



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Moderní trendy a vývojové směry v oblasti
anodické oxidace a jejich užití v leteckém
průmyslu

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Lucie Hudíková

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Kuchař Jiří, Ph.D., IWE

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika
strojírenství

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hudíková** Jméno: **Lucie** Osobní číslo: **487162**
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:

Moderní trendy a vývojové směry v oblasti anodické oxidace a jejich užití v leteckém průmyslu

Název bakalářské práce anglicky:

Modern trends and developments in the field of anodic oxidation and their use in the aerospace industry

Pokyny pro vypracování:

- 1) Druhy anodické oxidace slitin Al, Mg a Ti
- 2) Anodická oxidace využívaná v letectví
- 3) Nové trendy anodické oxidace
- 4) Přilnavost anodické oxidace
- 5) Technicko – ekonomické zhodnocení vybraných metod anodické oxidace

Seznam doporučené literatury:

1. KREIBICH, V., Teorie a technologie povrchových úprav, Praha, ČVUT, Praha, 1999.
2. MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OCENÁŠEK, V., KORENÝ, R., DRÁPALA, J., SCHNEIDER, H., MIŠKUFOVÁ, A., a kol., Encyklopedie hliníku, Prešov 2005, ISBN80-89041-88-4
3. STEPHEN D., Cramer a Covino BERNARD S. ASM Handbook Volume 13A: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. ASM International, 2003. ISBN 978-0-87170-705-5.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

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

Ing. Eva Michelle Sedláčková, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.
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

Studentka bere na vědomí, že je povinna 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.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením pana Ing. Jiřího Kuchaře, Ph.D., IWE a za konzultace se slečnou Ing. Evou Michelle Sedláčkovou, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE a jeho konzultantce, slečně Ing. Evě Michelle Sedláčkové, za velmi cenné rady a odborné vedení, které udalo směr mé práci.

Dále bych chtěla poděkovat rodině a své kočce, za neutuchající podporu a zájem o mou práci.

Anotace

Tato bakalářská práce pojednává o problematice anodické oxidace, jejím využití v letectví a hledání nových metod pro anodickou oxidaci. V experimentální části se tato práce zabývá adhezními zkouškami na hliníkových vzorcích. Zkoušky jsou prováděny odtrhem, metodou mřížkového a křížového řezu, a ohybem na kónickém trnu. V poslední části jsou vybrané metody anodické oxidace zhodnoceny z hlediska ekonomického, ekologického a technického.

Název diplomové práce: Moderní trendy a vývojové směry v oblasti anodické oxidace a jejich užití v leteckém průmyslu

Autor práce: Lucie Hudíková

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE

Konzultant: Ing. Eva Michelle Sedláčková

Akademický rok: 2020/2021

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie

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

Rozsah práce: 69 stránek, 23 tabulek, 24 obrázků

Klíčová slova: Anodická oxidace, protikoroziční ochrana, hliník, hořčík, titan, zkoušky přílnavosti, plazmová anodická oxidace

Annotation

This bachelor's thesis discusses the issue of anodic oxidation, its use in aviation, and the search for new methods for anodic oxidation. In the experimental section, this thesis pursues the adhesion testing on aluminum samples. The tests are performed by tear-off testing, grid and cross cut method, and the bend on the conical mandrel test. In the last part, the selected methods of anodic oxidation are assessed from an economic, ecological, and technical point of view.

Title of the final thesis: Modern trends and developments in the field of anodic oxidation and their use in aerospace industry

Author: Lucie Hudíková

Supervisor: Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE

Consultant: Ing. Eva Michelle Sedláčková

Academic year: 2020/2021

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology

Head of department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Extent: 69 pages, 23 tables, 24 pictures

Keywords: Anodic oxidation, corrosion protection, aluminium, magnesium, titanium, adhesion testing, plasma anodic oxidation

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Cíl práce	12
3	Povrchové úpravy trupu letadla.....	13
3.1	Materiály používané na výrobu trupů letadel	13
3.2	Vnější vlivy ovlivňující korozní podmínky a povrchovou úpravu letadel	14
4	Druhy anodické oxidace slitin Al, Mg a Ti.....	15
4.1	Anodická oxidace hliníku	16
4.1.1	Dekorativní anodická oxidace	16
4.1.2	Tvrdá anodická oxidace.....	18
4.2	Anodická oxidace hořčíku	19
4.2.1	Galvanická anodizace – Dow 9	19
4.2.2	Dow 17	19
4.2.3	HAE.....	20
4.3	Anodická oxidace titanu	21
4.3.1	Konvenční metody anodické oxidace.....	21
5	Anodická oxidace využívaná v letectví.....	23
5.1	Anodická oxidace v kyselině chromové	23
5.2	Anodická oxidace v borité kyselině sírové	23
5.3	Anodická oxidace v kyselině sírové	23
5.4	Anodická oxidace v kyselině fosforečné	24
6	Nové trendy anodické oxidace	25
6.1	Plazmová elektrolytická oxidace (PEO).....	25
6.1.1	Mikro-oblouková anodická oxidace hliníku.....	27
6.1.2	Tagnite	27
6.1.3	Magoxid.....	28
6.1.4	Anomag	28
6.1.5	Keronid.....	29
6.1.6	Mikro-oblouková anodická oxidace titanu	30
6.2	Anodická oxidace hliníku boritou kyselinou sírovou (BSAA).....	30
6.3	Anodická oxidace titanu ve fluoridovém elektrolytu	31
6.4	Pulzní anodická oxidace	32
7	Vybrané zkoušky přilnavosti povrchových vrstev	33
7.1	Zkouška odtrhem dle ČSN EN ISO 4624.....	33

7.2	Zkouška mřížkovým řezem dle ČSN EN ISO 2409	34
7.3	Zkouška křížovým řezem dle ČSN EN ISO 16276-2.....	34
7.4	Zkouška ohybem na kónickém trnu dle ČSN EN ISO 6860	35
8	Ověření přilnavosti eloxovaných povrchů	36
8.1	Vzorky	36
8.2	Označení vzorků	37
8.3	Měření tloušťky vrstvy	37
8.4	Zkouška odtrhem	37
8.4.1	Zkouška odtrhem za použití jednofázového lepidla	38
8.4.2	Zkouška odtrhem za použití dvoufázového lepidla.....	39
8.5	Zkouška mřížkovým řezem	41
8.6	Zkouška křížovým řezem.....	43
8.7	Zkouška ohybem na kónickém trnu.....	45
9	Porovnání technologií	47
9.1	Porovnání výsledků zkoušky odtrhem.....	47
9.2	Porovnání výsledků zkoušky mřížkovým řezem	48
9.3	Porovnání výsledků zkoušky křížovým řezem	48
9.4	Porovnání výsledků zkoušky ohybem na kónickém trnu	49
10	Technicko-ekonomické zhodnocení vybraných metod anodické oxidace	50
10.1	Ekologická náročnost.....	50
10.2	Technická náročnost	50
10.3	Ekonomická náročnost.....	51
11	Závěr.....	53
12	Bibliografie.....	55
13	Seznam obrázků.....	63
14	Seznam tabulek.....	64
15	Seznam příloh	65

Seznam zkratk

Zkratka	Vysvětlení
SAA	metoda anodické oxidace hliníku za použití kyseliny sírové
CAA	metoda anodické oxidace hliníku za použití kyseliny sírové
PEO	plazmová anodická oxidace
SSSR	Svaz sovětských socialistických republik
USA	Spojené státy americké
MAO	mikro-oblouková anodická oxidace
BSAA	metoda anodické oxidace hliníku za použití borité kyseliny sírové
EPA	agentura pro ochranu životního prostředí (United States Environmental Protection Agency)
Min	minimální hodnota
Max	maximální hodnota

Seznam jednotek

Jednotka	Vysvětlení
nm	nanometr
μm	mikrometr
mm	milimetr
°	stupeň
°C	stupeň Celsia
°F	stupeň Fahrenheita
min	minuta
$\mu\text{m}/\text{min}$	mikrometr za minutu
g/l	gram na litr
V	Volt
A	Ampér
A/dm^2	Ampér na decimetr čtvereční
HV	tvrdost podle Vickerse
Kč	Koruna česká
$\text{Kč}/\text{dm}^2$	Koruna česká na decimetr čtvereční

1 ÚVOD

Hliník je nejrozšířenější kov na Zemi a také nejpoužívanější neželezný kov. V současné době se hliník a jeho slitiny používají v různých odvětvích. Velké zastoupení mají hlavně slitiny v leteckém a automobilovém průmyslu, čistý hliník má využití například v elektrotechnice. Je velmi oblíbený pro dobré mechanické i fyzické vlastnosti, například pro jeho nízkou hustotu, a tím i malou hmotnost, má dobrou tepelnou i elektrickou vodivost, je dobře tvařitelný za tepla i za studena. Za přítomnosti vzduchu se na povrchu hliníku tvoří tenká vrstva oxidu hlinitého, čím chrání kov v malé míře proti korozi. Mezi jeho nevýhody patří především nízká pevnost a otěruvzdornost. Všechny tyto vlastnosti se dají různými způsoby zlepšit. Pokud se jedná o čistý hliník, jeho vlastnosti nejsou samy o sobě tak dobré, proto se zlepšují přidáváním legujících prvků, nejčastěji mědi a hořčíku. Mezi další způsoby úprav se řadí tepelné zpracování a povrchové úpravy. [1, 2, 3]

Povrchové úpravy lze provádět chemickou cestou (například chromátování), různými povlaky (například práškové lakování), nebo také anodickou oxidací. Anodická oxidace využívá přirozené tendence k oxidaci některých kovů. Kovy při reakci s kyslíkem tvoří oxidickou vrstvu na povrchu a tím se zvyšuje jejich korozní odolnost, pevnost i otěruvzdornost. Tloušťka i zbarvení oxidické vrstvy záleží na složení materiálu, použitém napětí, i složení základního elektrolytu. Nejčastěji se při anodické oxidaci hliníku používají kyselé elektrolyty, například kyselina sírová, chromová, nebo šťavelová. V základu lze anodickou oxidaci rozdělit na dekorativní a tvrdou anodickou oxidaci. Pro dekorativní účely stačí menší tloušťka vrstvy, která se v důsledku anodizace zbarví do různých odstínů z celého spektra barev (případně lze i dobarvit barvou), zatímco při tvrdé anodické oxidaci je třeba vytvořit silnější, vrstvu, která výrazně zlepší fyzikální, mechanické a tribologické vlastnosti. [1, 2, 3]

Anodická oxidace je velmi progresivní metoda. V této práci budou v první části popsány některé konvenční druhy anodické oxidace neželezných kovů a poté jejich moderní alternativy.

2 CÍL PRÁCE

Cílem řešeršní části této práce je rozšíření povědomí o anodické oxidaci a pojednání o moderních metodách, které umožňují dosáhnout lepší kvality povrchů a jejich následné využití v technologických odvětvích.

Experimentální část má za cíl ověřit přilnavost anodizovaných povrchů a následně porovnat jejich technologickou, ekologickou a ekonomickou náročnost. Toto ověření bylo pro srovnání děláno se stejnou předúpravou povrchu, jako pro anodizované díly, jen místo anodické oxidace byla zvolena jiná povrchová úprava – práškovým plastem.

3 POVRCHOVÉ ÚPRAVY TRUPU LETADLA

V letectví jsou nastaveny vysoké nároky především na kvalitu použitých materiálů a jejich odolnost v extrémních podmínkách. Povrchové úpravy dodávají materiálům vlastnosti, kterými sami o sobě nedisponují, například vyšší odolnost vůči korozi. Absence povrchových úprav by znamenala častější nutnost revize a oprav letounů, což může vést k jisté ekonomické náročnosti. Pro lepší pochopení významu anodické oxidace v letectví, bude tato kapitola věnována materiálům, používaným na konstrukci a vlivům, kterým musí letadla čelit.

3.1 Materiály používané na výrobu trupů letadel

V leteckém průmyslu jsou kladeny vysoké nároky na konstrukční materiály. Materiály musí mít co nejlepší poměr pevnosti k hmotnosti, zároveň být co nejtvrdší, korozivzdorné, odolné vysokým i nízkým teplotám a nehořlavé. Od počátku dvacátého století se začal na konstrukce využívat kromě dřeva a oceli i hliník, který splňuje pevnostní a hmotnostní podmínky. Nejprve se využívaly slitiny hliníku legované mědí, hořčíkem a manganem, zvané duraly, které měly tendence být napadány korozi. Od třicátých let, když se v Anglii vynalezl proces anodické oxidace, která uměle zvýšila oxidickou vrstvu na povrchu hliníku, nastal rozmach hliníku v leteckém odvětví. Přestože je snaha vyvinout nové, lehčí a odolnější materiály, je hliník v současnosti pořád nejpoužívanější lehký kov, co se týče komerčních letů. Kromě duralů je často používaná slitina Al-Li. Přidání lithia k hliníku způsobí lehčí materiál s vyšší pevností. Obecně se v letectví používají slitiny legované mědí (řady 2000 podle mezinárodního značení slitin hliníku), slitiny legované hořčíkem (řady 5000, konkrétně 5052), slitiny obohacené o hořčík a křemík (řady 6000) a v neposlední řadě se využívají slitiny legované zinkem (řady 7000). Slitiny řady 7000, například 7050, 7075 jsou často aplikované na vojenská letadla. [4, 5, 6]

Po druhé světové válce se začalo uvažovat o používání titanu v letectví. Titan je velmi oblíbený pro jeho nízkou hustotu, vysokou pevnost, korozivzdornost a teplotu tání 1668 °C. Mezi další klady patří nízká teplotní roztažnost a chemická odolnost. Jeho nevýhoda je zejména vysoká pořizovací cena. V současné době se využívá aluminid titanu TiAl, který je poměrně lehký, má dobrou tažnost a velmi dobře se obrábí, nebo slitina Ti6Al4V. Další často používaná slitina je titan 5553 (Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr), i když lze špatně obrábět, a je potřeba nižších rychlostí, aby obrábění bylo efektivní. [4, 7, 8]

Nejprogresivnější materiály jsou kompozity. Dříve byly používané pouze v interiéru letadel, ale postupem času se podařilo vyvinout kompozity odolné venkovním podmínkám. Mezi jejich benefity patří nízká hmotnost a dobrá tvarovatelnost, díky které se mohou i složité tvary vyrobit z jednoho kusu a nemusí být spojovány, jako kovové materiály, a je menší riziko selhání spoje. Velmi dobrou perspektivu má v kompozitech keramická matrice, vyztužená vlákny z karbidu křemíku, který se vyznačuje nízkou hustotou, vysokou tvrdostí a vysokou teplotní odolností. V komerčních letech nejsou kompozitní materiály tak rozšířené, jako při výrobě vojenských letadel nebo vrtulníků. Například konstrukce vrtulníku Tiger od společnosti Airbus obsahuje kompozit z 80 %. [4, 8]

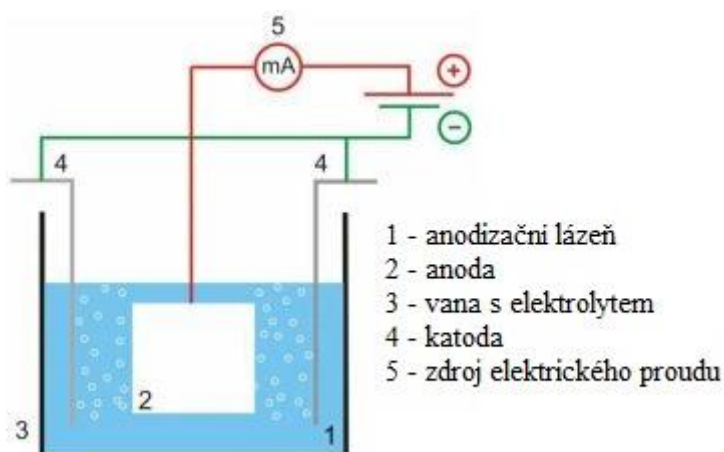
3.2 Vnější vlivy ovlivňující korozní podmínky a povrchovou úpravu letadel

V současnosti není mnoho míst, kam by letadla nelétala, z toho důvodu musí být odolná vůči rozdílným vlivům. Záleží zde na tom, z jaké a do jaké části světa letadlo létá, protože v různých částech zeměkoule jsou různé klimatické podmínky. Navíc je důležité, jestli je letadlo ve vzduchu nebo na zemi. Kromě velkého poklesu tlaku ve vzduchu musí také letadlo čelit poklesu teploty a jejím prudkým změnám při přistání a vzletu, přičemž mezi místy přistání a vzletu může být také podstatný rozdíl teplot. Další důležitý faktor je vlhkost vzduchu a salinita, které se liší v rozdílných částech světa. Při průletu bouřemi se letadla krátkodobě setkávají s velmi agresivním korozním prostředím i ve vzduchu, a navíc k tomu může letadlo čelit vlivům počasí, při kterých může dojít k mechanickému poškození letadla (například kroupami, úderem blesku), důraz je kladen i na nehořlavost letadel, přinejmenším je třeba používat materiály a povrchové úpravy, které případný požár zpomalí. Tyto činitele je potřeba brát v potaz při navrhování povrchových úprav. [9, 10]

4 DRUHY ANODICKÉ OXIDACE SLITIN Al, Mg A Ti

Anodická oxidace neboli elox, je povrchová úprava, která využívá toho, že se některé kovy (například titan, hliník, nikl) volně vážou s kyslíkem a vytváří si sami na povrchu tenkou vrstvu oxidu. Tato vrstva je většinou velmi tenká a nedaří se jí chránit materiál tak, jak by bylo potřeba. Anodizace spočívá v ponoření kovu do elektrolytu, kde je zapojen jako anoda, pro vytvoření větší tloušťky vrstvy z oxidů. V současnosti se nejvíce eloxuje hliník, titan, hořčík a jejich slitiny, v menší míře zinek. Jako katoda se často používá nikl, olovo, titan nebo korozivzdorná ocel. Takto se obvod napojí ke zdroji stejnosměrného nebo střídavého proudu a v elektrolytu se začnou rozpadat molekuly vody na O^- a H_2^+ . Kyslík je přitahován k anodě, kde s daným kovem tvoří oxidy. [11, 12, 13]

Díky vlivu kyseliny v elektrolytu se ve vytvořené oxidické vrstvě tvoří póry, které umožňují další pronikání kyslíku k povrchu kovu. Důsledkem tohoto procesu je větší povrchová vrstva se zmenšující se porozitou směrem k povrchu kovu. Kvůli tomu se v průběhu času zpomaluje průběh eloxování. Pokud kyselina nenarušuje oxidickou vrstvu, je tato vrstva poté kompaktní a průběh anodizace je konstantní. Oxidová vrstva se poté nepojí s dalšími oxidy a nevyvíjí se více, což má za následek poměrně tenkou, ale souvislou bariérovou vrstvu. Pro její vytvoření je potřeba velmi čistý povrch, protože jakékoliv nečistoty způsobí necelistvost vrstvy. [11, 12, 14]



Obr. 1: Schéma anodické oxidace [12]

Aplikace této metody povrchové úpravy zaručí kovům oxidickou vrstvu na povrchu, která má ochranný, v některých případech i dekorativní charakter. Anodizovaná vrstva je pevně spojena se základním materiálem, protože proces anodické oxidace vytváří vrstvu na úkor základního materiálu. Tloušťka a barva této vrstvy se liší v závislosti na použitém materiálu, čistotě materiálu, složení elektrolytu i napětí proudu. Tloušťka vrstvy se udává v rámci jednotek až desítek μm , v případě tvrdé anodizace hliníku se jedná až o stovky mikronů. Z estetického hlediska je možné docílit velké škály barev, kromě jednobarevných kusů lze v této době vytvořit i vícebarevný povlak, který může být jak lesklý, tak i matný. [11, 12, 15, 16]

4.1 Anodická oxidace hliníku

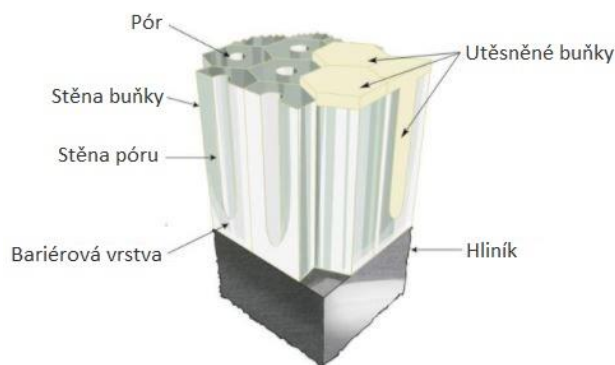
Povrch hliníku v přírodě přirozeně vytváří s kyslíkem tenkou vrstvu oxidu hlinitého, který je velmi tvrdý (udává se, že je druhý netvrďší po diamantu). Tato vrstva je ovšem velmi tenká, v řádech několika setin mikronů, kvůli čemu nedokáže poskytnout pořádnou ochranu v agresivnějších prostředích. Při anodické oxidaci se z tohoto oxidu vytváří vrstva o tloušťce až několika desítek mikrometrů, která má korozivzdorný charakter a poskytuje ochranu proti opotřebení. Proces anodické oxidace hliníku je velmi rozšířený a jeho využití lze najít v téměř všech odvětvích. [11, 12, 15, 17, 18, 19]

4.1.1 Dekorativní anodická oxidace

Dekorativní anodická oxidace slouží především pro vylepšení životnosti a zároveň pro dosažení pěkného vzhledu. Převážně stačí tloušťka povrchové vrstvy 2–10 μm . Takto tenká vrstva nezaručuje dostatečnou ochranu proti korozi, obzvláště ve velmi agresivních prostředích. Pro venkovní použití je vhodné vytvořit vrstvu tlustší, o tloušťce 15–20 μm . Samotný oxid hlinitý často kvůli jeho pórovitosti nestačí, aby kov pořádně uchránil před korozi v agresivních prostředích, proto může následovat proces utěsnění, který póry uzavře, za účelem dalšího zvýšení korozní odolnosti, oteruvzdornosti a snížení elektrické vodivosti. Tato metoda našla uplatnění například v architektuře a sportovním odvětví. [12,15,16]



Obr. 2: Příklad barev dosažitelných anodickou oxidací [15]



Obr. 3: Vrstva po anodické oxidaci a po utěsnění [15]

4.1.1.1 Metoda za použití kyseliny sírové (SAA)

Metoda s využitím kyseliny sírové je nejpoužívanější metodou oblíbenou pro nízkou pořizovací cenu použitých chemikálií a její široké možnosti využití. Je nevhodná pro součásti s drobnými otvory, nebo jinými dutinami, protože je obtížné z nich kyselinu

sírovou pořádně odstranit, a vzhledem k její agresivitě k materiálu může vyvolat korozi. [12, 16]

Na anodickou oxidaci se používá lázeň s kyselinou sírovou H_2SO_4 o koncentraci 180–200 g/l, o teplotě 18–24 °C a konstantním napětím 10–25 V. Proudová hustota použitého stejnosměrného proudu se pohybuje v rozmezí 1–2 A/dm². S vyšší koncentrací kyseliny sírové se zvyšuje její vodivost, což v praxi znamená, že lze použít nižší napětí. Pokud by byla jak koncentrace kyseliny, tak napětí vysoké, znamenalo by to větší porozitu v oxidické vrstvě, proto je důležité zvolit vyhovující poměr. Výsledná vrstva je pórovitá, s tloušťkou 2–25 μm. Vrstva je průhledná až mléčně bílá a lze ji snadno nabarvit do různých odstínů (modrá, žlutá, zelená, černá). [10, 12, 15, 16]

V minulosti se do elektrolytu přidávala i kyselina šťavelová v koncentraci 1–4 %, pro dosažení méně pórovitých a tvrdších vrstev. [12, 20]

4.1.1.2 Metoda za použití kyseliny chromové (CAA)

Při použití této metody se dosahuje vrstev o tloušťkách 3–5 μm, díky čemu je vhodná pro výrobky, které mají přesné tolerance. Ochranná vrstva slouží jako výborná ochrana proti korozi, je vysoce otěruvzdorná a velmi přilnavá pro následné nátěrové hmoty. Na rozdíl od kyseliny sírové, kyselina chromová nenaleptává hliník, čímž nevzniká riziko koroze, proto je vhodná i pro drobné otvory. [11, 12, 17, 21]

Nejpoužívanější metodou je v současnosti Bengough-Stuartova metoda. Tento proces se provádí v lázni o vysoké čistotě kyseliny chromové, s obsahem chromanů (CrO_3) alespoň z 99 %. Lázeň má koncentraci kyseliny chromové (H_2CrO_4) 30–50 g/l. Anodizace probíhá při teplotách 40–50 °C. V průběhu anodizace se postupně zvyšuje pracovní napětí až na 40 V, na kterých se vydrží 20 minut. V některých případech lze ještě poté pokračovat, zvýšit proud na 50 V, v průběhu pěti minut, s výdrží dalších pět minut. [12, 21, 22, 23]

Díky hnědé barvě této lázně je umožněno lépe vizuálně kontrolovat povrchové defekty výrobků po anodické oxidaci, protože v trhlinách jsou vidět zbytky kapaliny. [22]

V současné době se tato metoda používá pouze v letectví, protože šestimocný chrom, vyskytující se v lázni, je silně karcinogenní. Hledají se jiná složení lázní, například s kyselinou boritou a sírovou, která sice má velmi dobrou adhezi vůči dalším nátěrům, ale nelze dosáhnout takového antikorozičního potenciálu, aby ji v tuto chvíli bylo možné v leteckém průmyslu využít. [12, 21]

4.1.1.3 Metoda za použití kyseliny šťavelové

V polovině dvacátého století byla v Japonsku patentována metoda anodické oxidace za použití kyseliny šťavelové jako elektrolytu. Ten je tvořen kyselinou šťavelovou o koncentraci 2–10 %, a může být doplněn o různé soli, například chromany, nebo manganistany. Při anodické oxidaci při stejnosměrném proudu o hustotě od 1,5 do 6 A/dm² probíhá proces při pokojové teplotě a napětí 60 V, který má za výsledek nažloutle až bronzově zbarvený povrch a vysoké tvrdosti. Při vyšších teplotách (35 °C)

Lze snížit napětí na 30–35 V, ale dochází k vytvoření měkčích povlaků s většími póry. [12, 20, 24]

Při použití střídavého proudu dochází v průběhu procesu při stejném složení elektrolytu i stejné teplotě k průběžnému zvyšování napětí z 20 V až na 60 V. V důsledku toho se vytváří měkčí vrstvy než u eloxování stejnosměrným proudem, zbarvená do mosazných až bronzových odstínů. [24]

Pro vytvoření uspořádaných hexagonálních pórů lze použít dvoufázová anodizace. V první fázi je hliník anodizován při stejnosměrném proudem a nízkém počátečním napětí (do 60 V), čím se vytvoří tenká vrstva, která je pomocí kyselin naleptaná a následuje druhá fáze, při které je hliník anodizován při napětí dosahujícím až 120 V. [25]

Při porovnání s eloxováním v kyselině sírové vznikají u tohoto procesu tvrdší vrstvy za použití vyššího napětí, proto lze tuto metodu považovat za předchůdce tvrdé anodické oxidace. Přesto tato metoda nebyla ve světě velmi populární, nejčastěji ji používali v Německu a Japonsku. [12, 24, 26]

4.1.2 Tvrdá anodická oxidace

Tato metoda je rozšířená v technologické praxi, pro její výslednou mikrotvrdost, která dosahuje 300–500 HV, což je podstatně tvrdší vrstva, než jaká je dosahována klasickou metodou za použití kyseliny sírové. Oxidická vrstva dosahuje tloušťky od 20 μm do 250 μm, je málo porézní a neprůhledná. Barevné odstíny mohou být od světle hnědé (šedé) po tmavě hnědou (černou), záleží na chemickém složení použité slitiny hliníku. Nevhodné na tvrdé eloxování jsou slitiny, které obsahují více než 7,5 % křemíku a více než 3 % mědi. Měď má tendenci se rozpouštět i za provozních teplot této lázně a ve výsledku je vrstva více pórovitá, méně tvrdá a může být i nerovnoměrná. [11, 12, 16]

Proces probíhá v lázni s kyselinou sírovou o stejné koncentraci (180–200 g/l), jako pro dekorativní eloxování. Na rozdíl od výše popsaného procesu se při tvrdé anodické oxidaci používají teploty v rozsahu od -5 °C do 5 °C a vyšší proudová hustota. Počáteční napětí je 10 V a v průběhu anodizace ho lze zvednout až na 100 V. Je třeba počítat s vyšší energetickou náročností této lázně, z důvodu nutnosti chlazení na správnou provozní teplotu. V chladném prostředí lze snížit rozpustnost v kyselině, čím se vytvoří vrstva bez pórů, a lze říci, že čím chladnější je teplota lázně při procesu, tím menší je pórovitost a vyšší tvrdost. [11, 12]

S rostoucí tloušťkou oxidické vrstvy klesá její tažnost a roste mez únavy, což může být problém při použití, vzhledem k tomu, že hliníkové jádro je celkem měkké. Aby měla vrstva lepší houževnatost a plasticitu, lze do ní přidat drobné přísady v podobě různých částic, například teflonu. [11, 12]

Povrchová vrstva se může utěsnit v horké vodě, což sníží mez únavy, tvrdost, poróznost, ale i ošetrivost. Z toho důvodu se utěsnění nevyžaduje vždy a je lepší pro dokončení materiál naimpregnovat voskem, nebo jinými mazivy. [11, 12]

4.2 Anodická oxidace hořčíku

Hořčík a jeho slitiny jsou v současnosti relativně nové materiály. Díky dobrým mechanickým vlastnostem (například pevnost, dobrá obrobitelnost i svařitelnost) a zároveň velmi nízké hustotě (v porovnání s hliníkem má asi dvě třetiny jeho hustoty) mají velký potenciál do budoucna. Využití naleznou hlavně co se týče automobilového, leteckého nebo kosmického průmyslu, kde mohou nahradit slitiny hliníku a odlehčit konstrukce. Nicméně, jejich použití není zatím zdaleka tak rozsáhlé, kvůli velmi nízké odolnosti vůči korozi, která je ještě nižší ve vlhkých prostředích. [12, 19, 27]

Anodická oxidace je jedna z nejběžnějších povrchových úprav hořčíku a jeho slitin, která na povrchu zanechá oxidickou vrstvu. Ta není pouze oxidická, jako tomu bylo u hliníku, ale může být složena z různých sloučenin, v závislosti na chemickém složení lázně, například $Mg(OH)_2$. V současnosti je možné využít celou řadu procesů. Mezi konvenčními jsou nejvyužívanější DOW 9, DOW 17, nebo HAE. [12, 19]

4.2.1 Galvanická anodizace – Dow 9

Tato metoda vznikla ve čtyřicátých letech dvacátého století a je vhodná pro všechny slitiny hořčíku. Na povrchu se vytvoří vrstva, která má vynikající přilnavost k dalším nátěrům, zbarvená od tmavě hnědé po černou. Z toho důvodu je vhodná na zařízení, která potřebují povrch, který neodráží světlo, například kamery, elektrická nebo jiná optická zařízení. [12, 19]

Lázeň je složena z hydroxidu sodného (NaOH) v koncentraci 240 g/l, diethylenglykolu ($(HOCH_2CH_2)_2O$) o koncentraci 83 g/l a z šřavelu sodného ($Na_2C_2O_4$) o koncentraci 2,5 g/l. Teplota lázně by se měla pohybovat od 73,9 do 79,9 °C, při použití střídavého proudu o napětí 6–24 V, nebo přímého proudu, který má napětí 6 V. Celý proces trvá 15–25 minut. [12, 19]

4.2.2 Dow 17

Firma Dow Chemical vytvořila spoustu metod anodické oxidace, ale v polovině čtyřicátých let dvacátého století vynalezli metodu Dow 17, která je nejuniverzálnější z nich všech. Finální vrstva může mít barvy od světle zelené po tmavě zelenou, v závislosti na tloušťce vrstvy. Anodickou oxidací lze vytvořit dvoufázovou vrstvu. Spodní vrstva je tlustá přibližně 5 μm zbarvená světle zeleně, a proces spočívá v anodizaci při nízkém napětí. Poté se pokračuje další fází při vyšším napětí, čím se docílí tlustší vrstvy, kolem 30 μm a sytě zelené barvy. S touto vrstvou má povrch vynikající ořezuvzdorný a antikorozi charakter, také je to velmi dobrý základ pro další nátěry, i když je poměrně křehký. [12, 19, 28, 29]

Tato metoda probíhá v lázni složené z hydrogendifluoridu amonného (NH_4HF_2) v koncentraci 360 g/l, 100 g/l dichromanu sodného ($Na_2Cr_2O_4$) a kyseliny fosforečné (H_3PO_4) v množství 97 g/l. Minimální teplota lázně by měla být 160 °F (71 °C). Proudová hustota se udává od 0,5 do 5 A/dm². Lze použít střídavý i stejnosměrný proud, ale ten se používá zřídka. Ostatní parametry se liší v závislosti na vytvoření tenké, nebo tlusté vrstvy, viz tabulka. [12, 28, 30]

Tabulka 1: Parametry metody Dow 17 pro střídavý proud [12]

	Napětí [V]	Doba procesu [min]	Tloušťka vrstvy	Barva vrstvy
Tenká vrstva	60–75	4–5	2,5–7,5	Světle zelená
Tlustá vrstva	90–100	25	23–38	Tmavě zelená

Dichroman sodný obsahuje šestmocný chrom, který se v malém množství může dostat do povrchové vrstvy jako oxid. Protože je chrom karcinogenní, může nastat situace, kdy tato metoda nebude mít uplatnění v budoucnu a je třeba najít proces, který bude bezpečný. Hojně se probírá metoda Tagnite, nebo další metody mikro-obloukové anodické oxidace (MAO), jako například Anomag, Magoxid, Keronid. [12, 19, 31]

4.2.3 HAE

V roce 1952 si Harry A. Evangelides nechal patentovat novou metodu pro anodickou oxidaci, pojmenovanou HAE. Vytváření vrstev je podobné, jako u metody DOW 17 – za nižšího napětí vzniká tenká vrstva, která má tloušťku kolem 5 μm a světle hnědou barvu, naopak při vyšším napětí (které nepřesáhne 125 V) vzniká vrstva o tloušťce až 75 μm sytě hnědé barvy. Obě vrstvy jsou poměrně pórovité, oteru i korozivzdorné a po utěsnění mají ještě lepší antikorozi vlastnosti. Tlustá vrstva je tvrdá, ale křehká. Těmito vlastnostmi může zvýšit mez únavy základního materiálu, obzvláště, je-li tento materiál tenký [12, 19, 31].

Celý proces probíhá v elektrolytu o složení, které je uvedeno kvůli přehlednosti v tabulce 2. Na elektrolyt působí střídavý proud o proudové hustotě 1,5–2,5 A/dm² a lázeň by měla pracovat při teplotách 21–30 °C. Ostatní parametry se liší v závislosti na tloušťce vytvářené vrstvy a jsou popsány v tabulce 3. [19, 31, 32]

Tabulka 2: Chemické složení elektrolytu pro proces HAE [32]

Chemické názvosloví	Vzorec	Množství [g/l]
Hydroxid draselný	KOH	120
Hydroxid hlinitý	Al(OH) ₃	35
Fluorid draselný	KF	20
Fosforečnan sodný	Na ₃ PO ₄	34
Mangan draselný	K ₂ MnO ₄	35

Tabulka 3: Parametry procesu HAE v závislosti na tloušťce vrstvy [31]

	Napětí [V]	Doba procesu [min]	Tloušťka vrstvy [μm]
Tenká vrstva	65–70	7–10	Cca 5
Tlustá vrstva	80–90	60	Až 75

Přestože tato metoda neobsahuje karcinogenní chrom, není úplně vhodná, kvůli obsahu manganu draselného, který zatěžuje životní prostředí. [32]

4.3 Anodická oxidace titanu

Titan je velmi lehký kov, s dobrým poměrem pevnosti k váze, což z něj dělá užitečný kov v oblasti letectví a kosmonautiky, automobilu, i architektuře. Jeho využití je rozšířené také v medicínských oborech, kvůli jeho biokompatibilitě v lidském těle a schopnosti integrovat se ve spojení v kostech. Je prokázáno, že anodická oxidace zvyšuje jeho biokompatibilitu, díky silnější bioaktivní vrstvě. Titan má samopasivační vlastnost a pokud je v prostředí s kyslíkem, sám si vytváří na povrchu vrstvu z rutilu (TiO_2). I když je tato vrstva velmi odolná chemickým činitelům a chrání titan při využití v prostředích, která jsou více agresivní na korozi, je velmi tenká (2–5 μm) a je cílem technologů ji zesílit, pro větší ochranu a z toho plynoucí lepší využití v praxi. K tomu lze využít anodickou oxidaci, nebo dodání tepla. Tepelnou reakcí lze vytvořit tlustší vrstvy, ale z technologického hlediska je výhodnější použít anodickou oxidaci, protože tepelný proces je mnohem těžší kontrolovat. [33, 34, 35]

Anodická oxidace je jedním ze způsobů, jak ochranný film zesílit. V praxi se používá několik způsobů, které nemají přesně určené parametry, přestože existuje několik patentů. Specifického složení vrstvy lze dosáhnout různými podmínkami při anodizaci, například jiným složením elektrolytu, nebo parametry elektrického proudu. Je prokázáno, že napětí je přímo úměrné výsledné tloušťce vrstvy. Kromě klasických technologií anodické oxidace existuje i metoda mikro-obloukové anodické oxidace, nebo anodické oxidace ve fluoridové lázni. Tyto dvě metody budou popsány v kapitole 6. [33, 34, 35]

4.3.1 Konvenční metody anodické oxidace

Konvenčními procesy anodické oxidace se na povrchu titanu vytvoří kompaktní vrstva o tloušťce v řádech mikrometrů. Jak již bylo zmíněno výše, tloušťka vrstvy je přímo úměrná použitému proudu, s čím souvisí i barva dané vrstvy. Zajímavost této metody spočívá v širokém spektru barev vzniklých na povrchu díky interferenci světla. Při kontaktu s povrchem anodizované součásti se část světla odrazí a část projde dál oxidickou vrstvou, dokud nenarazí na povrch titanu, kde se opět část odráží a část pohlcuje. Odražené paprsky jsou koherentní, mají stejnou frekvenci a směr. Pokud se spolu tyto paprsky různě překrývají, dochází k interferenci a daný povrch vytváří různé barevné odstíny. Aby k tomuto jevu mohlo dojít, je potřeba dostatečně tenké prostředí, čemu odpovídá anodizovaná vrstva. Samotný titan, i když má na povrchu vrstvu rutilu, nevytváří barvy, protože je povrchová vrstva až příliš tenká. [33, 34, 35]

Jako elektrolyt lze použít velké množství sloučenin, vhodné jsou ředěné roztoky kyselin, různých solí, nebo jiných zásaditých látek. Pro představu jsou v tabulce 4 popsána některá možná složení elektrolytů. Proces probíhá při napětí od 3 do 180 V. Z bezpečnostních důvodů se většinou používá napětí do 30 V. Pokud se pracuje s nižším napětím, lze jako katodu použít nerezovou nádobu, v ostatních případech se proces odehrává v nádobě z plastu a katoda bývá z titanu zavěšená v elektrolytu. Aby byl povrch rovnoměrně pokryt vrstvou, je vhodné použít katodu, která je opačná jako tvar anodizované součásti. Například, pokud je povrch anody vydutý, je vhodné použít

vypouklou katodu tak, aby byla ve všech místech zachována stejná vzdálenost mezi katodou a anodou. Doba procesu se odvíjí od použitého napětí, protože ochranná vrstva je nevodivá, čím způsobuje ukončení procesu poté, co tato vrstva získá potřebnou tloušťku. Proud lze použít přímý i střídavý, příklady vhodného použití jsou uvedeny v tabulce 4. Každý proces se liší v závislosti na elektrolytu, proto se liší dané parametry. [33, 34, 35]

Tabulka 4: Vybraná složení elektrolytu a parametry vhodné pro toto složení [35]

Složení elektrolytu	Vhodné podmínky
22 % H ₂ SO ₄ s malým obsahem solí Al, Cu a Zn	Teplota: 0–60 °C Napětí: 5–80 V Katoda: Al
54,6 % metanol 31,6 % kyselina adipová 9,7 % adipan sodný 5,1 % voda	Napětí: 3,5 V Proudová hustota: 0,003 A/dm ²
2 % roztok HNO ₃	Teplota okolí Napětí: 4 V
3 % roztok vinanu amonného	pH 7 Proudová hustota: 1 A/dm ²
5 % roztok kyseliny vinné, Nebo 20 % roztok kyseliny fosforečné, Nebo 5 % roztok kyseliny šťavelové	Proudová hustota: 0,15 – 0,75 A/dm ² Napětí až 130 V
214,5 g/l NaOH 18,75 g/l Na ₂ SiO ₃ 15 g/l TiO ₂ 3,75 g/l aktivní uhlí	pH 13–14 Teplota: 18–20 °C Proudová hustota: 1,1 A/dm ² Katoda: Pb
Nasyčená kyselina šťavelová	Teplota: 25–60 °C Proudová hustota: 0,5 – 6 A/dm ²

5 ANODICKÁ OXIDACE VYUŽÍVANÁ V LETECTVÍ

V leteckém průmyslu je velmi důležitá ochrana letadel v náročném prostředí. Anodická oxidace dokáže zajistit skvělou ochranu proti korozi a opotřebení. Zároveň porézní vrstva dodává povrchům skvělou přilnavost, což je vhodné pro nanášení dalších barev, nebo například při spojování součástí k sobě. Pomocí anodizace lze velmi dobře spojit hliník a jeho slitiny s kompozity, což je v současné době velmi výhodné. [36, 37]

5.1 Anodická oxidace v kyselině chromové

Přestože je využití anodické oxidace v kyselině chromové, kvůli šestimocnému chromu, silně omezováno, v letectví se jedná stále o nejlepší možný proces anodické oxidace pro povrchové předúpravy. Touto metodou se vytvoří tenká, porézní, rovnoměrná vrstva, která disponuje velmi vysokou odolností vůči korozi. Anodická vrstva je světle šedá, a v kombinaci s porozitou ve vrstvě je ideální na nanášení barevných laků a nátěrů. Zároveň je ochranný film vhodný pro nanášení adhezních prostředků pro připojování kompozitních součástí. Tyto nátěrové hmoty je vhodné nanášet bezprostředně po procesu anodické oxidace, protože vzniklá vrstva je poměrně měkká a mohlo by dojít k jejímu poškození. [37, 38 39]

Protože je chrom nebezpečný, je potřeba ho ekologicky zlikvidovat. EPA (United States Environmental Protection Agency) schválila pěnové přípravky pro potlačení výparů, ale ty by v tomto případě negativně ovlivnily schopnost přijímat další nátěry. [37]

5.2 Anodická oxidace v borité kyselině sírové

Metoda anodické oxidace v borité kyselině sírové byla vynalezena ve snaze najít proces, který by mohl nahradit anodickou oxidaci v kyselině chromové. Jedna z předností této metody je ekologicky přívětivá lázeň, ve které je smíchána kyselina boritá s kyselinou sírovou. Takto vytvořené povlaky mají dobrou přilnavost k dalším nátěrům. Ve srovnání s anodizací v kyselině chromové zde vzniká o dost méně korozivzdorná vrstva. Pro zlepšení korozivzdornosti je potřeba povrch ještě utěsnit, a to v roztoku dichromanu. [37, 40, 41]

5.3 Anodická oxidace v kyselině sírové

Na rozdíl od konvenční metody anodické oxidace v kyselině sírové se v letectví záměrně vytvářejí pouze tenké vrstvy povlaku. Tím, že se jedná o konvenční metodu, je tato metoda lépe zprostředkovatelná a může nahradit anodizaci v borité kyselině sírové. I přesto se využívá zřídka. Takto vytvořené vrstvy zajišťují dobrý podklad pro nátěrové hmoty. Pro dobrou korozní ochranu je potřeba vrstvu ještě utěsnit v roztoku dichromanů. [37]

Pro účely letectví a kosmonautiky se používá i tvrdá anodická oxidace. Proces probíhá v roztoku kyseliny sírové dle konvenčních metod (kapitola 4.1.2). Teplota lázně se zde pohybuje od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností udržení teploty lázně $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Norma ČSN EN 2536 rozlišuje dva typy tvrdé anodické oxidace – typ A, kde se po procesu anodické oxidace vrstvy neutěsňují a typ B, kde utěsnění následuje. Neutěsňené vrstvy mají velmi dobrou otěruvzdornost, ale proces anodické oxidace nezvyšuje výrazně korozivzdornost. Utěsňené vrstvy poskytují kompromis mezi otěruvzdorností a korozivzdorností. Kvůli

bleskové korozi není tato metoda vhodná na díly, kde je riziko, že nepůjdou odstranit zbytky lázně. [42]

5.4 Anodická oxidace v kyselině fosforečné

Anodická oxidace v kyselině fosforečné je nejrozšířenější v oblasti spojování součástí. Na částech, které nejsou k ničemu připojeny, nebo utěsněny, jsou znát nedostatečné korozní schopnosti povrchové vrstvy. Její výhodou je snadná likvidace lázně, při které stačí ve většině případů upravit pH. [37]

6 NOVÉ TRENDY ANODICKÉ OXIDACE

Konvenční metody začínají být pro moderní svět nedostačující. Veškeré inovace vyžadují nové materiály, nebo vylepšení již stávajících materiálů. Hledáním nových možností jsou velmi ovlivněna odvětví, jako je letecký, kosmický, nebo automobilový průmysl. Jejich cílem je využívat co nejlehčích materiálů s vyšší korozní odolností, odolností vůči žáru spolu s dalšími tribologickými a mechanickými vlastnostmi. Odlehčení konstrukcí vede k vyššímu využití lehkých kovů, na úkor ocelí a jejich slitin. Protože je známo, že některé lehké kovy mají horší korozní odolnost (hořčík, vysokopevnostní hliník), je potřeba jejich povrch vhodným způsobem upravit. Z důvodu, že konvenční metody přestávají stačit dnešním potřebám, je nutné vyvíjet metody nové. [43, 44]

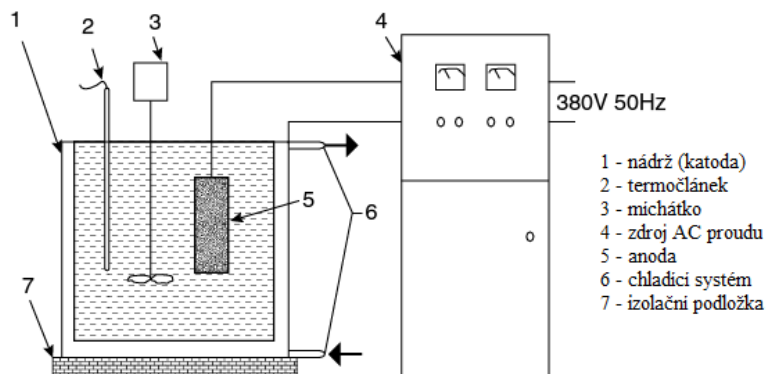
6.1 Plazmová elektrolytická oxidace (PEO)

Technologie upravování povrchu kovů plazmovým výbojem byla poprvé zkoumána koncem devatenáctého století. V té době se na ni však brzy zapomnělo a další pozornosti se ji dostalo až před necelými padesáti lety v SSSR. Během sedmdesátých let dvacátého století se výzkum rozšířil do dalších zemí, jako jsou USA, Japonsko, Čína nebo Německo. Vzhledem k tomu, že se tato metoda vyvíjí po celém světě až dodnes, je pro ni nesčetné množství patentů. Jako příklad lze uvést některé patenty pro metodu Magoxid – americký: U.S. Patent 4,978,432A; evropský: EP 0333048B1; japonský: JP5-51679B. Vlivem různých výzkumů zaměřených na chování plazmového oblouku se rozšířily i různé názvy pro tento proces, mimo jiné poměrně používaný mikro-oblouková anodická oxidace (MAO). Jedná se o metodu, kterou je možné použít na většinu lehkých kovů, nicméně nejčastěji se používá na hořčík, titan, hliník a zirkon. [19, 31, 44, 45]

O tuto metodu se vědci začali zajímat, protože se snažili dosáhnout odolnějšímu povrchu oproti konvenčním postupům, s větší možností využití v leteckém a kosmickém průmyslu, v automobilovém průmyslu nebo v elektrotechnice. Výsledkem různých studií je velmi tvrdý povrch s dobrými tribologickými vlastnostmi, vysoce odolný vůči korozi. Povrchová vrstva je schopna odolat vysokým teplotám (krátkodobě až 2000 °C) při zachování velmi dobrých dielektrických schopností. Navíc je povrch testován v oblasti biokompatibility (schopnost být přijat tělem hostitele) a biointegrace (schopnost spojit se s tkání v okolí implantátu), což přináší velký potenciál do medicínských oborů. Další výhody této metody jsou například dlouhá životnost elektrolytu, který je příznivý k životnímu prostředí. Zároveň má schopnost dobře tvořit vrstvu i v dutinách, takže je vhodný i pro tvarově složité materiály. V neposlední řadě, materiál před samotným procesem vyžaduje méně předúprav než při klasických metodách anodické oxidace, a není potřeba jeho povrch mechanicky opracovávat po procesu. [19, 44, 45]

Zařízení pro plazmatickou anodickou oxidaci je skoro stejné, jako zařízení pro konvenční metody. Základní materiál, který má být upraven, je zavěšen jako anoda. Katodou bývá většinou nádrž na elektrolyt, která je vyrobena z nerezové oceli. Musí být dobře izolována a uzemněna, aby se předešlo nebezpečí úrazu proudem. Nádrž může být vyrobena i z plastu, v takovém případě je přítomná i zavěšená katoda z nerezové oceli. Tato soustava je napojena na výkonný zdroj elektrického proudu. Celý proces probíhá

v elektrolytu, který je většinou vodný roztok obohacen o různé chemické látky. Důležité je, že v lázni nebývají přítomny žádné těžké kovy a lze tento proces považovat za ekologický. K chlazení dochází buď výměnou elektrolytu, nebo přenosem tepla ze stěn nádrže. [19, 44, 45]



Obr. 4: Schéma zapojení pro proces PEO [19]

Princip spočívá v zapojení proudu o vysokém napětí (udává se mezi 400-900 V), aby překonal průrazné napětí oxidických vrstev, které na materiálu byly původně. Při dosažení kritického napětí, které se liší v závislosti na použitém materiálu i elektrolytu, dochází ve vrstvě oxidů ke vzniku kanálek s plazmovým výbojem. Na povrchu materiálu dojde na malé části k lokální nestabilitě, způsobené výboji. Výboje se rychle rozmístí po celém povrchu. Jejich vysoká teplota způsobuje excitaci všeho, co je v jejich blízkém okolí, následuje zkrat výboje, který způsobí přesun molekul z elektrolytu do vrstvy. Zároveň, působením lokálního vysokého tlaku a teploty výboje, se natavuje a přemísťuje základní materiál, poté dochází k jeho oxidaci. Natavování základního materiálu dovoluje následný vznik velmi tvrdých keramických vrstev, které mají až 2000 HV. Natavováním je způsobeno, že vrstva neustále roste na úkor elektrolytu i základního materiálu. [19, 44, 45]

U vytváření vrstev lze pozorovat čtyři fáze. V první fázi roste postupně napětí až do bodu kritického napětí. Během toho prochází povrch materiálu z pasivovaného stavu přes proces běžné anodické oxidace (při nízkém napětí), až do stavu, kdy se z povrchu začne uvolňovat plyn při napětí blízkém se jeho kritickému stavu. Po přechodu tohoto bodu se v nejtenčím místě povrchové vrstvy začne tvořit výboj, který se rychle přesune na celý povrch. Na povrchu tak lze vidět jiskření typické pro tento proces. S pomalým růstem napětí se soustava dostane do druhé fáze, ve které se začíná základní materiál rozpouštět, což vede k pomalejšímu růstu vrstvy. Ve třetí fázi dochází pořád ke zvyšování napětí. Výboje začínají ubývat, ale jsou silnější a trvají delší dobu. V závěrečné fázi se napětí trochu snižuje, výboje stále ubývají, ale jejich životnost a síla jsou mnohem větší. [19, 44]

Vrstva vzniklá plazmovou elektrolytickou oxidací je díky obsahu keramických oxidů velmi tvrdá a odolná proti opotřebení. Vlivem mikro explozí plazmových výbojů a unikajícímu plynu je vrstva také velmi pórovitá, což ovlivňuje korozivzdornost. Vytvořená vrstva je sice velmi odolná vůči korozi, nicméně se její schopnosti v tomto

směru mohou několikanásobně zvýšit pomocí dalších povrchových úprav. Póry uvnitř vrstvy zajistí perfektní adhezní účinky pro následné utěsnění nebo nátěrové hmoty. Kromě nátěrových hmot se do vrstvy mohou přidat různé materiály – kovy, maziva, polymery. Takto ošetřený povrch může vést k dalšímu rozšíření použití těchto technologií. Výzkum na metodě PEO probíhá i nadále, na vývoji této metody se neustále pracuje a dílčí výsledky se průběžně aplikují v praxi. Metoda se zdokonaluje, aby její aplikace měla větší potenciál nejen v dopravním průmyslu. [19, 44]

6.1.1 Mikro-oblouková anodická oxidace hliníku

Mikro-oblouková anodická oxidace hliníku je asi nejzákladnější mezi procesy plazmové anodické oxidace. Princip je běžný pro PEO. Dokud se nedosáhne kritického napětí v elektrolytu, vytváří se vrstva jako při konvenčních metodách, poté se začnou objevovat plazmové výboje, které zajistí, že povrchová vrstva bude obsahovat keramické oxidy (s chemickým složením závislém na použitém elektrolytu), bude porézní, tlustší než u konvenčních metod. Díky obsahu keramiky je tato vrstva velmi tvrdá, ořezuvzdorná a odolná proti korozi. [46, 47]

Volba elektrolytu záleží na požadovaném chemickém složení povrchové vrstvy. Lze použít kyselý, zásaditý nebo slaný roztok, je však důležité, aby byl šetrný k životnímu prostředí a efektivní pro celý proces. Nejčastěji se používá roztok KOH-Na₂SiO₃, dle patentu US 5616229A. Tato metoda využívá střídavý proud pod napětím až 700 V a vytváří se vrstvy o tloušťce až 300 μm. Obecně dosahuje proudová hustota hodnot až 60 A/dm². Proud se používá až do 100 A, a napětí může dosahovat 900 V. [46, 48, 49]

6.1.2 Tagnite

Tato metoda byla vynalezena v devadesátých letech americkou společností Technology Applications Group Inc., aby mohla nahradit metody DOW 17 a HAE. Oproti těmto dvěma metodám, které mohou být nedostatečné pro potřebnou ochranu například v leteckém průmyslu, technologie Tagnite dosahuje vyšší korozní odolnosti a ořezuvzdornosti. [19, 50]

Ve spojení s DOW 17 a HAE se také často hovoří o velké škodlivosti vůči životnímu prostředí, kvůli elektrolytu s obsahem šestimocného chromu, nebo jiných těžkých kovů, které elektrolyt pro Tagnite neobsahuje. Na druhou stranu, obsahuje malé množství fluoridu (5-10 g/l), který se poté dostává do povrchových vrstev a může být potenciálně nebezpečný pro přírodu a zdraví lidí. Kromě fluoridu se lázeň skládá z hydroxidů (4–8 g/l) a křemičitanů (15-25 g/l), dohromady tvoří silně zásadité prostředí, které má pH alespoň 12,5. Výsledný elektrolyt je převážně vodnatý a bezbarvý, vhodný pro manipulaci při teplotách o trochu nižších, než je teplota okolí. [19, 31, 32]

Celý proces probíhá dvoufázově. V první fázi se materiál ponoří do roztoku z fluoridu hořečnatého, nebo jeho amoniaku, případně z jejich kombinace. Poté probíhá anodická oxidace v elektrolytu. Samotný materiál je zavěšen jako anoda a jako katoda zde slouží z pravidla vana obsahující elektrolytickou lázeň. Poté se tento obvod připojí na zdroj proudu, který u tohoto procesu pracuje při napětí vyšším než 300 V. Dosáhne se tak bílé

vrstvy složené převážně z tvrdých molekul oxidu hořečnatého, o tloušťce 2,5–22 μm . [19, 32]

6.1.3 Magoxid

Tato metoda byla vynalezena v Rusku a na jejím dalším vývoji se podílela Německá firma AHC Oberflächentechnik GmbH. Při procesu vzniká tvrdá vrstva, která disponuje výbornými antikorozními vlastnostmi a dobrou odolností proti opotřebením. Její výhodou je že se oxidická vrstva vytváří ve stejné tloušťce i na drobných nerovnostech na povrchu. [19, 50]

Elektrolyt je složen z glycerinu, ve kterém jsou obsaženy anionty fosfátů, boridů, křemičitanů, fluoridů a hlinitanů. Do této směsi mohou být přidány organické kyseliny, například kyselina citronová, nebo další kationty, například z hliníku. Zde je vidět, že lázeň neobsahuje šestimocný chrom, ani jiné těžké kovy. Stejně, jako u metody Tagnite je zde přítomen fluorid, který může být škodlivý. Hodnota pH tohoto elektrolytu je mírně zásaditá (nejlépe v hodnotách mezi 7–8), čím se dosáhne lehce zbarvené vrstvy, nejčastěji bílé, nebo světle šedé. [19, 32, 51]

Celý proces probíhá při zapojení přímého proudu, který má malou proudovou hustotu a napětí 400 V. Plazma je zde vytvořena externím zdrojem, který způsobí elektrický výboj v elektrolytu. Plazmový paprsek způsobí, že se rozpustí povrchová vrstva materiálu a vzápětí se vytvoří keramicko-oxidická vrstva, složená hlavně z tetraoxidu hořečnatodihlinitého (MgAl_2O_4). Díky tomu na povrchu vznikne trojvrstvý ochranný film. První vrstva slouží jako bariéra na povrchu kovu a je velmi tenká, kolem 100 nm. Druhá, keramická, vrstva s velmi malou porozitou má dobré antikorozní vlastnosti. Poslední vrstva obsahuje hodně pórů, díky čemu je vhodná pro následné barvení, nebo utěsnění, pro které se používají nejčastěji fluoropolymery, které zlepšují její vlastnosti. Naopak se ukazuje, že barvení těchto vrstev jejich korozi odolnost snižuje. Celková tloušťka vrstvy se může lišit v závislosti na potřebách. Tenké vrstvy kolem 5 μm jsou vhodné na následné dobarvení, tlusté vrstvy s rozměry 25–30 μm vykazují vynikající antikorozní schopnosti. [19, 32, 51]

6.1.4 Anomag

Tento proces byl vyvinut a patentován novozélandskou společností Magnesium Technologies Licensing, Ltd. Je to jedna z více ekologicky přátelských metod, díky tomu, že elektrolyt neobsahuje žádný chrom, těžké kovy, ani fluoridy. Je složen z amoniaku (NH_3) a hydrogenfosforečnanu sodno-amonného tetrahydrátu ($\text{NaNH}_4\text{HPO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Amoniak je ale potřeba ekologicky zlikvidovat z odpadních vod a ze vzduchu, do kterého se přirozeně uvolňuje. [19, 51]

Obsah amoniaku také ovlivňuje výboje z plazmy, což způsobuje jednotnou, málo porézní vrstvu, která je odolná proti korozi a opotřebením. Ochranná vrstva má dvě části – tenká spodní vrstva tvoří přechod z materiálu, je kompaktní a má více korozi vzdorný charakter. Horní vrstva je více pórovitá a tvoří základ pro další aplikace. V závislosti na tloušťce filmu se dělí do tří tříd, uvedené v tabulce 4. [19, 32, 51]

Tabulka 5: Rozdělení vrstev po aplikaci metody Anomag do tříd [32]

Třída	Tloušťka vrstvy [μm]
I.	3–8
II.	10–15
III.	20–25

Přirozeně má vrstva perleťovou barvu a dá se snadno dobarvit do spousty různých odstínů. Různé studie dokázaly, že nejlepší korozivzdorné účinky má vrstva po nabarvení a utěsnění, konkrétně lze zmínit studii provedenou na slitině AZ91, kterou vedl Vladimír Tchervyakov. Zaměřili se na povrchovou vrstvu po úpravě metodou Anomag a zjistili, že pórovitost povrchu je přibližně 13 % s póry o rozměrech 6 μm . Po aplikaci barvy a utěsnění klesla porozita na 4 %, velikost pórů se zmenšila na polovinu a zároveň stoupla korozní odolnost. [32, 51]

6.1.5 Keronid

V Rusku byla vynalezena i tato metoda, ovšem patent na ni získala Britská společnost Keronite Ltd. Jedná se o poměrně univerzální proces, který se používá na hořčík, hliník i titan. Zároveň je velmi ekologický, protože elektrolytická lázeň neobsahuje žádné těžké kovy, ani amoniak. Elektrolyt je málo koncentrovaný vodný roztok, z 98 % tvořen demineralizovanou vodou, který má neutrální, nebo mírně zásadité pH 5–12. [19, 32, 43]

Plazmový výboj je vytvořen pulzním proudem o specifické vlnové délce. Reaguje poblíž povrchu materiálu, čím způsobuje oxidaci a rekrystalizaci oxidů a také částečně rozpouští základní materiál. Tyto procesy způsobují lokálně velmi vysoký tlak na povrchu, ale vzhledem k tomu, že se jedná o jevy v mikroskopickém hledisku, nevystavují základní materiál vysokým teplotám. Teplota celého procesu se pohybuje mezi 20–50 °C a v závislosti na ní se odvíjí rychlost vytváření vrstvy, která se udává v rozmezí 1–5 $\mu\text{m}/\text{min}$. [19, 32, 43]

Ochranná vrstva se skládá převážně ze spinelu (MgAl_2O_4), ale může obsahovat i oxid křemičitý (SiO_2). Dělí se na tři části. První, nejspodnější vrstva je tenčí než jeden mikron a slouží ke spojení základního materiálu a keramické vrstvy. Druhá vrstva je keramická. Tato poměrně kompaktní vrstva je velmi tvrdá (tvrdší než například ocel nebo sklo) a zaručuje dobrou odolnost proti otěru materiálu. Třetí vrstva se vyznačuje vyšší pórovitostí, která zaručuje vhodné podmínky pro následnou adhezi krycích vrstev. Dohromady dosahují tloušťky od 10 do 80 μm . [19, 32]

Keramika obsažená v povlaku je velmi odolná různým chemickým činitelům, což zajišťuje velmi vysokou korozní odolnost a tepelnou stálost. Pro zlepšení některých dalších vlastností (například otěruvzdornost, elektrická izolace) lze keramickou matici impregnovat různými kovy, polymery (například teflonem), nebo látkami zpomalující hoření. [19, 32, 52]

V současnosti se tato technologie hojně využívá v automobilovém průmyslu a je velmi progresivní v celém dopravním odvětví, nebo na strojích v papírenském a textilním průmyslu. [52]

6.1.6 Mikro-oblouková anodická oxidace titanu

Mikro-obloukovou anodickou oxidací vznikají na povrchu titanu tlustší, více porézní vrstvy, které jsou velmi adhezní pro následné úpravy. Díky schopnosti povrchu absorbovat volné ionty z elektrolytu může být povrch obohacen o prvky jako je hliník, křemík, fosfor, nebo stříbro, v závislosti na složení elektrolytu. Takto vytvořená vrstva je bioaktivní a zvyšuje schopnost titanu integrovat se v lidském těle. Přídavek iontů stříbra způsobuje zpomalení množení mikroorganismů na povrchu, čím se zvětšuje oblast využití v lékařství a lze říci, že je takto upravený titan ještě více biokompatibilní. V současnosti se hojně používá na implantáty. [33, 53]

Mezi další vlastnosti tohoto povrchu patří i dobrá otěruvzdornost a korozivzdornost, přestože vzniklé póry mohou mít na korozní odolnost nepříznivý vliv. Skrz póry se částice rzi mohou poměrně snadno dostat skrz kompaktní část filmu až na povrch titanu. Aby se docílilo dobré korozivzdornosti, je potřeba celý proces korigovat a zvolit vhodné parametry. [33, 53]

Elektrolytem pro tuto metodu bývá většinou roztok solí, jako fosfáty, hlinitany a siričitany. Pro obsah stříbrných iontů ve vrstvě se používá elektrolyt s octanem stříbrným, nebo dusičnan stříbrný. Lze použít i kyselinu sírovou, ale obecně je pozorováno, že kyselý roztok nesvědčí vzniku plazmových výbojů. Proud lze použít přímý, pulzní, nebo střídavý. Napětí dosahuje hodnot 500 V. [33, 49, 54]

Princip je stejný jako u ostatních metod – při postupně zvyšujícím se napětí vzniká vrstva klasickým způsobem anodické oxidace, než se dostane k hranici kritického napětí, kdy se na nevodivé vrstvě oxidu v nejslabších místech začnou tvořit plazmové výboje. Ty způsobují póry ve vrstvě ve velikostech od 200 nm do 3 μm . Je pozorováno, že s vyšší proudovou hustotou je povrch kompaktnější. Proudová hustota může dosahovat až 40 A/dm². Tloušťka vrstvy dosahuje až 300 μm . Výsledky mikro-obloukové anodické oxidace se velmi liší v závislosti na použitém elektrolytu, na napětí a proudu použitém při tomto procesu. [33, 49, 54]

V oblasti výzkumu mikro-obloukové anodické oxidace titanu jsou ještě velké rezervy a je potřeba se této problematice více věnovat pro zjištění optimálních podmínek a vyšší efektivitu procesu. Kvůli tomu je celý proces poměrně nákladný v porovnání s plazmovou elektrolytickou oxidací hliníku a hořčíku. [33, 49]

6.2 Anodická oxidace hliníku boritou kyselinou sírovou (BSAA)

V roce 1990 si společnost Boeing nechala patentovat novou metodu pro anodickou oxidaci leteckých součástí, aby nahradila využívání chromové lázně obsahující karcinogenní šestimocný chrom. Díky tomu, že tento patent již vypršel, je možné anodickou oxidaci boritou kyselinou sírovou nadále rozvíjet. [44, 45, 46]

Oproti eloxování v kyselině chromové je hlavní výhodou této metody v netoxicitě elektrolytu, což vyhovuje různým normám, například předpisům EPA, evropským předpisům, i interním normám Boeingu BAC 5019. Metodou BSAA lze dosáhnout povrchových vrstev, které ovlivňují únavovou pevnost materiálu velmi málo, řádově ji snižují o 5 %. [40, 41, 55]

Ochranná vrstva má minimálně stejné adhezní schopnosti než vrstva připravená v kyselině chromové. Aby se jí vyrovnala korozivzdorností, je potřeba vrstvu utěsnit ve zředěném roztoku chromanu. Dlouhou dobu byl využíván šestmocný chrom, dokud společnost Sikorsky Aircraft Corporation nenašla pro utěsnění vhodnější metodu za využití třímocných chromových solí. [40, 41]

Elektrolyt je složený z kyseliny sírové (3–5 % hmotnosti) a v menším množství z kyseliny borité (0,5–1 % hmotnosti). Vlivem obsahu kyseliny sírové není tato metoda vhodná na používání na svarové konstrukce, nebo drobné otvory, protože kyselina sírová může ulpět na povrchu a tím vyvolat korozi. Podle patentu z roku 2000: US 6,149,795 lze do elektrolytu přidat benzoát sodný, nebo kyselinu benzoovou, pro vyšší ochranu v prašném prostředí a snížení možnosti růstu plísní. Napětí dosahuje hodnot 15 V, a čas anodizace bývá 20 minut. Ideální teplota tohoto procesu se pohybuje 21 do 32 °C (70–90 °F). Proudová hustota nepřesahuje 1,1 A/dm². Povrchová vrstva je velmi tenká, což je vhodné pro materiály, které mají těsné tolerance. Porovnání s parametry eloxování v kyselině chlorové je v následující tabulce. [40, 41, 56, 57]

Tabulka 6: Porovnání anodické oxidace v elektrolytu borité kyseliny sírové a kyseliny chromové

	BSAA	CAA
Složení elektrolytu	H ₂ SO ₄ , H ₃ BO ₃	ClO ₃
Napětí [V]	15	40–50
Doba anodizace [min]	20	30–60
Proudová hustota [A/dm ²]	Max 1,1	Není dáno
Teplota [°C]	21–32	40–50

6.3 Anodická oxidace titanu ve fluoridovém elektrolytu

Koncem dvacátého století bylo pozorováno, že v kyselém roztoku s přítomností iontů fluoridu se na povrchu titanu vytvoří nanotrubičky. Původně nebyly trubičky pořádně organizované a byly relativně krátké. Po dalším výzkumu se zjistilo, že při použití kyseliny fluorovodíkové se vytvoří nanotrubičky organizované, kolmé na povrch. Tyto trubičky jsou velmi užitečné v medicínském užití. Implantáty s nanotrubičkami na povrchu jsou velmi adhezní, mají lepší schopnost se integrovat v těle a jejich bioaktivní povrch dokáže pojmout další aktivní látky z těla. [33, 58, 59]

Je prokázáno, že při použití neutrálního nevodného, nebo organického roztoku zvyšuje uspořádanost a délku nanotrubiček, které mohou mít přes 100 μm. V elektrolytu jsou přítomny fluoridové ionty, které mohou pocházet z kyseliny fluorovodíkové, fluoridu sodného, draselného nebo amonného. Napětí bývá obvykle od 10 do 60 V, ve vodném roztoku se používá napětí do 30 V, v nevodných elektrolytech lze použít napětí vyšší,

udává se až do 150 V. Proudová hustota se koriguje během procesu, aby bylo dosaženo konstantního zvyšování napětí až na pracovní napětí. Proces anodizace může trvat až několik hodin. [33, 58, 59]

Na povrchu titanu vznikne nejprve konvenčním způsobem oxidická vrstva, která přestane růst, až když se vyčerpá její elektrická vodivost. Poté začne oxid titaničitý reagovat s ionty fluoru, což vytvoří porézní strukturu nanotrubiček. Rozměry pórů se udávají od 22 do 110 nm. Délka vrstvy je silně závislá na použitém elektrolytu. Jak je zmíněno výše, rozměry mohou být v nevodných neutrálních roztocích až kolem 100 μm , což je zatím neúčinnější metoda. V kyselých roztocích, kde byla tato metoda poprvé pozorována, se dosahuje délky nanotrubiček nejvýše 700 nm. [33, 58, 59]

V současnosti je tato metoda centrem pozornosti různých výzkumů, díky vzniku strukturovaných trubiček a lze předpokládat, že bude v budoucnu velmi používána. [33, 59]

6.4 Pulzní anodická oxidace

Účinky pulzního proudu na proces anodické oxidace se začaly zkoumat poměrně nedávno. Oproti klasickému využití přímého proudu je přímý pulzní proud vhodný pro materiály, u kterých je nedostatečná kvalita materiálu před anodizací (konkrétně daná obsahem legur, které by způsobily rychlejší opotřebení materiálu), nebo u kterých je potřeba dosáhnout lepších mechanických vlastností než při běžné anodizaci. Pulzní proud dokáže lépe přenášet teplo a účinněji se chladí lázeň kolem, což vede k vytvoření homogenní vrstvy. Je výhodné, že není potřeba žádných velkých modifikací oproti anodické oxidaci pro dosažení lepších výsledků, nebo stejných výsledků za kratší dobu. [60, 61, 62]

Tato metoda je vhodná pro všechny tři kovy, o kterých tato práce pojednává. Pokud hliník obsahuje jako leguru velké množství mědi, způsobí se, že se při procesu anodické oxidace měď precipituje v povrchové vrstvě a vytvoří se tak nerovnoměrná vrstva, která se může snadno opotřebit. Za pomoci pulzního proudu lze vytvořit rovnoměrně tlusté vrstvy se sníženou pórovitostí. Z toho vyplývá vhodnost této metody pro vytváření nanoporézních struktur. Proces tvrdé anodické oxidace je schopný takovou strukturu zajistit, ale póry jsou nepravidelné a povrch celkově je poměrně hrubý. Při využití jiných metod lze vytvořit dobře strukturované nanopóry, ale proces může trvat i několik dní, proto je pulzní anodická oxidace vhodným kompromisem mezi těmito procesy. [12, 60, 61]

U titanu se využívá hlavně v kosmickém a leteckém průmyslu, kde je potřeba vyšší důraz na korozní odolnost, pevnost materiálu a odolnost proti opotřebení. Elektrolyt se používá stejný jako při vytváření nanotrubiček ve fluoridové lázni. Při procesu vznikají shodně uspořádané nanotrubičky, které neobsahují ve své struktuře ionty z elektrolytu, vyskytující se obvykle ve struktuře při použití stejnosměrného proudu. Napětí se udává od 10 do 80 V a čas procesu bývá 2–30 minut. [62, 63]

7 VYBRANÉ ZKOUŠKY PŘILNAVOSTI POVRCHOVÝCH VRSTEV

Zkoušky přilnavosti slouží pro ověření kvality a ochranných vlastností nátěrů. Jsou důležité pro hodnocení přilnavosti povrchových vrstev k základnímu materiálu. V současnosti lze tyto zkoušky využít nejen ke kontrole, ale i k vývoji nových nátěrových hmot. [64]

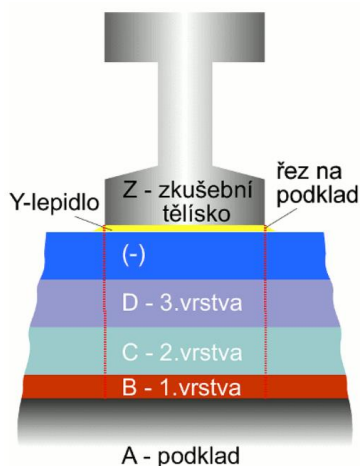
7.1 Zkouška odtrhem dle ČSN EN ISO 4624

Tato zkouška je vhodná pro testování přilnavosti jedno i více vrstevých nátěrů. Princip spočívá v měření maximálního dosaženého napětí při odtržení zkušebních tělísek – panenek. Panenky jsou ke zkušebnímu vzorku nalepeny lepidlem, které je potřeba nechat dostatečně dlouhou dobu při pokojové teplotě, aby se lepidlo správně vytvrdilo. Následně probíhá zkouška, při které je panenka umístěna do odtrhoměru. Po správném odtržení panenky je možné zaznamenat napětí při odtrhu. [64, 65, 66]

Vyhodnocení zkoušky probíhá podle tabulky 7. Na odtrženém vzorku se hodnotí druh lomu – adhezní, při kterém dojde k oddělení dvou vrstev od sebe, nebo kohezní, při kterém se poruší soudržnost atomů u sebe a k poškození dojde v rámci jedné vrstvy. [64, 65, 66]

Tabulka 7: Vyhodnocení odtrhové zkoušky dle ČSN EN ISO 4626 [66]

Klasifikace	Popis
A	Kohezní lom v podkladu
A/B	Adhezní lom mezi podkladem a první vrstvou
B	Kohezní lom první vrstvy
B/C	Adhezní lom mezi první a druhou vrstvou
-	Kohezní lom poslední vrstvy
-/Y	Adhezní lom mezi poslední vrstvou a lepidlem
Y	Kohezní lom v lepidle
Y/Z	Adhezní lom mezi lepidlem a zkušebním tělískem



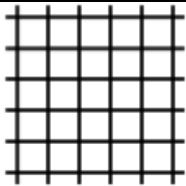
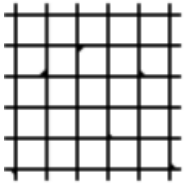
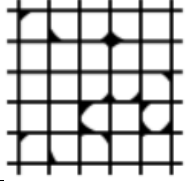
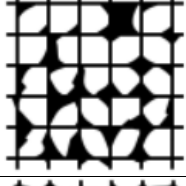
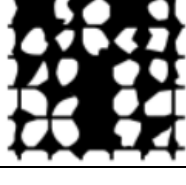
Obr. 5: Odtrhová zkouška dle ČSN EN ISO 4626 [67]

7.2 Zkouška mřížkovým řezem dle ČSN EN ISO 2409

Pro provedení zkoušky mřížkovým řezem je potřeba na zkušební vzorky udělat šest rovnoběžných řezů a dalších šest, které jsou na ně kolmé. Řezy musí projít až na základní materiál. Následně se na povrch nalepí adhezivní páska, která se poté strhne. Vyhodnocuje se poškození povlaku, které lze řadit do 6 klasifikačních stupňů (0–5). [64, 66, 68]

Pro vytvoření mřížky lze použít nůž s jedním, nebo šesti ostřími. Rozteč nožů závisí na tloušťce povlaku. Zkouška se provádí pro povlaky do tloušťky 250 μm . [64, 66, 68]

Tabulka 8: Vyhodnocení zkoušky mřížkovým řezem dle ČSN EN ISO 2409 [67]




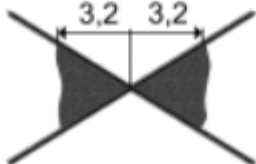

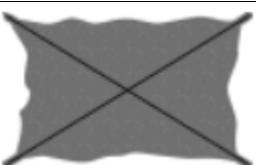
Klasifikace	Popis	Vzhled
0	Řezy zcela hladké, žádný čtverec není porušen	
1	Nepatrné poškození v místech, kde se řezy kříží. Poškozená plocha nesmí přesahovat 5 %	
2	Nátěr nepatrně poškozen podél řezů a při jejich křížení. Povrch mřížky smí být poškozen z více, než 5 % a méně než 15 % celkové plochy	
3	Nátěr je částečně poškozen v rozích řezů, podél řezných hran částečně, nebo celý, na různých místech mřížky. Poškození mřížky je větší než 15 % a menší než 35 %	
4	Na nátěru velké změny v rozích řezů a některé čtverečky jsou částečně, nebo zcela poškozeny. Plocha mřížky je poškozena z více jak 35 % ale méně než 65 %	
5	Změny, které jsou větší, než u stupně 4	

7.3 Zkouška křížovým řezem dle ČSN EN ISO 16276-2

Při zkoušce křížovým řezem se na vzorek udělají dva řezy dlouhé přibližně 40 mm, které spolu svírají úhel 30–45°. Poté se k povrchu přiloží adhezivní páska, která se následně odtrhne. Vyhodnotí se poškození povlaku v místě řezů a v místě, kde se řezy kříží. Poškození lze klasifikovat 6 stupni (0–5). [64, 66, 69, 70]

Tato zkouška je výhodná pro kontrolu povlaků v terénu. Oproti zkoušce mřížkovým řezem lze takto zkoušet i povlaky tlustší než 250 μm . [64, 66, 69, 70]

Tabulka 9: Vyhodnocení zkoušky křížovým řezem dle ČSN EN ISO 16276-2 [67, 70]

Klasifikace	Popis	Vzhled
0	Žádný odlup	
1	Nepatrný odlup podél řezů	
2	Odlup podél řezu, v ploše max. do vzdálenosti 1,6 mm od křížení řezů	
3	Odlup podél řezu, v ploše max. do vzdálenosti 3,2 mm od křížení řezů	
4	Odstranění povlaku z většiny plochy mezi řezy	
5	Odstranění povlaku i mimo plochu křížového řezu	

7.4 Zkouška ohybem na kónickém trnu dle ČSN EN ISO 6860

Princip zkoušky ohybem na kónickém trnu spočívá v připevnění vzorků ke zkušebnímu trnu (který má tvar komolého kužele) a ohnutí vzorku pomocí táhla. Vzorek se musí dotýkat kraje na straně kužele s malým průměrem. Po upevnění je vzorek plynulým pohybem táhla ohnut přes zkušební trn o 180°. [64, 66, 71, 72]

Výsledek zkoušky lze hodnotit lupou, nebo prostým okem. Hodnotí se přilnavost k povrchu základního materiálu, schopnost nevytvářet praskliny a neodlupovat se. V praxi se tato zkouška využívá pouze pro povlaky, které budou vystaveny obdobnému namáhání. [64, 66, 71, 72]

8 OVĚŘENÍ PŘILNAVOSTI ELOXOVANÝCH POVRCHŮ

V experimentální části je cílem pozorovat přilnavost vrstvy vzniklé anodickou oxidací na daných vzorcích. Na třech vzorcích jsou provedeny různé zkoušky přilnavosti: zkouška odtrhem, zkoušky mřížkovým a křížovým řezem a zkouška ohybem na kónickém trnu.

8.1 Vzorky

Pro pozorování v experimentální části jsou tři sady destiček ze slitiny hliníku. V každé sadě jsou tři vzorky (Pro měření tloušťky byly zvoleny vzorky čtyři, pro ohyb na kónickém trnu dva). Sada vzorků číslo 1 a 2 mají povrchovou vrstvu vytvořenou anodickou oxidací, vzorek číslo 3 je pro porovnání pokryt vrstvou práškového plastu. Pro přehlednost jsou vzorky popsány v tabulce níže:

Tabulka 10: Vzorky pro experimentální část

Číslo sady vzorků	Povrchová úprava	Barva	Rozměry [mm]
1	Anodická oxidace	Černá	100 x 65 x 0,7
2	Anodická oxidace	Stříbrná	
3	Práškový plast	Zlatá	

Materiál hliníkových destiček je AlMg₃ (lze najít pod označením ČSN 42413 nebo EN AW-5754), který patří do skupiny 5000. Jeho chemické složení je popsáno v tabulce 11. Tato slitina je chemicky stálá, tvrdá a je vhodná k eloxování a leštění. Řadí se mezi slitiny s hořčíkem, které se vyznačují zvýšenou odolností proti korozi, hlavně v prostředí se zvýšenou salinitou. Z tohoto důvodu nachází využití v námořnictví, potravinářství a chemickém průmyslu. U tohoto materiálu je také zaručena dobrá svařitelnost. V příloze jsou připojeny materiálové listy této slitiny. [73]

Tabulka 11: Chemické složení slitiny hliníku AlMg₃ [74]

Obsah prvku	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Mn + Cr	Al
Min [%]	-	-	-	-	2,60	-	-	-	0,10	Zbytek
Max [%]	0,40	0,40	0,10	0,50	3,60	0,30	0,20	0,15	0,60	

Na vzorky sad 1 a 2 byla použita anodická oxidace. Na vzorky sady 3 byl nanesen práškový plast bez přecházející úpravy anodickou oxidací. Technologický postup předcházející procesu anodické oxidace a aplikace práškového plastu byl pro všechny sady totožný. Konečná povrchová úprava a dokončení bylo jiné pro každou metodu.

V prvním kroku byly vzorky odmaštěny, čím byly zbaveny mastnoty a nečistot. V dalším kroku byly vzorky mořeny, pro lepší přijetí následných povrchových úprav. Mořením se vzorky účinně zbaví zbytků koroze a okují. Poslední fází předúprav bylo zesvětlení, které odstraní případné zbytky některých nečistot (například povlak fosfátu), které na povrchu zanechávají tmavý povlak. Před procesem anodické oxidace je třeba tento povlak odstranit zesvětlením. Mezi jednotlivými procesy byly vzorky vždy opláchnuty vodou. [1, 75, 76]

Pro vzorky sad 1 a 2, pokryté anodickou oxidací poté následoval samotný proces eloxování, poté vypírání, barvení a opláchnutí. Na závěr byly vzorky utěsněny a vysušeny. Pro vzorky sady tři, s práškovým plastem následovalo po moření a oplachu sušení. Na suché vzorky byl aplikován práškový plast, který byl poté vytvrzen.

8.2 Označení vzorků

Vzorky jsou pro větší přehlednost označeny systémem:

X-Y

X: číslo sady vzorků (1–3)

Y: číslo vzorku v sadě (1–6)

Pro odtrhovou zkoušku platí systém:

X-Y a/b

a (b): horní (dolní) odtrh

8.3 Měření tloušťky vrstvy

Tloušťka povrchové vrstvy byla měřena digitálním profiloměrem Elcometer 224. Měření bylo provedeno na čtyřech vzorcích z každé sady. V sadě 2 bylo měření provedeno pouze na třech vzorcích, z důvodu přílišného zakřivení zkušební destičky, které zkreslovalo výsledky. Protokol z měření je zaznamenán v příloze.

Tabulka 12: Měření tloušťky povrchové vrstvy

Číslo sady vzorků	Tloušťka vrstvy [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
1	19,225	5,650
2	18,633	8,940
3	62,125	8,940



Obr. 6: Digitální profiloměr Elcometer 224 [77]

8.4 Zkouška odtrhem

Odtrhová zkouška proběhla za použití hydraulického automatického odtrhoměru Elcometer 510, model T. Před zkouškou byl povrch všech vzorků zdrsněn a očištěn. Po nanesení lepidla se vzorky nechaly vytvrdit nejméně 24 hodin při pokojové teplotě.

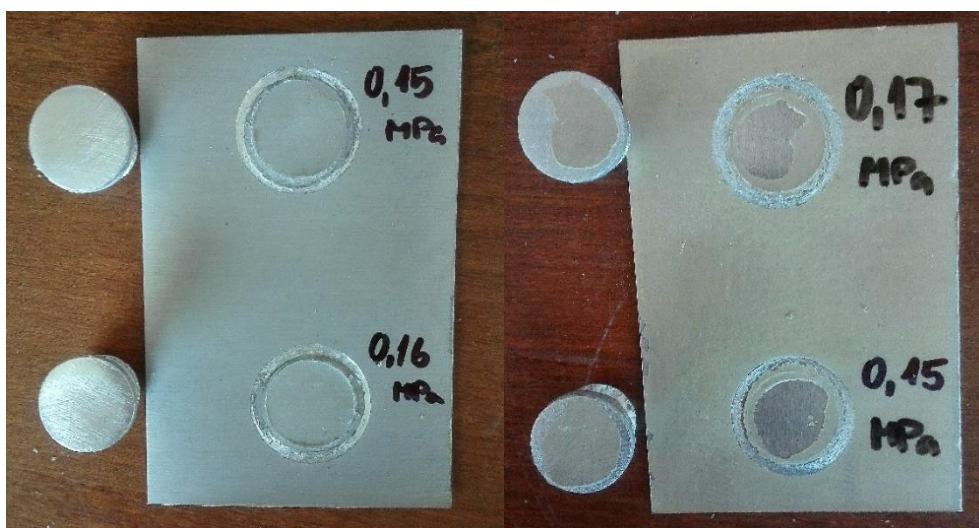
V tabulce 13 jsou shrnuty výsledky všech odtrhů, seřazeny podle sad.

Tabulka 13: Celkové vyhodnocení odtrhové zkoušky

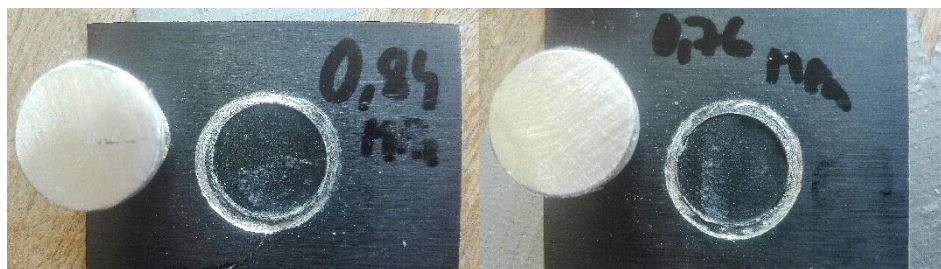
Číslo vzorku	Napětí při odtrhu [MPa]	Průměr napětí při odtrhu [MPa]	Typ lomu
1-1 a	0,840	0,800	99 % Y/Z, 1 % B
1-1 b	0,760		100 % Y/Z
1-2 a	0,810	0,995	65 % B/Y, 5 % B, 30 % Y/Z
1-2 b	1,180		20 % B/Y, 5 % B, 75 % Y/Z
1-3 a	1,000	0,800	70 % B/Y, 10 % B, 20 % Y/Z
1-3 b	1,050		40 % B/Y, 10 % B, 50 % Y/Z
2-1 a	0,150	0,155	100 % Y/Z
2-1 b	0,160		100 % Y/Z
2-2 a	0,890	0,505	35 % B/Y, 25 % B, 40 % Y/Z
2-2 b	0,120		45 % B/Y, 20 % B, 35 % Y/Z
2-3 a	0,130	0,405	80 % B/Y, 20 % B,
2-3 b	0,680		50 % B/Y, 35 % B, 15 % Y/Z
3-1 a	0,170	0,160	75 % A/B, 25 % Y/Z
3-1 b	0,150		90 % A/B, 10 % Y/Z
3-2 a	0,150	0,150	60 % A/B, 40 % Y/Z
3-2 b	-		-
3-3 a	0,150	0,930	10 % A/B, 90 % Y/Z
3-3 b	1,360		95 % A/B, 5 % Y/Z

8.4.1 Zkouška odtrhem za použití jednofázového lepidla

Z každé sady vzorků bylo na jednu destičku naneseno jednosložkové, kyanoakrylátové lepidlo Scotch-Weld™ PR 100.



Obr. 7: Odtrhová zkouška na vzorcích 2-1, 3-1 – Anodická oxidace stříbrná (vlevo) a práškový plast (vpravo)



Obr. 8: Odrhová zkouška na vzorku 1-1 – Anodická oxidace černá

Tabulka 14: Vyhodnocení odtrhové zkoušky při použití jednofázového lepidla

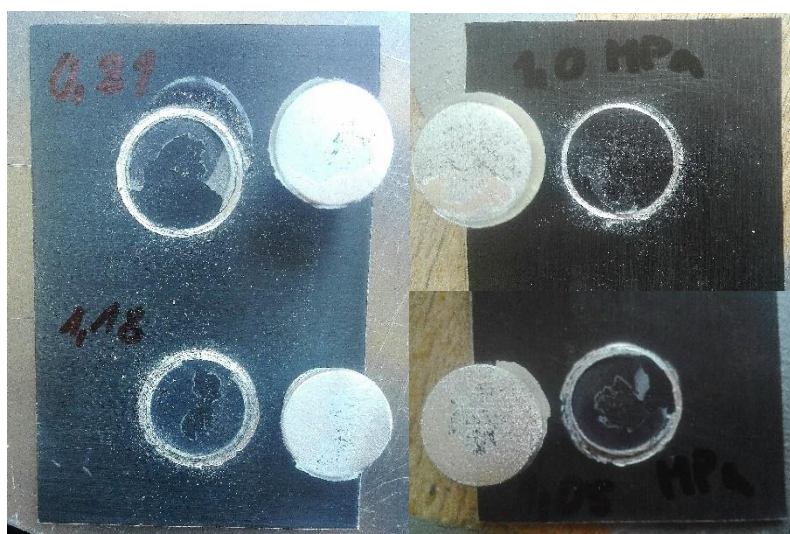
Číslo vzorku	Napětí při odtrhu [MPa]	Průměr napětí při odtrhu [MPa]	Typ lomu
1-1 a	0,840	0,800	99 % Y/Z, 1 % B
1-1 b	0,760		100 % Y/Z
2-1 a	0,150	0,155	100 % Y/Z
2-1 b	0,160		100 % Y/Z
3-1 a	0,170	0,160	75 % A/B, 25 % Y/Z
3-1 b	0,150		90 % A/B, 10 % Y/Z

Na vzorku 2-1 nelze pozorovat žádné poškození povrchové vrstvy, a z obrázku 8 lze vidět pouze nepatrné poškození vzorku 1-1 a. Na vzorku 3-1 lze vidět adhezni lom mezi povrchem základního materiálu a práškovým plastem.

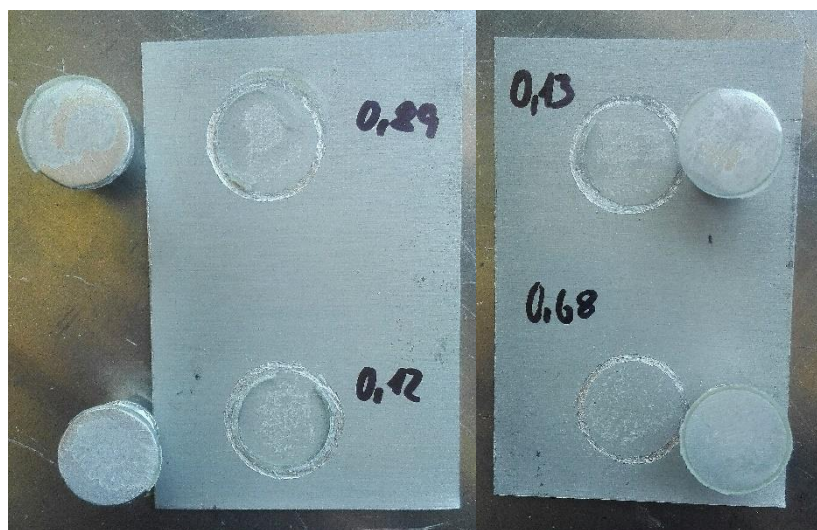
Pro odtržení vrstev s anodickou oxidací bylo použité lepidlo příliš slabé. Napětí při odtrhu se pohybovalo na velmi malých hodnotách, takže je odtrhoměr nedokázal ve většině případů pořádně vyhodnotit. Ukázalo se, že použití jednofázového lepidla nebylo v tomto případě vhodné pro odtrhovou zkoušku.

8.4.2 Zkouška odtrhem za použití dvoufázového lepidla

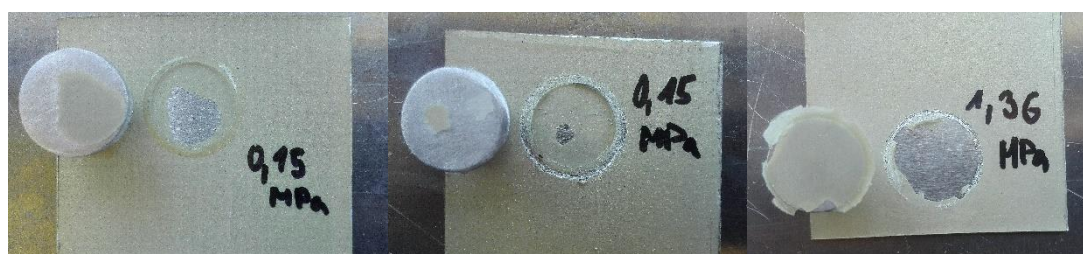
Na dva vzorky z každé sady bylo nanášeno vysokopevnostní dvoufázové epoxidové lepidlo UHU Plus Endfest.



Obr. 9: Odrhová zkouška na vzorcích 1-2, 1-3 – Anodická oxidace černá



Obr. 10: Odrhová zkouška na vzorcích 2-2, 2-3 – Anodická oxidace stříbrná



Obr. 11: Odrhová zkouška na vzorcích 3-2, 3-3 – Práškový plast

Tabulka 15: Vyhodnocení odtrhové zkoušky při použití dvoufázového lepidla pro vzorky X-2

Číslo vzorku	Napětí při odtrhu [MPa]	Průměr napětí při odtrhu [MPa]	Typ lomu
1-2 a	0,810	0,995	65 % B/Y, 5 % B, 30 % Y/Z
1-2 b	1,180		20 % B/Y, 5 % B, 75 % Y/Z
2-2 a	0,890	0,505	35 % B/Y, 25 % B, 40 % Y/Z
2-2 b	0,120		45 % B/Y, 20 % B, 35 % Y/Z
3-2 a	0,150	0,150	60 % A/B, 40 % Y/Z
3-2 b	-		-

Poznámka: Na vzorku 3-2 (3-2 b) nemohla být odtrhová zkouška provedena z důvodu nesprávné manipulace se vzorkem, při které došlo k neúmyslnému odtržení druhé zkušební panenky.

Tabulka 16: Vyhodnocení odtrhové zkoušky při použití dvoufázového lepidla pro vzorky X-3

Číslo vzorku	Napětí při odtrhu [MPa]	Průměr napětí při odtrhu [MPa]	Typ lomu
1-3 a	1,000	0,800	70 % B/Y, 10 % B, 20 % Y/Z
1-3 b	1,050		40 % B/Y, 10 % B, 50 % Y/Z
2-3 a	0,130	0,405	80 % B/Y, 20 % B,
2-3 b	0,680		50 % B/Y, 35 % B, 15 % Y/Z
3-3 a	0,150	0,930	10 % A/B, 90 % Y/Z
3-3 b	1,360		95 % A/B, 5 % Y/Z

Vzorky 1 a 2, upravené anodickou oxidací, mají viditelně lepší adhezní vlastnosti, než vzorky 3 s naneseným práškovým plastem. Na vzorcích 1 a 2 lze pozorovat kohezní lom v povrchové vrstvě, na vzorcích 3 dochází k adheznímu lomu mezi základním materiálem a práškovým plastem, což je dáno principem technologie tvorby povlaku, respektive anodizované vrstvy. Při bližším pozorování vzorků 1 a 2 lze říci, že lepší přilnavost mají vzorky 1, které mají menší kohezní porušení ve vrstvě.



Obr. 12: Odtrhoměr Elcometer 510 Model T



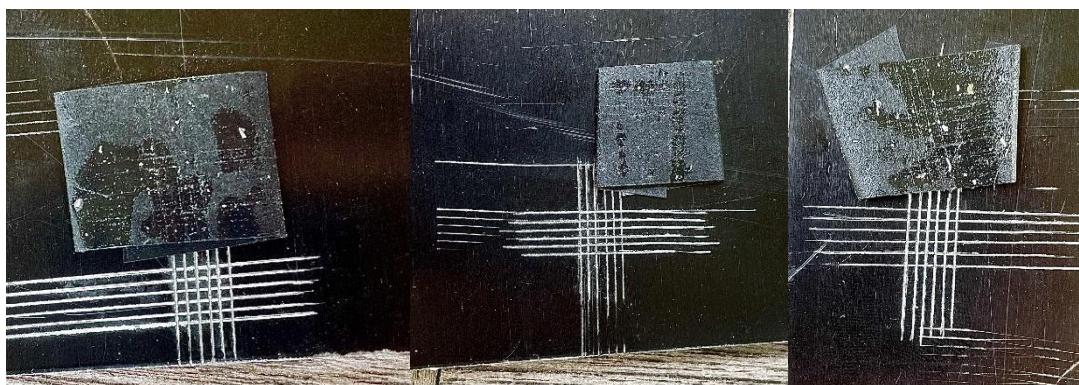
Obr. 13: Jednofázové lepidlo Scotch-Weld™ (vlevo) a dvoufázové lepidlo UHU Plus (vpravo)

8.5 Zkouška mřížkovým řezem

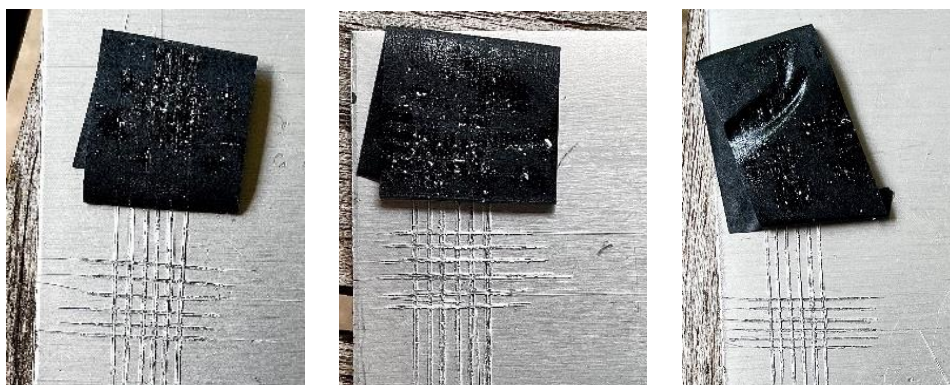
Při zkoušce mřížkovým řezem bylo na vzorky pomocí šablony vytvořeno šest rovnoběžných řezů a šest řezů na ně kolmých. Všechny řezy porušily povlak až na základní materiál. Tyto vzorky byly následně pomocí adhezivní pásky testovány.



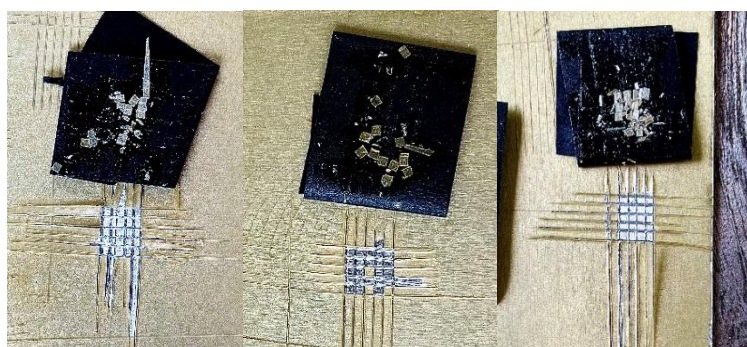
Obr. 14: Šablona pro zkoušku mřížkovým řezem – Zehntner ZFC 2088 [78]



Obr. 15: Zkouška mřížkovým řezem na vzorcích 1-1, 1-2, 1-3 – Anodická oxidace černá



Obr. 16: Zkouška mřížkovým řezem na vzorcích 2-1, 2-2, 2-3 – Anodická oxidace stříbrná



Obr. 17: Zkouška mřížkovým řezem na vzorcích 3-1, 3-2, 3-3 – Práškový plast

Tabulka 17: Vyhodnocení zkoušky mřížkovým řezem dle ČSN EN ISO 2409

Číslo vzorku	Klasifikace
1-1	0
1-2	0
1-3	0
2-1	0
2-2	0
2-3	0
3-1	5
3-2	5
3-3	5

Při mřížkové zkoušce vykazují vzorky sad 1 a 2 vynikající adhezní schopnosti. Mřížky všech šesti vzorků zůstaly neporušeny, přestože adhezivní páska nese znaky poškození povlaku. Tyto znaky jsou způsobeny nečistotami po řezání vzorků.

Vzorky sady 3 vykazovaly známky degradace povlaku již při přípravě mřížky. Výraznou degradaci lze pozorovat i v přilehlém okolí mřížky.

8.6 Zkouška křížovým řezem

Příprava zkoušky křížovým řezem spočívala ve vyřezání kříže do vzorků, které byly následně testovány pomocí adhezivní pásky. Řezy byly provedeny skrz povlak až na základní materiál.



Obr. 18: Zkouška křížovým řezem na vzorcích 1-1, 1-2, 1-3 – Anodická oxidace černá



Obr. 19: Zkouška křížovým řezem na vzorcích 2-1, 2-2, 2-3 – Anodická oxidace stříbrná



Obr. 20: Zkouška křížovým řezem na vzorcích 3-1, 3-2, 3-3 – Práškový plast

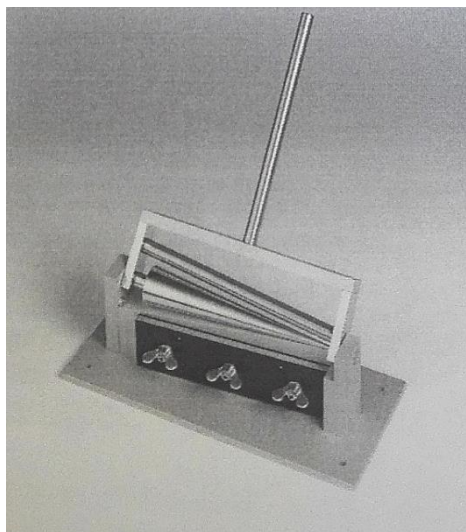
Tabulka 18: Vyhodnocení zkoušky křížovým řezem dle ČSN EN ISO 16276-2

Číslo vzorku	Klasifikace
1-1	0
1-2	0
1-3	0
2-1	0
2-2	1
2-3	0
3-1	1
3-2	1
3-3	1

V této zkoušce vykazovaly všechny tři sady vzorků poměrně dobré adhezni schopnosti. Nejlépe dopadly vzorky sady 1, na kterých nebylo vidět žádné poškození. Na vzorku 2-2 lze pozorovat poškození v místě křížení řezu. Vzorky sady 3 jsou poškozeny převážně v místě řezu, vzorek 3-2 má navíc odloupený povlak i po straně řezu.

8.7 Zkouška ohybem na kónickém trnu

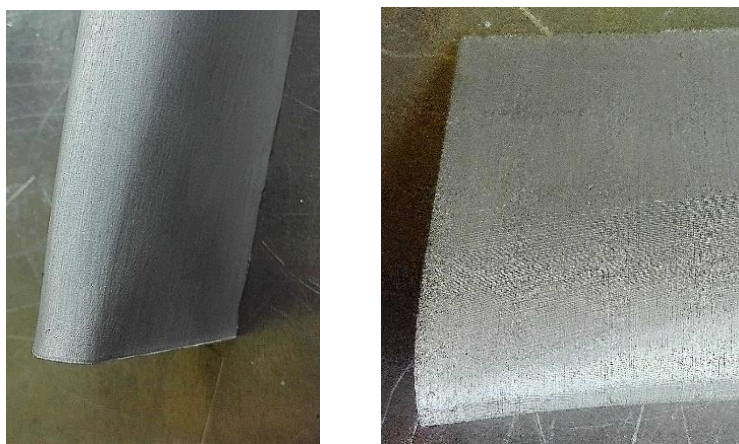
Pro zkoušku ohybem byly vybrány pouze dva vzorky z každé sady. Vzorek byl upevněn ke komolému kuželu podle normy ČSN EN ISO 6860 (kapitola 6.4). Vzorky byly následně ohnuty plynulým pohybem táhla o 180°.



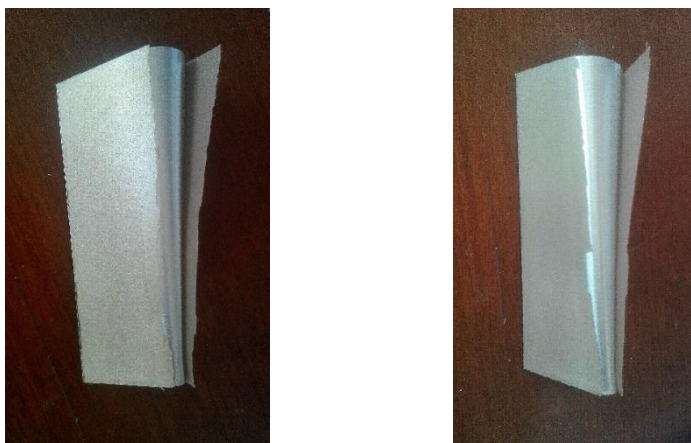
Obr. 21: Zařízení pro ohyb na kónickém trnu [71]



Obr. 22: Vzorky 1-5 a 1-6 po zkoušce ohybem na kónickém trnu – Anodická oxidace černá



Obr. 23: Vzorky 2-5 a 2-6 po zkoušce ohybem na kónickém trnu – Anodická oxidace stříbrná



Obr. 24: Vzorky 3-5 a 3-6 po zkoušce ohybem na kónickém trnu – Práškový plast

Na obrázku 24 je vidět rozlomený a odloupený povlak v celé délce. Je to způsobeno vlivem nedostatečné drsnosti povrchu před aplikací prášku. V důsledku toho mají vzorky sady 3 velmi špatnou přílnavost po této zkoušce. Na vzorcích sad 1 a 2 lze pozorovat degradaci v podobě zvrásnění povrchu. Na vzorcích 1-5 a 1-6 je povrch zvrásněn po celé délce vzorků. Na vzorcích 2-5 a 2-6 jsou patrné velmi malé trhlinky, které se táhnou po celé délce vzorků. Trhliny se zde nevyskytly pouze v místě ohybu, ale šířily se i mimo něj, vlivem zbytkového napětí.

9 POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ

V nadcházející kapitole bude shrnutí a porovnání výsledků adhezních zkoušek z experimentální části.

9.1 Porovnání výsledků zkoušky odtrhem

V tabulce 19 je shrnuta vyhodnocená zkouška odtrhem pro všechny tři sady vzorků. Vzorky jsou řazeny podle sad. Na vzorky označené X-1 bylo použito jednofázové lepidlo, které nebylo vhodné pro tento případ zkoušení. Přestože tyto výsledky lze mezi sebou porovnat, vzorky lepené dvoufázovým lepidlem vypovídají lépe o jejich adhezi.

Tabulka 19: Porovnání výsledků odtrhové zkoušky všech sad vzorků

Číslo vzorku	Napětí při odtrhu [MPa]	Průměr napětí při odtrhu [MPa]	Typ lomu
1-1 a	0,840	0,800	99 % Y/Z, 1 % B
1-1 b	0,760		100 % Y/Z
1-2 a	0,810	0,995	65 % B/Y, 5 % B, 30 % Y/Z
1-2 b	1,180		20 % B/Y, 5 % B, 75 % Y/Z
1-3 a	1,000	0,800	70 % B/Y, 10 % B, 20 % Y/Z
1-3 b	1,050		40 % B/Y, 10 % B, 50 % Y/Z
2-1 a	0,150	0,155	100 % Y/Z
2-1 b	0,160		100 % Y/Z
2-2 a	0,890	0,505	35 % B/Y, 25 % B, 40 % Y/Z
2-2 b	0,120		45 % B/Y, 20 % B, 35 % Y/Z
2-3 a	0,130	0,405	80 % B/Y, 20 % B
2-3 b	0,680		50 % B/Y, 35 % B, 15 % Y/Z
3-1 a	0,170	0,160	75 % A/B, 25 % Y/Z
3-1 b	0,150		90 % A/B, 10 % Y/Z
3-2 a	0,150	0,150	60 % A/B, 40 % Y/Z
3-2 b	-		-
3-3 a	0,150	0,930	10 % A/B, 90 % Y/Z
3-3 b	1,360		95 % A/B, 5 % Y/Z

Z tabulky 19 lze dobře vyčíst, že ze zkoušky vyšly nejhůře vzorky sady 3, upravené práškovým plastem. U těchto vzorků nebyla narušena soudržnost molekul v povlaku, k lomům docházelo převážně adhezně mezi základním materiálem a povlakem, bez ohledu na použité lepidlo.

Vzorky sad 1 a 2 měly vůči sobě velmi podobné výsledky, vlivem stejné povrchové úpravy – anodické oxidace. Vzorky 1-1 (černá anodická oxidace) vykazovaly adhezi téměř stoprocentní, vzorky 2-1 (stříbrná anodická oxidace) ji vykazovali plně na 100 %. V obou případech došlo k adheznímu lomu mezi lepidlem a zkušební panenkou. U vzorku 1-1 a došlo navíc k malému procentu porušení soudružnosti ve vrstvě anodické oxidace.

Při pozorování zbylých vzorků sady 1 (1-2, 1-3) a sady 2 (2-2, 2-3) lze říci, že vzorky sady 1 měly lepší výsledky než vzorky sady 2. U vzorků sady 1 došlo k menšímu koheznímu poškození ve vrstvě a jejich povrch byl lépe adhezní vůči lepidlu, což může

vypovídat o lepší přilnavosti následných nátěrů. Pro obě sady platí, že nebyla porušena adheze mezi základním materiálem a povrchovou vrstvou.

9.2 Porovnání výsledků zkoušky mřížkovým řezem

Porovnání zkoušky mřížkovým řezem je zobrazeno v tabulce 20.

Tabulka 20: Porovnání výsledků zkoušky mřížkovým řezem

Číslo vzorku	Klasifikace
1-1	0
1-2	0
1-3	0
2-1	0
2-2	0
2-3	0
3-1	5
3-2	5
3-3	5

Při zkouše mřížkovým řezem byla přilnavost anodické oxidace na sadě vzorků 1 a 2 velmi dobrá. V tabulce jsou tyto vzorky všechny vyhodnoceny stupněm 0 – jejich povrch v místě řezů nebyl zkouškou mřížkovým řezem nijak poškozen.

Vzorky sady 3 byly při této zkoušce vyhodnoceny stupněm 5. Práškový plast na jejich povrchu nevykazoval žádné adhezní schopnosti. Povlak se z velké části odloupl již při přípravě mřížky na vzorcích, často i v okolí mřížky, kde byly řezy pouze v jednom směru.

9.3 Porovnání výsledků zkoušky křížovým řezem

V tabulce 21 jsou shrnuty výsledky zkoušky křížovým řezem.

Tabulka 21: Porovnání výsledků zkoušky křížovým řezem

Číslo vzorku	Klasifikace
1-1	0
1-2	0
1-3	0
2-1	0
2-2	1
2-3	0
3-1	1
3-2	1
3-3	1

Výsledky zkoušky křížovým řezem byly pro všechny vzorky příznivé. Nejlépe dopadly vzorky sady 1 – černá anodická oxidace. Všechny vzorky jsou hodnoceny stupněm 0, který znamená, že se povrchová vrstva nikde v místě provedení zkoušky neodtrhla. Vzorky sady dva (anodická oxidace stříbrná) také vykazují dobré adhezní

schopnosti, ale u vzorku 2-2 bylo možné pozorovat drobné poškození anodické vrstvy v místě křížení řezu.

Pro vzorky sady tři, pokryté práškovým plastem, vyšly výsledky zkoušky, na rozdíl od zkoušky mřížkovým řezem, o dost lépe. Všechny vzorky byly ohodnoceny stupněm 1, protože došlo k poškození v místě křížení řezu. Na vzorku 3-2 došlo navíc k mírnému odloupení podél řezu.

9.4 Porovnání výsledků zkoušky ohybem na kónickém trnu

Výsledky zkoušky ohybem jsou shrnuty v tabulce 22.

Tabulka 22: Porovnání výsledků zkoušky ohybem na kónickém trnu

Číslo vzorku	Poškození vzorku
1-5	Povrch výrazně zvrásněn v nejužším místě ohybu, zvrásnění se táhne v celé délce.
1-6	Povrch zvrásněn v celé délce, méně výrazně než na vzorku 1-5
2-5	Povrch popraskaný v místě ohybu i po stranách vzorku v celé délce
2-6	Povrch popraskaný více než u vzorku 2-5, v místě ohybu i po stranách vzorku v celé délce
3-5	Rozlomení v ohybu po celé délce
3-6	Rozlomení v ohybu po celé délce

Z vyhodnocení zkoušky je zřejmé, že práškový plast (sada 3) nepřilnul na základním materiálu vůbec, což je důsledek příliš hladkého povrchu před aplikací práškového plastu.

Vzorky sad 1 a 2 (černá a stříbrná anodická oxidace) dosáhly ve zkoušce výsledky o dost lepší než práškový plast. Povrch černých vzorků byl zvrásněn po celé délce. Zvrásnění bylo zaznamenáno pouze v místě ohybu vzorků. Naproti tomu, stříbrné vzorky byly pokryty trhlinkami, které se vlivem zbytkového napětí dostaly i na neohýbané boky vzorků. Z těchto důvodů lze říci, že při porovnání dvou povrchů upravených anodickou oxidací má větší adhezní přilnavost černá anodická oxidace – sada 1.

10 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VYBRANÝCH METOD ANODICKÉ OXIDACE

V této kapitole bude zhodnocena náročnost procesů konvenční anodické oxidace hliníku a procesů speciální anodické oxidace označované jako MAO ze tří směrů – ekologický, technický a ekonomický. Pro porovnání zde budou uvedeny i ekonomické aspekty pro úpravu práškovým plastem, který byl v praktické části porovnáván s anodickou oxidací.

10.1 Ekologická náročnost

V procesech anodické oxidace hliníku se využívá nejčastěji jako elektrolyt kyselina sírová a kyselina chromová. Obě tyto kyseliny jsou anorganického původu. Anorganické kyseliny se velmi dobře rozpouští ve vodě a obecně bývají silné. Kyselina sírová je velmi žíravá. Kyselina chromová obsahuje šestimocný chrom, který je nebezpečný pro lidský organismus – zvyšuje pravděpodobnost nádorových onemocnění a dokáže měnit lidské geny. [79, 80, 81, 82]

Častým elektrolytem bývala kyselina šťavelová, která se řadí mezi organické kyseliny. Ty bývají obecně slabé a jsou pro životní prostředí i lidský organismus mnohem více přívětivé. [79]

Plazmová anodická oxidace byla zkoumána pro vytvoření odolnějších a lepších povlaků. Spolu s tím tento proces vedl k lepším složením elektrolytů. Elektrolyty pro různé metody ve většině případů neobsahují šestimocný chrom, ani jiné těžké kovy, které by byly lidem nebezpečné. V elektrolytu se může vyskytnout amoniak (například u metody Anomag), který se přirozeně uvolňuje do ovzduší a je proto třeba ho ekologicky zlikvidovat ze vzduchu i z odpadních vod. U metod Tagnite a Magoxid se v elektrolytu vyskytuje fluorid, který se může dostat do povlaku a může být nebezpečný pro přírodu, i lidi.

10.2 Technická náročnost

Dekoratивní anodická oxidace hliníku je z hlediska parametrů lázně jednodušší než tvrdá anodická oxidace. Je to z toho důvodu, že při tvrdé anodické oxidaci je třeba lázeň udržovat na velmi nízké teplotě (až $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) a je potřeba vyššího napětí a proudové hustoty, což znamená dodatečné chlazení lázně.

Výše zmíněné chlazení platí i pro metody mikro-obloukové anodické oxidace, při kterých napětí běžně přesahuje 300 V. Je zde také potřeba dbát na řádnou izolaci vany pro anodickou oxidaci, pokud slouží jako katoda.

Z hlediska technologie je třeba posoudit náročnost celého procesu souvisejícího s anodickou oxidací. Předúpravy povrchu jsou při konvenčním eloxování hliníku velmi důležité. Důraz je na ně kladen z důvodu, že tvorba anodické vrstvy je závislá na čistotě materiálu. U plazmové elektrolytické oxidace nejsou na předúpravy kladeny takové nároky, díky plazmovým výbojům, které vytvářejí na rozhraní materiálu drobné exploze.

Dalším krokem je utěsnění. U dekorativní anodické oxidace je vhodné povrch utěsnit, protože je velmi porézní a nedokáže materiál chránit dostatečně. Materiál poté vykazuje

dobrou korozní odolnost. U tvrdé anodické oxidace se operace utěsnění, jako je u dekorativní anodické oxidace, většinou nevyužívá, a pokud ano, tak ve speciálních případech, například v letectví. Utěsnění výrazně ovlivní korozivzdornost materiálu, která se po tomto procesu zvýší na úkor otěruvzdornosti. Povrch po plazmové elektrolytické oxidaci je kvůli výbojům velmi porézní, což zajišťuje dobrou přilnavost. Je proto vhodné povrch dále upravit, kvůli většímu zvýšení korozní odolnosti i otěruvzdornosti. Pro všechny typy dokončovacích úprav platí, že lze do vrstvy přidat různé materiály (například polymery, teflon) pro další zlepšení jejích vlastností.

10.3 Ekonomická náročnost

21. století je charakteristické touhou po dosahování vysokých zisků. Pro společnosti je z toho důvodu prioritou co nejnižší cena materiálů a technologií, ve snaze získat co nejlepší poměr ceny vůči kvalitě. [72]

V následující tabulce budou shrnuty ceny za anodickou oxidaci dekorativní, tvrdou a PEO. Pro porovnání zde bude zahrnuta i cena za povrchovou úpravu práškovým plastem. Ceny se obvykle udávají v Kč/dm². Ceny práškových barev jsou od výrobce udané v Kč/m² bez DPH, a v tabulce budou uvedeny již přepočteny na dm², s přepočteným DPH a zaokrouhleny na desetiny Kč.

Pro anodickou oxidaci jsou ceny uvedeny s DPH, bez DPH jsou ceny zaokrouhleny na desetiny Kč. Ceny jsou uvedeny bez barvení a utěsnění.

Tabulka 23: Porovnání cen anodické oxidace a práškového plastu [84, 85]

Povrchová úprava		Cena Kč/dm ² bez DPH	Cena Kč/dm ² s DPH
Anodická oxidace	Dekorativní	5,80	7,00
	Tvrdá	24,80	30,00
	PEO	165,30	200,00
Prášková barva	Venkovní	2,55	3,10
	Vnitřní	2,25	2,70
	Předúprava tryskáním Sa 3	3,20	3,80

Poznámka: Sa 3 je nejvyšší stupeň hodnocení kvality otryskaných materiálů. Jedná se o povrch, který je kompletně zbaven všech neželezných i železných nečistot. Tato povrchová předúprava se řídí normou ČSN EN ISO 8501-1. [83]

V experimentální části je vidět, že práškový plast na vzorcích vykazoval velmi malou přilnavost. Pro účely této práce by bylo vhodné povrch před barvením ještě upravit právě technologií tryskání s vhodně zvoleným abrazivem a parametry procesu, aby barva lépe držela. V tabulce 16 je uvedena cena za tryskání jako předúpravu. Po sečtení vychází cena s DPH venkovní barvy na 6,90 Kč/dm² a vnitřní barvy na 6,50 Kč/dm².

Z cen uvedených v tabulce 23 je zřejmé, že nejlevnější povrchová úprava je práškovými plasty. Nicméně jeho adhezní schopnosti v této práci byly velmi slabé, kvůli zvolené předúpravě, která byla stejná jako pro anodizované vzorky. Lze přepokládat, že při předúpravě tryskáním by byla jeho přilnavost podstatně lepší a cenově se dostane blízko k dekorativní anodické oxidaci.

Dekoratívni anodická oxidace je při její ceně výhodná metoda na zvýšení korozní odolnosti drobných nebo interiérovných předmětů. Tato vrstva se bez následného utěsnění nebo dobarvení velmi snadno poškrábe, proto je vhodné v dalších krocích tyto úpravy udělat, což negativně ovlivní cenu. [84]

Tvrdá anodická oxidace je čtyřikrát dražší než dekorativní, ale lze pomocí ní vytvořit velmi tvrdé, otěruvzdorné a korozivzdorné povlaky. Je vhodná pro použití do exteriéru a míst s těžkými okolními podmínkami. [84]

Nejdražší metodou je plazmová anodická oxidace. Pro vytvoření těchto vrstev je potřeba specifické vybavení a velké napětí, což si vyžaduje vyšší cenu. Výsledkem jsou povlaky s vynikající korozní ochranou, velmi tvrdé a velmi otěruvzdorné. Z hlediska poměru ceny a výkonu se tato povrchová úprava hodí do míst s nároky na vysokou otěruvzdornost a tvrdost. [84]

11 ZÁVĚR

V odpovědi na otázku problematiky povrchových úprav v letectví se jedná zejména o kvalitní, vysoce korozivzdorný podklad, případně finální povrchovou úpravu. Ochrana proti korozi je důležitá, kvůli vlivu náročného prostředí, ve kterém se letadla pohybují. Jako jedna z vhodných povrchových úprav se jeví anodická oxidace, která kromě vysoké korozní odolnosti garantuje dobrý základ pro následující nátěrové nebo adhezni hmoty.

V teoretické části byly shrnuty konvenční metody anodické oxidace pro slitiny hliníku, hořčíku a titanu. Tyto metody, ač začaly být používány již před dávnou dobou, jsou stále velmi spolehlivé, co se protikorozní ochrany týče. V leteckém průmyslu se velmi osvědčila anodizace hliníku v kyselině chromové, která je sice nebezpečná pro životní prostředí a organismus, ale zatím jí nebyla nalezena dostačující náhrada. Ve snaze zlepšit korozní odolnost se v druhé polovině 20. století začaly zkoumat nové druhy anodické oxidace – plazmová elektrolytická oxidace. Výsledkem jsou vysoce korozivzdorné povrchové vrstvy s dobrými tribologickými vlastnostmi, které jsou také velmi tvrdé. Další výhodou jsou složení elektrolytů, která jsou ekologicky více vyhovující než při anodické oxidaci v kyselině chromové.

V experimentální části byla zkoušena přilnavost anodické oxidace k základnímu materiálu a pro porovnání i přilnavost práškového plastu. Vzorky byly ve třech sadách po šesti vzorcích, z čeho byla na čtyřech měřena tloušťka povlaku, na pěti byly postupně provedeny zkoušky přilnavosti. První dvě sady měly povrchovou vrstvu vytvořenou dekorativní anodickou oxidací. Sada 1 byla zbarvená černě, sada 2 stříbrně. Naměřená průměrná tloušťka těchto vzorků se pohybovala pod dvacet mikrometrů, konkrétně 19,225 μm pro vzorky sady 1 a 18,633 μm pro vzorky sady 2. Sada tři měla povrch pokrytý práškovým plastem, pro který byla naměřená průměrná tloušťka povlaku 62,125 μm .

Zkoušky přilnavosti proběhly tři na třech vzorcích z každé sady a jedna na dvou vzorcích z každé sady. Jako první byla hodnocena přilnavost zkouškou odtrhem. Pro účely této zkoušky bylo použito nejprve jednofázové lepidlo, které se ukázalo jako nevhodné pro eloxované vzorky, které po této zkoušce měly téměř 100% výsledky na adhezni lom mezi lepidlem a zkušební panenkou. Z tohoto důvodu byla provedena zkouška za pomoci jednofázového lepidla pouze na prvním vzorku ze tří, na zbylé bylo použito dvoufázové lepidlo, s poněkud průkaznějšími výsledky. Vzorky kryté anodickou oxidací měly dobrou adhezi vůči podkladu, poškození na těchto vzorcích bylo pouze kohezního charakteru ve vrstvě anodické oxidace. Práškový plast vykazoval poměrně malou přilnavost k základnímu materiálu. Převážně na těchto vzorcích docházelo k adhezni lomu mezi povrchovou vrstvou a práškovým plastem, poté také mezi lepidlem a zkušební panenkou. Nízká adheze je způsobena stejnou povrchovou úpravou, která byla použita i na vzorky anodické oxidace

Po zkoušce odtrhem následovala zkouška mřížkovým řezem. Vzorky pokryté práškovým plastem se začaly poškozovat již při přípravě zkoušky pomocí šablony a nože. Po provedení zkoušky byl povlak odtržen i z míst, kam mřížka nezasahovala, proto pro vzorky byla udělena klasifikace 5. Tyto vzorky se vyznačovaly velmi špatnou

přilnavostí. Vzorky s anodickou oxidací byly naopak vyhodnoceny klasifikačním stupněm 0 – jejich povrchová vrstva nevykazovala žádné znaky porušení adheze.

Výsledky zkoušky křížovým řezem byly nad očekávání dobré. Pro všechny tři sady vzorků nebylo k vyhodnocení potřeba použít stupeň horší než 1, který se týkal hlavně vzorků pokrytých práškovým plastem. Na vzorcích bylo pozorováno mírné odloupení povlaku v místě křížení řezu a po straně řezu. Dále byl stupněm 1 ohodnocen vzorek 2-2, se stříbrnou anodickou oxidací, který vykazoval stejné znaky poškození, jako vzorky s práškovým plastem. Ostatní vzorky nebyly touto zkouškou vůbec poškozeny.

Zkouška ohybem na kónickém trnu proběhla pouze na dvou vzorcích. Na všech sadách vzorků se poškození projevilo v celé délce. Nejlepší výsledky byly na vzorcích s černou anodickou oxidací. Po ohybu měly vzorky povrch zvrásněný pouze na hřbetu v místě ohybu na trnu. Na pomyslném druhém místě se umístila stříbrná anodická oxidace, na které se vytvořily prasklinky nejen v místě ohybu, ale i na boku vzorků. Nejhorší adheze byla na vzorcích pokrytých práškovým plastem, u kterých se povrchová vrstva zcela roztrhla, což bylo opět zapříčiněno jednotnou předúpravou povrchu.

Obecně v praktické části této bakalářské práce anodická oxidace vykazuje mnohem větší přilnavost povrchové vrstvy oproti práškovému plástu. Nevyhovující přilnavost práškového plástu je zde způsobena nedostatečnou předúpravou materiálu hliníkových slitin. Hliníkové destičky byly po moření velmi hladké a práškový plást se proto nemohl pořádně uchytit na vzorcích. Pro lepší výsledky by bylo vhodné povrch před nanesením práškového plástu nejprve otryskat, aby se zajistil vhodný kotvicí profil pro následnou povrchovou úpravu. Dalším faktorem, který ovlivnil velkou rozdílnou přilnavost povrchových vrstev na vzorcích je fakt, že vrstva vytvořená anodickou roste z části do základního materiálu, čím je s povrchem velmi dobře spojená. Při pozorování výsledků vzorků s anodickou oxidací z experimentální části lze říci, že černá anodická oxidace má o trochu lepší adhezní schopnosti než stříbrná anodická oxidace.

Z ekologického hlediska se jeví jako nejlepší možnost mikro-oblouková anodická oxidace, jejíž lázeň neobsahuje škodlivý chrom, ani jiné těžké kovy. Celý proces je ale drahý a technicky poměrně náročný z důvodu využívání vysokého napětí. Další ekologické varianty jsou dekorativní a tvrdá anodická oxidace, které využívají jako elektrolyt roztok kyseliny sírové. Tyto lázně jsou nenáročné na cenu, a navíc se jedná o konvenční procesy, tudíž ekonomicky vycházejí příznivě. Tvrdá anodická oxidace je metoda vhodná nejen do průmyslu. Dekorativní anodická oxidace má povrch málo odolný otěru, je proto vhodná nejvíce pro dobarvování a následně dekorativní použití.

Anodická oxidace v kyselině chromové je nejméně přívětivá pro životní prostředí, z důvodu obsahu karcinogenního chromu v lázni. Kromě ojedinělých typů průmyslu, jako je třeba letecký průmysl, se tato metoda již nikde nepoužívá. V leteckém průmyslu je nenahraditelná pro povrchové vrstvy, které jsou tenké, dobře korozivzdorné a poskytují skvělý základ pro další nátěrové systémy.

12 BIBLIOGRAFIE

- [1] REMEŠOVÁ, Michaela. *Anodická oxidace hliníku a jeho slitin* [online]. Brno, 2013 [cit. 2020-12-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/27521>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Ladislav Čelko.
- [2] PETR, Jiří. *Povrchové úpravy hliníkových slitin* [online]. Brno, 2013 [cit. 2021-7-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=62767. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.
- [3] CHESTERFIELD, Larry. Oxalic Acid Anodizing—the Basics. *Products finishing: The Voice of the Finishing Industry* [online]. Cincinnati, OH, 2008 [cit. 2021-7-12]. Dostupné z: [https://www.pfonline.com/articles/oxalic-acid-anodizingthe-basics\(2\)](https://www.pfonline.com/articles/oxalic-acid-anodizingthe-basics(2))
- [4] STANDRIDGE, Michael. Aerospace materials — past, present, and future. In: *Aerospace Manufacturing and Design* [online]. Valley View (Ohio), 2012 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/amd0814-materials-aerospace-manufacturing/>
- [5] SMYE, Ben. Aluminum alloys for aerospace. *Aerospace manufacturing and design* [online]. Valley View, 2018 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/aluminum-alloys-for-aerospace/>
- [6] POULTON, Goeff. Aviation's material evolution: From heavy metal to lightweight high-tech. In: *Airbus* [online]. Leiden, 2017 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2017/02/Material-evolution.html>
- [7] Titane. In: *Futura Sciences* [online]. Saint-Raphaël [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-titane-14783/>
- [8] VACH, Ondřej. *Anodická oxidace jako předúprava pro tvorbu funkčních duplexních systémů* [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-7-12]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84820/F2-BP-2019-Vach-Ondrej-Vach%20Ondrej%20BP%20-%202019.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [9] KREIBICH, Viktor. *Přednáška z předmětu Technologie Povrchových Úprav: Úvod do povrchových úprav*. 2020.
- [10] SEDLÁČKOVÁ, Eva Michelle. *Cvičení z předmětu Technologie Povrchových Úprav: Povrchové úpravy v letectví*. 2020.
- [11] Anodisation. In: *Alu-Stock* [online]. Vitoria-Gasteiz [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.alu-stock.es/fr/informations-techniques/anodisation/>
- [12] REMEŠOVÁ, Michaela. *Technologie galvanické anodizace neželezných kovů a slitin* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103814. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ladislav Čelko.

- [13] KŘENKOVÁ, Petra. *Antikorozní ochrana kovů a povrchové úpravy kovových výlisků* [online]. Zlín, 2006 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/510/k%C5%99enkov%C3%A1_2006_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Michal Kovář.
- [14] PERNOT-GEHIN, Aurélie. *Étude des procédés de colmatage d'alliages d'aluminium anodisé* [online]. Nancy, 2007 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_2007_0113_PERNOT-GEHIN.pdf. Disertační práce. Université Henri Poincaré Nancy-I, Faculte des sciences & techniques. Vedoucí práce M. J. Steinmetz.
- [15] DUVAL, Maurice. Anodisation. In: *CeAl – AluQuébec* [online]. Québec, 2018 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://ceal-aluquebec.com/anodisation/>
- [16] Traitement sur Aluminium. *Modertech Industry* [online]. Saint-Etienne [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.modertech-industries.com/index.php/traitements/traitement-sur-aluminium>
- [17] SHAHZAD, Majid. *Influence de la rugosité et des traitements d'anodisation sur la tenue en fatigue des alliages d'aluminium aéronautiques 2214 et 7050* [online]. Toulouse, 2011 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_2007_0113_PERNOT-GEHIN.pdf. Disertační práce. Université de Toulouse, Fracture mechanics, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace. Vedoucí práce Farhad REZAI-ARIA.
- [18] L'anodisation: Votre masterclass en design produit et développement. *Protolabs* [online]. Shropshire, 2020 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.protolabs.fr/ressources/insight/l-anodisation/>
- [19] SONG, Guang-Ling. *Corrosion prevention of magnesium alloys* [online]. Cambridge (UK): Woodhead Publishing, c2013 [cit. 2021-02-16]. ISBN 978-0-85709-896-2. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=1581407&pq-origsite=summon#>
- [20] HÜBNER, Walter W. G. *Die anodische Oxydation des Aluminiums in verschiedenen zusammengesetzten Oxalsäurelösungen* [online]. Zürich, 1948 [cit. 2021-6-2]. Dostupné z: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/134786/eth-21276-02.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Disertační práce. Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich.
- [21] Anodisation chromique. In: *A3TS* [online]. Paris [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.a3ts.org/actualite/commissions-techniques/fiches-techniques-traitement-surface/anodisation-chromique/>
- [22] Bengough Stuart method. In: *Galvanotechnik for you* [online]. Bad Saulgau [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.galvanotechnik-for-you.de/lexikon/bengough-stuart-method/>
- [23] BOVEY, E. The anodic oxidation of aluminium and aluminium alloys. *Journal of scientific instrument* [online]. 1943, (20), 92 - 97 [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0950-7671/20/6/303/pdf>

- [24] LEONTIEV, A. P., I. V. ROSLIAKOV a K. S. NAPOLSKII. Complex influence of temperature on oxalic acid anodizing of aluminium. *Electrochimica acta* [online]. 2019, (319), 88–94 [cit. 2021-6-2]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S001346861931254X?token=E420B07A32FBF0C37076225775CDAD3B17C0EF2D2EA23A1FDEFB42711AB6C757A8D6F1423AD45397BEB8E91E2563B2B6&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210601120700>
- [25] REMEŠOVÁ, Michaela. Research and development of a technology of hard anodization of nonferrous alloys. Brno, 2020. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/128704>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Středoevropský technologický institut VUT, Central European Institute of Technology BUT
- [26] PROBERT, Robert H. *Aluminium how to: The Chromatizing, Anodizing, Hard Coating Handbook*. Tailored Text, 2005.
- [27] TKACZ, Jakub. *Korozní odolnost konstrukčních slitin hořčíku* [online]. Brno, 2013 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30310848.pdf>. Zkrácená verze disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Centrum materiálového výzkumu. Vedoucí práce Jaromír Havlica.
- [28] GHALI, Edward. *Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys: Understanding, Performance, and Testing* [online]. New Jersey: Wiley, c2010 [cit. 2021-02-16]. ISBN 978-0-471-71576-4. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=533938#>
- [29] Aluminum & Magnesium Coatings. *Saporito finishing* [online]. Cicerp [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://saporitofinishing.com/processes/magnesium-aluminum>
- [30] ELMQUIST, Bill. Combating Corrosion in Magnesium Using New Generation Alloys and Modern Coatings such as Tagnite. In: *Tagnite* [online]. Grand Forks, 2010 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: https://www.fire.tc.faa.gov/2010Conference/files/Magnesium_Use_In_Aircraft/ElmqvistCorrosionIssues/ElmqvistCorrosionIssuesPres.pdf
- [31] BLAWERT, Carsten, Wolfgang DIETZEL, Edward GHALI a Guang-Ling SONG. Anodizing Treatments for Magnesium Alloys and Their Effect on Corrosion Resistance in Various Environments. *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS* [online]. 2006, 8(6), 511–533 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.techlib.cz/doi/epdf/10.1002/adem.200500257>
- [32] Low-Cost, Environmentally Friendly Magnesium Anodization. In: *Eltron research* [online]. Boulder, c2009 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: http://www.eltronresearch.com/docs/magnesium_anodization.pdf
- [33] DIAMANTI, Maria Vittoria, Barbara DEL CURTO a MariaPia PEDEFERRI. Anodic Oxidation of Titanium: From Technical Aspects to Biomedical Applications. *Journal of Applied Biomaterials and Biomechanics* [online]. 2011, 9(1), 55–69 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/10.5301/JABB.2011.7429#articleCitationDownloadContainer>

- [34] POKORNÝ, Milan. Anodizování titanu. *Knife.cz* [online]. 2007 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.knife.cz/Knifecz/Technika/tabid/57/ctl/Details/mid/384/ItemID/215/Default.aspx>
- [35] ALADJEM, Abraham. Anodic oxidation of titanium and its alloys. *Journal of Materials Science* [online]. 1973, **8**, 688–704 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00561225>
- [36] Aircraft Surface Treatment Market Size to Reach \$789.6 Million in 2025, Says Stratview Research. *PR Newswire: press release distribution, targeting, monitoring and marketing* [online]. c2021 [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: <https://www.prnewswire.com/news-releases/aircraft-surface-treatment-market-size-to-reach-789-6-million-in-2025--says-stratview-research-300962952.html>
- [37] KUDELKA, Jason. Anodizing for Bonding Applications in Aerospace. *Products finishing: The Voice of the Finishing Industry* [online]. Cincinnati, OH, 2011 [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/anodizing-for-bonding-applications-in-aerospace>
- [38] Eloxování hliníku. *PBS - mnoho podob přesného strojírenství* [online]. Praha [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: <https://www.pbs.cz/cz/Sluzby/Povrchove-upravu/Druhy-povrchovych-uprav>
- [39] Chemical Treatments and Protective Paint Finishes for Aircraft. *Aircraft systems* [online]. [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: <https://www.aircraftsystemstech.com/2020/02/chemical-treatments-and-protective.html>
- [40] Anodizing for Aerospace: 101. In: *Metal Powder Report – Materials Today* [online]. Kidlington, 2010 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.materialstoday.com/metal-finishing/features/anodizing-for-aerospace-101/>
- [41] KOOP, Rodney a Yukimori MOJI. Boric/Sulfuric Acid Anodize-Alternative to Chromic Acid Anodize. *Journal of Aerospace* [online]. 1992, **101**, 71-78 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/44732961?seq=1>
- [42] ČSN EN 2536. *Letectví a kosmonautika – Tvrdá anodická oxidace hliníkových slitin*. Český normalizační ústav, 1997.
- [43] SHRESTHA, S. a B. D. DUNN. Advanced plasma electrolytic oxidation treatment for protection of light weight materials and structures in a space environment. *Surface World* [online]. 2007, 40–44 [cit. 2021-7-13]. Dostupné z: [Keronite2007paper.pdf](#)
- [44] CHVOJKA, Martin, Viktor KREIBICH a Petr DRAŠNAR. Moderní PEO vrstvy – Alternativa konvenčního eloxování. In: *Prvý strojársky portál – Strojárstvo / Strojírrenství* [online]. Žilina [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/stroj-arstvo-extra/4094-moderni-peo-vrstvy-alternativa-konvencniho-eloxovani>
- [45] FICKOVÁ, Zuzana a Jan KUDLÁČEK. Technologie v kosmickém výzkumu – část II.: 2012. *Občasník Povrcháři* [online]. 2014, Leden 2014, **8**(1), 4-9 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201401_povrchari.pdf

- [46] MARKOV, M. A., A. D. BYKOVA, A. V. KRASIKOV et al. Formation of Wear – and Corrosion-Resistant Coatings by the Microarc Oxidation of Aluminum. *Refractories and Industrial Ceramics* [online]. 2018, **59**, 207-214 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11148-018-0207-3#citeas>
- [47] RAMA KRISHNA, L., A. SUDHA PURNIMA a G. SUNDARARAJAN. A comparative study of tribological behavior of microarc oxidation and hard-anodized coatings. *Wear* [online]. 2006, **261**(10), 1095-1101 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164806000810>
- [48] ŠVORC, Jan. *Progresivní technologie povrchových úprav slitin Al* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80634/F2-DP-2018-Svorc-Jan-dp_final_1.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Viktor Kreibich.
- [49] LAVEISSIERE, Marie. *Élaboration et caractérisations de revêtements élaborés par Oxydation Micro-Arcs sur alliage de titane TA6V* [online]. Toulouse, 2018 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <http://thesesups.ups-tlse.fr/4420/1/2018TOU30351.pdf>. Disertační práce. Université de Toulouse III – Paul Sabatier. Vedoucí práce Laurent ARURAUULT.
- [50] The Tagnite Coating. *Tagnite* [online]. Grand Forks, c2007 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: http://www.tagnite.com/tagnite_coating/
- [51] GRAY, J. E. a B. LUAN. Protective coatings on magnesium and its alloys — a critical review. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2002, **366**(1-2), 88-113 [cit. 2021-01-24]. ISSN 0925-8388. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0925838801018990?via%3Dihub>
- [52] Nová povrchová úprava nekovových materiálů. In: *MMS Průmyslové spektrum: odborně-vzdělávací a zpravodajský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů* [online]. Praha, 2002 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/novinka/nova-povrchova-uprava-nekovovych-materialu.html>
- [53] CUI, W. F., L. JIN a L. ZHOU. Surface characteristics and electrochemical corrosion behavior of a pre-anodized microarc oxidation coating on titanium alloy. *Materials Science and Engineering: C* [online]. 2013, **33**(7), 3775-3779 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0928493113002993>
- [54] MORTAZAVI, Golsa, Jiechao JIANG a Efstathios I. MELETIS. Investigation of the plasma electrolytic oxidation mechanism of titanium: GolsaMortazaviJiechaoJiangEfstathios I.Meletis. *Applies Surface Science* [online]. (488), 370-382 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433219315582>
- [55] Preferred materials and processes. In: *Boeing* [online]. Chicago, c2010 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.boeing.com/environmental/chromic.html>
- [56] KRIESCH, Gary, Warren John FULLEN, Earl TURNS et al. Overview: Aerospace Anodize Finishes. In: *The Voice of the Finishing Industry | Products*

- Finishing* [online]. Cincinnati, 2010 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/overview-aerospace-anodize-finishes>
- [57] OELUND, John C., Warren J. FULLEN a David L. CRUMP. *Fungus resistant boric acid-sulfuric acid anodizing*. US6149795A.
- [58] ROY, Poulomi, Steffen BERGER a Patrik SCHMUKI. TiO₂ Nanotubes: Synthesis and Applications. *Angewandte* [online]. 2011, **50**(13), 2904-2939 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.techlib.cz/doi/full/10.1002/anie.201001374>
- [59] Boric Sulfuric Acid Anodize (BSAA). In: *Anoplate* [online]. Syracuse [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.anoplate.com/news-and-events/boric-sulfuric-acid-anodize/>
- [60] BÁRTA, J., V. JONÁK, V. WEISS et al. Pulzní anodická oxidace hliníkových slitin. *Prvý strojársky portál – Strojárstvo / Strojrenství* [online]. Žilina [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/8553-pulzni-anodicka-oxidace-hlinikovych-slitin>
- [61] LEE, Woo, Kathrin SCHWIRN, Martin STEINHART et al. Structural engineering of nanoporous anodic aluminium oxide by pulse anodization of aluminium. *Nature nanotechnology* [online]. 2008, **8**, 234-239 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/nnano.2008.54>
- [62] YU, Bai, Ji HENG a Cao YAN. *Titanium alloy pulse-direct current anodic oxidation surface treatment method*. CN110863227 (A). Zapsáno 03.06.2020.
- [63] HONGYI, Li, Wang JINSHU, Su PENGLEI a Wang FEI. *Method for preparing highly ordered titanium dioxide nanotube array thin film by pulse anodic oxidation*. CN103924279 (A). Zapsáno 16.07.2014. MORAVEC, Hynek, Jaroslav FOJT, Vladimír FILIP a Luděk JOSKA. Modifikace povrchu titanu pro medicínské aplikace. *Chemické listy* [online]. 2014, **108**, 40-45 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014_01_40-45.pdf
- [64] BENEŠOVÁ, Jaroslava a Markéta PARÁKOVÁ. Zkušební metody pro hodnocení přilnavosti organických povlaků. *Tribológia* [online]. Žilina [cit. 2021-7-13]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-52013/zkusebni-metody-pro-hodnoceni-prilnavosti-organickych-povlaku.html>
- [65] Odtrhoměry. *Gamin* [online]. Ostrava, c2021 [cit. 2021-7-13]. Dostupné z: <https://www.gamin.cz/odtrhomery/>
- [66] SLOVINEC, Miroslav. *Dočasná protikorozní ochrana nátěrovými hmotami* [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-7-13]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73426/F2-BP-2017-Slovinec-Miroslav-BP_Docasna%20protikorozni%20ochrana%20naterovymi%20hmotami_Slovinec.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [67] Hodnocení přilnavosti nátěru. *Nátěrové hmoty Atryx s.r.o* [online]. Praha [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: <https://atryx.cz/prakticka-prirucka/16-hodnoceni-prilnavosti>

- [68] Mřížková zkouška přilnavosti. *Proinex Instruments: Měřicí přístroje - tloušťkoměry, leskoměry, tvrdoměry - Proinex* [online]. Ostrava, c2017 [cit. 2021-7-13]. Dostupné z: https://www.proinex.cz/cs/blog/11_mrizkova-zkouska-prilnavosti#:~:text=M%C5%99%C3%AD%C5%BEkov%C3%A1%20zkou%C5%A1ka%20p%C5%99ilnavosti%20Principem%20zkou%C5%A1ky%20je%20vy%C5%99ezat%20do,p%C5%99ilo%C5%BE%C3%AD%20se%20adhezivn%C3%AD%20p%C3%A1ska%2C%20kter%C3%A1%20se%20n%C3%A1sledn%C4%9B%20odtrhne.z)
- [69] *Technologické vlastnosti povrchových vrstev* [online]. Podklady k předmětu Technologie 1 [cit. 2021-7-16]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/105/vady-pu-podkl.pdf>
- [70] ČSN EN ISO 16276-2. *Ochrana ocelových konstrukcí proti korozi ochrannými nátěrovými systémy – Hodnocení a kritéria přijetí, adheze/koheze (odtrhová pevnost povlaku – Část 2: Mřížková zkouška a křížový řez*. Český normalizační ústav, 2008.
- [71] ČSN EN ISO 6860. *Nátěrové hmoty – Zkouška ohybem (na kónickém trnu)*. Český normalizační institut, 2006.
- [72] HELLER, Jakub. *Interaktivní termocitlivé nátěrové systémy pro bezpečnostní účely* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-7-13]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80522/F2-DP-2018-Heller-Jakub-Jakub%20HELLER%20-%20Diplomova%20prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [73] EN AW-5754 (AlMg3): Vlastnosti. *PROAL Ostrava: Hliníkové profily, tyče, plechy a desky* [online]. Ostrava [cit. 2021-8-2]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-5754/>
- [74] Material data sheet AlMg3. *Seeberger* [online]. Schalksmühle [cit. 2021-8-2]. Dostupné z: https://www.seeberger.net/_assets/pdf/werkstoffe/aluminium/en/AlMg3
- [75] Odmašťování. *MEDUNA vakuová kalírna* [online]. Pardubice, c2020 [cit. 2021-8-2]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/we-are-a-member-of/33-odmastovani.html>
- [76] Moření kovů. *1.plzeňská galvanovna: Zinkování, moření, chromátování* [online]. Plzeň, c2008 [cit. 2021-8-2]. Dostupné z: <http://www.galvanovna.cz/moreni-kovu.html>
- [77] Digitální profiloměr Elcometer 224. *Elcometer.cz* [online]. Ostrava [cit. 2021-7-13]. Dostupné z: <https://www.elcometer.cz/elcometer-224/#lg=1&slide=1>
- [78] SLOVINEC, Miroslav. *Vliv Mg částic v matrici organických nátěrových hmot na abrazivní odolnost povlaků* [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84775/F2-DP-2019-Slovinec-Miroslav-DP_Vliv%20Mg%20castic%20v%20matrici%20organickych%20naterovych%20hmot%20na%20abrazivni%20odolnost%20povlaku_Slovinec.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [79] Rozdíl mezi organickou kyselinou a anorganickou kyselinou. *Znát – Strephonsays* [online]. [cit. 2021-7-16]. Dostupné z: <https://cs.strephonsays.com/difference-between-organic-acid-and-inorganic-acid>

- [80] BALOVÁ, Martina. Kyseliny. *Výukové materiály – Martina Balová* [online]. [cit. 2021-7-16]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/balovamhtml/chemie/kyseliny>
- [81] Chrom. *Periodická tabulka prvků* [online]. c1998-2021 [cit. 2021-7-16]. Dostupné z: <https://www.tabulka.cz/prvky/ukaz.asp?id=24>
- [82] Šestimocný chrom: Co je třeba vědět. *HBM4EU: Science and policy for a healthy future* [online]. [cit. 2021-7-16]. Dostupné z: https://www.hbm4eu.eu/wp-content/uploads/2019/09/Chromium-VI-factsheet-HBM4EU_CS.pdf
- [83] SEDLÁČKOVÁ, Eva Michelle. *Předúpravy povrchu úzkých štěrbin ocelových konstrukcí* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: file:///C:/Users/lucka/Downloads/F2-DP-2020-Sedlackova-Eva%20Michelle-Diplomova_prace_Sedlackova.pdf. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [84] ŠVORC, Jan. *Progresivní technologie povrchových úprav slitin Al* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80634/F2-DP-2018-Svorc-Jan-dp_final_1.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [85] Ceník. *Povrchové úpravy kovových dílů: Prášková Lakovna Baumruk Plzeň* [online]. Plzeň, c2021 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: <https://www.lakovna-baumruk.cz/cenik>

13 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma anodické oxidace [12].....	15
Obr. 2: Příklad barev dosažitelných anodickou oxidací [15]	16
Obr. 3: Vrstva po anodické oxidaci a po utěsnění [15]	16
Obr. 4: Schéma zapojení pro proces PEO [19].....	26
Obr. 5: Odtrhová zkouška dle ČSN EN ISO 4626 [67]	33
Obr. 6: Digitální profiloměr Elcometer 224 [77]	37
Obr. 7: Odtrhová zkouška na vzorcích 2-1, 3-1 - Anodická oxidace stříbrná (vlevo) a práškový plast (vpravo)	38
Obr. 8: Odtrhová zkouška na vzorku 1-1 - Anodická oxidace černá	39
Obr. 9: Odtrhová zkouška na vzorcích 1-2, 1-3 - Anodická oxidace černá	39
Obr. 10: Odtrhová zkouška na vzorcích 2-2, 2-3 - Anodická oxidace stříbrná.....	40
Obr. 11: Odtrhová zkouška na vzorcích 3-2, 3-3 - Práškový plast.....	40
Obr. 12: Odtrhoměr Elcometer 510 Model T	41
Obr. 13: Jednofázové lepidlo Scotch-Weld™ (vlevo) a dvoufázové lepidlo UHU Plus (vpravo)	41
Obr. 14: Šablona pro zkoušku mřížkovým řezem - Zehntner ZFC 2088 [78]	42
Obr. 15: Zkouška mřížkovým řezem na vzorcích 1-1, 1-2, 1-3 – Anodická oxidace černá.....	42
Obr. 16: Zkouška mřížkovým řezem na vzorcích 2-1, 2-2, 2-3 – Anodická oxidace stříbrná .	42
Obr. 17: Zkouška mřížkovým řezem na vzorcích 3-1, 3-2, 3-3 – Práškový plast.....	42
Obr. 18: Zkouška křížovým řezem na vzorcích 1-1, 1-2, 1-3 – Anodická oxidace černá.....	43
Obr. 19: Zkouška křížovým řezem na vzorcích 2-1, 2-2, 2-3 – Anodická oxidace stříbrná	44
Obr. 20: Zkouška křížovým řezem na vzorcích 3-1, 3-2, 3-3 – Práškový plast.....	44
Obr. 21: Zařízení pro ohyb na kónickém trnu [71].....	45
Obr. 22: Vzorky 1-5 a 1-6 po zkoušce ohybem na kónickém trnu – Anodická oxidace černá	45
Obr. 23: Vzorky 2-5 a 2-6 po zkoušce ohybem na kónickém trnu – Anodická oxidace stříbrná	45
Obr. 24: Vzorky 3-5 a 3-6 po zkoušce ohybem na kónickém trnu – Práškový plast	46

14 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Parametry metody Dow 17 pro střídavý proud [12]	20
Tabulka 2: Chemické složení elektrolytu pro proces HAE [32]	20
Tabulka 3: Parametry procesu HAE v závislosti na tloušťce vrstvy [31]	20
Tabulka 4: Vybraná složení elektrolytu a parametry vhodné pro toto složení [35]	22
Tabulka 5: Rozdělení vrstev po aplikaci metody Anomag do tříd [32]	29
Tabulka 6: Porovnání anodické oxidace v elektrolytu borité kyseliny sírové a kyseliny chromové	31
Tabulka 7: Vyhodnocení odtrhové zkoušky dle ČSN EN ISO 4626 [66].....	33
Tabulka 8: Vyhodnocení zkoušky mřížkovým řezem dle ČSN EN ISO 2409 [67].....	34
Tabulka 9: Vyhodnocení zkoušky křížovým řezem dle ČSN EN ISO 16276-2 [67, 70]	35
Tabulka 10: Vzorok pro experimentální část	36
Tabulka 11: Chemické složení slitiny hliníku AlMg3 [74].....	36
Tabulka 12: Měření tloušťky povrchové vrstvy	37
Tabulka 13: Celkové vyhodnocení odtrhové zkoušky	38
Tabulka 14: Vyhodnocení odtrhové zkoušky při použití jednofázového lepidla.....	39
Tabulka 15: Vyhodnocení odtrhové zkoušky při použití dvoufázového lepidla pro vzorky X-2	40
Tabulka 16: Vyhodnocení odtrhové zkoušky při použití dvoufázového lepidla pro vzorky X-3	40
Tabulka 17: Vyhodnocení zkoušky mřížkovým řezem dle ČSN EN ISO 2409	43
Tabulka 18: Vyhodnocení zkoušky křížovým řezem dle ČSN EN ISO 16276-2	44
Tabulka 19: porovnání výsledků odtrhové zkoušky všech sad vzorků	47
Tabulka 20: Porovnání výsledků zkoušky mřížkovým řezem	48
Tabulka 21: Porovnání výsledků zkoušky křížovým řezem.....	48
Tabulka 22: Porovnání výsledků zkoušky ohybem na kónickém trnu.....	49
Tabulka 23: Porovnání cen anodické oxidace a práškového plastu [84, 85].....	51

15 SEZNAM PŘÍLOH

Po dohodě s vedoucím práce budou veškeré přílohy a fotografie nahrány také na CD.

Přílohy:

Příloha 1 – Materiálové listy slitiny AlMg₃

Příloha 2 – Naměřené hodnoty při měření tloušťky

PŘÍLOHA 1

Materiálové listy slitiny AlMg₃

Material data sheet AlMg3

Chemical composition to DIN EN 573-3 [in % of the mass, rest Al]

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Mn+Cr
min.	-	-	-	-	2,60	-	-	-	-	-	-	0,10
max.	0,40	0,40	0,10	0,50	3,60	0,30	-	0,20	0,15	-	-	0,60

Mechanical properties to DIN EN 754-2 / drawn tubes

Temper	Wall thickness t mm	R_m MPa		$R_{p0,2}$ MPa		A %	$A_{50,mm}$ %	HBW typical value
		min.	max.	min.	max.			
O, H111	≤ 20	180	250	80	-	16	14	45
H14, H24, H34	≤ 10	240	290	180	-	4	3	75
H18, H28, H38	≤ 3	280	-	240	-	3	2	88

Mechanical properties to DIN EN 755-2 / extruded tubes

Temper	Wall thickness t mm	R_m MPa		$R_{p0,2}$ MPa		A %	$A_{50,mm}$ %	HBW typical value
		min.	max.	min.	max.			
F, H112	≤ 25	180	-	80	-	14	12	47
O, H111	≤ 25	180	250	80	-	17	15	45

(No responsibility is accepted for the accuracy of this information)

Seeberger GmbH & Co. KG
 Langenstück 4
 D-58579 Schalksmühle
 Telefon: +49 (0) 2351 9531-0
 Telefax: +49 (0) 2351 9531-300
 E-Mail: info@seeberger.net
 Internet: www.seeberger.net

PŘÍLOHA 2

Naměřené hodnoty při měření tloušťky

Uvedená tloušťka povrchových vrstev je udávána v mikrometrech.

Sada vzorků: 1 – Anodická oxidace černá

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	Směrodatná odchylka
1-1	20	15	19	14	11	25	13	17	20	17	17,1	3,88
1-2	33	24	27	17	19	21	24	20	21	24	23	4,34
1-3	29	18	10	14	17	15	20	14	13	14	16,4	4,96
1-4	28	28	19	21	24	20	21	9	9	25	20,4	6,42

Průměr ze všech naměřených hodnot: 19,225 μm

Směrodatná odchylka ze všech hodnot: 5,65 μm

Sada vzorků: 2 – Anodická oxidace stříbrná

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	Směrodatná odchylka
1-1	10	25	17	29	18	11	27	10	20	10	17,7	7,04
2-2	11	21	26	18	10	36	11	21	11	13	17,8	8,01
2-3	24	13	16	13	6	7	38	35	33	19	20,4	11,01

Poznámka: Pro vzorek 2-4 nemohlo být provedeno přené měření tloušťky povlaku, kvůli zdeformovanému profilu vzorku.

Průměr ze všech naměřených hodnot: 18,633 μm

Směrodatná odchylka ze všech hodnot: 8,94 μm

Sada vzorků: 3 – Práškový plast

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	Směrodatná odchylka
3-1	63	69	61	47	64	63	56	64	59	67	61,3	5,92
3-2	60	70	53	54	57	65	52	60	53	63	58,7	5,69
3-3	59	89	80	67	80	72	77	65	65	57	71,1	9,75
3-4	54	72	49	49	60	61	54	59	55	61	57,4	6,47

Průměr ze všech naměřených hodnot: 62,125 μm

Směrodatná odchylka ze všech hodnot: 8,94 μm