ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Anodická oxidace jako předúprava pro tvorbu funkčních duplexních systémů

Anodizing as a surface pretreatment for functional duplex systems

AUTOR: Ondřej VACH

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

PRAHA 2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vach** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **466652**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**

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

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

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Anodická oxidace jako předúprava povrchu pro tvorbu funkčních duplexních systémů

Název bakalářské práce anglicky:

Anodizing as a surface pretreatment for functional duplex systems

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor sledované problematiky
2. Návrh metodiky zkoušení a přípravy vzorků
3. Vyhodnocení získaných poznatků

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Martin Chvojka, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**

doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc. podpis vedoucí(ho) práce	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

2.5.2019 Datum převzetí zadání	Vach Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci „Anodická oxidace jako předúprava pro tvorbu funkčních duplexních systémů“ jsem vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č.121/200 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 22. 7. 2019 ……

Ondřej Vach

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Viktoru Kreibichovi, CSc. za cenné rady, připomínky a podněty, které mi poskytnul při řešení této práce.

Velice rád bych také poděkoval Ing. Martinu Chvojkovi, bez kterého by tato práce nevznikla. Děkuji za jeho pomoc, ať už při tvorbě samotné experimentální části, tak také ve funkci druhého vedoucího.

Dále bych ještě rád poděkoval Ing. Michalu Zoubkovi za pomoc a poskytnutí prostor laboratoře povrchových úprav na ČVUT FS k provedení potřebných zkoušek.

Ústav strojírenské technologie

Program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Obor: Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství

Název bakalářské práce: Anodická oxidace jako předúprava pro tvorbu funkčních duplexních systémů

Autor bakalářské práce: Ondřej Vach

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Školitel specialista a konzultant bakalářské práce: Ing. Martin Chvojka

Rozsah bakalářské práce:	Počet stran:	70
	Počet obrázků:	35
	Počet tabulek:	17
	Počet grafů:	3
	Počet příloh:	8

Anotace

Jednou z nejdůležitějších povrchových úprav hliníku a jeho slitin je zatím anodická oxidace povrchu. Touto povrchovou úpravou lze získat funkčních vlastností povrchu i zlepšit korozní odolnost těchto kovů. Pro řadu různých funkčních požadavků, které lze jen obtížně splnit klasickými technologiemi anodické oxidace je potřebné vyvíjet a objevovat nové technologie s vyššími parametry ochrany povrchů a to především v oblasti otěruvzdornosti i žáruvzdornosti. Tato práce se proto zabývá tvorbou funkčního vícevrstvého duplexního systému. Zaměřuje se především na celkové propojení anodické oxidace a nátěrových hmot.

Klíčová slova

anodická oxidace, duplexní systém, nátěrová hmota, zkoušky přilnavosti

Annotation

One of the most important surface treatments of aluminum and its alloys is the anodic surface oxidation. This surface treatment can provide functional surface properties and improve the corrosion resistance of these metals. It is necessary to develop and discover new technologies with higher surface protection parameters. Especially in the areas of abrasion resistance and heat resistance for a number of different functional requirements, which are difficult to meet with classical anodic oxidation technologies. This work therefore deals with the creation of a functional multilayer duplex system. It focuses mainly on the overall interconnection of anodic oxidation and paints.

Key words

anodic oxidation, duplex system, coatings, adhesion tests

OBSAH

1 ÚVOD ..... - 8 -

1.1 HLINÍK ..... - 8 -

1.1.1 Fyzikální vlastnosti hliníku ..... - 8 -

1.2 ROZDĚLENÍ HLINÍKU A JEHO SLITIN ..... - 9 -

1.3 HISTORIE ..... - 10 -

1.4 SOUČASNOST ..... - 10 -

1.5 BAUXIT ..... - 11 -

1.6 VÝROBA ČISTÉHO HLINÍKU ..... - 12 -

1.6.1 Získání čistého Al_20_3 ..... - 12 -

1.6.2 Nečistoty v Al_20_3 ..... - 14 -

1.6.3 Výroba surového hliníku elektrolýzou ..... - 15 -

1.6.4 Elektrolytická rafinace ..... - 16 -

2 POVRCHOVÉ ÚPRAVY HLINÍKU ..... - 18 -

2.1 MECHANICKÉ POVRCHOVÉ ÚPRAVY ..... - 18 -

2.1.1 Kartáčování ocelovými kartáči ..... - 18 -

2.1.2 Broušení a leštění ..... - 19 -

2.1.3 Omílání ..... - 19 -

2.1.4 Tryskání ..... - 19 -

2.2 CHEMICKÁ A ELEKTROCHEMICKÁ POVRCHOVÁ ÚPRAVA ..... - 19 -

2.2.1 Moření ..... - 19 -

2.2.2 Leptání ..... - 20 -

2.2.3 Zvětšení tloušťky ochranné povrchové vrstvy oxidů ..... - 20 -

3 ANODICKÁ OXIDACE ..... - 21 -

3.1 PRINCIP VYTVÁŘENÍ OXIDICKÉ VRSTVY ..... - 22 -

3.2 OMEZENÍ VYUŽITÍ ANODICKÉ OXIDACE ..... - 22 -

3.3 SLOŽENÍ VRSTVY ..... - 23 -

3.4 METODY ANODICKÉ OXIDACE ..... - 24 -

3.4.1 Metoda kyseliny sírové – H_2SO_4 ..... - 24 -

3.4.2 Metoda kyseliny šťavelové ..... - 24 -

3.4.3 Metoda kyseliny chromové ..... - 25 -

3.4.4 Metoda smaltu ..... - 25 -

3.4.5 Ostatní metody ..... - 25 -

3.4.6 Tvrdá anodická oxidace ..... - 26 -

3.4.7 Metoda plasmové elektrolytické oxidace - PEO ..... - 26 -

3.5 PŘEDÚPRAVY POVRCHU ..... - 27 -

3.5.1 Mechanické předúpravy ..... - 27 -

3.5.2 Chemické předúpravy ..... - 27 -

3.6 DOKONČOVACÍ ÚPRAVY ..... - 29 -

3.6.1 Barvení ..... - 29 -

3.7 UTĚSNĚNÍ (SEALING) ..... - 30 -

3.8 CHYBY PŘI ELOXOVÁNÍ A JEJICH PŘÍČINY ..... - 31 -

4 DUPLEXNÍ SYSTÉM ..... - 31 -

4.1 SYNERGICKÝ EFEKT - 31 -

5 NÁTĚROVÝ SYSTÉM - 32 -

5.1 APLIKACE NÁTĚROVÝCH SYSTÉMŮ - 32 -

5.2 FUNKCE NÁTĚRU - 34 -

5.3 SLOŽENÍ NÁTĚROVÝCH HMOT - 34 -

5.4 ROZDĚLENÍ NH - 35 -

6 TRIBOLOGICKÉ ZKOUŠKY - 37 -

6.1 MĚŘENÍ DRSNOSTI - 37 -

6.1.1 Struktura povrchu - 37 -

6.2 MĚŘENÍ TLOUŠŤKY NH - 38 -

6.3 ODTRHOVÉ ZKOUŠKY - 39 -

6.3.1 Podstata metody - 39 -

6.3.2 Zkušební tělíska - 40 -

6.3.3 Řezný nástroj - 40 -

6.3.4 Druh lepidla - 41 -

6.3.5 Vyhodnocení zkoušky - 41 -

6.4 MŘÍŽKOVÝ TEST - 42 -

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - 43 -

7.1 VÝROBA VZORKŮ - 43 -

7.1.1 Technologické postupy - 45 -

7.1.2 Složení chemických prostředků - 46 -

7.2 DUPLEXNÍ SYSTÉM - 47 -

7.3 DRSNOSTI PO ANODICKÝCH OXIDACÍCH - 47 -

7.4 TLOUŠŤKY NÁTĚRŮ A ANODICKÝCH OXIDACÍ - 49 -

7.5 VYHODNOCENÍ ADHEZNÍCH ZKOUŠEK - 50 -

7.5.1 Odtrhová zkouška přilnavosti - 50 -

7.5.2 Mřížkový test - 56 -

7.6 METALOGRAFICKÉ SNÍMKY - 56 -

8 DISKUZE - 61 -

9 ZÁVĚR - 62 -

10 SEZNAM LITERATURY - 63 -

11 SEZNAM CHEMICKÝCH NÁZVŮ PRVKŮ, LÁTEK A ZKRATEK - 66 -

12 SEZNAM JEDNOTEK - 67 -

13 SEZNAM OBRÁZKŮ - 68 -

14 SEZNAM TABULEK - 70 -

15 SEZNAM GRAFŮ - 70 -

1 Úvod

1.1 Hliník

Hliník je třetím nejrozšířenějším prvkem a prvním nejrozšířenějším kovem na Zemi. Tvoří celkově až 9 % zemské kůry. Jedná se o lehký kov s řadou dalších fyzikálních a chemických vlastností. Má široké využití v elektrotechnice i spotřebním průmyslu. Ve formě slitin v automobilovém a leteckém průmyslu. K zásadním specifikům patří dobré mechanické a technologické vlastnosti a možnosti. Především dostatečná pevnost, dobrá tvářitelnost a svařitelnost. Důležitá je i jeho korozní odolnost. [1, 29]

1.1.1 Fyzikální vlastnosti hliníku

Čistý hliník je stříbrolesklý, na vzduchu stálý kov. Má plošně středěnou kubickou mřížku K12. V důsledku toho má hliník i jeho slitiny dobré plastické vlastnosti. A to jak za studena, tak za tepla. Hliník je slabě paramagnetický, tepelná a elektrická vodivost hliníku je velice dobrá. Čistý hliník má malou mez pevnosti. K dalším důležitým fyzikálním vlastnostem hliníku patří jeho hustota, při 20°C 2,7 g/cm3. Porovnání s nízkouhlíkovými oceli je následující. [1, 30]

Tab. 1 Porovnání vlastností hliníku s nízkouhlíkovými oceli [30]

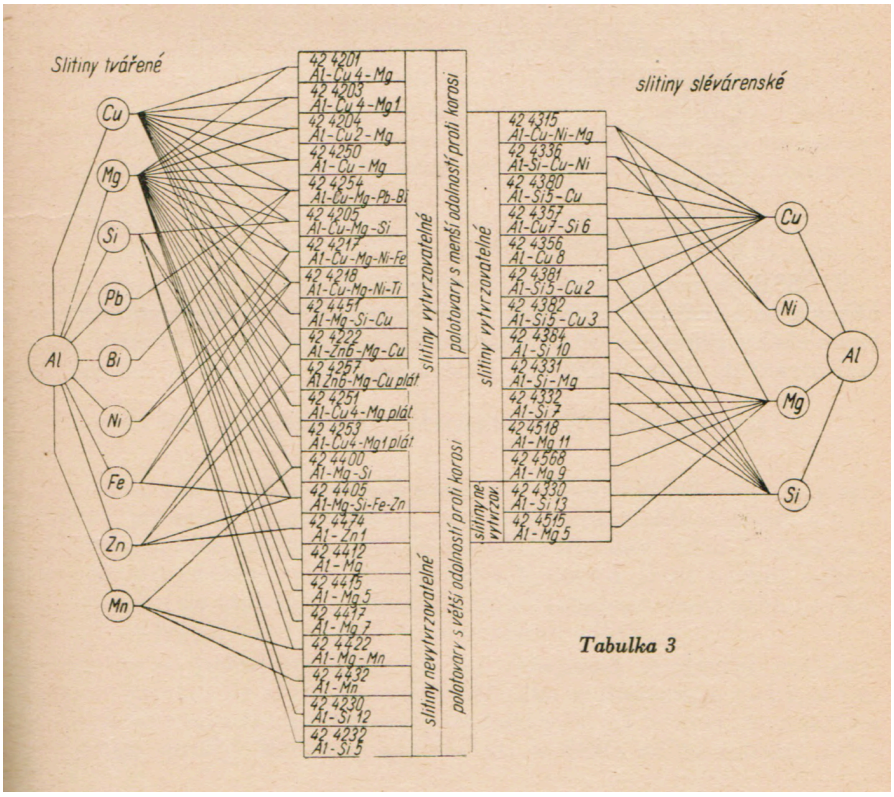
Vlastnosti	Hliník	Nízkouhlíkové oceli
měrná hmotnost při 20 °C ($kg.m^{-3}$)	2699	7850
při teplotě tavení ($kg.m^{-3}$)	2380	7000
teplota tavení (°C)	660	1530
tepelná vodivost ($J.cm^{-1}.s^{-1}.°C^{-1}$)	2,1	0,46
tepelná roztažnost ($°C^{-1} . 10^{-6}$)	23,8	12
elektrická vodivost (S)	35	8
pevnost (Mpa)	70 - 100	300 - 400
tažnost (%)	30 - 40	30 - 35

Základní důležité aplikace fyzikální metalurgie u hliníku a jeho slitinách spočívají ve využití a znalosti chemického složení, tepelného zpracování, tváření. Hliník ve formě slitin, tedy vhodnou změnou jeho chemických vlastností nabývá zlepšených vlastností. Správným poměrem legujících látek jsme schopni zajistit změnu pevnostních, korozních, slévárenských, vodivostních a dalších vlastností. Obecně mají slitiny hliníku malou měrnou váhu s dobrými mechanickými vlastnostmi. [30, 12]

1.2 Rozdělení hliníku a jeho slitin

1. Dle chemického složení (legováním, nejčastěji mědí, křemíkem, hořčíkem nebo zinkem)
2. Dle způsobu zpracování (na slitiny ke tváření či odlévání)
3. Dle odolnosti proti chemickým vlivům (využití v chemickém průmyslu, zvýšení odolnosti proti chemikáliím)
4. Dle schopnosti k tepelnému zpracování

Důležitou změnou fyzikálních vlastností dochází při použití tepelného zpracování. Značný praktický význam má precipitační zpevnění - vytvrzování. Proces vytvrzování se skládá ze tří etap. První je rozpouštěcí žíhání, tím rozumíme ohřev a výdrž na teplotě dle fázového diagramu slitiny. Druhou fází je rychlé ochlazení, kde dochází k vzniku přesyceného tuhého roztoku. K ochlazování se využívá růžných médií, dle velikosti součásti. Třetí fází je samotné vytvrzování, někdy nazývané stárnutí. Zde dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku. Výsledkem je pnutí v mřížce hliníku a zvýšení tvrdosti hliníku. Ne všechny slitiny Al jsou vytvrditelné. [1, 9]



Obr. 1 Rozdělení vytvrditelných a nevytvrditelných slitin[9]

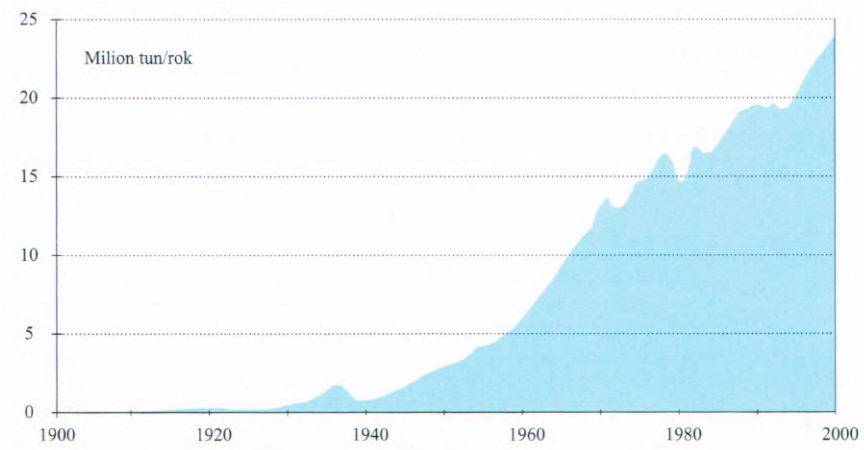
1.3 Historie

Hliník je neželezný kov, který je lidstvu známý k poměru k ostatním kovům poměrně velmi krátkou dobu. Izolovat hliník se poprvé podařilo dánskému chemikovi Hansu Chrisitanovi Oerstedovi v roce 1825. Výroba byla ale na tehdejší poměry velice nákladná, proto se k průmyslovému rozvoji výroby přistoupilo až roku 1854, kdy francouzský chemik Henry Etiene Sainte - Claire Deville vynalezl způsob, jak průmyslovým způsobem vyrábět hliník levnějším způsobem. Cena výroby hliníku klesla a nic již dále nebránilo v cestě průmyslového využívání tohoto kovu.

K velkému vzrůstu průmyslového zpracovaní hliníku došlo ve 70. letech čemuž napomohlo tomu využití ve vojenském průmyslu. Oživení ekonomiky na začátku 50. let přichází znovu s rostoucím trendem výroby. S koncem 50. let dochází k exponenciálním růstu výroby hliníku. Od roku 1953 se hliník vyrábí i na území tehdejšího Československa. [1, 21]

1.4 Současnost

Hliník je v neželezný kov, v současnosti s největší produkcí na světě. Rychle rostoucí spotřebu a výrobu hliníku možno vysvětlit jeho vhodnými fyzikálními, chemickými, mechanickými, technologickými. V neposlední řadě i jeho dostupností a cenou. Hliníkový materiál vhodně nahrazuje například měď v elektrotechnice nebo nikl v chemickém a potravinářském průmyslu. Hliník představuje především důležité postavení ve konstrukci dopravních prostředků, stavebnictví, letectví i kosmickém průmyslu. Postupně se uplatnil téměř ve všech průmyslových odvětvích. [1,21]



Obr. 2 Vývoj produkce hliníku [1]

1.5 Bauxit

Základní surovinou při výrobě hliníku jsou rudy které obsahují vysoké procento oxidu hlinitého. Těch je celá řada, patří mezi ně například korund, diaspor, boehmit, spinel, gibbsit či andaluzit nebo kaolinit. Nejvýznamnější ekonomicky využitelnou rudou pro výrobu hliníku je ale bauxit.

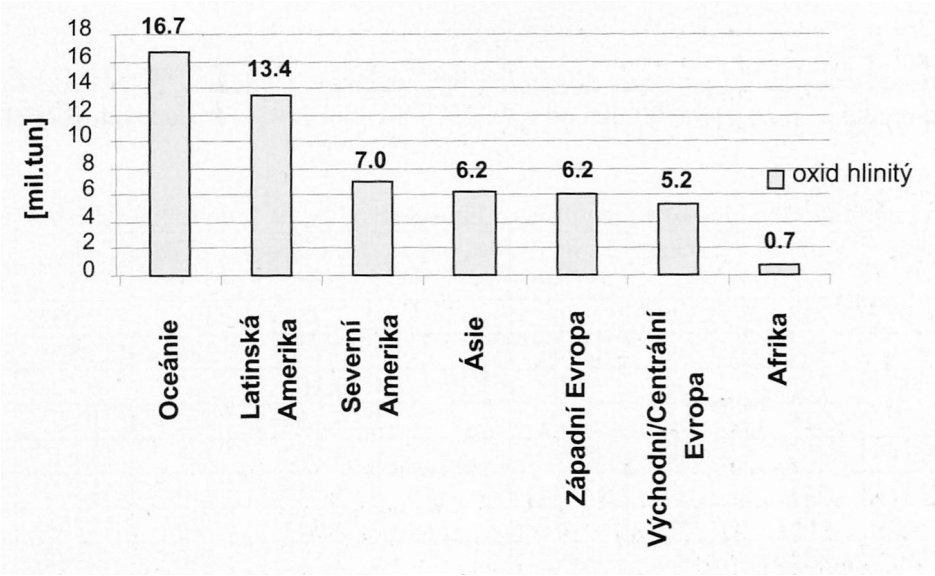
Bauxit není přímo specifikovaným minerálem, ale horninou skládající se z hydratovaných oxidů hliníku. A to zejména gibbsitu, diasporu a boehmitu. Název bauxit hornině prosadil P. Berthier, geolog, který analyzoval jílovité horniny z naleziště Le Baux ve Francii s následujícím složením.

Tab. 2 Složení Bauxitových hornin [1]

Prvek	Al_2O_3	Fe_2O_3	H_2O
Složení v %	52	27	20,4

Horniny jejichž chemické složení je tomuto srovnatelné proto jsou nazývány bauxitem.

V současnosti těžbou bauxitu dominuje několik zemí. Jsou jimi Austrálie, Jamajka, Čína, Guinea, Brazílie, Indie a Venezuela. Dle zeměpisného umístění těchto států je patrné, že největší naleziště se nacházejí poblíž rovníku, jejich zásoby zde představují dle odhadu kolem 86% celkové množství bauxitů. Do budoucna se předpokládá, že těžba bauxitu a výroba oxidu hlinitého se v těchto státech bude i nadále zvyšovat. [1]



Obr. 3 Porovnání světové produkce bauxitu [1]

1.6 Výroba čistého hliníku

Výroba se skládá ze tří základních etap:

1. získání čistého Al_20_3
2. výroba surového hliníku
3. při potřebě vyšší koncentrace (než 99,5 %) elektrolytická rafinace [1, 9]

1.6.1 Získání čistého Al_20_3

V současnosti se k výrobě oxidu hlinitého, jakožto před produktu čistého hliníku používá nejrozšířenější hydrometalurgická výroba zásaditým Bayerovým způsobem. Vstupní surovinou je již zmíněný bauxit s malým množstvím oxidu křemičitého, v rozmezí 2 - 5 %. Bauxit je před vstupem do výroby potřeba vysušit a rozemlít. Finální jemnost bauxitu je dána především jeho složením. Maximální velikost zrn před vstupem do výroby bývá kolem 1 - 0,06 mm. [1, 9]

A - Bayerova metoda

Bayerova metoda je proces a uzavřený cyklus loužení hydroxidem sodným a srážení sloučenin hliníku z bauxitu. Vznikají následující reakce:

- pro gibbstické bauxity - $Al(OH)_3 + NaOH = NaAlO_2 + 2\ H_2O$
- pro boehmiticke bauxity - $AlOOH + NaOH = NaAlO_2 + H_2O$
- pro diasporické bauxity - $AlOOH + NaOH + Ca(OH)_2 = NaAlO_2 + Ca(OH)_2 + H_2O$

Hlavními kroky Bayerova procesu jsou:

- již zmíněný rozklad loužením, probíhá za zvýšeného tlaku a teploty

  $Al(OH)_3 + NaOH = NaAlO_2 + 2\ H_2O$
- oddělení od vzniklého červeného kalu
- srážení a odstranění $Al(OH)_3$ od hlinitanového roztoku v přítomnosti očkovadla)

  $NaAlO_2 + 2\ H2O = Al(OH)_3 + NaOH$
- odpaření matečného roztoku, který se vrací pře filtrací zpět do výroby
- $Al(OH)_3 + NaOH = Al(OH)_3$
- kalcinace vzniklého hydroxidu hlinitého

Kalcinace probíhá při teplotách do 1200°C, čistý hydroxid hlinitý se zbavuje vlhkosti a vázané vody. Průměrná spotřeba tepla na proces kalcinace bývá 3050 kJ/kg Al_2O_3.

$2\ Al(OH)_3 = Al_2O_3 + 3\ H_2O$

Vzniká před produkt výroby hliníku, oxid hlinití Al_2O_3. [1, 9]

B - Spékací metoda výroby Al_2O_3

Využívá se k zpracování chudších bauxitových rud s vyšším obsahem SiO_2. Podstatou metody je spékání rozmělněného bauxitu společně s vápencem a sodou. Tím získáváme takzvaný spečenec. Ten je velice dobře rozpustný ve vodě. Rozpuštěním spečence ve vodě vzniká hlinitanový roztok a nerozpustná část, nazývaná hnědý kal. Ten se od hlinitanové roztoku oddělí. Hlinitanový roztok se dále karbonizací pomocí CO2 rozkládá na hydroxid hlinitý a matečný roztok. Podobně jako u Bayerovy metody se matečný roztok od hydroxidu hlinitého oddělí a přefiltruje. Matečný roztok se poté znovu vrací na začátek procesu, kdy se přidává do větve mokrého mletí bauxitu. Finálním procesem vzniku čistého oxidu hlinitého je taktéž obdobně jako u Bayerova zásaditého pochodu kalcifikace.

Spékací metoda je v současné době na ústupu a využívá se pouze v Rusku a v některých republikách bývalého Sovětského svazu. Na ústupu je hlavně díky vysoké spotřebě elektrické energie na tunu Al_2O_3. V porovnání, 10 GJ/tun u Bayerovo zásaditého pochodu a 38 GJ/tun u spékací metody. Energetický výdej je tedy téměř čtyřnásobný. Je to dáno rozdílným technologickým procesem. Možnou výhodou spékací metody je možnost zpracování méně kvalitního bauxitu. [1, 9]

C - Kombinované metody výroby

Pokud není možné suroviny zpracovat ekonomicky výhodným Bayerovým procesem, zpracovávají se spékacími nebo kombinovanými způsoby. Za určitých okolností je možno využívat kombinovaného Bayerova a spékacího procesu.

- Paralelní kombinovaná

Výroba probíhá až do vzniku hlinitanových roztoků odděleně. Před srážením se oba hlinitanové roztoky smíchají. Podmínkou kombinované metody je, že kapacita výroby spékací větví nesmí přesáhnout 10 - 15% z obou větví.

- Sériová kombinovaná

Výroba oxidu hlinitého se prolíná a jednotlivé meziprodukty přecházejí z jedné větvě na druhou.

Využitím kombinovaných metod výroby je získáváno mnoho výhod. Především se jedná o možnost jak ušetřit množství surovin a paliv týkajících se procesů. Výběr metody a způsobu získání Al_2O_3 se řídí především složením bauxitových rud v místě těžby. [1, 9]

1.6.2 Nečistoty v Al_20_3

Hlavními nečistotami oxidu hlinitého jsou Na_2O, CaO, SiO_2, TiO_2 a Fe_2O_3. Požadavky odběratelů na čistotu oxidu hlinitého jsou vysoké a budou se zvyšovat. Všechny tyto nečistoty způsobují problémy při následné elektrolýze a zvyšují nečistoty ve výsledném hliníku. Snižují tedy jeho kvalitu. Za problém je také považována vysoká nebo naopak nízká zrnitost oxidu hlinitého. Ta buď zvyšuje prašnost nebo zpomaluje proces rozpouštění v elektrolytu. [9]

1.6.3 Výroba surového hliníku elektrolýzou

Elektrolýza pomocí roztavených solí je dalším procesem po získání oxidu hlinitého z procesů předcházejících. Poprvé byla patentována Američanem Charlesem Hallem a nezávisle na sobě i Francouzem Paulem Héroultem v roce 1886.S malými obměnami se používá dodnes. Proto se elektrolýze pomocí roztavených solí říká Hall - Héroultova. [1, 9]

Elektrolýza probíhá za pomocí roztavených solí, Na_3AlF_6 v elektrolyzních pecích s teplotu okolo 960 °C. Využití solí je způsobeno neušlechtilostí hliníku. Není proto možné využít běžných vodných roztoků. Do roztavené soli se dále vsází i modifikátory na bázi fluoridů, chloridů sodíku, hořčíku, vápníku nebo lithia. V elektrolyzní peci se dále nachází i uhlíková anoda tvořící dno elektrolyzéru a uhlíková katoda, která je ponořena do elektrolytické lázně. Přidávaný Al_2O_3 se za pomocí proudu rozkládá na kovový hliník putující na dno k uhlíkové anodě a na kyslík, který oxiduje uhlíkovou anodu. Anoda se tím spotřebovává, elektrolyt nezměněný zůstává, doplňují se do něj pouze modifikátory. Konečným produktem je hliník s čistotou mezi 99,7 až 99,9 %. [1, 9]

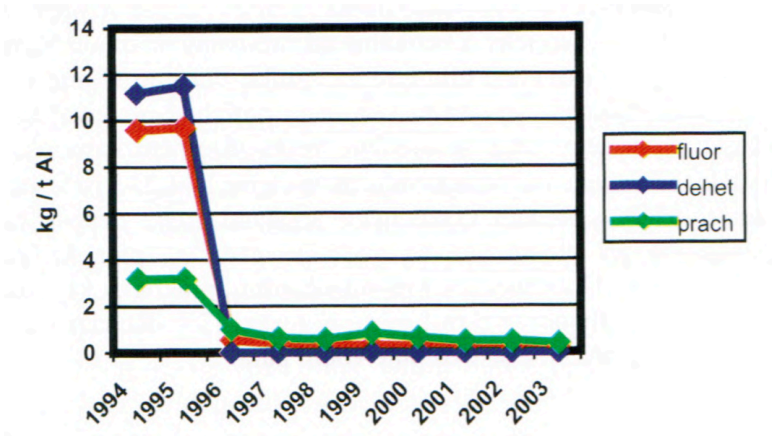
Je potřeba zajistit aby měl Al_20_3 vhodné vlastnosti pro elektrolýzu.

Především:

- vysoká chemická čistota a nízký obsah Fe, P, V, Si
- dostatečná rychlost rozpouštění v elektrolytu
- vlastnost dobré pokrývání anody

Emisní dopady elektrolýzy

Při elektrolýze hliníku vzniká veliké množství zdraví škodlivých plynů. Nejvíce se řeší množství fluoru vypouštěných do ovzduší. To je limitováno daným státem, ve kterém se elektrolyzační pece nacházejí. [1]



Obr. 4 Vývoj produkce emisních plynů postupem let [1]

Z grafu je patrné, že emise dehtu, fluoru a prachu v průběhu let a zavádění emisních opatření výrazně klesají.

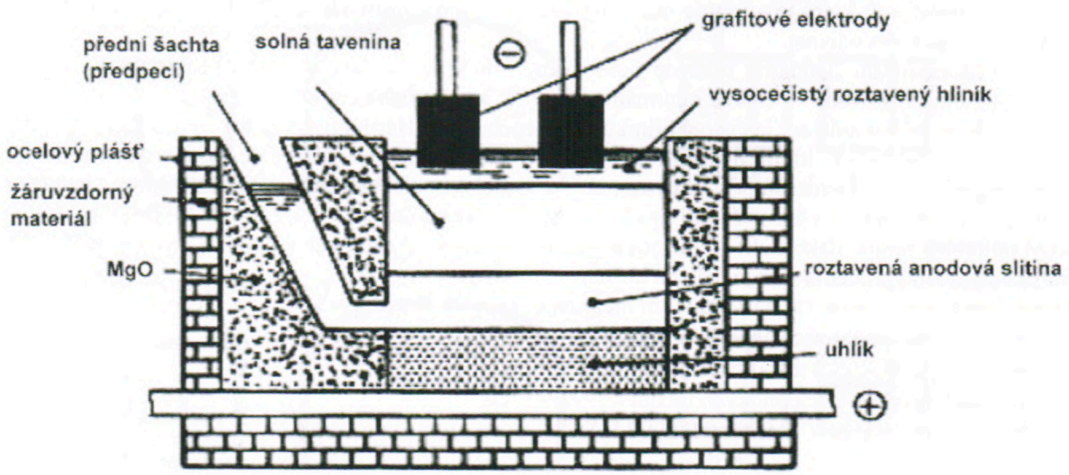
1.6.4 Elektrolytická rafinace

Pro některá průmyslová moderní odvětví je zapotřebí vyšší čistoty hliníku. Například v odvětvích vysokotlakého lití jsou prvky, které by mohly být pro proces tuhnutí nebo konečnou pevnost rozhodující velice dobře sledovány. Jde především o stopová množství vodíku, ale i železa, křemíku, zinku, manganu, hořčíku či titanu. Typické mohou být taktéž stopová množství galia, sodíku, lithia, vápníku, vanadu či bóru. [1, 9]

Dalším typickým příkladem mohou být i použití v elektronickém nebo optoelektronickém průmyslu. Zde mohou být nežádoucí jakékoliv nečistoty, které by způsobili nižší elektrickou vodivost. Pro tyto případy je vyžadovaná čistota vyšší, až 99,999% Al.

Pro všechny tyto speciální případy je potřeba získaný hliník rafinovat. Základními způsoby jsou:

- zonální rafinace (99,999 – 99,9999%)
- elektrolýzou v organických médiích (99,999%)
- třívrstvou elektrorafinací (99,99 – 99,998%)
- frakční rekrystalizací (99,96 - 99,99%) [1, 9]



Obr. 5 Schéma procesu rafinace [1]

V celkovém objemu produkce hliníku je využití jeho rafinace kolem pouhého 1%. [1]

2 Povrchové úpravy hliníku

Povrch hliníku se dle přání zákazníka a jeho potřeb někdy ponechává tak, jakým způsobem byl vyroben. Bez jakýchkoliv dodatečných povrchových úprav.

Velice často je ale potřeba povrch hliníku povrchově ošetřit. Nejčastěji je povrchových úprav využíváno k zlepšení vzhledu, přilnavosti nátěrů, korozní odolnosti, nebo povrchové tvrdosti. Je několik způsob jak k těmto povrchovým úpravám dosáhnout. [7]

2.1 Mechanické povrchové úpravy

2.1.1 Kartáčování ocelovými kartáči

Kartáčování slouží k zlepšení vzhledu povrchu materiálu. Procesem kartáčování je získáváno stříbřitě bílé barvy se sametovým leskem. Dle slitiny hliníku se užívá různých druhů kartáčů s rozdílnou rychlostí kartáčování. Pokud je povrch mastný, je potřeba jej předem odmastit. Nejčastěji využitím roztoku NaOH. Po této mechanické úpravě je vhodné opatřit povrch vrstvou bezbarvého laku, který chrání vyleštěný povrch pod ním. Vhodná je tato metoda i pro zakrytí případných nerovností při výrobě. Při té se využívá menších průměrů kartáčů při vysokých rychlostech. Řádově 20 násobek rychlosti než při klasickém kartáčování. Vzniklý povrch nazýváme mramorovaným. [7, 9]

Obr. 6 Mramorovaný povrch hliníku [28]

2.1.2 Broušení a leštění

Pro zakrytí větších nerovností povrchu je zapotřebí využít dražších metod, tedy broušení s následným leštěním. K broušení se nejčastěji využívají dřevěné nebo hliníkové kotouče potažené smirkovým plátnem. Po dosažení hladké výchozí plochy povrchu přichází na řadu leštění. Za pomocí bavlněného nebo hadrového kotouče a leštících past je dosažováno cíleného lesku. Dobré si uvědomit, že ne všechny plochy je možno z konstrukčního hlediska leštit. [7, 9]

2.1.3 Omílání

Při hromadné výrobě je potřeba povrchově upravit velké množství materiálu. Proto je vhodné využití omílacích bubnů. Bubny bývají až do jedné třetiny naplněné ocelovými kuličkami nebo válečky . V závislosti na velikosti odlitku a produkci se využívá rozdílných průměrů. Nejčastější kolem 2 - 6 mm. Jako leštící emulze se užívá roztok jádrového mýdla. Předměty se podobně jako u kartáčování, broušení a leštění nejprve odmašťují. Průmyslové omílání není rozhodně tak účinné jako samotné broušení a leštění. Nicméně povrch bývá i tak pro většinu aplikací dostatečný. [7, 9]

2.1.4 Tryskání

Při tryskání jsou dvě možnosti výběru abraziv. První, křemičitý písek, který vytváří matně šedivý povrch. Ten je velice citlivý na otisky prstů a nečistoty. Zároveň se touto metodou značně snižuje mez únavy materiálu. Druhou možností je využití hliníkových granulátů. Plocha tryskaná granuláty má čistý, rovnoměrný a lehce lesklý vzhled, také není tak citlivá na mastnotu a špínu. Navíc mez únavy materiálu zmenšuje daleko méně. [7, 9]

2.2 Chemická a elektrochemická povrchová úprava

2.2.1 Moření

Jde o proces chemického rozpouštění kovového povrchu. Moření slouží buď jako finální povrchová úprava, nebo jako předúprava pro jiné povrchové úpravy. Využití nalezneme například v odstraňování licí kůry nebo válcovaného povrchu. Moří se jak v zásaditých, tak kyselých louzích. Nejčastěji v roztoku NaOH nebo HNO_3 s HF. [1, 9]

Výhodou této povrchové úpravy je možnost mořit tvarově složité a tenkostěnné hliníkové materiály. Důležité zmínit, že před mořením potřeba materiál důkladně odmastit a provést oplach.

2.2.2 Leptání

Leptání buď to na povrchu materiálu, takzvaně na strukturu nebo do hloubky. Při využití leptání na strukturu jsou vyvolány na povrchu krystalické struktury vhodné k dekorativním účelům. Leptání do hloubky k odběru vrstev materiálu, možné nahrazení frézování. [9]

2.2.3 Zvětšení tloušťky ochranné povrchové vrstvy oxidů

Hliník vytváří na svém povrchu vlivem atmosféry tenkou přírodní oxidickou vrstvu, která částečně chrání materiál před jeho další oxidační korozí. Tloušťka této přírodní oxidické vrstvy po několika měsících dosahuje běžně od 0,003 až 0,005 μm. Za běžných klimatických podmínek propůjčuje tato tenká vrstva vysokou odolnost proti korozi. To ale neplatí pokud je vystavena nepříznivým povětrnostním podmínkám, přímého kontaktu s vodou, nebo korozně agresivním chemikáliím. Tenká vrstva oxidu hlinitého se rozruší a povrch se začne pokrývat bílými skvrnami. Vzniká koroze hliníku, obdobnou jako známe u ocelí.

Proto je potřeba výrobky z hliníku vždy chránit vrstvou, která zajistí mechanickou a chemickou odolnost vůči vnějším vlivům. Takto opatřené povrchy dodají materiálu na vzhledu a celkové životnosti. [9]

Využití vařící vody a páry

Tento způsob povrchové úpravy je vhodný zejména pro potravinářský průmysl a vodohospodářství. Metodou se nejčastěji upravují nádrže, vodovodní potrubí. Vrstvy jsou odolné působením kyseliny mléčné, ovocných kyselin a vařící vody. Ve přehřáté páře a vařící vodě se na hliníku vytváří vrstva Boehmittu. Ta je 10 až 40 krát odolnější než vrstva přírodní oxidická. Tloušťka se zvýší oproti přírodní oxidické přibližně 100 násobně, kolem 0,2 - 0,5 μm [1, 9]

Chemická reakce vzniku Boehmitu – $2\ Al + 4\ H_2O = Al_2O_3 \cdot H_2O + 3\ H_2$

Využití chemické oxidace

V tomto případě se ke zvýšení oxidické vrstvy dosahuje ponořením hliníkových materiálu do zahřátých lázní s obsahem uhličitanu, chromanu, nebo dvojchromanu sodného. Vzniklá vrstva má tmavě až světle šedou barvu. Tloušťka se pohybuje okolo 1 – 2 μm. Je vhodná k využití jako předúprava k nátěrům. Dobře odolává nárazům a ohýbání. [9]

Chromátování

Hlavní složkou lázně do které se hliníkový materiál ponořuje je kyselina chromová. Vzniklá vrstva dosahuje až 3 μm. Podobně jako u chemické oxidace je tato vrstva vhodná jako podklad pro různou škálu nátěrů. [9]

Fosfátování

U povrchové úpravy fosfátováním je hlavní složkou roztoků kyselina fosforečná s přídavkem komplexních fluoridů. Tuto metodu lze rovněž zařadit jako vhodnou pro podklad nátěrům. Korozní odolnost se zvyšuje, snižuje se tření povrchu. [9]

Nátěry

Nátěry na samotný hliník špatnou lnou, proto je využíváno předúprav povrchu. Doporučuje se proto vytvoření umělé vrstvy oxidu na níž se nátěr dobře přichytí.[7, 24]

3 Anodická oxidace

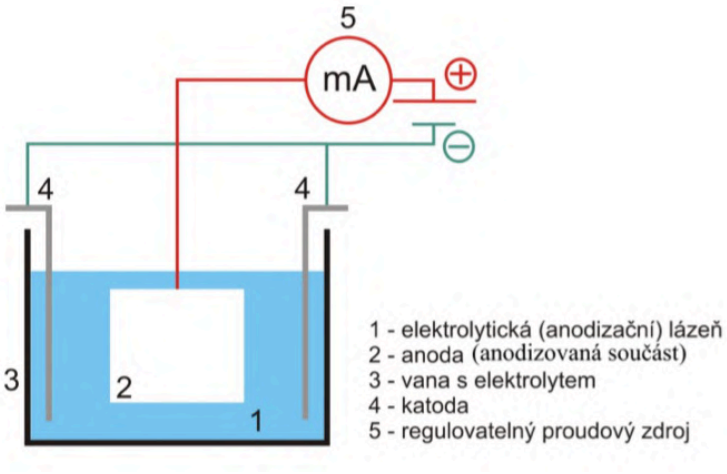
Neboli elektrolytická oxidace hliníku, je technologie která slouží k vytvoření nevodivé a velmi tvrdé přírodní vrstvy oxidu hlinitého, která je pevně spojena se základním materiálem. Anodickou oxidací jsou získány výrobky s korozně a funkčně odolným povrchem s hezkým vzhledem. Hlavními vlastnostmi anodické oxidace mohou být:

- zvýšení korozní odolnosti
- zlepšení tribologických vlastností povrchu
- zlepšení vzhledu materiálu
- snížení tepelné a elektrické vodivosti povrchu (odolávání vysokým teplotám)

Existuje velké množství technologických postupů a druhů anodické oxidace. Různé varianty postupů a druhů umožňují realizaci oxidické vrstvy rozdílných vlastností. I když se zdá povrchová úprava složitá, její proveditelnost je možná i za domácích podmínek. Při recyklaci hliníku není problém s jejím odstraněním. [1, 11, 7]

3.1 Princip vytváření oxidické vrstvy

Jedná se o elektrochemický proces, kde jsou na kovový závěs zavěšovány hliníkové předměty na kladném pólu (anodě) stejnosměrného proudu, zatímco záporná katoda je nerozpustná. Eloxování však může probíhat i při proudu střídavém. Zde je na každý pól zavěšený stejný kus hliníkového materiálu. [1, 11]



Obr. 7 Schéma zapojení při anodické oxidaci [11]

Teorie vytváření anodicky oxidovaného vrstvy je následovná. Proud je v elektrolytu veden póry krycí vrstvy ke dnu eloxovaného materiálu, k mezní vrstvě, přes pevný oxid. Mezní vrstva je dielektrická, proto vzrůstá elektrický odpor a dochází k silnému zahřátí.

To způsobuje urychlení rozpouštění hliníku a oxidů hliníku, které se nacházejí na dně pórů. Pór tímto způsobem roste vrstva oxidů směrem k vnějšímu povrchu hliníku.

Uspořádání, geometrii a velikost určuje zvolený typ elektrolytu. Použité napětí a typ elektrického proudu zase tloušťku stěn a tloušťku celkové vrstvy. [7, 11, 23]

3.2 Omezení využití anodické oxidace

Anodicky oxidovat lze hliník pouze s vyšší čistotou. Pro běžnou potřebu se využívá kolem 99,5% čistoty hliníku s maximálním obsahem 0,5% cizích kovů. Pro dekorativní účely je potřeba využít hliníku čistoty nejméně 99,85% nebo čistšího. Pro opravdu speciální a nejvyšší požadavky se využívá hliníku s čistotou 99,99%. Jelikož je ale čistý hliník jako kov měkký, využívá se k oxidaci slitin s dalšími kovy, které oxidaci neovlivňují. [7]

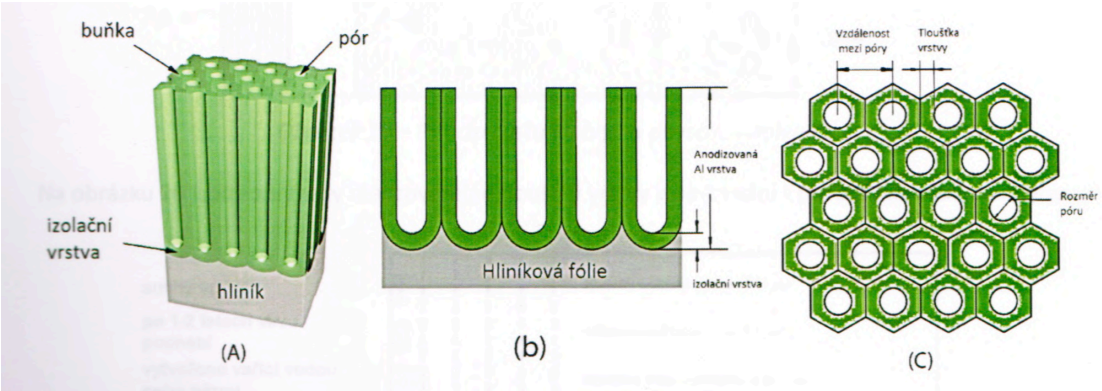
Tab. 3 Možné chemické složení hliníku vhodného k eloxování [7]

Železo	(Fe)	nejvýše 0,5 %	Hořčík	Mg)	nejvýše 7 %
Křemík	(Si)	nejvýše 2 - 3 %	Zinek	(Zn)	nejvýše 6 -8 %
Měď	(Cu)	nejvýše 1,5 %	Chrom	(Cr)	nejvýše 0,3 %
Mangan	(Mn)	nejvýše 0,5 - 0,8 %	Titan	(Ti)	nejvýše 0,3 %

3.3 Složení vrstvy

Vytvořená vrstva anodické oxidace se skládá ze dvou vrstev. První vrstvou je prakticky bezpórovitá dielektrická vrstva s tloušťkou přibližně 2% celkové vrstvy. Na ní se nachází jemně pórovitá vrstva, krycí. Ta je čirá, vzniká na rozhraní elektrolytu a mezní vrstvy při procesu zpětného rozpouštění mezní vrstvy v elektrolytu. Porézní vrstva vypadá jako pole seřazených hexagonálních buněk s pórem uprostřed.

Jeden z nejvíce používaných modelů vytvořených vrstev je model podle pánu Keller – Hunter. [1, 12, 23]



Obr. 8 Preferovaný model složení vrstev Keller – Hunter [12]

Větší četnost póru, porozita snižuje tvrdost a korozní odolnost materiálu. Zvýšení porozity s sebou nese ale i výhody, v podobě možnosti vybarvování, respektive dalších následných úprav této vrstvy. Celková tloušťka vrstvy běžně používaných oxidací se pohybuje řádově v desítkách mikrometrů. Taková tloušťka znamená až tisícinásobné zvětšení oproti oxidaci přirozené. [1, 12, 23]

3.4 Metody anodické oxidace

Množství vynalezených a patentovaných elektrolytů je nespočetně mnoho. V průběhu posledních desetiletí jejich počet ještě narůstal. V praxi se ale využívá jen velmi malý počet technicky realizovatelných variant. Proto je v této práci zaměřeno z větší části na ně. [1, 7]

3.4.1 Metoda kyseliny sírové – H_2SO_4

Jde o jednu z nejpoužívanějších metod eloxování. Její typické označení zní "metoda standartní". Jak je z názvu patrné, anodická oxidace probíhá v roztoku kyseliny sírové o koncentraci 180 / 200 g/l. Výhodou této metody je vytvoření vrstvy, která má zvýšenou korozní odolnost, výbornou ochranu proti povětrnostním podmínkám a možnosti vybarvování. Známé pod pojmem dekorativní eloxování. Dalšími dnes velice důležitými výhodami jsou nízká spotřeba energie, práce s nízkým pracovním napětím, využití cenově dostupných chemikálií a v neposlední řadě provozní spolehlivost a opakovatelnost.

U této metody se dosahuje největší tloušťky kolem 20 μm. Povrch má jemnou mléčně zakalenou strukturu. Nevýhodou povlaku sklon k křehkosti. [1, 11, 7]

Tab. 4 Parametry eloxování metodou kyseliny sírové a kyseliny šťavelové [1]

Metoda	Zkratka	Druh proudu	Napětí (V)	Proudová hustota (A/dm²)	Teplota (°C)	Vlastní barva vrstvy
Kyselina sírová	GS	stejnosměrný proud	13-20	1.2-2.0	18-21	žádná
Kyselina sírová – šťavelová	GSX	stejnosměrný proud	20-25	1.2-2.0	20-25	žádná

3.4.2 Metoda kyseliny šťavelové

Elektrolyt na bázi této kyseliny umožňuje vytvoření silnějších oxidických vrstev dobře odolných proti otěru. Vrstvy vytvořené touto metodou mají díky relativně velkému množství vrchních pórů dobrou schopnost vybarvovaní. Je potřeba užití vyšších napětí, s tím možná spojení se speciálními bezpečnostními opatřeními. Tuto metodu později nahradila metoda kyseliny sírové. [1, 11, 7]

3.4.3 Metoda kyseliny chromové

Jde o druhý nejčastěji využívaný způsob. Elektrická vodivost je stejně jako u kyseliny šťavelové menší, proto je potřeba zvýšeného napětí. Oxidace také probíhá déle jako u kyseliny sírové. Povlak je mléčný, našedlé barvy, tenký a málo odolný proti otěru. Za to disponuje velmi dobrou ochranou proti korozi. Využití této vlastnosti možno uplatnit zejména u výrobku složitých profilů a předmětu, které nelze díky jejich konstrukci jinak anodicky oxidovat. [1,11, 7]

Tab. 5 Obecné parametry eloxování metody kyseliny chromové [1]

Označení	Elektrolyt	[g/l]	Proudová hustota [A/dm²]	Napětí [V]	Teplota [°C]	Expoziční doba [min]	Tloušťka vrstvy	Barva
metoda „Bengoug - Stuart“	CrO_3	20-30	0.1-0.2	do 50	40	10-20	3-8	šedá

3.4.4 Metoda smaltu

U této metody se využívá smíšeného elektrolytu na bázi štavelanu draselno-titaničitého dále kyseliny borité a kyseliny šťavelové. Vzniklé oxidické vrstvy se dají vybarvit organickými barvivy. Vzhled se jeví jako po klasickém smaltování. Odsud název “metoda smaltu“. Povrch má velice dobré kluzné vlastnosti a je odolný proti opotřebení. [1, 11, 7]

Tab. 6 Obecné parametry při eloxování využitím smaltu [1]

Označení	Elektrolyt	[g/l]	Proudová hustota [A/dm²]	Napětí [V]	Teplota [°C]	Expoziční doba [min]	Tloušťka vrstvy	Barva
Metoda smaltu	šťavelan draselno-titaničitý, kyselina borité a šťavelová		2-3	80-120	40-60	10-40	10-20	šedobílá

3.4.5 Ostatní metody

V elektrotechnice nebo v nanotechnologiích je zapotřebí rozdílných a specializovaných požadavků na přesný poměr fyzikálních a chemických vlastností povrchu. Může se využívat ostatních roztoku elektrolytů. Například kyseliny fosforečné, borité (výroba kondenzátorů pomocí tenkých povlaků oxidace) nebo roztoku kyselého síranu sodného. [1]

Možné vlastnosti těchto dalších roztoků:

- vytvoření čiré vrstvy
- vlastní barvení oxidické vrstvy
- vytvoření vrstvy s vloženými funkčními částicemi (PTFE) [1]

3.4.6 Tvrdá anodická oxidace

Je přímou obměnou metody kyseliny sírové s tím rozdílem, že se elektrolyt nachází za velmi nízkých teplot. Toho se dosahuje umělým chlazením elektrolytu. Vrstvy takto vytvořené oxidace dosahují tloušťky až 100 μm. S rostoucí tloušťkou povlaku roste také ale riziko spojené se vznikem trhlin, u takto poškozených vrstev je patrné snížení korozní odolnosti. Finální povlak má skvělé tribologické vlastnosti, hlavně tvrdost a výbornou odolnost prosti mechanickému opotřebení.

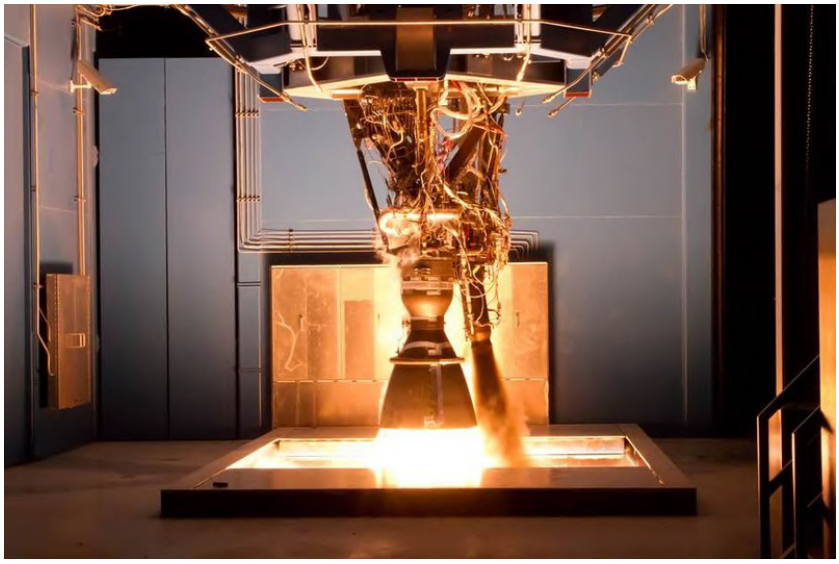
Eloxovaný povlak je tmavě šedé až černé barvy. Jelikož je lázeň elektrolytu chladná, je za potřebí vynaložit většího napětí. S tím spojená možná bezpečnostní rizika.

Cílem tvrdé oxidace je zajištění optimální odolnosti proti opotřebení zároveň s vysokou korozní odolností. [1, 7, 4]

3.4.7 Metoda plasmové elektrolytické oxidace - PEO

S rostoucí poptávkou po nekonvenčních materiálech roste i poptávka pro vhodnou povrchovou úpravu. Dochází tak ke skloubení mnoha vlastností. Jednou z novějších metod, která takové povrchové vlastnosti materiálům propůjčuje je právě i metoda plasmové elektrolytické oxidace, někdy nazývané jako mikro-anodická. Na rozdíl od běžných metod, při kterých se eloxování provádí mezi 10 – 50 V se u eloxování PEO využívá násobně vyšších napětí. Kolem 400 – 800 V. Napětí jsou tak vysoká, že dochází k překročení průrazných napětí původních vrstev. Dochází k tvorbě plazmy při mikro-vybíjení vzniklého potenciálu. To se opticky projevuje jiskřením povrchu. [18, 22]

Vrstvy vzniklé touto metodou mají výbornou korozní odolnost, otěruvzdornost, tvrdost (až 2000 HV) a vynikající odolnost proti odtržení od povrchu. Specifické je díky tloušťce oxidace i krátkodobá odolnost vůči žáru, které se využívá například na usměrňovačích proudu raketových motorů americké firmy Space X. [18, 22]



Obr. 9 Raketový motor společnosti SpaceX [27]

3.5 Předúpravy povrchu

Druh předúpravy je přesně definován v normě ČSN ISO 7599 označen zkratkami E0 až E8. [7, 3]

3.5.1 Mechanické předúpravy

Mechanickou předúpravou se získá patřičné kvality povrchu danou především drsností. Tryskání, broušení, kartáčování, leštění. To vše jsou technologie, které jsou využívané nejčastěji.

Tímto procesem jsou odstraněny z produktu vady spojené například s předchozími operacemi. Mohou to být vady po odlití, otřepy nebo korozní produkty. [3, 9]

3.5.2 Chemické předúpravy

Tyto předúpravy mají za význam odstranit zbylé nečistoty na povrchu materiálu, případně připravit materiál k samotnému procesu anodické oxidace. Jsou využívaný různé chemické prostředky s vlastnostmi k odmaštění a moření materiálu. Předúpravy chemické jsou z hlediska času a nákladů příznivější než předúpravy mechanické. [11, 9, 17]

Chemické předúpravy dělíme na dva druhy:

- odmaštění a čištění bez znatelných změn na povrchu
- moření, leptání a leštění s znatelnými změnami na povrchu (odstraňující její část) [11, 9]

Čištění a odmaštění

V průběhu odmašťování dochází k odstranění zbylých látek, které na materiálu ulpěly v průběhu výroby. Například tuky, vosk, oleje, mastnota nebo prach. Cílem je tedy tyto nežádoucí látky vyloučit.

Proces odmaštění dělíme na několik druhů. Dle způsobu aplikace a dle druhu probíhajících procesů a využitých prostředků. Čistící prostředek se skládá z anorganických, organických solí a tenzidů. Pomocí moderních, vodou ředitelných prostředků jsme schopni dosáhnout velmi dobrých výsledků již při pracovních teplotách od 50 °C. [1, 11, 9]

Moření

Moření je chemický proces sloužící k odstranění tenké oxidické vrstvy z povrchu základního materiálu. Taktéž odstraňuje korozní produkty vytvořené na materiálu a zbytky nečistot. Nevýhodou moření je částečné rozpuštění základního kovu a tak vniknutí nežádoucího vodíku a rozpuštěných solí do povrchu materiálu.

Mořící lázeň může být u ocelí ve formě zředěné kyseliny sírové, fosforečné či chlorovodíkové. U hliníku nejčastěji v alkalických lázních ve formě 10 - 15% hydroxidu sodného. Účinek mořidla je závislý na teplotě, době strávené v kontaktu s povrchem, chemickém složení a technologických parametrech při jeho procesu. [1, 11, 12]

Tab. 7 Obvyklé parametry při moření [12]

Složení lázně	Min. 25 g/l mořící přísady Alfisatin 339 50-80 g/l NaOH (hydroxid sodný)
Hustota	cca 1,19 g/ml
Doba zpracování	8 až 30 minut podle teploty, koncentrace a požadovaného mořícího stupně
Teplota	40 až 70 °C

Dezoxidace (dekapování, vyjasnění)

Dezoxidace má za funkci aktivace povrchu před samotnou anodickou oxidací a slouží také k odstranění zbytků nerozpustných slitinových součástí z kovového povrchu. Z ekologického hlediska se nyní již nevyužívá ředěná kyselina dusičná ale speciální roztok a přípravek speciálních aditiv. [12, 11]

Tab. 8 Obvyklé paramtery při vyjasnění [12]

Složení lázně	GS - použitá eloxovací lázeň: 160-200 g/l kyseliny sírové min. 10 g/l hliníku Alfideox 75: 0,2 – 10 g/l
Hustota	cca 1,1 g/ml
Doba zpracování	0,5 až 2 minuty
Teplota	Pokojová (20 až 25°C)

Oplach

Po moření je vždy zapotřebí důkladný oplach, který zabraňuje kontaminaci dalších lázní. Využívá se téměř v každém jednotlivém kroku. Oplach bývá průtočný a vícestupňový. Nejlepší možnou variantu oplachu je ve vodě zbavené veškerých minerálu. tzv. demineralizované. Po samotné povrchové úpravě je vhodné čas oplachu prodloužit aby došlo k úplnému vymytí kyseliny z pórů anodicky oxidované vrstvy.[11]

Elektrolytická lázeň

Elektrolyt se mění, s každou anodickou oxidací je odlišný. Nejčastěji využívaným elektrolytem je kyselina sírová, někdy využívaná ve směsi s kyselinou šťavelovou. Pro lepené spoje je využívána nejčastěji kyseliná fosforečná či kyselina chromová. Může být ale využita taktéž kyselina citronová nebo boritá. [11]

3.6 Dokončovací úpravy

3.6.1 Barvení

Existuje několik variant barvení materiálu. Jednou z nich je barvení integrální, kdy dochází k zabarvení již v průběhu vlastního procesu anodizace. Dalším z možných metod je barvení elektrolytické, adsorpční či kombinace těchto metod. [7, 11]

Elektrolytické barvení

Hojně využívaný proces barvení anodicky oxidovaných vrstev spočívá ve vložení materiálu do vhodné barvící lázně. Do té je přiveden střídavý proud, ten rozkládá alkalické soli na ionty. Ty se vylučují v pórech anodicky oxidované vrstvy. [7, 11]

Adsorpční

Tato metoda využívá porezitu vrstvy. Čím vyšší porezita je tím lépe na ní organické či anorganické barvící látky ulpívají. Vliv na proces má hodnota pH lázně a její teplota, respektive uzavření pórů. [7, 11]

Kombinované

Jde o směs elektrolytického a adsorpčního barvení. [7, 11]

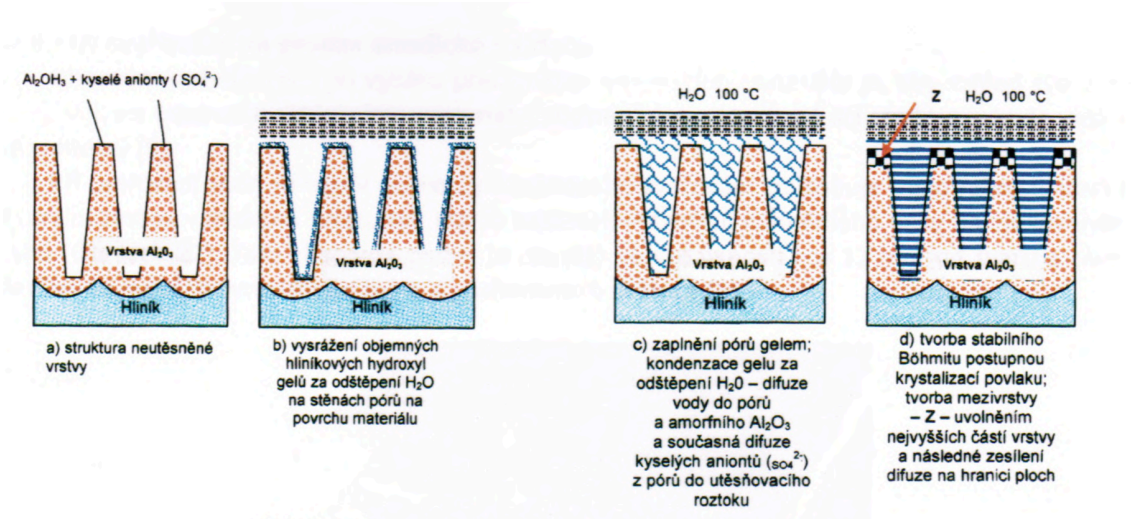
3.7 Utěsnění (Sealing)

Optimální korozní a mechanické odolnosti lze dosáhnout až kvalitním utěsněním. Jde o závěrečnou operaci po anodické oxidaci. Dochází k uzavření porézní a velmi reaktivní oxidické vrstvy a tím k získání finálních parametrů materiálu. Dochází k zabránění vymytí barvy z vrstvy. Utěsnění probíhá za pomocí horké deionizované vody, či kovových solí. Doba strávená utěsněním je přímo úměrná tloušťce oxidické vrstvy.

Je známo několik forem utěsnění, v současné době se ale využívá nejčastěji 4 metod. Jsou to:

- utěsnění za nízkých teplot (kolem 82 – 88 °C)
- utěsnění v roztocích kovových solí za teploty 28 - 32 °C
- utěsnění v roztocích kovových solí za teploty minimálně 97 °C
- utěsnění v horké vodě, minimálně 97 °C

Z těchto 4 metod se k masovém využití nejčastěji využívá metoda Sealingu za horka, tedy utěsnění za vyšších teplot. Při teplotách nad 60 °C postupně dochází k interakci oxidu hliníku s molekulami vody. Při teplotách pod 70 °C vzniká Baerit (Al_2OH_3 x $_3H_2O$), teprve za vyšších teplot dochází k vytvoření stabilní krystalické fáze Boehmitu (Al_2 OH_3 x H_2O). Fáze průběhu utěsnění dle níže přiloženého obrázku. [1, 12]



Obr. 10 Mechanismus horkého utěsnění [12]

3.8 Chyby při eloxování a jejich příčiny

Jak bylo již na začátku zmíněno, ne všechny slitiny hliníku jsou dobře eloxovatelné. Pro dosažení vysoké kvality anodické oxidace je zapotřebí nejlépe hliník nejvyšší čistoty (99,99 % Al). Nejenom chemické složení základního materiálu, ale i špatně zvolený technologický postup, či systém předchozího zpracování mohou být častou příčinou vzniku vad v eloxovaných vrstvách. Vady se objevují většinou ihned při jednotlivých operacích této technologie. Dalšími vadami mohou být například předchozí korozní poškození, tenká vrstva či úplná absence eloxu případně změna odstínu při procesu vybarvení. [7, 9]

4 Duplexní systém

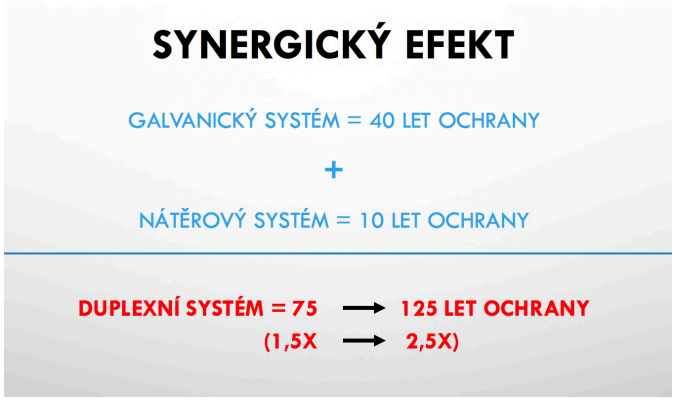
Duplexní systém je spojení dvou na sobě vytvořených povrchových úprav, který navyšuje technologické a chemické vlastnosti. Nejčastěji se s pojmem duplexní systém pojí několikanásobné zvýšení korozní odolnosti. Povrchové úpravy se ale mohou také vzájemně doplňovat, to co jedné chybí druhá nahradí. Vzájemně tak tvoří pevné spojení doplňujících se vlastností. Například u ocelí to bývá spojení zinkování a poté využití ochranných vlastností nátěrových systémů.

V této práci duplexní systém konkrétně představuje spojení vrstev vytvořených anodickou oxidací a nátěrového systému.

Duplexní systém se u anodických oxidací přímo nabízí. Neutěsněním (sealingem) krycích vrstev oxidace vzniká prostor do kterého se nátěr uchytí. Společně tak vytvoří duplexní ochrannou dvojici. [13]

4.1 Synergický efekt

Díky existenci dvou povrchových úprav na jednom povrchu vzrůstá jejich ochrana společně 1,5 - 2,5 krát než by byl součet ochrany povrchu jednotlivých vrstev či povlaků. Synergickým efektem se výrazně zvýší odolnost proti korozi a tím i životnost celkového výrobku. Současně dochází i k snížení nákladů na údržbu. [13]



Obr. 11 Příklad zvýšení životnosti a odolnosti při využití duplexního systému [13]

5 Nátěrový systém

Nátěrový systém zlepšuje funkční vlastnosti povrchu materiálu. Nejčastěji se využívá nátěrových systému pro zvýšení korozní odolnosti, otěruvzdornosti, nebo i vzhledovým vlastnostem. [2]

5.1 Aplikace nátěrových systémů

Nátěrové systémy na povrchy předmětů jsou nanášeny různými technologiemi. Těmi jsou:

- **Natírání (štětcem, válečkem)**

Natírání štětcem představuje jednu z nejstarších ale stále nejrozšířenějších technik nanášení NH. Využití zejména pro nátěr nábytku, jeho renovaci nebo u členitých a zabudovaných konstrukcí ve stavebnictví. Štětce jsou převážně vyráběny z prasečích štětin z hřbetní části kůže, často se využívá kombinace prasečích a syntetických štětin.

Výhodou je minimální ztráta NH, malá spotřeba ředidel a nízké pořizovací náklady. Nevýhodou je malá výkonnost.

Nanášení válečkem je používáno pro velké hladké plochy pro natírání stěn, vrat nebo pletiv hustých mříží. Technika spočívá v navalování nátěrové hmoty pod malým tlakem na připravenou plochu.

Výhodou této techniky je vysoká produktivita práce a také úspora NH. Nevýhodou může být nemožnost natírat členité a profilované podklady. [19]

- **Máčením**

Technika máčením je používána pro tvorbu základních nebo podkladových nátěrů. Technologie spočívá v máčení daného předmětu ve vanách s NH. Přebytečná NH se nechá nad vanou vykapat a předmět schne, případně se dá k vypálení.

Předností této metody je vysoká produktivita práce a jednoduchost. Nevýhodou je nutnost perfektního očistění a předúpravy máčeného povrchu. [19]

- **Bubnování**

Jedná se o metodu průmyslového nanášení NH. Využívá se k povrchové úpravě velkého množstvích malých předmětů. Principem metody je obalení a zároveň i vysušení NH přímo v bubnu. [19]

- **Stříkání**

Princip spočívá v rozprašování NH na předmět. NH musí mít v tomto případě vhodnou konzistenci. Drobné kapičky NH poté vytváří celistvý film. K stříkání NH je využíváno vícero technologií:

- **vysokotlaké stříkání**
- **pneumatické stříkání**
- **elektrostatické stříkání**
- **nástřik teplé nátěrové hmoty**

Hlavní výhodou stříkání NH je dosažení stejnoměrné tloušťky NH a celkové urychlení procesu. Nevýhodou může být finanční zátěž spojená se zakoupením potřebného vybavením takovéto lakovny. [19]

- **Clonování**

Předmět prochází souvislou clonou NH a tím dochází k jejímu nanášení. Výhodou této metody je získání stejnoměrné tloušťky a nízká ztráta NH. Nevýhodou je hlavně nemožnost takto povrchově upravovat členité tvary předmětů. [19]

- **Navalování**

Principem technologie je průchod natíraného předmětu přes soustavu natíracích válců. Navalování využíváme k povrchové úpravě plošných výrobků jako jsou dřevěné desky, plechy atd. [19]

5.2 Funkce nátěru

Chrání povrch především bariérovým nebo inhibičním účinkem. Využívá se k dosažení korozivzdorných, dekoračních, ochranných nebo jiných funkčních účinků. [2]

5.3 Složení nátěrových hmot

Složení nátěrových hmot je různé ale dá se shrnout do takzvaného obecného složení.

- pojiva
- plniva a pigmenty
- rozpouštědla
- aditiva a speciální přísady

Hlavní složkou nátěrových hmot jsou pojiva, neboli filmotvorné látky, ty zajišťují vytvoření tuhého souvislého filmu různé tloušťky. Nejčastěji se sestávají z vysychavých olejů, pryskyřicí, asfaltů, derivátů celulózy nebo kaučuku.

Další důležitou látkou v NH jsou rozpouštědla, ty zajištují naředění NH do požadované konzistence.

NH tvoří také pigmenty a plniva. Pigmenty zajišťují v NH hlavně estetickou funkci. Kromě toho mohou plnit i některé další funkce nátěru, jako je například antikorozní účinek. Pigmenty dělíme na inhibiční, stimulující a neutrální. Plniva jak už z jejich názvu vyplívá mají za funkci barvu vyplnit, tedy navýšit její objem. Plniva snižují cenu NH a zároveň mohou zlepšovat její mechanické a optické vlastnosti.

Poslední přísadou NH bývají aditiva a speciální přídavné látky. Jedním ze základních aditiv používání při tvoření NH jsou aditiva dispergační a rozlivová. Dispergační aditiva zajišťují snížení množství energie potřebného k smíšení NH. Aditiva rozlivová mají především za úkol snížit množství povrchových vad a vyrovnání povrchu NH. Příkladem speciální přídavné látky může být například odpěňovač, který slouží k odstranění pěny na povrchu NH. Všechny tyto látky ve správném poměru vytváří již konkrétní NH s danými vlastnostmi. [20, 16]

5.4 Rozdělení NH

NH dělíme do několika segmentů.

A - v závislosti na druhu báze

- A - asfaltové
- B - polyesterové
- C - celulózové
- E - práškové
- H - chlorkaučukové
- N - NH pro povrchovou úpravu plastů
- S - syntetické
- U - polyuretanové
- V - vodové a emulzní
- P - pomocné přípravky

Za základním písmenem se nachází čtyřmístná číslice, která udává informace o druhu NH

- 1000 - transparentní látky a fermeže
- 2000 - pigmentové NH
- 3000 - pasty
- 4000 - plniče
- 5000 - tmely
- 6000 - ředidla
- 7000 - sušidla a tvrdidla
- 8000 - pomocné přípravky
- 9000 - pryskyřice [2]

B - dle základních vlastností

- laky - na ošetřeném povrchu vytváří průsvitnou vrstvu, chrání a zároveň zvýrazňují strukturu dřeva
- pigmentové nátěrové systémy - vytváří na povrchu neprůhlednou vrstvu [2]

C - dle prostředí

- vnitřní - dekorativní funkce
- vnější - odolnost vůči vnějším vlivům, dekorativní funkce
- speciální - například elektrická vodivost, feromagnetická funkce, nebo odrazivost a jiné [2]

D - dle způsobu aplikace

- napouštěcí - využívají se jako impregnace savých materiálu, ať už proti plísním, či jako odpuzení vody
- základní
- plnící - snížení nerovností povrchu
- vrchní a zakrývací - finální vrstva, dekorativní a funkční účel [2]

E - dle typu pigmentu a plnidla

- jsou děleny na pigmentované a transparentní [2]

6 Tribologické zkoušky

6.1 Měření drsnosti

Různým zpracováním hliníku a jeho slitin dosahujeme různých drsností na jeho povrchu. Drsnost je velice důležitým parametrem pro určení a zvolení vhodných mechanických a chemických předúprav materiálu. Drsnost je vhodné měřit nejenom před samotnými povrchovými úpravami, ale i po nich.

Metodiku hodnocení drsnosti povrchu udává norma ČSN ISO 468.

Drsnost povrchu lze měřit dvěma způsoby:

A - **Bezkontaktně** - za pomocí optických přístrojů a etalonů povrchu pouhým porovnáním

B - **Dotykovou metodou** - měřící hrot snímá vertikální odchylky přímo od středící čáry

V dnešní době se nejčastěji využívá metody dotykové. [14, 8]

6.1.1 Struktura povrchu

Drsností povrchu jsou chápány části tvarových úchylek dosaženého, skutečného profilu povrchu s malou vzdáleností nerovností.

Strukturu dělíme na dva typy:

Mikronerovnosti - velice jemná nerovnost, dána technologií výroby

Makronerovnosti - jde o rozlehlejší sledovanou část, nejčastěji například zjištění vlnitosti povrchu

Při měření drsnosti povrchu nás zajímají především tyto statistické hodnoty.

Ra - střední aritmetická hodnota absolutních hodnot úchylek profilu v rozsahu délky l

Rmax - jde o největší z největších výšek stanovených na pěti stejně velkých základních délkách

Rz - střední hodnota z výšek a hloubek pěti největších prohlubní profilu

Pt - neboli hloubka profilu, jde o nejmenší vzdálenost dvou hraničních přímek profilu

D - hustota, určuje počet výstupku uvnitř dané vyhodnocované délky [14, 8]

6.2 Měření tloušťky NH

Pro správnost provedení například odtrhové zkoušky je zapotřebí zjistit tloušťku jednotlivých vrstev nanesených na základním materiálu. Existují dva základní druhy měření. [26]

A - Měření a stanovení tloušťky mokrého filmu

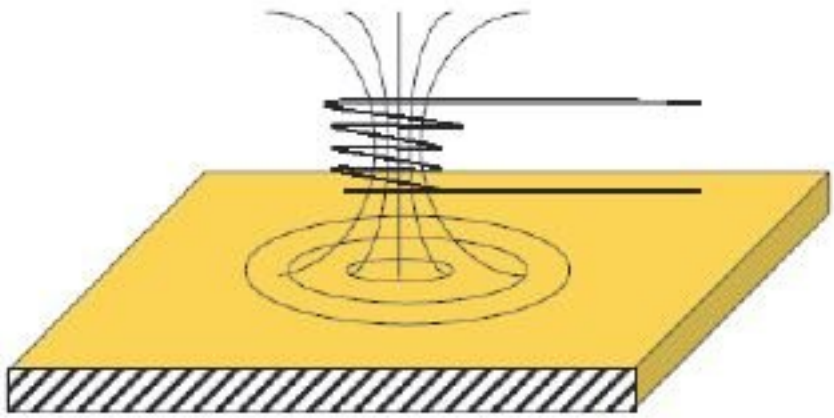
Povrch podkladu je přímo v kontaktu s částí měřícího přístroje a povrch povlaku je také s přímou interakcí jiné části měřícího přístroje. Po odečtu vzdáleností těchto dvou bodů, vzniká zjištění výsledné tloušťky mokrého filmu NH.

Je využíváno měřících hřebenů, koleček nebo úchylkoměrů. [26]

B - Měření a stanovení tloušťky suchého filmu

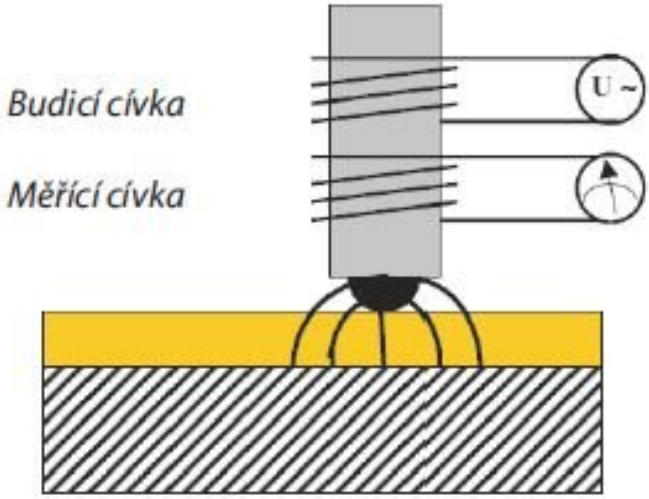
Tloušťka je změřená na základě rozdílu mezi celkovou tloušťkou a tloušťkou podkladu. Existují jak destruktivní tak nedestruktivní metody. Také je ze možné uplatnění úchylkoměrů, ale nejčastěji se zde využívá tloušťkoměru na principu metody vířivých proudů.

Principem metody je rozdílnost vodivosti povlaku a podkladu. [26]



Obr. 12 Princip metody vířivých proudů [26]

Další používanou metodou je využití magneticko-indukční metody. Ta spočívá ve vyhodnocování intenzity vybuzeného elektromagnetického pole.



Obr. 13 Princip magneticko-indukční metody [26]

6.3 Odtrhové zkoušky

Jde o zkoušku hodnocení přilnavosti nebo soudržnosti jednoho materiálu, nebo souboru jeho povrchových úprav. Hodnocení se provádí měřením minimálního napětí v tahu, potřebnému k roztržení nebo oddělení nátěru v kolmém směru od jeho podkladu.

Výsledné hodnocení závisí na zvoleném druhu a přípravou podkladu, také dále teplotou, vlhkostí, podmínkami zasychání nátěru, druhem lepidla a dalšími činiteli. Kvalita provedení zkoušky se odvíjí vhodným zvolením zkušebního zařízení.

Ty jsou děleny na dvě základní. A to elektrická s možností lineárního růstu napětí nebo mechanická s velice obtížnou možností lineárního růstu napětí. Postupné zatěžování je důležité pro získání reálných dat z měření. Je proto vhodné využít zařízení elektronická.

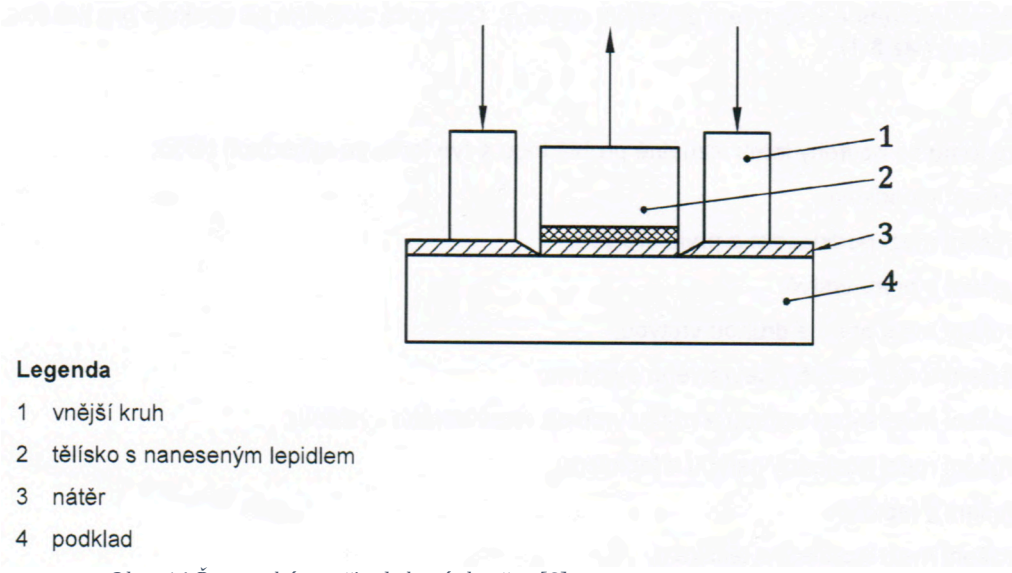
Pro průkazné měření je potřeba alespoň šest zkušebních sestav s tím že jednotlivá měření se provedou dle ISO 3270, tedy při okolní teplotě 23 ± 2°C.

Odtrhovými zkouškami v NH se přesněji zabývá norma ČSN ISO 4624:2016 [6]

6.3.1 Podstata metody

Zkoušená NH nebo systém se nanese v pokud možno stejnoměrné tloušťce na základní zkušební materiál o stejnoměrné struktuře povrchu. Po zaschnutí a vytvrzení NH nebo systému se na povrch připevní lepidlem zkušební tělíska.

Po vytvrzení lepidla se sestava s tělískem uchytí do odtrhového zařízení a změří se potřebná síla k přerušení adhezní či kohezní vazby mezi systémy nebo NH. Výsledkem zkoušky je tahové napětí potřebné k rozlomení nejslabšího rozhraní. [6]



Obr. 14 Řez a schéma při odtrhové zkoušce [6]

6.3.2 Zkušební tělíska

Jde o válcovou zkušební část vytvořenou z hliníku nebo oceli. Na jednom konci s rovnou základnou pro dobré spojení lepidlo/NH a na druhém konci k vhodnému spojení s odtrhovým zařízením. Zkušební tělíska nazýváme panenkami. Nejčastěji se využívají panenky o průměru 20 mm, lze ale využít i panenek větších nebo menších. Výběr závisí na tloušťce základního materiálu a předpokládaných hodnot tahových napětí. [6, 16]

6.3.3 Řezný nástroj

Před započetím samotné odtrhové zkoušky je vhodné zbavit tělíska ostatních soudržných sil, například vyteklého lepidla přes bok tělíska. Jinak by tak mohlo docházet k zkreslování finálních hodnot. Je obřezána vždy celá panenka po obvodu, vždy až k základnímu materiálu. Tím je vymezena zkoušená oblast pouze na plochu pod samotným zkušebním tělískem. Do výsledného protokolu je nezbytné zaznamenat zda bylo tělísko obřezáno a zaznamenat typ řezného nástroje. [6]

6.3.4 Druh lepidla

Je důležité užití vhodného lepidla, takového, jehož soudržnost a přilnavost bude větší než má samotný zkoušený nátěr. Proto se využívá těch nejpevnějších lepidel s vysokou schopností adheze.

Nejčastěji jsou využívána lepidla kyano-akrylátová ale také dvousložková bezrozpouštědlová epoxidová nebo polyesterová lepidla s peroxidovým katalyzátorem. Je snaha vytvrzovací dobu zkracovat, to dává možnosti využití například rychleschnoucím dvousložkovým epoxidům. [6, 10]

6.3.5 Vyhodnocení zkoušky

Pro stanovení charakteru lomu se zkoušené povrchy a typ lomu vyhodnotí dle přiložené tabulky. [6]

Tab. 9 Vyhodnocení odtrhových zkoušek [6]

Klasifikace	Popis
A	Kohezní lom v podkladu
A/B	Adhezní lom mezi podkladem
B	Kohezní lom první vrstvy
B/C	Adhezní lom mezi prvním a druhým podkladem
C	Kohezní lom druhé vrstvy
C/Y	Adhezní lom mezi druhou vrstvou a lepidlem
Y	Kohezní lom v lepidle
Y/Z	Adhezní lom mezi lepidlem a zkušebním tělesem (panenkou)

6.4 Mřížkový test

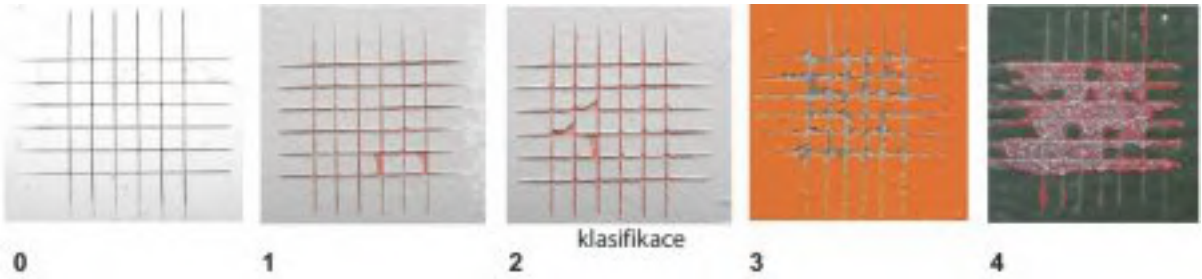
Jednou z dalších metod zkoušení přilnavosti povrchových úprav je i mřížková zkouška. Principem je vyřezání mřížek složených ze 6 vertikálních a 6 horizontálních řezů. Podle tloušťky zkoušeného povrchu a typu podkladu se určuje jakou vzdálenost od sebe budou jednotlivé řezy mít. [5]

Tab. 10 Určení metody mřížkové zkoušky [5]

Tloušťka NH	Vzdálenost mezi řezy
do 60 (µm)	vzdálenost 1 mm pro tvrdé podklady (kov a plasty)
do 60 (µm)	vzdálenost 2 mm pro měkké podklady (dřevo a sádrové výrobky)
61 až 120 (µm)	vzdálenost 2 mm pro tvrdé i měkké podklady
121 až 250 (µm)	vzdálenost 3 mm pro tvrdé i měkké podklady

Běžně se k vykonání zkoušky používají vodící nebo distanční šablony. S kterými se za pomocí řezného nástroje do povrchu vytvoří řezy. Přesný průběh a parametry řezných nástrojů zaznamenává norma ČSN ISO 2409.

Po vyřezání mřížky se za pomocí štětce nebo lepící pásky odstraní veškeré uvolněné části povlaku. Vyhodnocení mřížkového testu probíhá dle přiložené tabulky. [5, 26]



Obr. 15 Klasifikace a vyhodnocení po mřížkové zkoušce [26]

7 Experimentální část

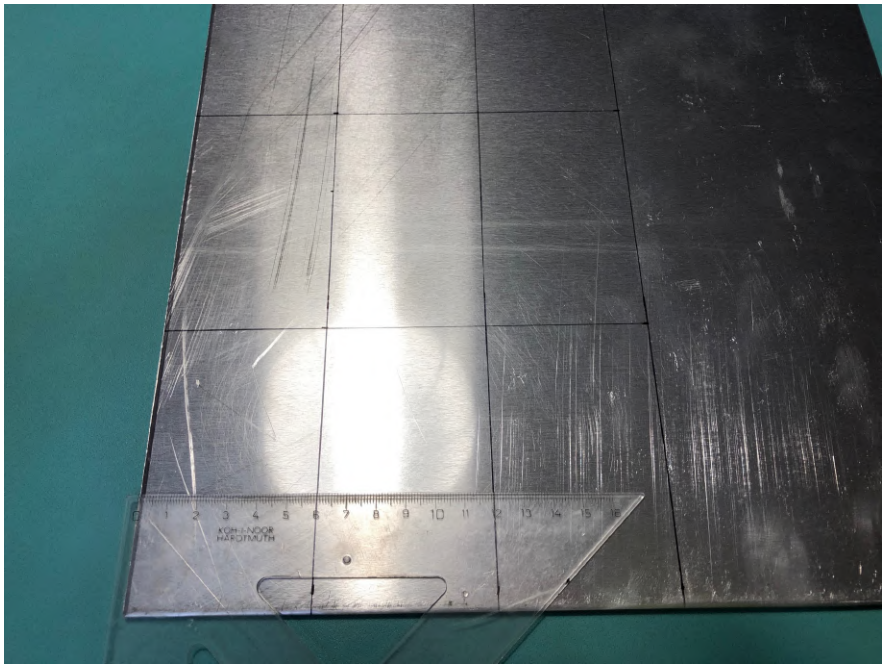
Praktická část této bakalářské práce se zabývá zhodnocením vytvořených duplexních systémům. Hodnotí zde především přilnavost NH k anodicky oxidovaným povlakům. K hodnocení přilnavosti NH na anodicky oxidovaný základní materiál využívá odtrhovou zkoušku dle ČSN EN ISO 4224:2016, dále také mřížkovou zkoušku dle ČSN EN ISO 2409. Výsledky obou zkoušek jsou porovnány.

Vyjma samotné anodické oxidace vzorků byly veškeré potřebné úkony, nanášení barvy nebo samotné zkoušky prováděny v laboratořích povrchových úprav Fakulty strojní ČVUT v Praze. Tvrdé a dekorativní eloxování byly provedeno firmou GALVANIKA PRAHA s.r.o. Vzorky eloxované metodou PEO z části z Ruska a z části od Ing. Martina Chvojky za spolupráce s Výzkumným a testovacím centrem materiálů SVÚM a.s. v Čelákovicích. Některé parametry jako drsnosti, nebo metalografické snímky byly pořízeny také v tomto centru.

7.1 Výroba vzorků

Pro výrobu vzorků byl použit hliník s označením EN AW 1050 je nelegovaný hliník s maximálním podílem nečistot 0,5 %. Tento materiál vyl zvolen vzhledem k dobré eloxovatelnosti. Přesný materiálový list je uveden v příloze. Bylo vytvořeno celkem 11 stejných vzorků. Další dva vzorky byly získány od Ing. Martina Chvojky, vyrobené metodou PEO.

Vzhledem k vytvoření dobrého spojení mezi NH a anodickou oxidací jsme vzorky ani v jednom případě neutěsňovali. [25]



Obr. 16 Příprava hliníkových vzorků

Obr. 17 Připravené vzorky k eloxování

7.1.1 Technologické postupy

Tab. 11 Technologický postup dekorativní anodické oxidace [31]

č.	název operace	prostředek	koncentrace [g/l]	teplota [°C]	doba operace [min]	proudová hustota [A/dm2]
1.	odmašťování	Rogal 19	20	50	1 - 5	
2.	odmašťování a moření	Rogal 18	100	50	1 - 5	
3.	oplach neprůtočný	voda	-	20	0,5	
4.	oplach průtočný	voda	-	20	1	
5.	vyjasnění	Rogal 32	20	20 - 30	1	
6.	oplach průtočný	voda	-	20	1	
7.	eloxování	Rogal 3	60	25	30	1 - 3
8.	oplach neprůtočný	voda demi	-	20	0,5	
9.	oplach průtočný	voda demi	-	20	20	

Tab. 12 Technologický postup tvrdé anodické oxidace [31]

č.	název operace	prostředek	koncentrace [g/l]	teplota [°C]	doba operace [min]	proudová hustota [A/dm2]
1.	odmašťování	Rogal 19	20	50	1-5	
2.	odmašťování a moření	Rogal 18	100	50	1-5	
3.	oplach neprůtočný	voda	-	10	0,5	
4.	oplach průtočný	voda	-	10	1	
5.	vyjasnění	Rogal 32	20	20 - 30	1	
6.	oplach průtočný	voda	-	10	1	
7.	eloxování	Rogal 5	62	2	20 - 60	4 - 8 (20 - 40 V)
8.	oplach neprůtočný	voda demi	-	10	0,5	
9.	oplach průtočný	voda demi	-	20	20	

7.1.2 Složení chemických prostředků

Rogal 18

Slouží k odmaštění a moření zároveň.

Pracovní koncentrace : 10 – 20 kg Rogal 18.1 / 100 l lázně
0,5 l Rogal 18.2 / 100 l lázně

Rogal 19

Slouží k odmaštění bez naleptání povrchu a bez ztrát lesku, nenarušujeme tím rozměry ani lesk.

Pracovní koncentrace : 2 kg Rogal 19.1 / 100 l lázně
0,5 l Rogal 19.2 / 100 l lázně

Rogal 32

Slouží k odstranění matné, tmavé vrstvy vzniklé obsaženými legurami (Cu, Mn, Fe atd.). Dříve se využíval pro tyto účely roztok HNO_3. Ten postupem času nahradil ekologicky přívětivější roztok právě 32, který posloužil ke snížení dusičnanů v odpadních vodách.

Pracovní koncentrace : 30 – 50 l kyseliny sírové akumulátorové (38%) / 100 l lázně
3 kg Rogal 32.1 / 100 l lázně
0,5 l Rogal 32.2 100 l lázně

Rogal 3

Slouží jako elektrolyt pro dekorativní eloxování

Pracovní koncentrace : 3 kg Rogal 3A / 100 l lázně
3 kg Rogal 3B / 100 l lázně
34 kyseliny sírové akumulátorové (38%) / 100 l lázně

Rogal 5

Slouží jako elektrolyt pro tvrdé eloxování

Pracovní koncentrace: 3 kg Rogal 5.1 / 100 l lázně
3 kg Rogal 5.2 / 100 l lázně
100 ml Rogal 5.3 / 100 l lázně
34 l kyseliny sírové akumulátorové (40%) / 100 l lázně

Technologické postupy PEO nejsou zaznamenané, jelikož podléhají obchodnímu tajemství. I již zmíněné technologické postupy dekorativní a tvrdé eloxace jsou obecné a každá společnost si pečlivě chrání vlastní technologický postup eloxování. [31]

7.2 Duplexní systém

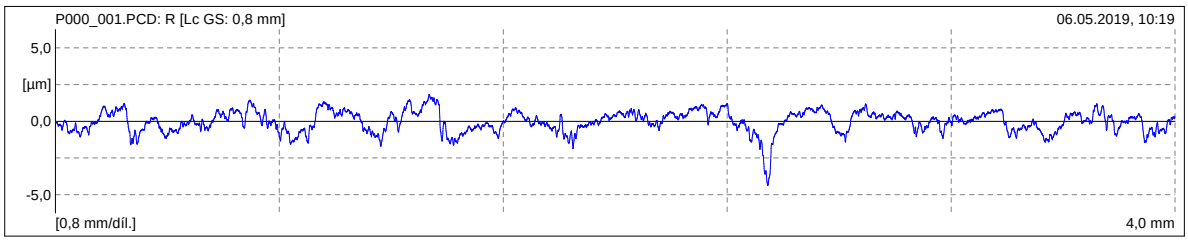
Funkční duplexní systém v tomto případě v této práci představuje nanesení nátěrové hmoty na již eloxované vzorky.

Pro možnost srovnání vlastností získaných tímto spojením bylo použito pouze jedné nátěrové hmoty. Nátěrové hmoty Hempadur Multi Strength 45751/45753 od firmy Hempel. Jde o dvousložkový vysoce nanášivý epoxidový nátěr vhodný na povrchy vystavené abrazi a určený pro těžké korozní podmínky. Praktické využití takového nátěru například na trupech lodí, ramp různého použití nebo jako nátěr balastních nádrží určených pro přepravu teplých chemických nákladů. Nátěr byl aplikován za pomocí pneumatické stříkací pistole.

Bylo využito tohoto nátěru vzhledem k možnosti zlepšení otěruvzdornosti a celkové korozní odolnosti. Materiálový list k NH Hempadur je v příloze práce.

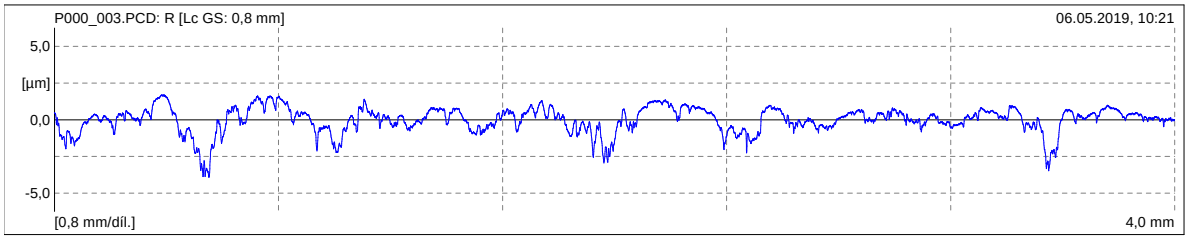
7.3 Drsnosti po anodických oxidacích

Před samotnou aplikací nátěrové hmoty byly změřeny drsnosti jednotlivých vzorků s anodickou oxidací. Všechny za pomocí mobilního drsnoměru MarSurf PS1.



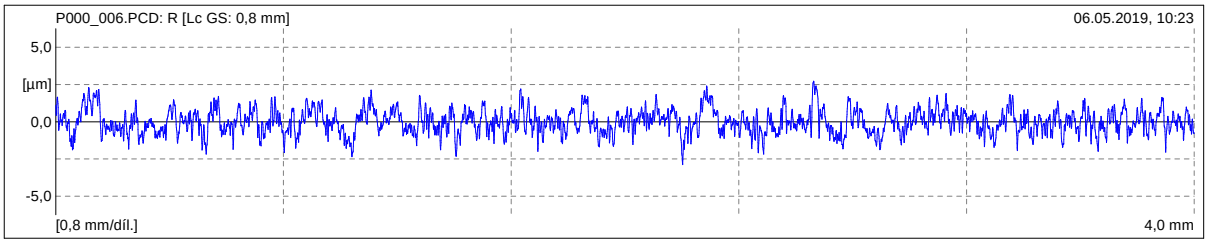
Ra	0,572 µm	Rq	0,729 µm	Rz	3,56 µm
RzJ	2,10 µm	Rmax	5,56 µm	Rp	1,37 µm
Rpm	1,81 µm	Rpk	0,38 µm	Rk	1,82 µm
Rvk	0,99 µm	Mr1	5,49 %	Mr2	86,3 %
A1	10,49 µm2/mm	A2	68,0 µm2/mm	Vo	0,007 mm3/µm2
Rt	6,18 µm	R3z	2,34 µm	RSm	218 µm
Rsk	-1,030	S	51 µm	R	1,90 µm
Ar	191 µm	Rx	6,2 µm		

Obr. 18 Profilometrický záznam dekorativní anodické oxidace



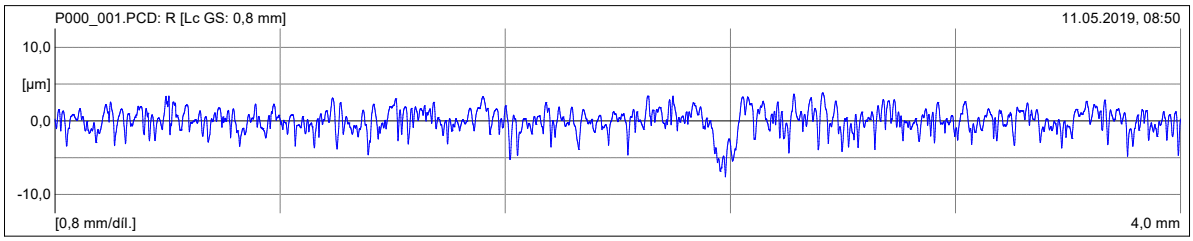
Ra	0,645 µm	Rq	0,870 µm	Rz	4,28 µm
RzJ	2,26 µm	Rmax	5,61 µm	Rp	1,33 µm
Rpm	1,70 µm	Rpk	0,45 µm	Rk	1,70 µm
Rvk	1,79 µm	Mr1	7,32 %	Mr2	81,6 %
A1	16,52 µm2/mm	A2	164,1 µm2/mm	Vo	0,016 mm3/µm2
Rt	5,61 µm	R3z	2,62 µm	RSm	306 µm
Rsk	-1,195	S	54 µm	R	2,04 µm
Ar	167 µm	Rx	6,5 µm		

Obr. 19 Profilometrický záznam tvrdé anodické oxidace



Ra	0,632 µm	Rq	0,800 µm	Rz	4,60 µm
RzJ	2,55 µm	Rmax	5,29 µm	Rp	2,27 µm
Rpm	2,72 µm	Rpk	0,87 µm	Rk	1,99 µm
Rvk	0,74 µm	Mr1	11,50 %	Mr2	90,2 %
A1	50,32 µm2/mm	A2	36,1 µm2/mm	Vo	0,004 mm3/µm2
Rt	5,60 µm	R3z	3,59 µm	RSm	44 µm
Rsk	0,144	S	18 µm	R	3,12 µm
Ar	101 µm	Rx	5,9 µm		

Obr. 20 Profilometrický záznam PEO - typ 1



Ra	1,196 µm	Rq	1,569 µm	Rz	8,51 µm
RzJ	4,71 µm	Rmax	11,00 µm	Rp	3,32 µm
Rpm	3,78 µm	Rpk	1,12 µm	Rk	3,56 µm
Rvk	2,76 µm	Mr1	8,87 %	Mr2	88,1 %
A1	49,56 µm2/mm	A2	164,6 µm2/mm	Vo	0,016 mm3/µm2
Rt	11,40 µm	R3z	6,79 µm	RSm	63 µm
Rsk	-0,743	S	25 µm	R	5,11 µm
Ar	72 µm	Rx	12,7 µm		

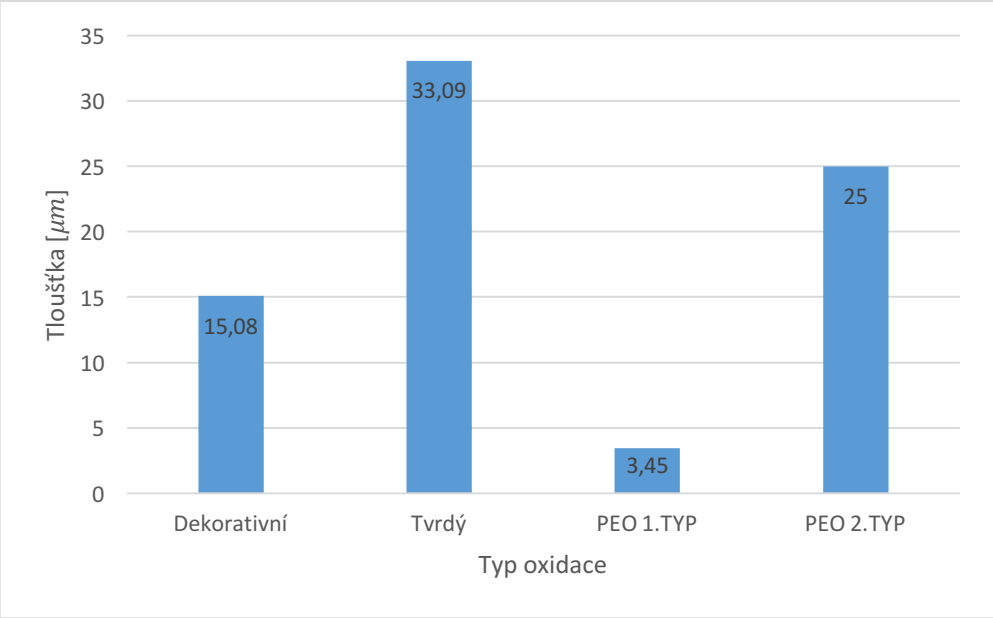
Obr. 21 Profilometrický záznam PEO - typ 2

7.4 Tloušťky nátěrů a anodických oxidací

Tloušťky jednotlivých vrstev byly změřeny tloušťkoměrem značky Elcometer 456. Tento přístroj je za pomocí kombinované sondy a za pomocí metody vířivých proudů schopen měření tloušťky vrstev na feromagnetickém i paramagnetickém základním materiálu.

Tab. 13 Výsledky měření tloušťky jednotlivých anodických oxidací

Vzorek č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Průměrná tloušťka NH [μm]	179	150	141	165	118	116	206	143	142	142	155	174	144
Průměrná tloušťka eloxu [μm]	15,08	15,08	15,08	15,08	33,09	33,09	33,09	33,09	25	25	3,45	3,45	3,45
Typ eloxu	Dekorativní				Tvrdý				PEO - 2. typ		PEO - 1. typ		



Graf 1 Porovnání tlouštěk eloxování

Obr. 22 Elektronický tloušťkoměr Elcometer 456 [32]

7.5 Vyhodnocení adhezních zkoušek

7.5.1 Odtrhová zkouška přilnavosti

Elcometer 510

K odtrhovým zkouškám bylo využito elektrického automatického odtrhoměru Elcometer 51O, který zajišťuje lineární zatížení v čase. Elektrický odtrhoměr má také výhodu v možnosti ukládání hodnot do zvoleného souboru. Dále lze zobrazit trendové údaje a statistické hodnoty zvoleného souboru. Odtrhoměr je schopný pracovat s panenkami o průměrech 10, 14,2 20 a 50 mm. Pro experimentální část této práce byly zvoleny panenky o průměru 20 mm. [32]

Obr. 23 Automatický odtrhoměr Elcometer 510

K první odtrhové zkoušce bylo využito kyanoakrylátové lepidlo na bázi ethylu, lepidlo Scotch Weld PR100. K odmaštění bylo použito acetonu a k zdrsnění povrchu smirkového papíru. Panenky byly dle návodu kyanoakrylátového lepidla po dobu 24 h ponechány k vytvrzení. Poté byly panenky z povrchu vzorků Elcometrem 510 odtrhány. V mnoha případech došlo k odtržení panenky jejím pouhým nasazením do odtrhoměru. Zároveň se panenka, kromě jednoho případu, vždy odtrhnula v tenké vrstvě nátěrové hmoty. Z toho bylo usouzeno, že panenky nebyly správně připevněny k celé vrstvě NH. Jednou z možných příčin je použití acetonu jako odmašťovadla, který sice povrch odmastil, ale zároveň narušil horní vrstvy nátěru a ty od sebe oddělil.

Tab. 14 Výsledky odtrhových zkoušek s využitím lepidla PR100

Vzorek č.	Druh eloxování	1. odtrhy [PR100]				
		Odtržná síla [MPa]	B/C	C	C/Y	Y/Z
1	Dekorativní	2,66	0	70	10	20
2		3,13	0	70	30	0
3		1,14	0	70	30	0
4		1,88	0	80	20	0
5	Tvrdý	3,55	0	90	10	0
6		3,23	0	80	20	0
7		0	0	90	10	0
8		0	0	70	30	0
9	PEO - 2. typ	2,2	0	70	30	0
10		2,32	0	80	20	0
11	PEO - 1. typ	1,9	0	80	20	0
12		0	0	80	20	0
13		0	50	30	0	20

Obr. 24 Odtrhové zkoušky (PR100)

Obr. 25 Viditelně špatná koheze NH

Odtrhová zkouška byla proto zopakována. Při dalších odtrhových zkouškách došlo pouze k oplachu vzorků demineralizovanou vodou. I samotné lepidlo bylo zvoleno jiné. Jednalo se o dvousložkové strukturální lepidlo Scotch Weld DP 810. Následovala znovu expoziční doba vytvrzení 24h pro správné zatvrdnutí lepidla. Odtrhy byly provedeny na totožném automatickém odtrhoměru Elcometru 510.

Obr. 26 Příprava k 2. odtrhovým zkouškám

Obr. 27 Viditelné odtržení NH od anodické oxidace

Za pomocí lepidla DP810 a využitím pouhého oplachu demineralizovanou vodou bez narušení struktury NH odmašťovačem jsme dosáhnuli znatelně lepších výsledku, než z první várky odtrhových zkoušek. Z tabulky č.14 je patrné, že se odtržné síly téměř ztrojnásobili. U dekorativní anodické oxidace došlo u poloviny vzorků k odtržení NH od samotného eloxovaného podkladu. U vzorků s tvrdou anodickou oxidací a metodou PEO, z větší části pouze ke kohezním lomům, ale již v hlubších vrstvách nátěru.

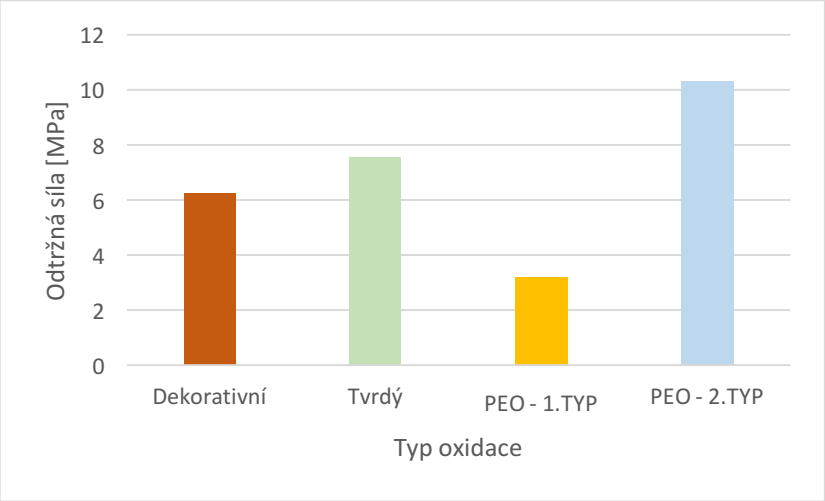
Lze tím usuzovat, že se podařilo zjistit přibližnou kohezní soudržnost NH, z výsledku kolem 8,4 MPa na průměr panenky 20 mm.

Tab. 15 Výsledek odtrhových zkoušek s využitím lepidla DP810

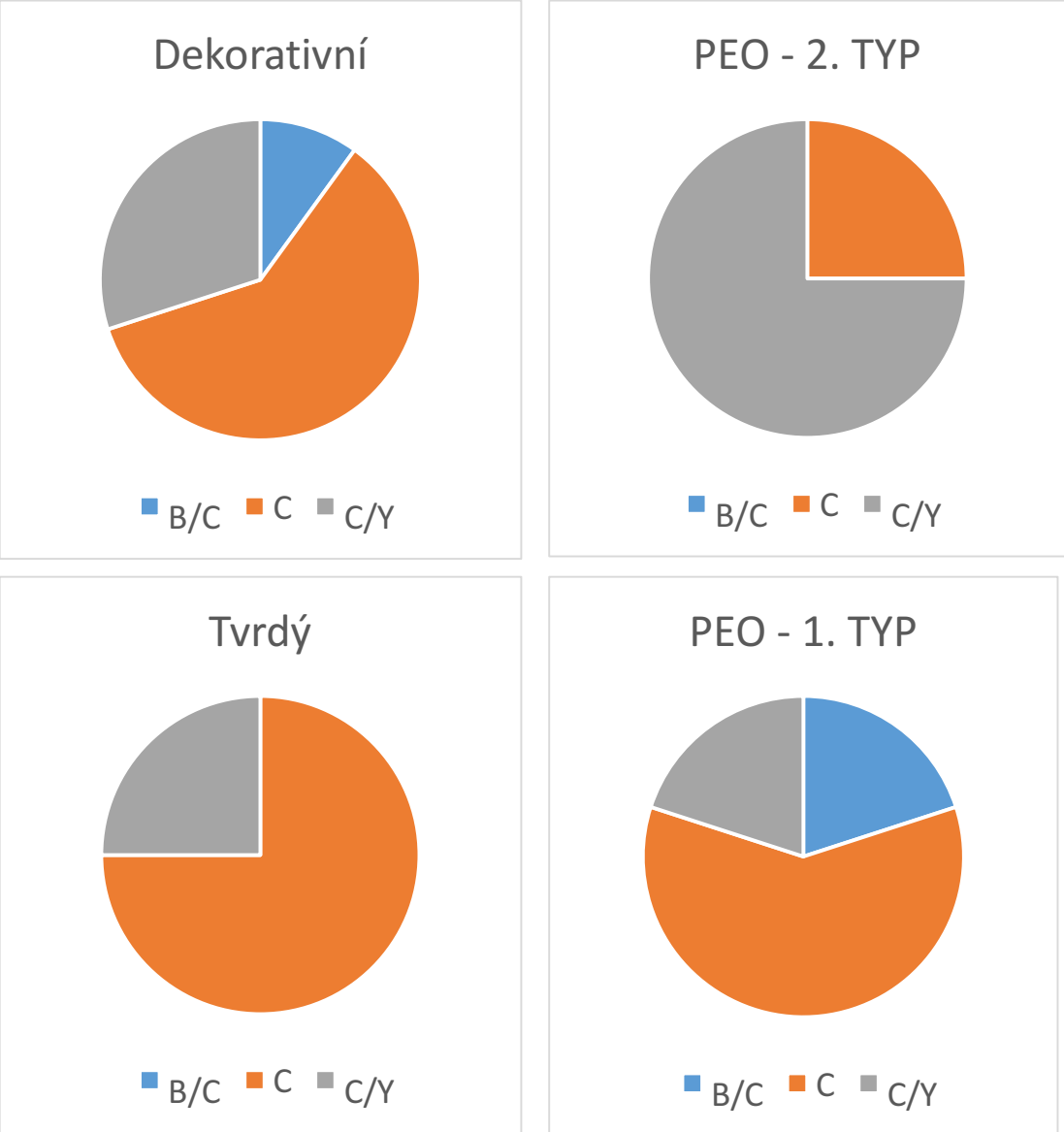
Vzorek č.	Druh eloxování	2.odtrhy [DP810]			
		Odtržná síla [MPa	B/C	C	C/Y
1	Dekorativní	9,18	0	40	60
2		7,05	20	50	30
3		4,58	20	60	20
4		4,24	0	90	10
5	Tvrdý	6,81	0	60	40
6		8,13	0	70	30
7		8,24	0	80	20
8		7,11	0	90	10
9	PEO - 2. typ	10,52	0	20	80
10		10,12	0	30	70
11	PEO - 1. typ	4,5	0	90	10
12		2,1	0	70	30
13		2,99	60	20	20

Tab. 16 Značení lomů dle normy ČSN ISO 4624:2016 [6]

Klasifikace	Popis
A	Kohezní lom v hliníku
A/B	Adhezní lom mezi hliníkem a vrstvou anodické oxidace
B	Kohezní lom ve vrstvě anodické oxidace
B/C	Adhezní lom mezi NH a anodickou oxidací
C	Kohezní lom v NH
C/Y	Adhezní lom mezi NH a lepidlem
Y	Kohezní lom v lepidle
Y/Z	Adhezní lom mezi lepidlem a zkušebním tělesem (panenkou)



Graf 2 Průměrné výsledky odtržných sil eloxování



Graf 3 Porovnání průměrného chování lomů

7.5.2 Mřížkový test

Pro potvrzení výsledků z předchozí zkoušky přilnavosti byl proveden mřížkový test dle normy ČSN ISO 2409, pro tloušťky NH větší než 120 μm bylo potřeba zvolit šablonu o rozteči 3 mm. Pro NH kde byla tloušťka menší než 120 μm šablonu o rozteči 2 mm.

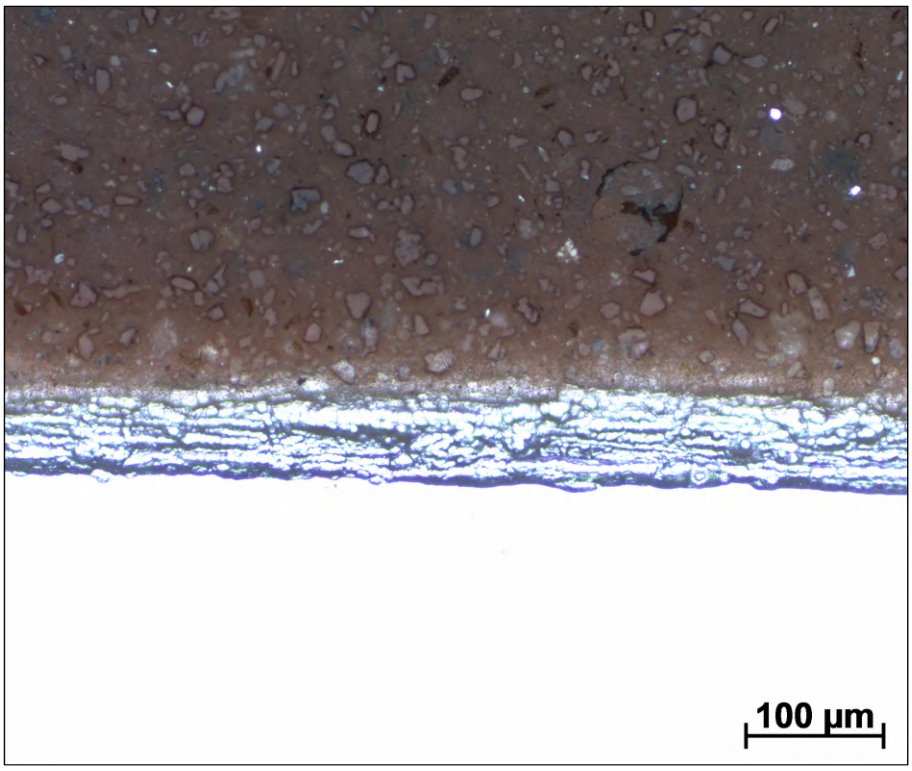
Ze získaných hodnot je patrné, že potvrzují předchozí výsledek odtrhové zkoušky. Nejlépe si v této zkoušce vedly vzorky tvrdého eloxování a vzorky PEO. Na dekorativním eloxování se z větší části okraje řezů odlupovaly.

Tab. 17 Vyhodnocení mřížkové zkoušky

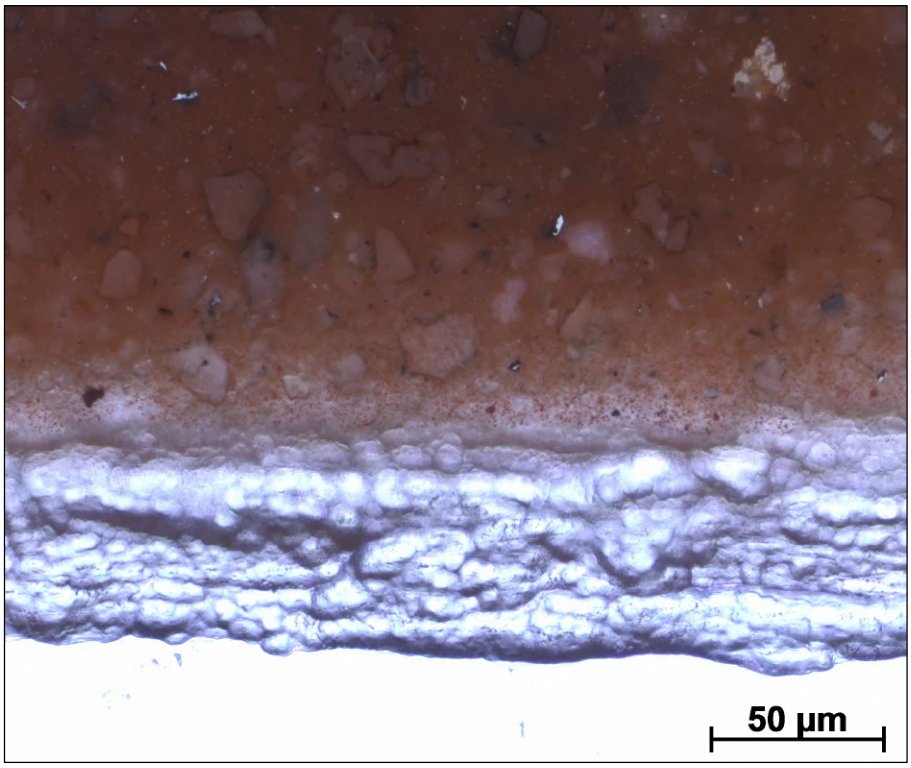
Vzorek č.	Druh eloxování		
		Metoda	Klasifikace
1	Dekorativní	3	2
2		3	2
3		3	0 - 1
4		3	2
5	Tvrdý	2	0 - 1
6		2	1
7		3	0
8		3	1
9	PEO - 2. typ	3	0
10		3	0
11	PEO - 1. typ	3	3
12		3	X
13		3	X

7.6 Metalografické snímky

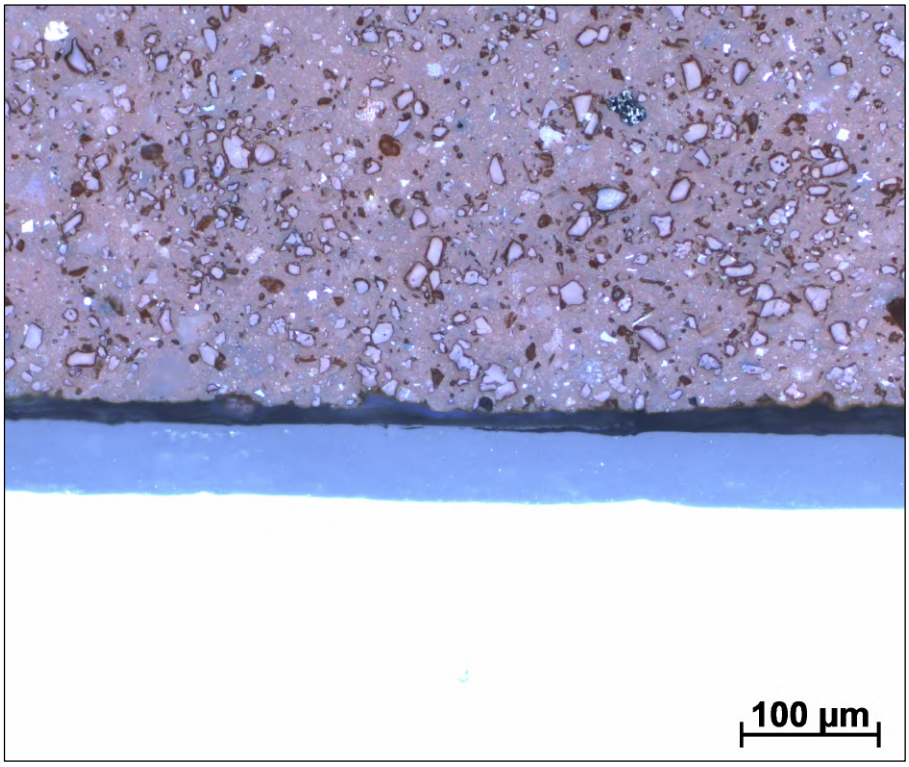
Na následujících snímcích pořízených ve společnosti SVÚM a.s. na optickém mikroskopu ZEISS Observer Z1m jsou k vidění metalografické snímky duplexního rozhraní hliník – vrstva anodické oxidace – nátěrová hmota (na snímcích od spod vzhůru). Snímky byly vytvořeny na výbrusech zalitých do pryskyřice s následným vyleštěním bez leptání.



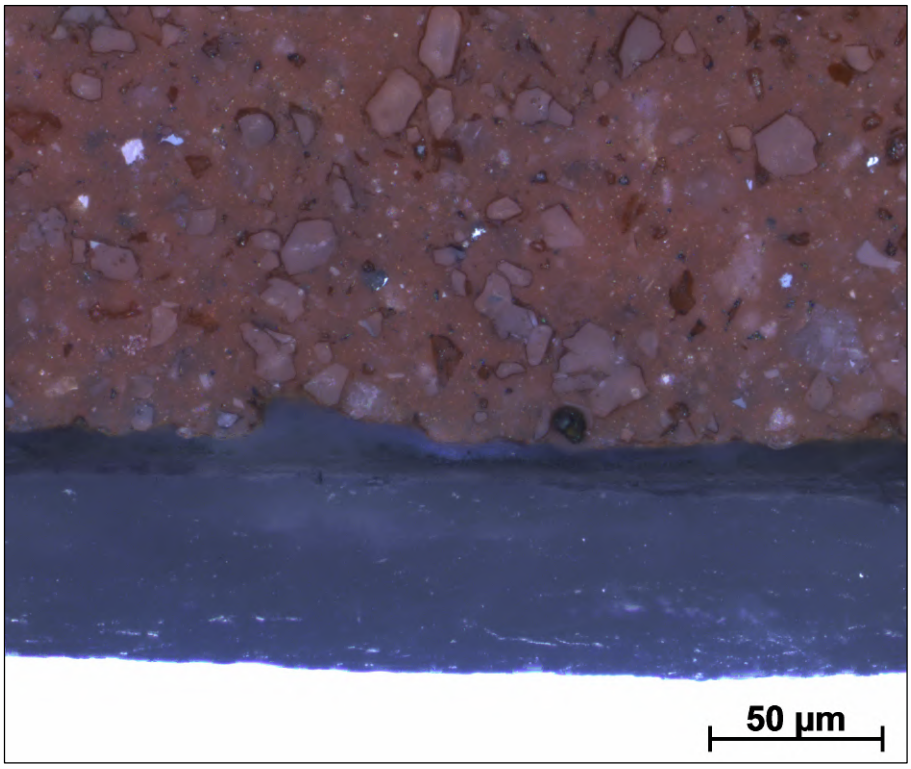
Obr. 28 Výbrus dekorativním eloxováním (200x zvětšeno)



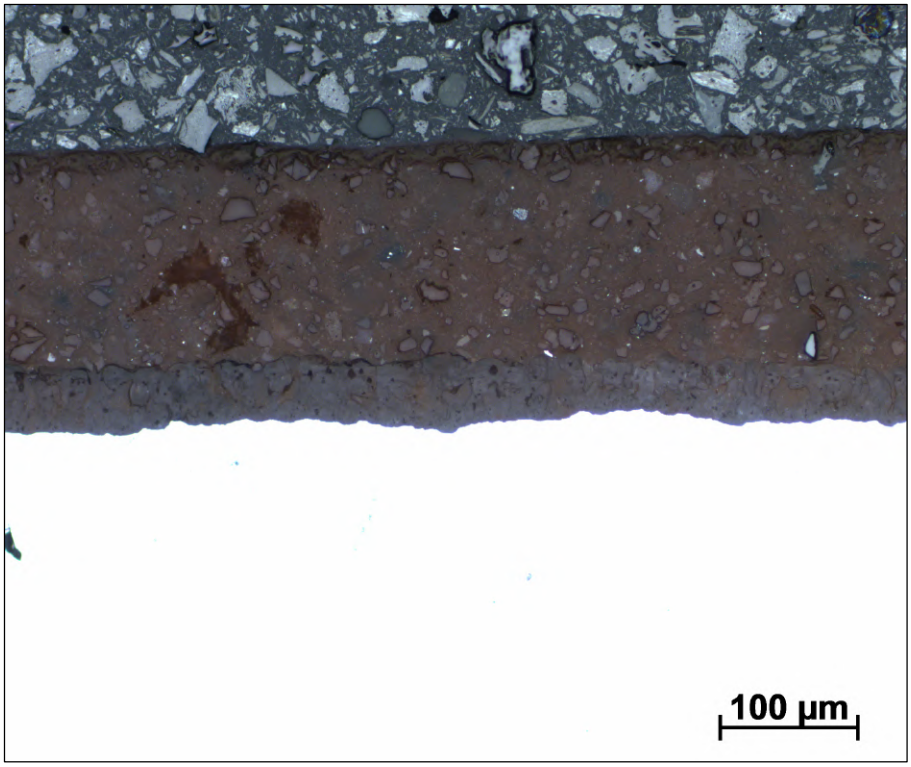
Obr. 29 Výbrus dekorativním eloxováním (500x zvětšeno)



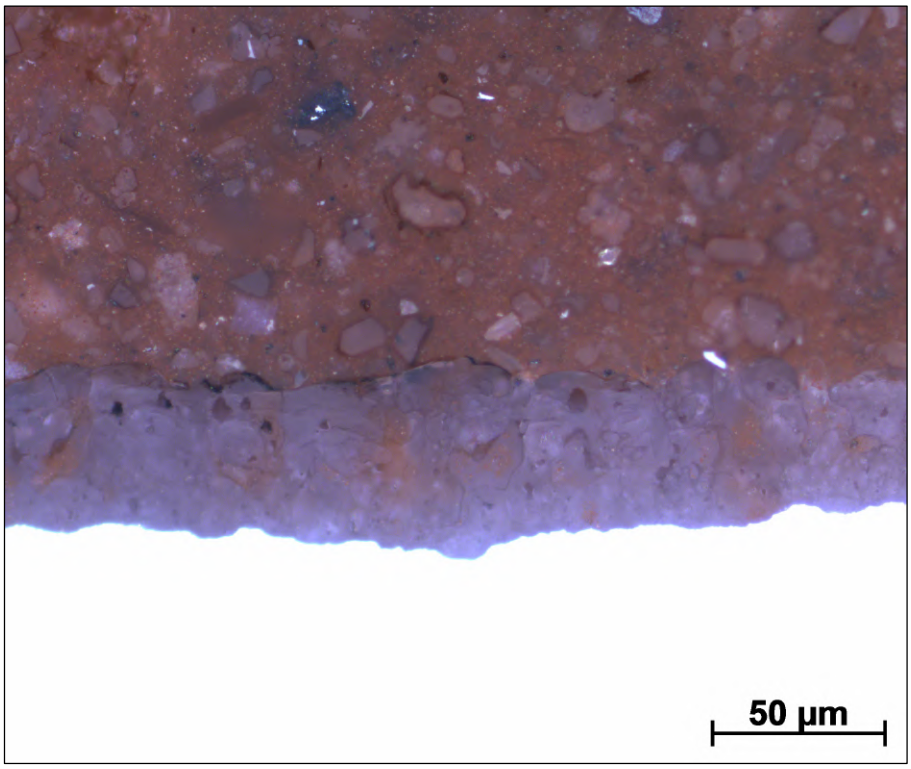
Obr. 30 Výbrus tvrdým eloxováním (200x zvětšeno)



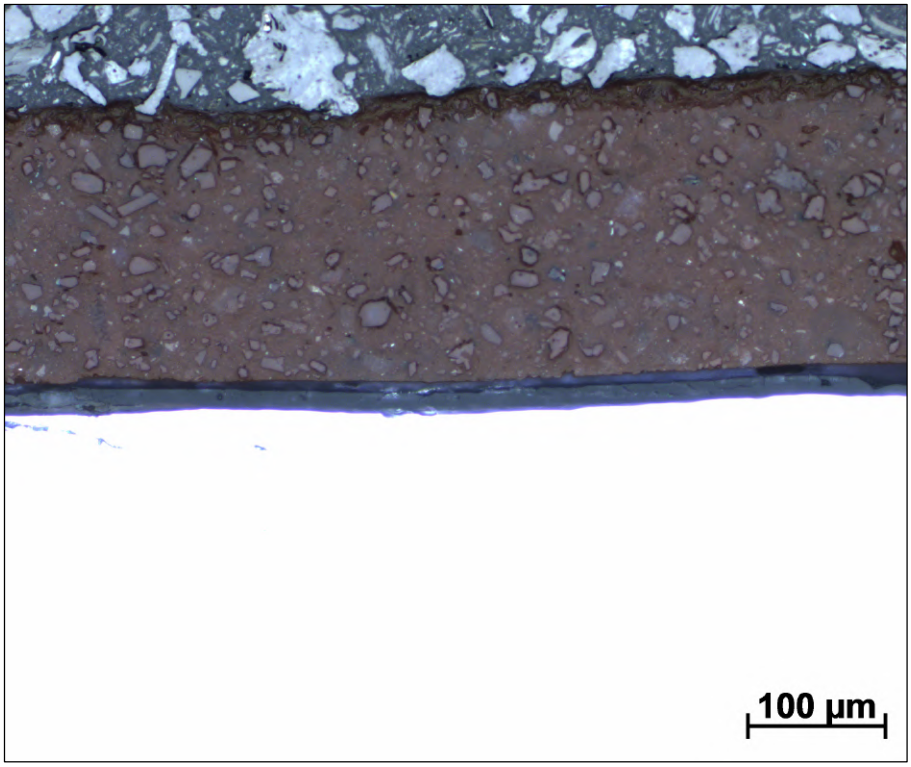
Obr. 31 Výbrus tvrdým eloxováním (500x zvětšeno)



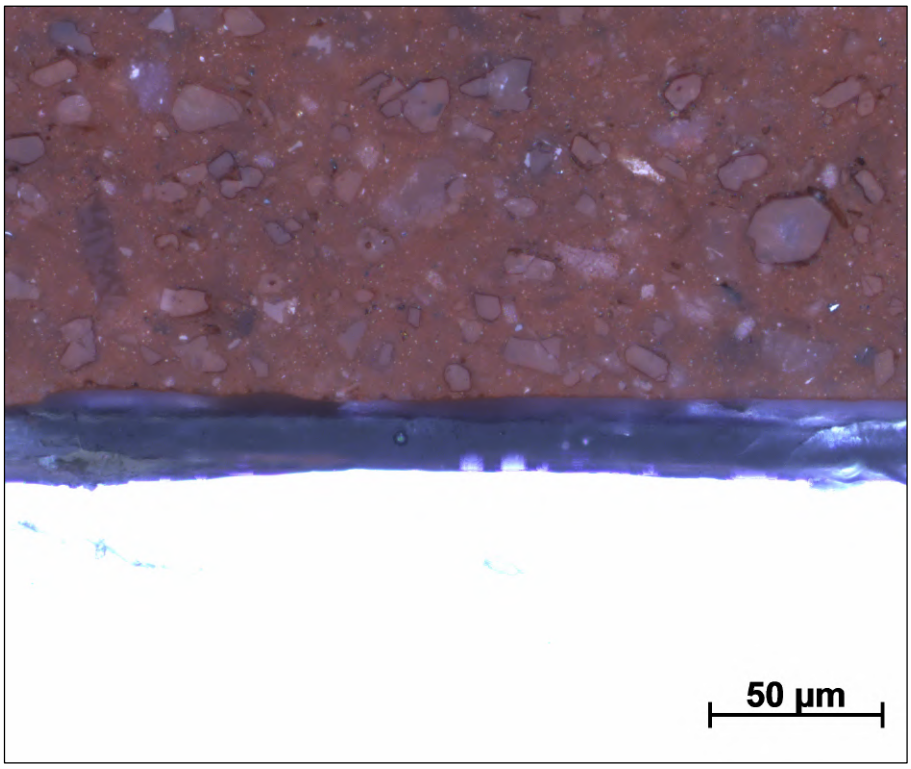
Obr. 32 Výbrus vrstvou PEO Typ 2 (200x zvětšeno)



Obr. 33 Výbrus vrstvou PEO Typ 2 (500x zvětšeno)



Obr. 34 Výbrus vrstvou PEO Typ 1 (200x zvětšeno)



Obr. 35 Výbrus vrstvou PEO Typ 1 (500x zvětšeno)

8 Diskuze

Byly provedeny série odtrhových zkoušek následované mřížkovým testem. Prvním testem odtrhových zkoušek bylo zjištěno, že adheze eloxované vrstvy k NH není dokonalá a přilepené panenky se odtrhují ve svrchní vrstvě této NH. Výsledkem lze usuzovat, že se svrchní vrstva NH narušila, buď při procesu odmaštění nebo samotné lepidlo povrch lehce naleptalo.

Proto byla provedena další série odtrhových zkoušek ale s využitím pouhého oplachu bez odmaštění a panenky byly přilepeny za pomocí dvousložkového strukturálního lepidla. Výsledky se s pozměněným technologickým postupem výrazně změnily.

Bylo zjištěno, že největší potřebnou sílu k odtrhům je zapotřebí u vzorků vyrobených metodou PEO. U té byly taktéž naměřeny největší hodnoty drsnosti a tloušťky eloxované vrstvy. U dalších vzorků docházelo ke snížení potřebné odtrhové síly. Dalšími vzorky byly ty vytvořené tvrdým eloxováním. Tyto disponovaly také vyšší tloušťkou.

Následovaly vzorky pokryté vrstvou dekorativního eloxování. U té se vícekrát projevily zhoršené adhezní schopnosti. Zlomy v odtrzích se nacházely i na rozmezí NH a eloxované vrstvy. Mřížkový test naměřené hodnoty z odtrhových zkoušek potvrdil.

Je potřeba zhodnotit také 2 typy vzorků eloxované metodou PEO, na prvním typu docházelo vzhledem k malým tloušťkám eloxu ke zhoršeným výsledkům. Na jednom vzoru se NH odloupla až ze 60 % odtrhové plochy. Tedy PEO typ 2 disponoval zcela odlišnými vlastnostmi, od toho se také odvíjeli získané hodnoty.

Bylo by krátkozraké tvrdit, že získané výsledky jsou exaktní. Souvislost soudržnosti NH s typem eloxování je ale značná.

9 Závěr

Práce měla za cíl navrhnout a ověřit metodiku porovnání rozdílných technologií eloxování vzhledem k přilnavosti následných nátěrových systémů. K porovnání technologií byly využity adhezní zkoušky. Především technologie odtrhových zkoušek a mřížkových testů.

Z výsledků zkoušek přilnavosti je patrné, že duplexní systém je vhodné aplikovat především na anodické oxidace s větší tloušťkou. U těchto vzorků nastává lepší zakotvení NH. Proto dosahují při měření přilnavosti lepších výsledků než vzorky s tloušťkou menší. K adhezním zkouškám byly provedeny také profilometrické záznamy, měření tloušťky vrstev a metalografické snímky, které potvrzují výsledky zkoušek adhezních.

Porovnáním jednotlivých technologií vyplynulo, že dobrou adhezní schopnost mají vzorky s tvrdou anodickou oxidací. Ještě lepší adhezní schopnosti mají ale vzorky s anodickou oxidací plasmatickou (PEO). Horší adhezní schopnosti poté mají vzorky s dekorativním eloxováním, u kterých došlo vícekrát k odtržení samotné NH.

10 Seznam literatury

1. MICHNA, Š. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
2. KUBÁTOVÁ, H. Nátěry kovů. 1. vyd. Praha: Grada, 2000, 101 s. Profi. ISBN 80-247-9035-1
3. ČSN EN ISO 7599. *Anodická oxidace hliníku a jeho slitin: Metoda specifikování dekorativních a ochranných anodických oxidových povlaků na hliníku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
4. ČSN EN ISO 10074. *Anodická oxidace hliníku a jeho slitin: Specifikace pro tvrdé anodické oxidové povlaky na hliníku a jeho slitinách*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
5. ČSN EN ISO 2409. *Nátěrové hmoty: Mřížková zkouška*. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2013.
6. ČSN EN ISO 4624. *Nátěrové hmoty - Odtrhová zkouška přilnavosti*. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2016.
7. RONEŠ, J. Anodická oxidace hliníku. Praha: SNTL, 1961. 116 s.
8. VOCEL, M. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1976. ISBN DT 621.891.
9. CHVOJKA, J. a BRZOBOHATÝ, V.. *Zpracování a použití hliníku a jeho slitin*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1961. ISBN DT 669.716.717.
10. BRIŠ, P. KUBĚNA, J. a ŠTRKAŇ, J.. *Lepení v praxi*. Praha: Grada Publishing, 2017. ISBN 978-80-271-0247-1.
11. *REMEŠOVÁ*, M.[online]. Brno, 2013 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65435. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
12. MICHAJLEC, M. *Vývoj hliníkových svařovaných výrobků pro kolejovou dopravu*. Praha, 2016. Kritická rešerše. ČVUT - FS.
13. KUBÍČEK, J. *Nátěrové hmoty* [online]. In: . BRNO: VUT FSI, 2018, s. 42 [cit. 2019-06-26]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu_renovace_a_povrchove_upravy_naterove_hmoty_2018_kubicek.pdf
14. KEHLER, R. *Měření drsnosti povrchů* [online]. České Budějovice, 2014 [cit. 2019-06-26]. Dostupné z: https://theses.cz/id/nf4w4l/BP-_men_drsnosti_povrch_-_Kehler_Roman.pdf. Bakalářská práce.
15. KREJČÍK, O. [online]. Praha, 2015 [cit. 2019-06-26]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63618/F2-DP-2015-Krejcik-Ondrej-Vliv%20predupravy%20povrchu%20na%20prilnavost%20duplexnich%20systemu.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce.

16. SLOVINEC, M. *Dočasná protikorozní ochrana nátěrovými hmotami* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-06-26]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63618/F2-DP-2015-Krejcik-Ondrej-Vliv%20predupravy%20povrchu%20na%20prilnavost%20duplexnich%20systemu.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČVUT FS.
17. KREIBICH, V. a OSTRÁ, V.. Chyby při eloxování hliníku a jeho slitin. Povrcháři [online]. 2009, č. 3, s. 3-5 [cit. 2018-12-05]. ISSN 1802-9833.Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/200903_povrchari.pdf
18. CHVOJKA, M. KREIBICH, V. a DRAŠNAR, P. MODERNÍ PEO VRSTVY - ALTERNATIVA KONVENČNÍHO ELOXOVÁNÍ. *Engineering.sk* [online]. Praha [cit. 2019-06-27]. Dostupné z: https://www.engineering.sk/strojarstvo-extra/4094-moderni-peo-vrstvy-alternativa-konvencniho-eloxovani
19. LIŠKA, R. Macík, J.: Materiály pro 1. až 3. ročník učebních oborů lakýrník, malíř a malíř - natěrač na SOU a OU. 3. vydání. Praha: Sobotáles, 2007. 172 s. ISBN 80-85920-28-X
20. ZOUBEK, M. *Nátěrové hmoty* [online]. In: . PRAHA: ČVUT FS, s. 42 [cit. 2019-06-26]. https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/126135/mod_resource/content/3/NH_Zoubek_2018_moodle.pdf
21. AL INVEST BŘIDLIČNÁ, a. s. Alinvest: hliník: historie-hliníku[online]. 20 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: http://www.alinvest.cz/hlinik/historie-hliniku
22. YEROKHIN, Aleksey. Phase formation in Ceramic Coatings During Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum Alloys. *Ceramics International*. 1997, 1997(67-3), 6.
23. GROVES, G. *ANODISING OF ALUMINIUM* [online]. In: . Elessmere College, s. 7 [cit. 2018-12-05].
24. Whelan, M. et al. (2016) Optimisation of Anodic Oxidation of Aluminium for Enhanced Adhesion and Corrosion Properties of Sol-gel Coatings, Journal of The Electrochemical Society, 163 (5) C1-C8 (2016) DOI : 10.1149/2.0741605jes
25. *Alunet - Hliníkové profily na míru* [online]. [cit. 2019-06-26]. Dostupné z: http://www.alunet.cz/ENAW-1050
26. *Tribotechnika* [online]. 2019 [cit. 2019-06-26]. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-52013/zkusebni-metody-pro-hodnoceni-prilnavosti-organickych-povlaku.html
27. MERLIN ENGINES. *SpaceX* [online]. USA, 2016 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: https://www.spacex.com/news/2013/03/26/merlin-engines
28. GOODING ALUMINIUM.[online]. [cit. 2019-06-27]. Dostupné z: https://goodingalum.com
29. ALFUN http://www.alfun.cz. *Alfun metal service center* [online]. 2017 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: Obecná specifikace hliníku
30. KOUTNÝ, J. *Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování* [online]. In: . 2006, s. 24 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: http://www.ews.cz/files/servis/hlinik.pdf

31. *EKOCHEM-PPÚ s.r.o.* [online]. Letovice [cit. 2019-07-16]. Dostupné z: http://www.ekochem-ppu.cz/
32. *Gamin s.r.o.* [online]. Ostrava [cit. 2019-07-16]. Dostupné z: https://www.elcometer.cz

11 Seznam chemických názvů prvků, látek a zkratek

HF	kyselina fluorovodíková
HNO_3	kyselina dusičná
NaOH	hydroxid sodný
Al_2O_3	oxid hlinitý
Na_3AlF_6	hexafluorohlinitan sodný (kryolit)
Na_2O	oxid sodný
CaO	oxid vápenatý
TiO_2	oxid titaničitý
Fe_20_3	oxid železitý
$Al(OH)_3$	hydroxid hlinitý
H_2O	voda
$NaAlO_2$	hlinitan sodný
$Ca(OH)_2$	hydroxid vápenatý
Fe	železo
P	fosfor
V	vanad
Si	křemík
PEO	plasma electrolytic oxidation = plasmatická anodická oxidace
NH	nátěrová hmota

12 Seznam jednotek

s	jednotka času - 1s = jedna sekunda
min	jednotka času -1 min = 60 s
h	jednotka času - 1 h = 60 min
°C	jednotka teploty ve stupních Celsia - 1° C = stupeň Celsia
K	jednotka teploty ve stupních Kelvina - 0 °C = 273,15 K
mg	jednotka hmotnosti - 1mg = jeden miligram
g	jednotka hmotnosti - 1 gram = 1000 mg
kg	jednotka hmotnosti - 1 kg = 1000 g
t	jednotka hmotnosti - 1 t = 1000 kg
ml	jednotka objemu - 1 ml = jeden mililitr
l	jednotka objemu - 1 l = 1000 ml
A	jednotka elektrického proudu - 1 A = jeden ampér
m	jednotka délky - 1 m = jeden metr
µm	jednotka délky - 1 m = $1 * 10^6$ µm
dm^2	jednotka plochy (užívaná v galvanotechnice)
HV	jednotka tvrdosti dle Vickerse
V	jednotka elektrického napětí - 1 V = jeden volt

13 Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení vytvrditelných a nevytvrditelných slitin[9] ..... - 9 -
Obr. 2 Vývoj produkce hliníku [1] ..... - 10 -
Obr. 3 Porovnání světové produkce bauxitu [1] ..... - 12 -
Obr. 4 Vývoj produkce emisních plynů postupem let [1] ..... - 16 -
Obr. 5 Schéma procesu rafinace [1] ..... - 17 -
Obr. 6 Mramorovaný povrch hliníku [28] ..... - 18 -
Obr. 7 Schéma zapojení při anodické oxidaci [11] ..... - 22 -
Obr. 8 Preferovaný model složení vrstev Keller – Hunter [12] ..... - 23 -
Obr. 9 Raketový motor společnosti SpaceX [27] ..... - 27 -
Obr. 10 Mechanismus horkého utěsnění [12] ..... - 30 -
Obr. 11 Příklad zvýšení životnosti a odolnosti při využití duplexního systému [13]- 32 -
Obr. 12 Princip metody vířivých proudů [26] ..... - 38 -
Obr. 13 Princip magneticko-indukční metody [26] ..... - 39 -
Obr. 14 Řez a schéma při odtrhové zkoušce [6] ..... - 40 -
Obr. 15 Klasifikace a vyhodnocení po mřížkové zkoušce [26] ..... - 42 -
Obr. 16 Příprava hliníkových vzorků ..... - 44 -
Obr. 17 Připravené vzorky k eloxování ..... - 44 -
Obr. 18 Profilometrický záznam dekorativní anodické oxidace ..... - 47 -
Obr. 19 Profilometrický záznam tvrdé anodické oxidace ..... - 48 -
Obr. 20 Profilometrický záznam PEO - typ 1 ..... - 48 -
Obr. 21 Profilometrický záznam PEO - typ 2 ..... - 48 -
Obr. 22 Elektronický tloušťkoměr Elcometer 456 [32] ..... - 50 -
Obr. 23 Automatický odtrhoměr Elcometer 510 ..... - 50 -
Obr. 24 Odtrhové zkoušky (PR100) ..... - 52 -
Obr. 25 Viditelně špatná koheze NH ..... - 52 -
Obr. 26 Příprava k 2. odtrhovým zkouškám ..... - 53 -
Obr. 27 Viditelné odtržení NH od anodické oxidace ..... - 53 -
Obr. 28 Výbrus dekorativním eloxováním (200x zvětšeno) ..... - 57 -
Obr. 29 Výbrus dekorativním eloxováním (500x zvětšeno) ..... - 57 -
Obr. 30 Výbrus tvrdým eloxováním (200x zvětšeno) ..... - 58 -
Obr. 31 Výbrus tvrdým eloxováním (500x zvětšeno) ..... - 58 -
Obr. 32 Výbrus vrstvou PEO Typ 2 (200x zvětšeno) ..... - 59 -

Obr. 33 Výbrus vrstvou PEO Typ 2 (500x zvětšeno) ..... - 59 -
Obr. 34 Výbrus vrstvou PEO Typ 1 (200x zvětšeno) ..... - 60 -
Obr. 35 Výbrus vrstvou PEO Typ 1 (500x zvětšeno) ..... - 60 -

14 Seznam tabulek

Tab. 1 Porovnání vlastností hliníku s nízkouhlíkovými oceli [30] ..... - 8 -
Tab. 2 Složení Bauxitových hornin [1] ..... - 11 -
Tab. 3 Možné chemické složení hliníku vhodného k eloxování [7] ..... - 23 -
Tab. 3 Parametry eloxování metodou kyseliny sírové a kyseliny šťavelové [1] ..... - 24 -
Tab. 4 Obecné parametry eloxování metody kyseliny chromové [1] ..... - 25 -
Tab. 5 Obecné parametry při eloxování využitím smaltu [1] ..... - 25 -
Tab. 7 Obvyklé parametry při moření [12] ..... - 28 -
Tab. 8 Obvyklé paramtery při vyjasnění [12] ..... - 29 -
Tab. 9 Vyhodnocení odtrhových zkoušek ..... - 41 -
Tab. 10 Určení metody mřížkové zkoušky [5] ..... - 42 -
Tab. 11 Technologický postup dekorativní anodické oxidace [31] ..... - 45 -
Tab. 12 Technologický postup tvrdé anodické oxidace [31] ..... - 45 -
Tab. 13 Výsledky měření tloušťky jednotlivých anodických oxidací ..... - 49 -
Tab. 14 Výsledky odtrhových zkoušek s využitím lepidla PR100 ..... - 51 -
Tab. 15 Výsledek odtrhových zkoušek s využitím lepidla DP810 ..... - 54 -
Tab. 16 Značení lomů dle normy ČSN ISO 4624:2016 [6] ..... - 54 -
Tab. 17 Vyhodnocení mřížkové zkoušky ..... - 56 -

15 Seznam grafů

Graf 1 Porovnání tlouštěk eloxování ..... - 49 -
Graf 2 Průměrné výsledky odtržných sil eloxování ..... - 55 -
Graf 3 Porovnání průměrného chování lomů ..... - 55 -