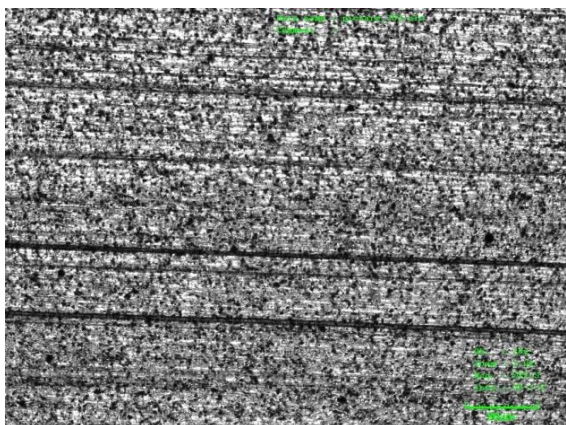
Tab. 14 Srovnání vzorků po anodické oxidaci

Č. vzorku	1	2	3	4	5
Třída mater.	6060	5056	2024	7075	1000
Anod.oxidace	N	R	R	R	R

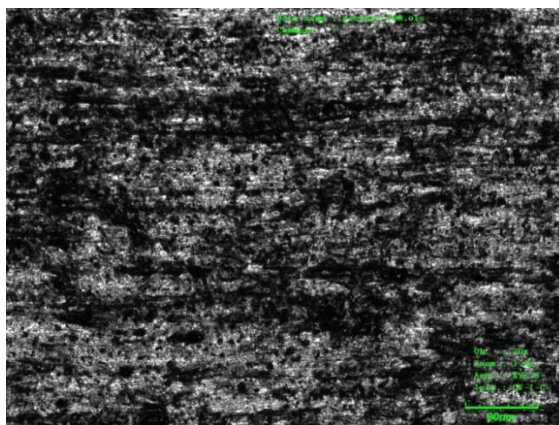
\*N – nerovnoměrná ; R – rovnoměrná

Je vidět, že anodická oxidace proběhla rovnoměrně ve všech uvedených třídách hliníku a jeho slitin až na třídu 6060, kde jsou viditelné šmouhy. Některé vzorky jsou poškozeny na hranách po dělení materiálu.

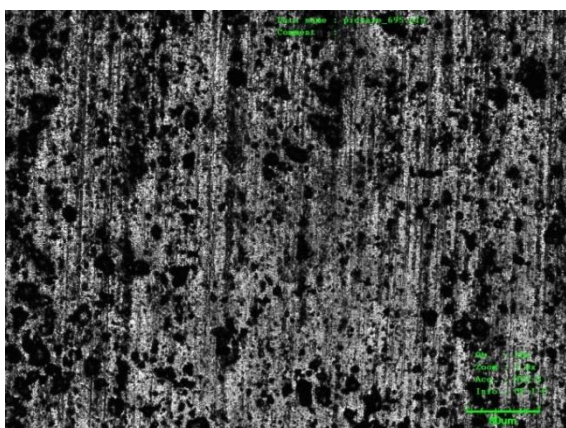
Fotografie vzorků nasnímaných pomocí mikroskopu Olympus Lext . Z každé třídy byla vybrána jedna fotografie pro srovnání a popis výsledku. Fotografie všech vzorků jsou umístěny v příloze 3.



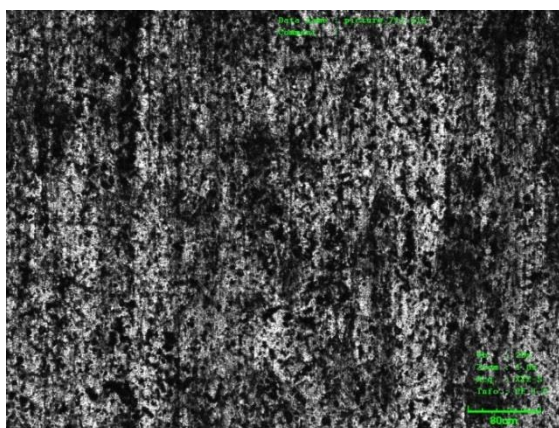
Obr. 21 Material třídy 6060



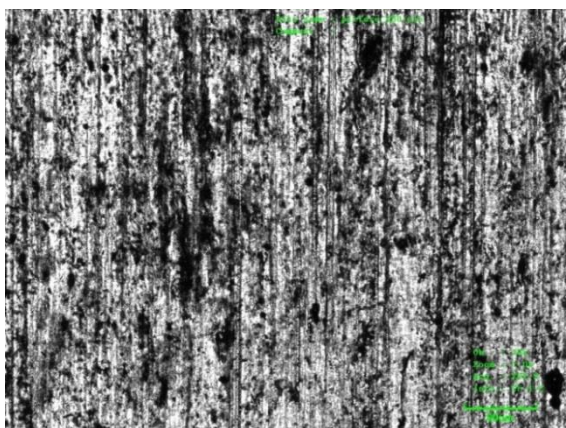
Obr. 22 Material třídy 5056



Obr. 23 Material třídy 2024



Obr. 24 Material třídy 7075

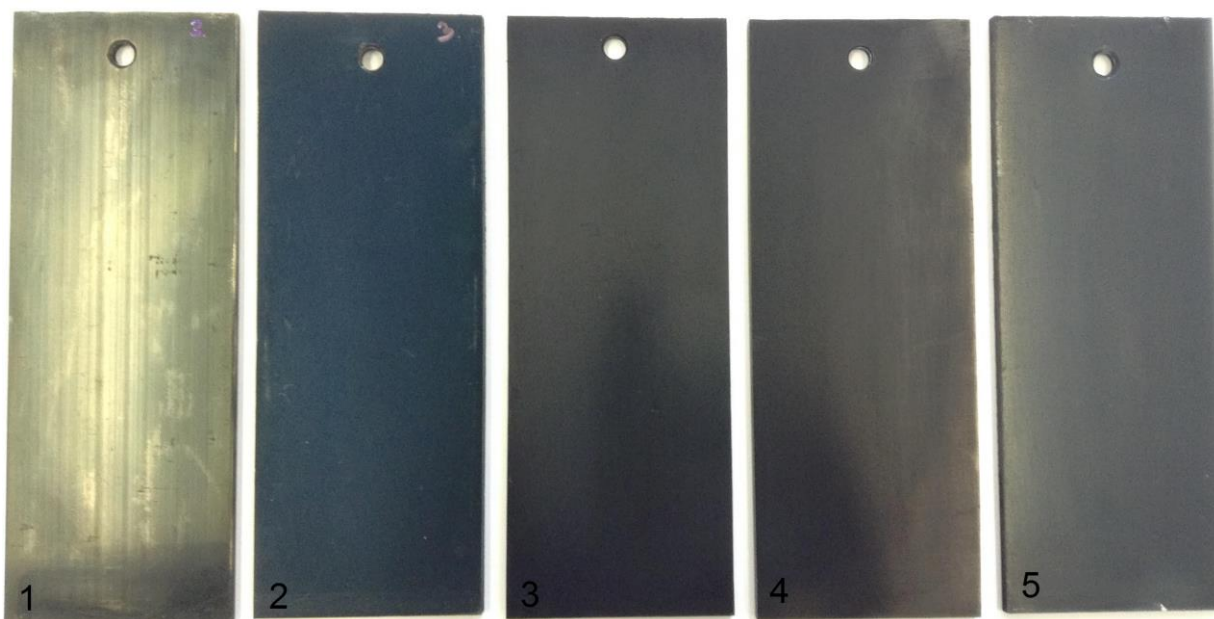


Obr. 25 Material třídy 1000



Z předložených fotografií můžeme konstatovat, že po procesu anodické oxidace vzorek na obr. 21, materiálu třídy 6060, má nejlepší rovnoměrnou vrstvu. Jsou viditelné nepatrné vrypy, které vznikly po obrábění (tváření). Vzorek na obrázku 25, materiálu třídy 1000, má taky poměrně rovnoměrnou vrstvu. Jsou viditelné také prohlubně pórů. Vzorky na obr. 22, 23, 24 mají nerovnoměrnou anodizovanou vrstvu, je viditelně větší množství povrchových vad.

Pro provedení srovnání po barvení materiálů byly vybrány vzorky číslo 3 z každé třídy hliníku.



Obr. 26 Vzorky po barvení č. 3 z každé třídy

Tab. 15 Srovnání vzorků po barvení

Č. vzorku	1	2	3	4	5
Třída mater.	6060	5056	2024	7075	1000
Barvení	N	N	R	N	R

\*N – nerovnoměrná ; R – rovnoměrná

Z obr. 26 je vidět, že vzorek třídy 5056 (vzorek číslo 2) má mnohem výraznější černou barvu, než ostatní vzorky. Barvení dopadlo rovnoměrně na vzorcích č. 3 a 4. Vzorek třídy 6060 (vzorek č. 1) má světlejší odstín a nerovnoměrné barvení. Na vzorku číslo 2 třídy 5056 jsou škrábance kvůli nesprávnému pohybování se vzorkem. Další příčinou může být obrobiteľnosť, nebo dělení materiálu.

## Závěr

Cílem praktické části práce bylo experimentálně ověřit eloxovatelnost materiálů na bázi Al a porovnat výsledky s běžně dostupnými prameny. V níže uvedené tabulce 16, je vypsaná všeobecná eloxovatelnost a příklady použití konkrétních tříd hliníku a jeho slitin.

Tab. 16 Eloxovatelnost hliníku a jeho slitin [27,28]

Hliník a jeho slitina	Eloxovatelnost dle normy	Eloxovatelnost po experimentu	Příklady použití
<b>EN AW 6060</b>	1	1	C,E,F
<b>EN AW 5056</b>	3	2	B,E
<b>EN AW 2024</b>	3 – 4	3 – 4	B,C
<b>EN AW 7075</b>	4 – 5	2 – 3	B,C,E,F
<b>EN AW 1000</b>	1	4	A,E

\*A – elektrotechnika

B – strojní součásti vhodné k obrábění

C – konstrukce

D – stavba lodí

E – tváření za tepla a za studena

F – všeobecné použití

\*\* Známkování: 1 – výborně.... [27,28]

Ze srovnání tab. 16 a tab. 9 – 13 z kapitoly 4.3.2 plyne, že technicky eloxovatelné jsou všechny uvedené slitiny hliníku. Podle norem mají být materiály třídy 1000 dobře eloxovatelné, ale po experimentu byla jejich eloxovatelnost slabší. Naopak u materiálů třídy 7075 jsme u eloxovatelnosti, která je zde jinak podmíněčná, dostali poměrně dobré výsledky. Ostatní materiály vyhovují uvedeným normám.

## Seznam použitých zdrojů:

- [1] ФИАЛКОВ, Ю. Девятый знак. — М.: Детгиз, 1963.  
Dostupné z: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Алюминий#cite\\_note-4](https://ru.wikipedia.org/wiki/Алюминий#cite_note-4)
- [2] HARPER D. Online Etymology Dictionary, © 2001-2015  
Dostupné z: <http://www.etymonline.com>
- [3] КНУНЯНЦ И.Л. Краткая химическая энциклопедия, 1961  
Dostupné z: <http://www.twirpx.com/file/155476/>
- [4] DĚČÍN: Alcan Děčín Extrusions, Encyklopedie hliníku, 2005, 1 elektronický optický disk (CD-ROM). ISBN 80-890-4188-4.
- [5] ООО «ПОТОК» Порошковое окрашивание.  
Dostupné z: <http://www.okb-potok.ru/articles/125/>
- [6] АСТАХОВ К.В, Богословский С.В., Варгафтик М.Б.и др. [1968-2007].  
Dostupné z: <http://chem21.info/>
- [7] KREIBICH, Viktor a Vladislava OSTRÁ.  
Dostupné z: <http://www.povrchari.cz/>
- [8] COTELL, C.M., SPRAGUE, J.A., SMIDT, F.A. ASM Handbook - Vol.5 Surface Engineering, ASM International, Ohio 1994.
- [9] MICHNA, Štefan. Koroze: Povrchová úprava - eloxování. 2008  
Dostupné z: <http://www.stefanmichna.com/download/koroze/povrchova-uprava-eloxovani.pdf>
- [10] KREIBICH, Viktor, Elektronický časopis POVRCHOVÁ ÚPRAVA  
Dostupné z: <http://www.povrchovauprava.cz>
- [11] CHROMTECH. *Chromátování hliníku (pasivace)* [online]. [cit. 2013-05-08].  
Dostupné z: <http://www.chromtech.cz/cz/chromatal.htm>
- [12] ALUCAD BOHEMIA «Technicke udaje».  
Dostupné z: <http://www.alucad.cz>.
- [13] TOMÁŠ, Fiala. *Tvrdé a otěruvzdorné vrstvy na slitinách hliníku* [online]. Praha, 2006, s. 1-9 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z:  
[http://stc.fs.cvut.cz/History/2006/Sbornik\\_S2.pdf](http://stc.fs.cvut.cz/History/2006/Sbornik_S2.pdf)
- [14] KREIBICH, Viktor. *Příčiny a důsledky nevhodných aplikací povrchových úprav: Causes and consequences undersirable applications of surface treatments*. V Praze: České vysoké učení technické, 2004, 29 s. ISBN 80-010-3120-9.

- [15] EKOCEM – PPÚ s.r.o, Anodická oxidace hliníku a jeho slitin.  
Dostupné z: [http://www.ekochem-ppu.cz/Materi%C3%A1ly/Anodicka\\_oxidace\\_hliniku\\_a\\_jeho\\_slitin.pdf](http://www.ekochem-ppu.cz/Materi%C3%A1ly/Anodicka_oxidace_hliniku_a_jeho_slitin.pdf)
- [16] KRAUS V. POVRCHY A JEJICH ÚPRAVY  
Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/POUcelk.pdf>
- [17] SULKA, G. D.: Nanostructured materials in electrochemistry. Weinheim: Wiley - VCH, 2008, s. 1-117. ISBN 978-3-527-31876-6.
- [18] VÁLA, J. *Anodická oxidace (Struktura a růst vrstvy)* [online]. 2009 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z:  
<http://www.lakovna.cz/anodicka-oxidace-struktura-a-rust-vrstvy/vsechny-strany.html>
- [19] BÁRTA A CIHLÁŘ, Povrchové technologie a úpravy  
Dostupné z: <http://www.povrchove-technologie.cz/cz/technologie/eloxovani-hliniku/>
- [20] HROCH M. Eloxování hliníku  
Dostupné z: <http://www.astronom.cz/procyon/chemistry/elox.html>
- [21] АЛЮФИНИШ РУС, Процесс анодирования алюминия. (Proces anodizace hliníku) Dostupné z:  
[http://galvanicworld.com/netcat\\_files/899/750/h\\_290338b91ff2710d0a3ad83f3292751d](http://galvanicworld.com/netcat_files/899/750/h_290338b91ff2710d0a3ad83f3292751d)
- [22] ČSN EN ISO 4516. *Kovové a jiné anorganické povlaky - Zkoušky mikrotvrdomosti podle Vickerse a podle Knoopu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [23] VUT v Brně, Tvrdost (mikrotvrdomost)  
Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/tvrdomost-mikrotvrdomost>
- [24] IMPEA s.r.o, Měření tloušťky vrstev povrchově upravených materiálů  
Dostupné z: <http://povrchovauprava.cz/clanek/50/mereni-tloustky-vrstev-povrchove-upravenych-materialu>.
- [25] MM Průmyslové spektrum. Databáze online [21. 2. 2012].  
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/dotykove-nebo-bezdotykove-mereni-struktury-povrchu.html>
- [26] Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/olympus/product-17434-866071.html>
- [27] Dostupné z: <http://www.alms-brno.cz/produkty/1-hlinik/>
- [28] Dostupné z: <http://www.aludecin.cz/29530/standardni-slitiny-hliniku/>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Popis	Jednotka
<b>GS</b>	metoda kyseliny sírové	
<b>GSX</b>	metoda kyseliny sírové a šřavelové	
<b>HV</b>	tvrdost podle Vickerse	
<b>HK</b>	tvrdost podle Knoop	
<b>KHN</b>	Knoopovo číslo tvrdostí	
<b>AP</b>	aritmetický průměr	
<b>pH</b>	stupeň kyselosti	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>F</b>	síla	[ N ]

## **Seznam příloh**

Příloha 1 – Vzorok po ukončení procesu anodické oxidace

Příloha 2 – Měření tloušťky vrstvy

Příloha 3 – Povrch anodizovaného materiálu

Příloha 4 – Vzorok po barvení

Příloha 5 – Měření

## Příloha 1

Vzorky po ukončení procesu anodické oxidace. Popis k vzorkům viz. kapitola 4.3.2, str 36.

### 1) 6060



*Obr. P1.1 Skupina vzorků – třída 6060*

### 2) 5056



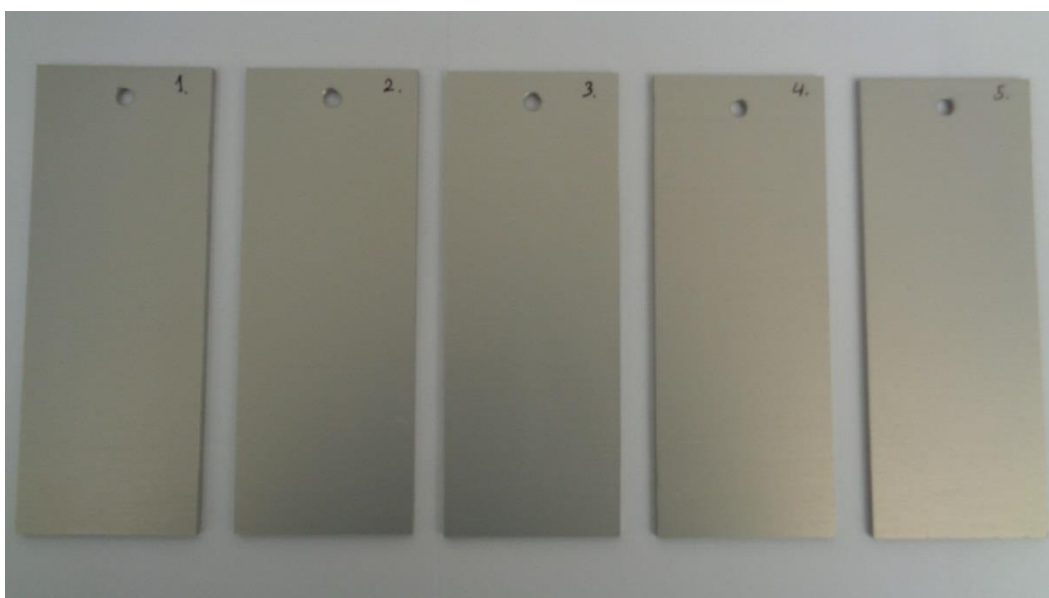
*Obr. P1.2 Skupina vzorků – třída 5056*

**3) 2024**



*Obr. P1.3 Skupina vzorků – třída 2024*

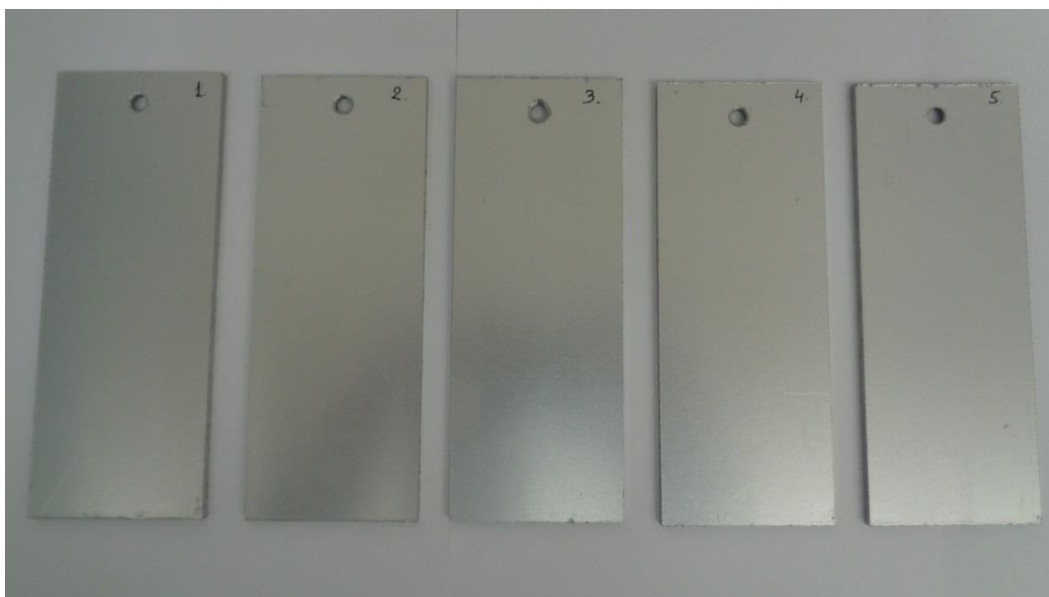
**4) 7075**



*Obr. P1.4 Skupina vzorků – třída 7075*



5) 1000



*Obr. P1.5 Skupina vzorků – třída 1000*

## Příloha 2

### Měření tloušťky vrstvy

Tab. P2.1 Naměřené hodnoty vzorků třídy 6060

I - 6060	Měření tloušťky v [μm].										
0)	a.	1)	15,6	b.	15	c.	12,3	d.	13,6	e.	13,7
		2)	15,2		13,8		14,6		13,4		14,1
		3)	16,2		15,2		14,6		15,1		15,4
∅			15,7		14,7		13,8		14,0		14,4
σ			0,4		0,6		1,1		0,8		0,7

1)	a.	1)	15,1	b.	16,4	c.	15,8	d.	13,5	e.	12,6
		2)	15,4		14,1		14,6		12,6		10,8
		3)	15,8		15,2		15,7		15,1		13,5
∅			15,4		15,2		15,4		13,7		12,3
σ			0,3		0,9		0,5		1,0		1,1

2)	a.	1)	14,2	b.	11,2	c.	14,5	d.	9,5	e.	10,1
		2)	14,1		13,7		10,3		10,5		10,2
		3)	13,7		13,9		13,9		11,8		10,8
∅			14		12,9		12,9		10,6		10,4
σ			0,2		1,2		1,9		0,9		0,3

3)	a.	1)	12,9	b.	13,9	c.	13,5	d.	9,8	e.	13,3
		2)	13,3		13,3		14,4		12,7		11,8
		3)	14		13,4		13,2		12,2		11,6
∅			13,4		13,5		13,7		11,6		12,2
σ			0,5		0,3		0,5		1,3		0,8

4)	a.	1)	14,2	b.	13,5	c.	14,4	d.	15,9	e.	12,3
		2)	14,6		14,2		15,3		14,5		12
		3)	13,4		15,6		14,5		14,2		12,9
∅			14,1		14,4		14,7		14,9		12,4
σ			0,5		0,9		0,4		0,7		0,4

5)	a.	1)	17,3	b.	14,4	c.	14,9	d.	14,7	e.	13,1
		2)	16,1		14,2		15,6		14,3		13,2
		3)	15,4		15,3		14,5		14,6		13,6
∅			16,3		14,6		15		14,5		13,3
σ			0,8		0,5		0,5		0,2		0,2

Tab. P2.2 Naměřené hodnoty vzorků třídy 5056

II - 5056	Měření tloušťky v [μm].										
1)	a.	1)	21,3	b.	20	c.	18,1	d.	15,2	e.	15,3
		2)	18,4		16,9		19,1		15,8		14,5
		3)	20,4		17,1		17,8		15,3		16,1
∅			20,0		18		18,3		15,4		15,3
σ			1,2		1,4		0,6		0,3		0,7

2)	a.	1)	16,5	b.	16,5	c.	14,4	d.	13,9	e.	14,9
		2)	17,4		17,5		13,5		13,6		15,2
		3)	16,5		18,4		14,1		15		14,3
∅			16,8		17,5		14		14,2		14,8
σ			0,4		0,8		0,4		0,6		0,4

3)	a.	1)	15,7	b.	14	c.	15	d.	15,2	e.	15,6
		2)	16		14,8		14		15,9		15,8
		3)	14,6		14,8		13,6		15,9		15,6
∅			15,4		14,5		14,2		15,7		15,7
σ			0,6		0,4		0,6		0,3		0,1

4)	a.	1)	15,6	b.	17,8	c.	15	d.	15,1	e.	16,1
		2)	16		16,8		15,2		15,1		14,8
		3)	14,7		17,4		15,8		15,8		15,3
∅			15,4		17,3		15,3		15,3		15,4
σ			0,5		0,4		0,3		0,3		0,5

5)	a.	1)	15,8	b.	16,1	c.	16,2	d.	17	e.	15,4
		2)	16,3		15,5		16,6		17,1		14
		3)	16,4		16		16,1		16,7		14,1
∅			16,2		15,9		16,3		16,9		14,5
σ			0,3		0,3		0,2		0,2		0,6

Tab. P2.3 Naměřené hodnoty vzorků třídy 2024

III - 2024	Měření tloušťky v [μm].										
1)	a.	1)	13,4	b.	10,5	c.	10,8	d.	15	e.	10,4
		2)	12,7		11,8		12,1		13,9		11,2
		3)	12,5		10,8		10,8		13,4		11,4
∅			12,9		11,0		11,2		14,1		11
σ			0,4		0,6		0,6		0,7		0,4

2)	a.	1)	13	b.	11,4	c.	14	d.	13,9	e.	11,7
		2)	13,2		11		14,1		13,6		12,4
		3)	12,9		11,1		13,8		13,8		12,4
∅			13,0		11,2		14,0		13,8		12,2
σ			0,1		0,2		0,1		0,1		0,3

3)	a.	1)	11,2	b.	11,4	c.	10,5	d.	11,6	e.	14,8
		2)	10,9		11,5		11,4		11,1		13,6
		3)	10,9		11,4		11,7		11,4		14,6
∅			11		11,4		11,2		11,4		14,3
σ			0,1		0,0		0,5		0,2		0,5

4)	a.	1)	12,7	b.	11	c.	15,9	d.	13,9	e.	13,1
		2)	12,2		10,5		14,7		14		12,4
		3)	12,5		10,9		14,4		14,3		13,3
∅			12,5		10,8		15		14,1		12,9
σ			0,2		0,2		0,6		0,2		0,4

5)	a.	1)	10,9	b.	10,9	c.	12	d.	14,3	e.	12,9
		2)	10,6		12		12,6		14,3		12,7
		3)	10,8		11		12,2		13,7		12,4
∅			10,8		11,3		12,3		14,1		12,7
σ			0,1		0,5		0,2		0,3		0,2

Tab. P2.4 Naměřené hodnoty vzorků třídy 7075

IV - 7075		Měření tloušťky v [μm].									
1)	a.	1)	15,3	b.	15,1	c.	13,6	d.	14,7	e.	14,1
		2)	15,6		17,3		13,5		14,3		15,9
		3)	14,9		15,8		13,8		15		14,8
∅			15,3		16,1		13,6		14,7		14,9
σ			0,3		0,9		0,1		0,3		0,7

2)	a.	1)	12,4	b.	12	c.	12,6	d.	15,1	e.	14,2
		2)	12,7		12,8		12,3		13,4		16,3
		3)	12,2		12,4		13,4		13		16
∅			12,4		12,4		12,8		13,8		15,5
σ			0,2		0,3		0,5		0,9		0,9

3)	a.	1)	15,8	b.	13,5	c.	14	d.	14,8	e.	12,2
		2)	15,3		13,8		13,6		15,5		13,7
		3)	14,4		13,7		15,7		15,5		13,2
∅			15,2		13,7		14,4		15,3		13,0
σ			0,6		0,1		0,9		0,3		0,6

4)	a.	1)	13,2	b.	12,2	c.	13,5	d.	17	e.	15,9
		2)	14		13,2		13,7		17,2		13,6
		3)	13,6		12,7		13,2		17,5		15,6
∅			13,6		12,7		13,5		17,2		15,0
σ			0,3		0,4		0,2		0,2		1,0

5)	a.	1)	13,6	b.	11	c.	14,6	d.	13,5	e.	10,1
		2)	13,1		11,7		13		14,4		10,5
		3)	14		11,2		11,6		13,5		10,6
∅			13,6		11,3		13,1		13,8		10,4
σ			0,4		0,3		1,2		0,4		0,2

Tab. P2.5 Naměřené hodnoty vzorků třídy 1000

V - 1000	Měření tloušťky v [μm].										
1)	a.	1)	10,6	b.	14,1	c.	13,1	d.	11,4	e.	11,5
		2)	10,7		12,2		13,1		11,7		12,2
		3)	10,2		13		12,2		11,9		11,8
$\bar{\varnothing}$			10,5		13,1		12,8		11,7		11,8
$\sigma$			0,2		0,8		0,4		0,2		0,3

2)	a.	1)	12,8	b.	12	c.	12,1	d.	11,5	e.	11,2
		2)	11,6		12,2		11,1		11,6		12,5
		3)	11,8		11,9		11,4		11,2		11,9
$\bar{\varnothing}$			12,1		12,0		11,5		11,4		11,9
$\sigma$			0,5		0,1		0,4		0,2		0,5

3)	a.	1)	10	b.	10,4	c.	10,6	d.	10,9	e.	14,9
		2)	9,6		10,8		10,4		10,2		14,7
		3)	10,3		10,6		10,6		10,8		14,2
$\bar{\varnothing}$			10,0		10,6		10,5		10,6		14,6
$\sigma$			0,3		0,2		0,1		0,3		0,3

4)	a.	1)	12,7	b.	13,4	c.	13,3	d.	13,2	e.	11,7
		2)	11,7		13,3		13		14		11,8
		3)	11,2		14,8		13,1		13,4		11,7
$\bar{\varnothing}$			11,9		13,8		13,1		13,5		11,7
$\sigma$			0,6		0,7		0,1		0,3		0,0

5)	a.	1)	11	b.	11,7	c.	10,5	d.	10,4	e.	12,5
		2)	11,1		13,4		11,9		10		11
		3)	10,9		12,8		10,4		10,1		12,2
$\bar{\varnothing}$			11		12,6		10,9		10,2		11,9
$\sigma$			0,1		0,7		0,7		0,2		0,6

Druhá strana (kde není numerace)

Tab. P2.6 Naměřené hodnoty vzorků třídy 6060

I - 6060	Měření tloušťky $v$ [ $\mu\text{m}$ ].										
0)	a.	1)	16	b.	15,1	c.	15,7	d.	14,1	e.	15,4
		2)	16,6		14,6		16,4		13,9		15,5
		3)	16,6		14,6		15,6		13,6		14,7
$\emptyset$			16,4		14,8		15,9		13,9		15,2
$\sigma$			0,3		0,2		0,4		0,2		0,4

1)	a.	1)	16,7	b.	16,8	c.	17,7	d.	17,4	e.	15,5
		2)	16,5		17		17,4		17,7		15,6
		3)	16,6		16,5		17,1		18		16
$\emptyset$			16,6		16,8		17,4		17,7		15,7
$\sigma$			0,1		0,2		0,2		0,2		0,2

2)	a.	1)	12,3	b.	11,2	c.	14,2	d.	11,9	e.	11,1
		2)	12,8		11,4		13,9		12,5		10,8
		3)	12,1		11,2		14,2		12,2		10,6
$\emptyset$			12,4		11,3		14,1		12,2		10,8
$\sigma$			0,3		0,1		0,1		0,2		0,2

3)	a.	1)	11,6	b.	11,6	c.	10,8	d.	10,2	e.	12,3
		2)	11,3		11,4		11,1		10,8		12,6
		3)	11,8		12		10,7		10,6		11,6
$\emptyset$			11,6		11,7		10,9		10,5		12,2
$\sigma$			0,2		0,2		0,2		0,2		0,4

4)	a.	1)	12,1	b.	14,6	c.	14,3	d.	12,5	e.	10,4
		2)	12,7		14,1		14,7		12,9		10,5
		3)	12,2		14,6		14,1		13		10,2
$\emptyset$			12,3		14,4		14,4		12,8		10,4
$\sigma$			0,3		0,2		0,2		0,2		0,1

5)	a.	1)	13,4	b.	13,4	c.	12,7	d.	13,4	e.	12,6
		2)	13,8		13,5		12		14,6		12,5
		3)	13,6		13,8		12,8		13,7		11,9
$\emptyset$			13,6		13,6		12,5		13,9		12,3
$\sigma$			0,2		0,2		0,4		0,5		0,3

Tab. P2.7 Naměřené hodnoty vzorků třídy 5056

II - 5056		Měření tloušťky v [μm].									
1)	a.	1)	19,4	b.	20,1	c.	18,6	d.	16,5	e.	16,3
		2)	19		19,4		18,4		16,5		16,9
		3)	19,1		19,8		19		16,4		16,7
∅			19,2		19,8		18,7		16,5		16,6
σ			0,2		0,3		0,2		0,0		0,2

2)	a.	1)	16,7	b.	17,7	c.	15,6	d.	14,7	e.	17,1
		2)	16,7		18		15		15,1		17,4
		3)	17,1		17,3		15,3		15,3		17,1
∅			16,8		17,7		15,3		15,0		17,2
σ			0,2		0,3		0,2		0,2		0,1

3)	a.	1)	16,7	b.	17,8	c.	16,1	d.	17,5	e.	17,8
		2)	17		17,6		16,7		17,5		17,8
		3)	16,6		17,7		16,5		17,9		17
∅			16,8		17,7		16,4		17,6		17,5
σ			0,2		0,1		0,2		0,2		0,4

4)	a.	1)	18	b.	18,2	c.	16,2	d.	17,1	e.	16,2
		2)	18,3		18,5		16,4		17,8		15,9
		3)	18,6		18,1		16,6		17,7		16,7
∅			18,3		18,3		16,4		17,5		16,3
σ			0,2		0,2		0,2		0,3		0,3

5)	a.	1)	15,9	b.	17,3	c.	16	d.	15,6	e.	17
		2)	16,3		17		16,1		15		16,6
		3)	16		17,6		16,1		15,4		17
∅			16,1		17,3		16,1		15,3		16,9
σ			0,2		0,2		0,0		0,2		0,2



Tab. P2.8 Naměřené hodnoty vzorků třídy 2024

III - 2024	Měření tloušťky v [ $\mu\text{m}$ ].										
1)	a.	1)	13,1	b.	13,9	c.	14,6	d.	14,6	e.	13,4
		2)	13,3		14		15,3		14,5		13,5
		3)	12,9		13,5		15,3		14,5		13,4
$\bar{\varnothing}$			13,1		13,8		15,1		14,5		13,4
$\sigma$			0,2		0,2		0,3		0,0		0,0

2)	a.	1)	15,3	b.	12,6	c.	13,3	d.	14,1	e.	13,5
		2)	14,2		12,8		13,8		14,1		13
		3)	14,4		12,7		14		13,5		13,7
$\bar{\varnothing}$			14,6		12,7		13,7		13,9		13,4
$\sigma$			0,5		0,1		0,3		0,3		0,3

3)	a.	1)	13,6	b.	14,6	c.	16,4	d.	13,5	e.	14
		2)	13,3		14,6		15,1		13,8		13,9
		3)	13,5		13,9		15,7		14,1		14,4
$\bar{\varnothing}$			13,5		14,4		15,7		13,8		14,1
$\sigma$			0,1		0,3		0,5		0,2		0,2

4)	a.	1)	14,2	b.	14	c.	14,4	d.	14,3	e.	12,9
		2)	14,8		13,8		13,7		13,9		12,7
		3)	14,6		14		13,7		14		13
$\bar{\varnothing}$			14,5		13,9		13,9		14,1		12,9
$\sigma$			0,2		0,1		0,3		0,2		0,1

5)	a.	1)	13,7	b.	15,2	c.	13,7	d.	14,6	e.	13,2
		2)	13,5		14,3		14,3		15		12,8
		3)	14,1		14,8		13,4		14,1		13
$\bar{\varnothing}$			13,8		14,8		13,8		14,6		13
$\sigma$			0,2		0,4		0,4		0,4		0,2

Tab. P2.9 Naměřené hodnoty vzorků třídy 7075

IV - 7075		Měření tloušťky v [μm].									
1)	a.	1)	16,6	b.	16,6	c.	14,6	d.	13,1	e.	15,8
		2)	17		17,1		15,3		13,1		15,5
		3)	16,2		16		14,5		12,7		16,1
∅			16,6		16,6		14,8		13,0		15,8
σ			0,3		0,4		0,4		0,2		0,2

2)	a.	1)	15,3	b.	14,7	c.	15,5	d.	14,4	e.	15
		2)	14,7		15,3		14,9		14,5		15,7
		3)	14,3		14,7		15,5		14,4		15,8
∅			14,8		14,9		15,3		14,4		15,5
σ			0,4		0,3		0,3		0,0		0,4

3)	a.	1)	16,1	b.	15,5	c.	14,9	d.	14,8	e.	15,9
		2)	16,7		15,3		14,5		14,3		15
		3)	16,4		14,9		15		14,4		14,8
∅			16,4		15,2		14,8		14,5		15,2
σ			0,2		0,2		0,2		0,2		0,5

4)	a.	1)	15,5	b.	13,5	c.	16,1	d.	14,3	e.	14,8
		2)	14,6		13,1		16,5		14,1		15
		3)	14,9		13,5		16,5		14,9		14,6
∅			15		13,4		16,4		14,4		14,8
σ			0,4		0,2		0,2		0,3		0,2

5)	a.	1)	14,3	b.	16,7	c.	15,8	d.	15,6	e.	14,3
		2)	14,7		15,3		14,9		15		15
		3)	15		15,9		15,7		15,1		15
∅			14,7		16,0		15,5		15,2		14,8
σ			0,3		0,6		0,4		0,3		0,3

Tab. P2.10 Naměřené hodnoty vzorků třídy 1000

V - 1000	Měření tloušťky v [μm].										
1)	a.	1)	13,3	b.	14,6	c.	13,2	d.	12,7	e.	12,3
		2)	13,3		14,7		12,8		12,6		12,9
		3)	13,1		14,2		12,7		12,3		12,6
$\bar{\varnothing}$			13,2		14,5		12,9		12,5		12,6
$\sigma$			0,1		0,2		0,2		0,2		0,2

2)	a.	1)	14,3	b.	14,4	c.	15,1	d.	11,5	e.	13,7
		2)	13,2		15,3		14,2		11,4		13,3
		3)	13,5		15,4		14,1		11,4		12,9
$\bar{\varnothing}$			13,7		15,0		14,5		11,4		13,3
$\sigma$			0,5		0,4		0,4		0,0		0,3

3)	a.	1)	13,4	b.	13,4	c.	13,8	d.	13,6	e.	13,2
		2)	14,1		14,2		13,9		14,2		13,2
		3)	13,7		14,3		13,8		14,1		13
$\bar{\varnothing}$			13,7		14,0		13,8		14,0		13,1
$\sigma$			0,3		0,4		0,0		0,3		0,1

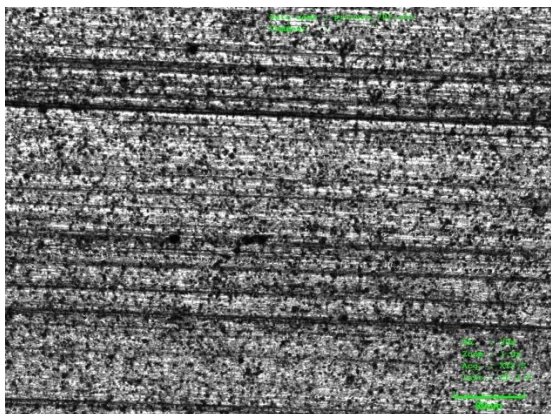
4)	a.	1)	13,1	b.	13,5	c.	13,4	d.	12,4	e.	12,8
		2)	13,5		13,5		14		12,8		13,1
		3)	13,4		13,6		13,7		13		12,7
$\bar{\varnothing}$			13,3		13,5		13,7		12,7		12,9
$\sigma$			0,2		0,0		0,2		0,2		0,2

5)	a.	1)	14,1	b.	12,7	c.	14,2	d.	13,1	e.	12,4
		2)	14,4		12,4		14,3		12,9		12,9
		3)	14,3		12,9		14		13		12,7
$\bar{\varnothing}$			14,3		12,7		14,2		13		12,7
$\sigma$			0,1		0,2		0,1		0,1		0,2

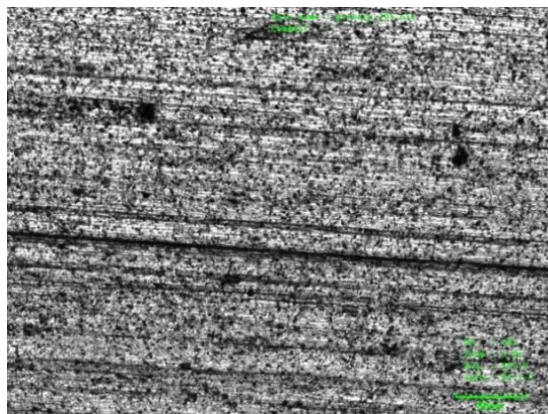
### Příloha 3

Povrch anodizovaného materiálu

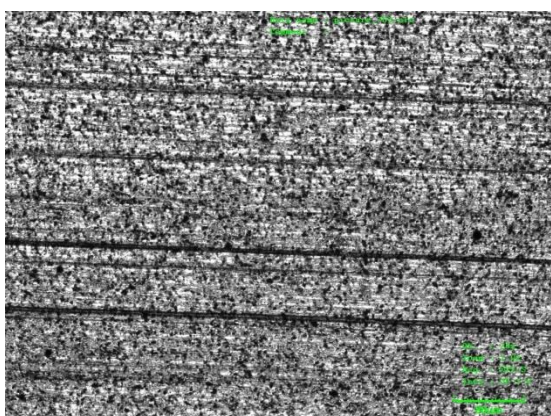
#### 1) 6060



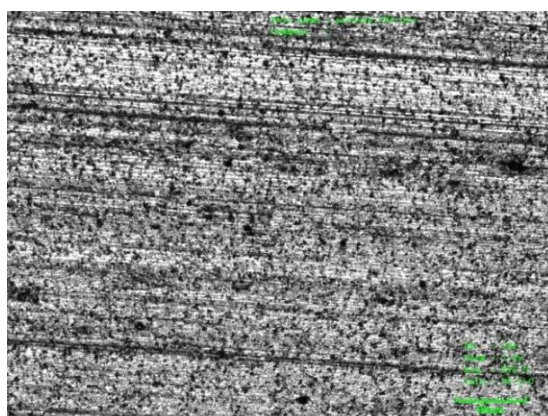
Obr. P3.1



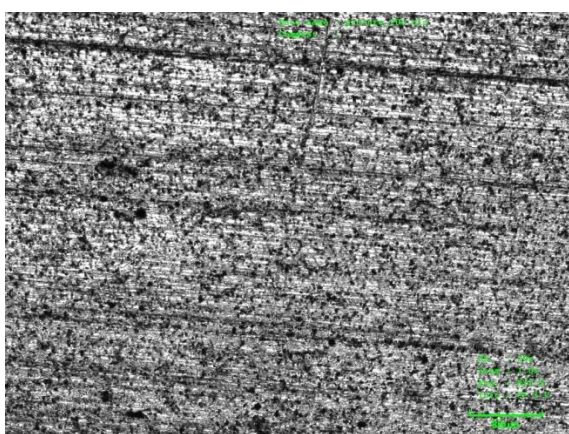
Obr. P3.2



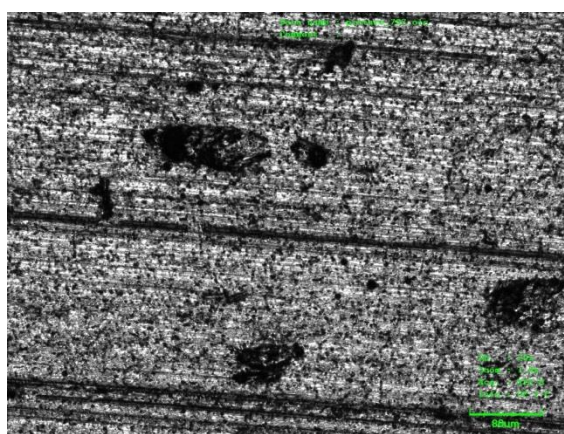
Obr. P3.3



Obr. P3.4

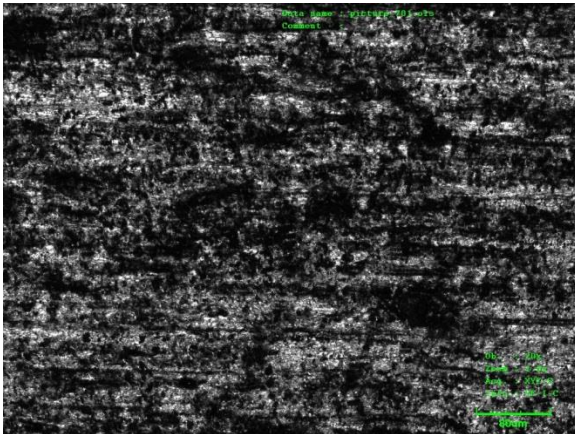


Obr. P3.5

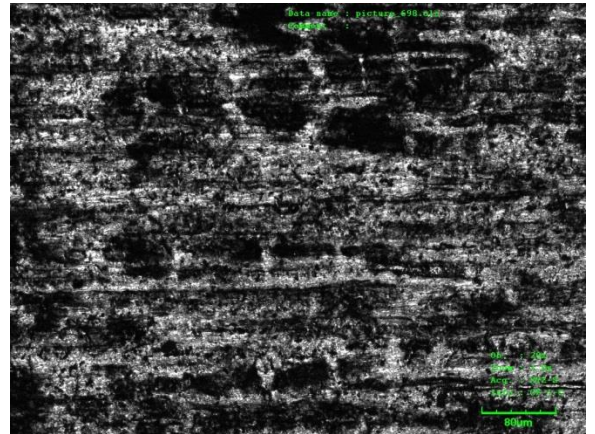


Obr. P3.6

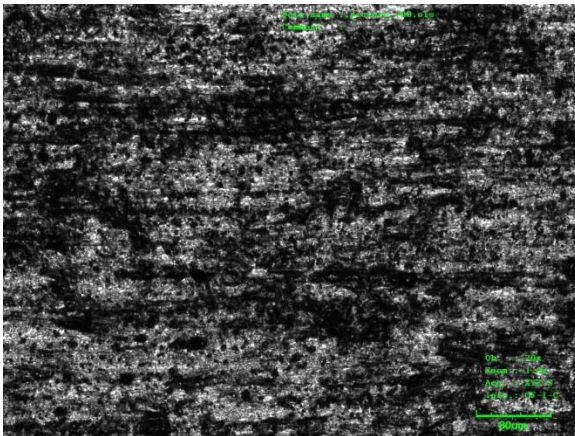
2) 5056



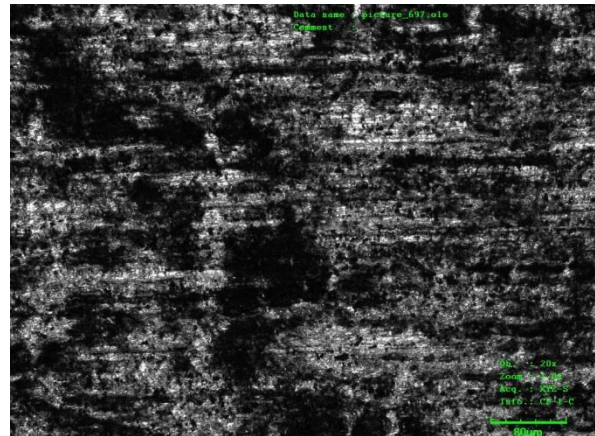
Obr. P3.7



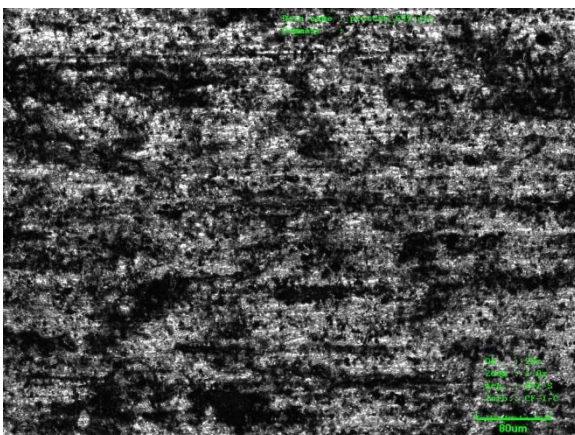
Obr. P3.8



Obr. P3.9

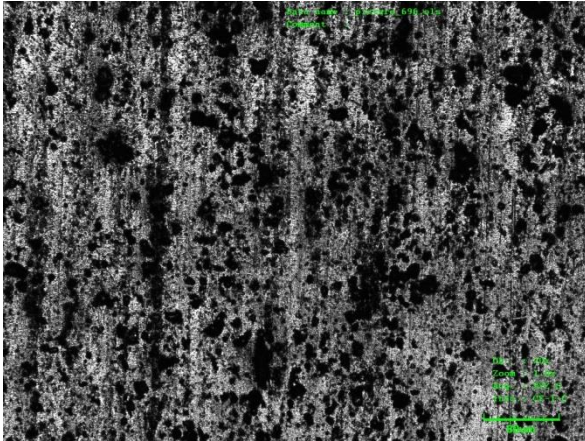


Obr. P3.10

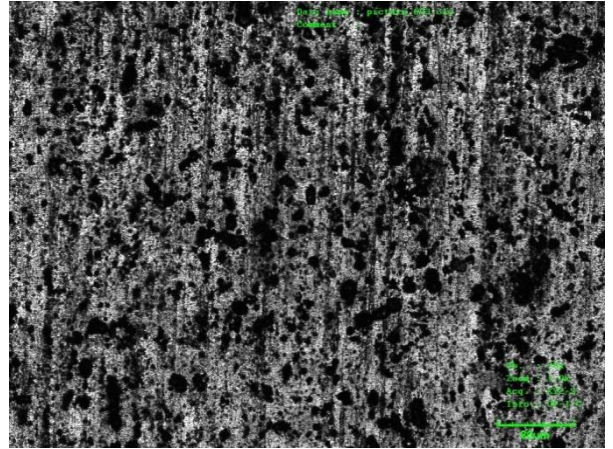


Obr. P3.11

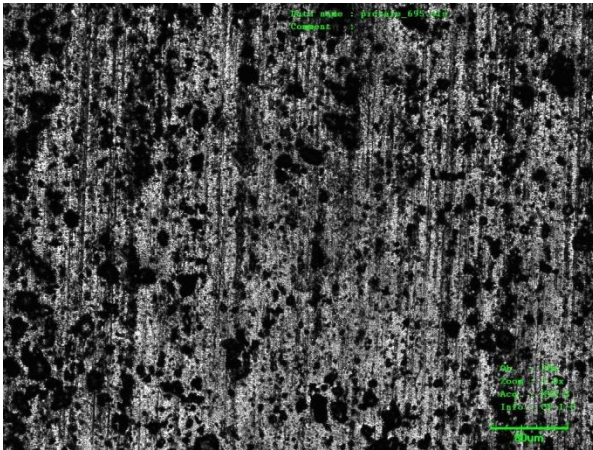
3) 2024



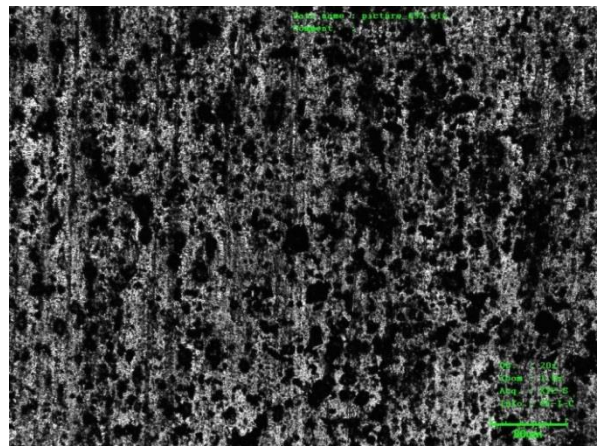
Obr. P3.12



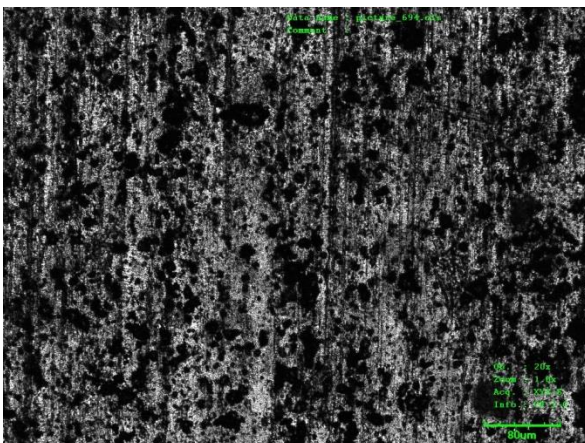
Obr. P3.13



Obr. P3.14

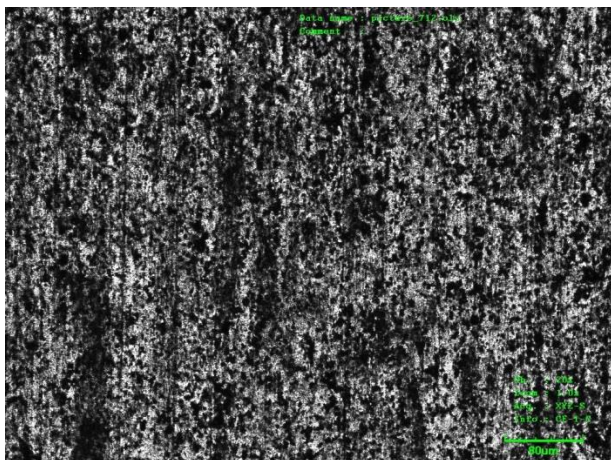


Obr. P3.15

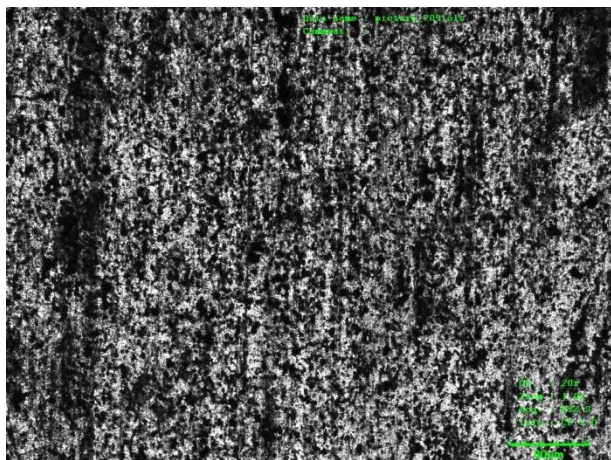


Obr. P3.16

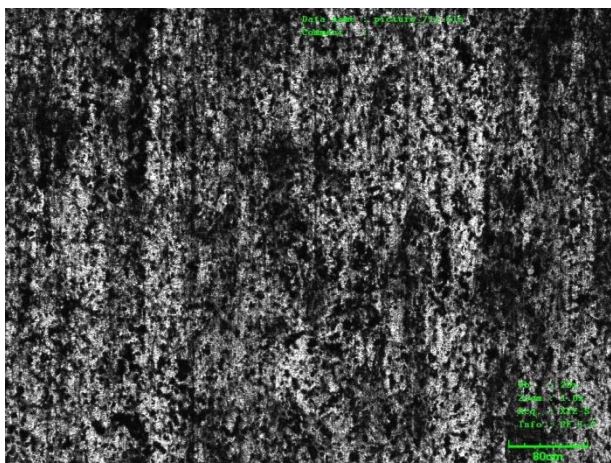
4) 7075



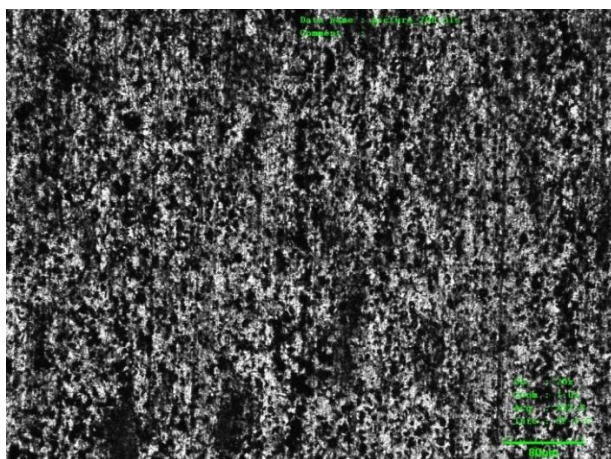
Obr. P3.17



Obr. P3.18

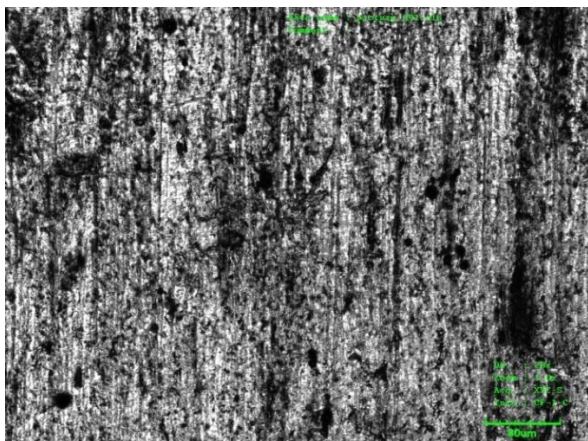


Obr. P3.19

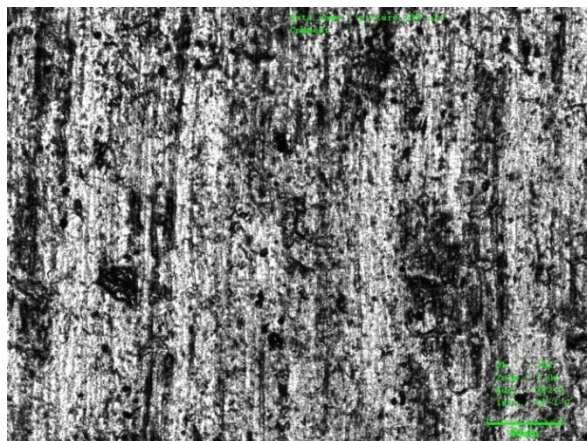


Obr. P3.20

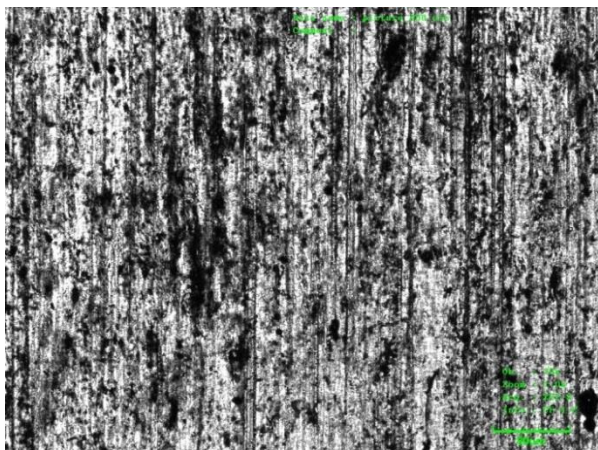
5) 1000



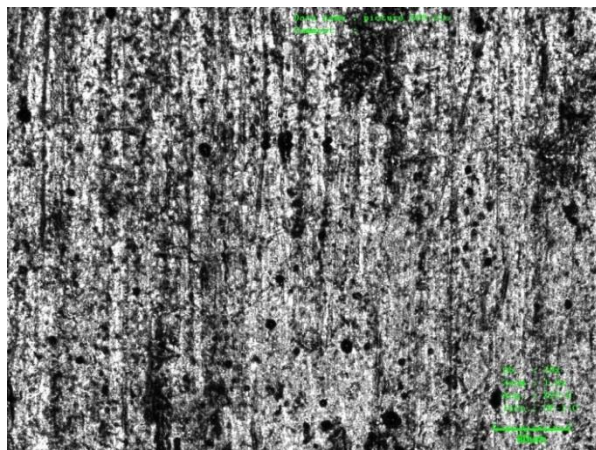
Obr. P3.21



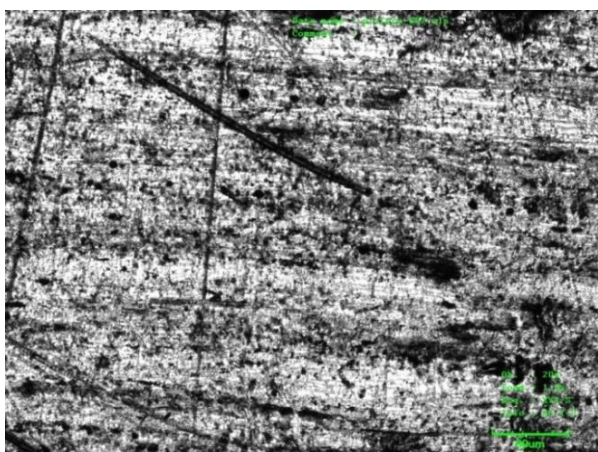
Obr. P3.22



Obr. P3.23



Obr. P3.24



Obr. P3.25



## Příloha 4

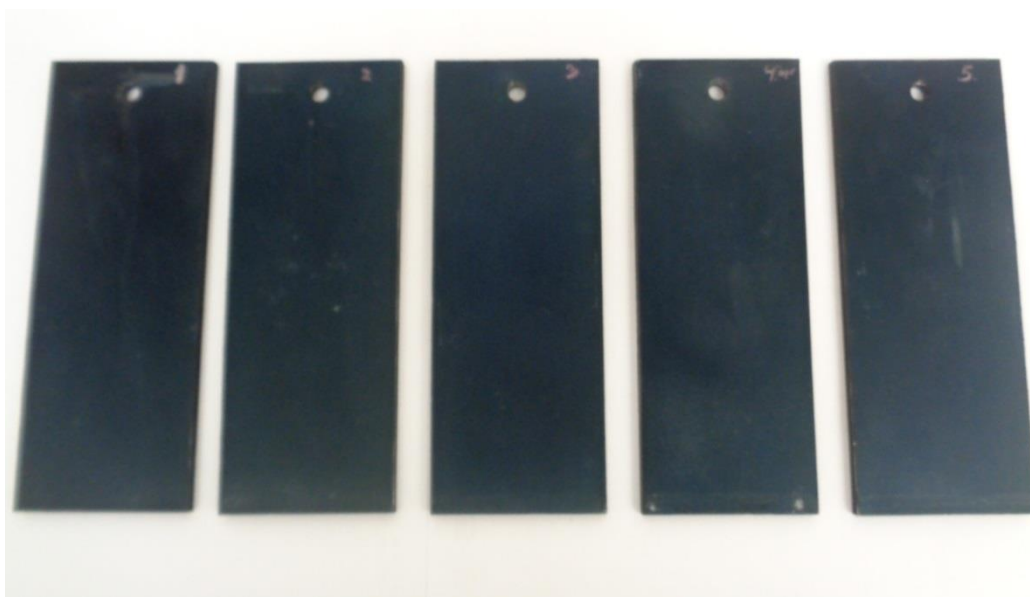
### 1) 6060



Obr. P4.1

Barvení je nerovnoměrné, kvůli nesprávné manipulaci se vzorky, na kterých zůstaly otisky prstů, které před barvením nebyly viditelné (vzorek č. 0, 5, 6). Také jsou poškrabané po dělení hrany vzorků 0,2 a 6.

### 2) 5056



Obr. P4.2

Barvení je nerovnoměrné, na vzorcích č. 1,4,5 došlo k poškození hran po dělení. Na vzorku č. 1 a 5 je vidět světlejší odstín – nesprávné sušení vzorků.

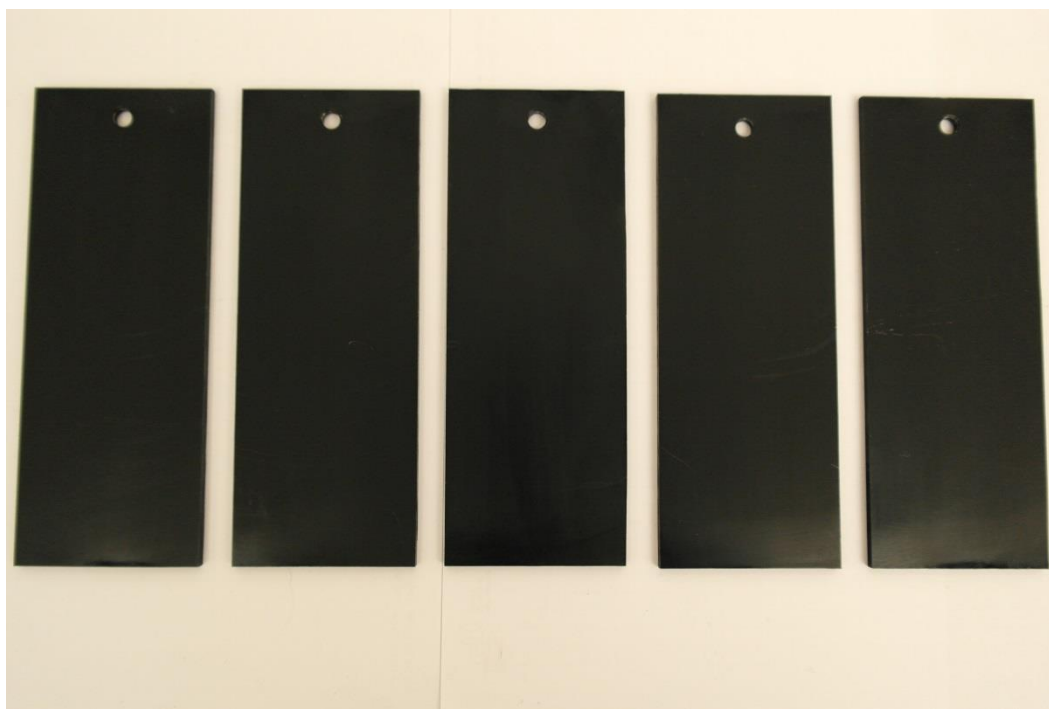
**3) 2024**



*Obr. P4.3*

Barvení vypadá poměrně rovnoměrně, na vzorcích č. 1,4 a 5 jsou vidět trochu světlejší odstíny, které se objevily po nesprávném sušení vzorku.

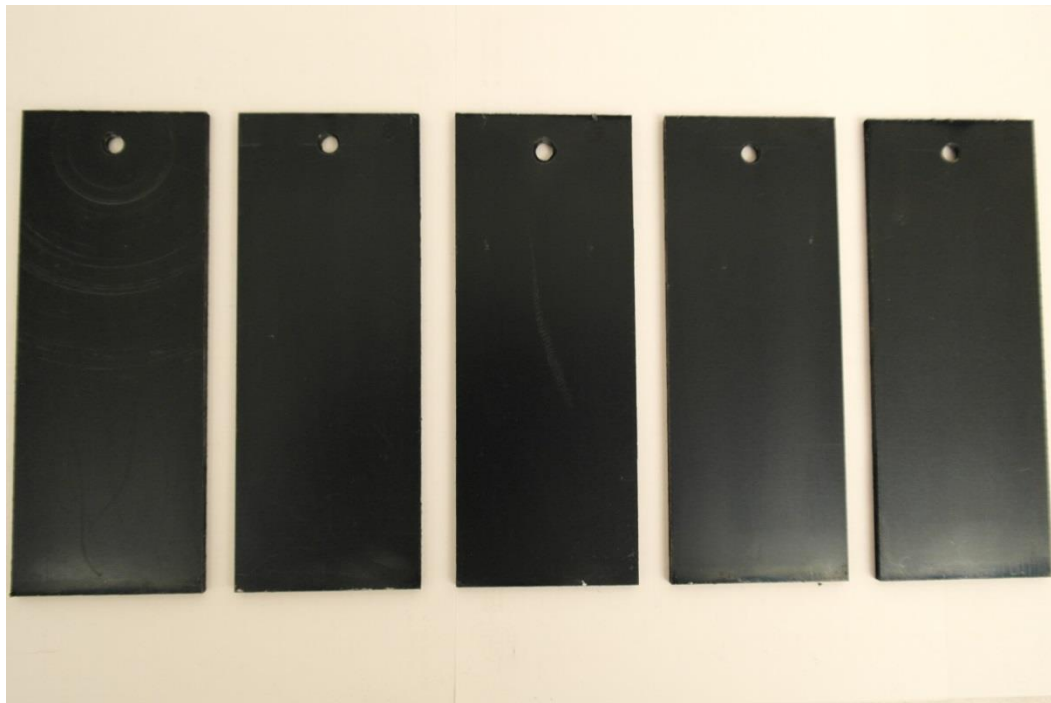
**4) 7075**



*Obr. P4.4*

Barvení je rovnoměrné, ale vznikl stejný problém jako na vzorcích třídy 2024. Sušení vzorků probíhalo v zavěšeném stavu, kvůli čemu se voda soustředila ve spodní části vzorků a po sušení zanechala světlejší odstín. (vzorky č.1,3,5).

## 5) 1000



*Obr. P4.5*

Barvení je nerovnoměrné, na vzorcích č. 1,2,3 jsou vidět škrábance, které se objevily po dělení materiálu. V dolních částech vzorků jsou viditelné světlejší odstíny.

## Příloha 5

Tab. P5.1

I - 6060										
Č. vzorku	Barvení	Měření 1				Měření 2		Měření 3		
0	N	L	22,94	$\Delta I$	17,84	28,84	15,94	27,15	13,63	
		a	1,69	$\Delta a$	1,17	1,92	0,94	1,72	1,14	
		b	1,03	$\Delta b$	8,18	0,67	7,82	0,92	6,23	
		G	8,1	$\Delta G$	27,4	13,7	21,8	15,7	19,8	
		D65/10°		$\Delta E$	19,66	D65/10°	17,77	D65/10°	15,02	
1	N	L	22,83	$\Delta I$	17,95	22,32	17,46	25,12	15,66	
		a	1,49	$\Delta a$	1,37	1,45	1,41	1,62	1,25	
		b	1,44	$\Delta b$	8,59	0,92	8,07	0,14	7,02	
		G	13,2	$\Delta G$	22,3	13,1	22,4	13,8	21,7	
		D65/10°		$\Delta E$	19,94	D65/10°	19,28	D65/10°	17,2	
2	N	L	27,85	$\Delta I$	12,93	32,5	8,28	29,92	11,96	
		a	2,37	$\Delta a$	0,49	2,08	0,78	1,9	0,96	
		b	0,56	$\Delta b$	6,59	2,96	4,19	1,56	5,59	
		G	13,9	$\Delta G$	21,6	16,2	19,3	14,1	21,4	
		D65/10°		$\Delta E$	14,52	D65/10°	9,31	D65/10°	13,23	
3	N	L	33,32	$\Delta I$	7,46	36,77	4,01	31,76	9,02	
		a	1,52	$\Delta a$	1,35	0,83	2,03	1,1	1,77	
		b	3,37	$\Delta b$	3,78	5,69	1,46	2,83	4,32	
		G	22,9	$\Delta G$	12,6	23,6	11,9	20,9	14,6	
		D65/10°		$\Delta E$	8,47	D65/10°	4,72	D65/10°	10,15	
4	N	L	24,84	$\Delta I$	15,95	26,09	14,69	27,72	13,06	
		a	2	$\Delta a$	0,86	1,78	1,09	1,73	1,13	
		b	0,46	$\Delta b$	7,61	0,04	7,11	1,17	5,99	
		G	11,8	$\Delta G$	23,7	13,4	22,1	13	22,5	
		D65/10°		$\Delta E$	17,69	D65/10°	16,35	D65/10°	14,41	
5	N	Měření 1				Měření 2		Měření 3		
		L	30,21	$\Delta I$	10,57	25,22	15,56	25,69	15,09	

	a	0,62	$\Delta a$	3,49		1,39	1,47		1,34	1,52
	b	3,62	$\Delta b$	3,53		0,4	7,55		0,23	6,92
	G	18,4	$\Delta G$	17,1		13,2	22,3		15,3	20,2
	D65/10°		$\Delta E$	11,67		D65/10°	17,35		D65/10°	16,67

Tab. P5.2

II - 5056										
Č. vzorku	Barvení	Měření 1				Měření 2		Měření 3		
1	N	L	15,66	$\Delta l$	25,12	15,63	25,15	19,24	21,54	
		a	1,81	$\Delta a$	1,06	1,67	1,19	1,52	1,34	
		b	8,26	$\Delta b$	15,41	8,01	15,16	7,12	14,27	
		G	5	$\Delta G$	30,4	2,5	33	3,5	32	
		D65/10°		$\Delta E$	29,48	D65/10°	29,38	D65/10°	25,87	
2	N	L	15,35	$\Delta l$	25,44	17,58	23,2	21,3	19,48	
		a	2,3	$\Delta a$	0,56	2,79	0,07	2,72	0,14	
		b	8,11	$\Delta b$	15,26	7,63	14,78	6,86	14,01	
		G	2,3	$\Delta G$	33,2	2,2	33,3	2,5	33	
		D65/10°		$\Delta E$	29,67	D65/10°	27,5	D65/10°	23,99	
3	N	L	14,93	$\Delta l$	25,85	16,37	24,41	19,63	21,16	
		a	2,62	$\Delta a$	0,24	2,31	0,55	2,63	0,24	
		b	9,54	$\Delta b$	16,69	9,26	16,41	8,57	15,72	
		G	2,8	$\Delta G$	32,7	3,1	32,3	3,7	31,8	
		D65/10°		$\Delta E$	30,77	D65/10°	29,41	D65/10°	26,36	
4	N	L	14,72	$\Delta l$	29,06	18	22,78	19,93	20,79	
		a	2,95	$\Delta a$	0,08	2,41	0,45	2,35	0,51	
		b	7,59	$\Delta b$	14,74	7,21	14,36	6,29	13,44	
		G	2,4	$\Delta G$	33,1	3,4	32,1	4,4	31,1	
		D65/10°		$\Delta E$	29,93	D65/10°	26,93	D65/10°	24,76	
5	N	L	16,46	$\Delta l$	24,33	18,92	21,87	18,34	22,44	
		a	3,38	$\Delta a$	0,5	2,29	0,57	2,8	0,07	
		b	7,01	$\Delta b$	14,16	6,55	13,7	7,23	14,38	
		G	1,9	$\Delta G$	33,6	3,9	31,6	2,7	32,8	
		D65/10°		$\Delta E$	28,15	D65/10°	25,81	D65/10°	26,65	

Tab. P5.3

III - 2024													
Č. vzorku	Barvení	Měření 1				Měření 2		Měření 3					
1	N	L	19,01	$\Delta I$	21,77	17,71	23,08	19,83	20,95				
		a	0,33	$\Delta a$	3,19					0,36	3,22	0,35	3,21
		b	1,43	$\Delta b$	8,58					1,67	8,82	1,52	8,67
		G	19,1	$\Delta G$	16,4					15,7	19,8	23,3	12,2
		D65/10°		$\Delta E$	23,61					D65/10°	24,91	D65/10°	22,89
2	R	L	20,87	$\Delta I$	19,91	21,05	19,73	20,97	19,81				
		a	0,42	$\Delta a$	3,28					0,48	3,35	0,46	3,32
		b	1,46	$\Delta b$	8,61					1,26	8,41	1,2	8,35
		G	22,8	$\Delta G$	12,7					26,6	8,9	30,7	4,8
		D65/10°		$\Delta E$	21,94					D65/10°	21,7	D65/10°	21,75
3	N	L	20,98	$\Delta I$	19,8	20,89	19,89	20,83	19,95				
		a	0,41	$\Delta a$	3,27					0,35	3,22	0,4	3,27
		b	1,45	$\Delta b$	8,6					1,42	8,57	1,42	8,57
		G	9,6	$\Delta G$	25,9					9,5	26	12,9	22,6
		D65/10°		$\Delta E$	21,83					D65/10°	21,89	D65/10°	21,95
4	N	L	21,36	$\Delta I$	19,42	20,84	19,94	20,84	19,95				
		a	0,4	$\Delta a$	3,27					0,37	3,23	0,3	3,16
		b	1,59	$\Delta b$	8,74					1,73	8,88	1,86	9,01
		G	7,4	$\Delta G$	28					5,4	30,1	6,8	28,7
		D65/10°		$\Delta E$	21,54					D65/10°	22,06	D65/10°	22,11
5	N	L	20,7	$\Delta I$	20,08	21,14	19,64	21,06	19,73				
		a	0,08	$\Delta a$	2,94					0,38	3,24	0,41	3,27
		b	2,42	$\Delta b$	9,57					1,6	8,75	1,6	8,75
		G	3,1	$\Delta G$	32,4					5	30,5	5,8	29,7
		D65/10°		$\Delta E$	22,43					D65/10°	21,74	D65/10°	21,82

Tab. P5.4

IV - 7075													
Č. vzorku	Barvení	Měření 1				Měření 2		Měření 3					
1	N	L	20,18	$\Delta l$	20,6	20,8	19,98	20,94	19,84				
		a	0,4	$\Delta a$	3,26					0,45	3,31	0,37	3,23
		b	1,38	$\Delta b$	8,53					1,53	8,68	1,4	8,55
		G	5,4	$\Delta G$	30,1					0,4	28,1	8,6	26,9
		D65/10°		$\Delta E$	22,53					D65/10°	22,03	D65/10°	21,84
2	N	L	20,94	$\Delta l$	19,84	19,91	20,87	20,34	20,44				
		a	0,37	$\Delta a$	3,23					0,36	3,22	0,42	3,28
		b	1,4	$\Delta b$	8,55					1,41	8,56	1,31	8,46
		G	8,6	$\Delta G$	26,9					7,8	27,7	6,4	29,1
		D65/10°		$\Delta E$	21,84					D65/10°	22,78	D65/10°	22,36
3	N	L	19,81	$\Delta l$	20,97	20,16	20,62	20,66	20,12				
		a	0,24	$\Delta a$	3,1					0,25	3,11	0,38	3,24
		b	1,49	$\Delta b$	8,64					1,55	8,7	1,14	8,29
		G	14,1	$\Delta G$	21,4					8,6	26,9	10,7	24,8
		D65/10°		$\Delta E$	22,89					D65/10°	22,59	D65/10°	22
4	N	L	20,62	$\Delta l$	20,16	20,77	20,02	20,87	19,91				
		a	0,46	$\Delta a$	3,32					0,5	3,36	0,57	3,43
		b	1,2	$\Delta b$	8,36					1,13	8,28	0,93	8,08
		G	6,1	$\Delta G$	29,4					6,4	29,1	9	26,5
		D65/10°		$\Delta E$	22,07					D65/10°	21,92	D65/10°	21,75
5	N	L	20,05	$\Delta l$	20,73	20,16	20,62	20,41	20,37				
		a	0,41	$\Delta a$	3,27					0,44	3,31	0,43	3,29
		b	1,39	$\Delta b$	8,54					1,27	8,42	1,14	8,29
		G	6,4	$\Delta G$	29,1					5,7	29,8	10,6	24,9
		D65/10°		$\Delta E$	22,65					D65/10°	22,51	D65/10°	22,23

Tab. P5.5

V - 1000													
Č. vzorku	Barvení	Měření 1				Měření 2		Měření 3					
1	N	L	23,44	$\Delta I$	17,34	24,23	16,56	24,89	15,89				
		a	0,44	$\Delta a$	2,42					0,56	2,3	0,78	2,08
		b	3,46	$\Delta b$	10,62					3,93	11,08	4,56	11,71
		G	24,8	$\Delta G$	10,7					17,4	18,1	27	8,5
		D65/10°		$\Delta E$	20,47					D65/10°	20,05	D65/10°	19,84
2	N	L	23,52	$\Delta I$	17,27	24,46	16,33	25,7	15,08				
		a	0,71	$\Delta a$	2,15					0,8	2,07	1,02	1,85
		b	4,27	$\Delta b$	11,42					4,77	11,92	5,1	12,25
		G	31,3	$\Delta G$	4,2					31,4	4,1	32,6	2,9
		D65/10°		$\Delta E$	20,81					D65/10°	20,32	D65/10°	19,51
3	N	L	21,73	$\Delta I$	19,06	21,78	18	23,27	17,51				
		a	0,48	$\Delta a$	2,39					0,48	2,38	0,59	2,27
		b	3,54	$\Delta b$	10,69					3,72	10,87	4,06	11,21
		G	25,6	$\Delta G$	9,9					24,1	11,4	29,6	5,9
		D65/10°		$\Delta E$	21,98					D65/10°	21,16	D65/10°	20,91
4	N	L	21,87	$\Delta I$	18,91	22,23	18,55	23,64	17,14				
		a	0,38	$\Delta a$	2,48					0,43	2,43	0,78	2,08
		b	4,05	$\Delta b$	11,2					4,32	11,47	4,5	11,65
		G	29,3	$\Delta G$	6,2					29,9	5,6	28,6	6,3
		D65/10°		$\Delta E$	22,11					D65/10°	21,94	D65/10°	20,82
5	N	L	23,08	$\Delta I$	17,7	25,14	15,64	27	13,78				
		a	0,89	$\Delta a$	1,97					1,17	1,69	1,37	1,49
		b	3,62	$\Delta b$	10,77					3,91	11,06	3,78	10,93
		G	33,3	$\Delta G$	2,2					36	0,5	37,8	2,3
		D65/10°		$\Delta E$	20,81					D65/10°	19,22	D65/10°	17,65