ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Materiály a povrchové úpravy aplikované v leteckém průmyslu a jejich korozní odolnost

Bakalářská práce

AUTOR: Danis Bikmeev

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

KONZULTANTKA: Ing. Eva Michelle Sedláčková

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství

PRAHA 2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bikmeev** Jméno: **Danis** Osobní číslo: **475461**

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:

Materiály a povrchové úpravy aplikované v leteckém průmyslu a jejich korozní odolnost

Název bakalářské práce anglicky:

Materials and surface treatments applied in the aviation industry and their corrosion resistance

Pokyny pro vypracování:

1) Přehled materiálů a povrchových úprav v letectví
2) Korozní odolnost slitin Al a Mg
3) Korozní odolnost povrchových úprav používaných v letectví
4) Diskuze výsledků

Seznam doporučené literatury:

1. KREIBICH, V., Teorie a technologie povrchových úprav, Praha, ČVUT, Praha, 1999.
2. MICHNA, Š., LUKÁC, I., OCENÁŠEK, V., KORENY, 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.	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

. Datum převzetí zadání

Podpis studenta

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

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Kuchaře Ph.D., IWE, a to pouze za pomoci 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

Anotace

Název bakalářské práce:	Materiály a povrchové úpravy aplikované v leteckém průmyslu a jejich korozní odolnost
Autor bakalářské práce:	Danis Bikmeev
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE
Konzultantka:	Ing. Eva Michelle Sedláčková
Akademický rok:	2020/21
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah bakalářské práce:	Počet stran: 54 Počet obrázků: 22 Počet grafů: 3 Počet tabulek: 9
Klíčová slova:	Materiály v leteckém průmyslu, povrchové úpravy v leteckém průmyslu, koroze, korozní odolnost, anodická oxidace

Abstrakt:

Tato práce se zabývá materiály a povrchovými úpravami používanými v leteckém průmyslu. Zabývá se korozní odolností hliníkových a hořčíkových slitin. Dále řeší problematiku korozní odolnosti povrchových úprav používaných v letectví. Experimentální část zkoumá a vyhodnocuje korozní odolnost vzorků s dekorativní anodickou oxidací a práškovou barvou v prostředí kondenzační komory a solné lázně.

Annotation

Title of the final thesis:	Materials and surface treatments applied in the aviation industry and their corrosion resistance
Author:	Danis Bikmeev
Supervisor:	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE
Consultant:	Ing. Eva Michelle Sedláčková
Academic year:	2020/21
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Depatment:	12133 – Depatment of manufacturing technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Extent:	Pages: 54 Pictures: 22 Graphs: 3 Tabels: 9
Keywords:	Materials in the aerospace industry, surface treatments in the aerospace industry, corrosion, corrosion resistance, anodic oxidation.

Abstract:

This work deals with materials and surface treatments used in the aviation industry. It deals with the corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys. It also addresses the issue of corrosion resistance of surface treatments used in aviation. The experimental part examines and evaluates the corrosion resistance of samples with decorative anodic oxidation and powder paint in the environment of condensation chamber and salt bath.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat paní Ing. Evě Michelle Sedláčkové za korekturu mé práce a odborné rady, které mi udělila.

Obsah

Úvod **1**

Teoretická část **2**

1. Přehled materiálu a povrchových úprav v letectví **2**

1.1 Materiály v letectví 2

1.1.1 Hliník 2

1.1.1.1 Hliníkové slitiny Al–Cu–Mg 2

1.1.1.2 Hliníkové slitiny Al–Zn–Mg 2

1.1.1.3 Hliníkové slitiny Al–Cu–Li 3

1.1.1.4 Hliníkové slitiny Al-Mg-Si 3

1.1.2 Titan 3

1.1.2.1 Titanová slitina Ti-13V-11Cr-3Al 3

1.1.2.2 Titanová slitina Ti-6Al-4V 3

1.1.2.3 Titanová slitina Ti-7Al-4Mo 4

1.1.3 Železo 4

1.1.3.1 Žáropevné oceli v letectví 5

1.1.3.2 Nelegované oceli 6

1.1.3.3 Nízkolegované oceli 6

1.1.3.4 Vysokolegované oceli 6

1.1.3.5 Chrom-niklové oceli 6

1.1.4 Kompozitní materiály v letectví 7

1.1.4.1 Sendvičové materiály 7

1.1.4.2 Kompozitní materiály s uhlíkovými vlákny 7

1.2 Povrchové úpravy v letectví 8

1.3 Systém nátěrových hmot 8

1.3.1 Epoxidové nátěry základního systému 8

1.3.2 Vrchní nátěrový systém 8

1.4 Dekorativní anodická oxidace 9

1.5 Tvrdá anodická oxidace 10

1.6 Chromování 11

1.6.1 Vlastnosti a výskyt 11

1.7 Kadmiování 12

1.8 Současné trendy anodické oxidace 12

1.8.1 Proces elektrolytické oxidace v plazmě 13

1.8.1.1 Oxidace substrátu 13

1.8.1.2 Povrchová úprava plazmatem 13

1.8.1.3 Začlenění prvků elektrolytu do povlaku 14

1.8.2 Parametry procesu 14

1.8.3 Vlastnosti povlaku 14
1.8.3.1 Povrch 14
1.8.3.2 Extrémní tvrdost 15
1.8.3.3 Šetrnost k životnímu prostředí 15
1.8.4 Zkoušky povlaku a jeho kontrola 16
1.8.4.1 Vizuální kontrola 16
1.8.4.2 Kontrola tloušťky 17
1.8.4.3 Hmotnostní test 17
1.8.4.4 Korozní zkouška 18
2. Koroze 19
2.1 Podle druhu korozního prostředí 19
2.1.1 Atmosférická koroze 19
2.1.2 Koroze v kapalinách 21
2.1.3 Půdní koroze 22
2.2 Podle vnitřního mechanismu 22
2.2.1 Chemická koroze 22
2.2.2 Elektrochemická koroze 22
2.3 Ochrana proti korozе 23
2.3.1 Povrchové ochranné povlaky kovů 23
2.3.2 Úprava prostředí 23
2.3.3 Volba materiálu 23
2.3.4 Konstrukční řešení 23
2.4 Korozní zkoušky 24
3. Korozní odolnost slitin Al a Mg 25
3.1 Koroze hliníku 25
3.1.1 Atmosférická koroze 25
3.1.2 Kapalné prostředí 25
3.1.3 Kyselá prostředí 26
3.1.4 Alkalické prostředí 26
3.2 Koroze hořčíku 27
3.2.1 Kapalné prostředí 27
3.2.2 Roztoky solí 27
3.2.3 Kyselá prostředí 27
3.2.4 Alkalické prostředí 27
3.2.5 Organické sloučeniny 28
3.2.6 Plyny za vyšších teplot 28
4. Korozní odolnost povrchových úprav používaných v letectví 29
4.1 Korozní odolnost chromování 29
4.2 Korozní odolnost oxidace plazmatem 29

4.3 Korozní odolnost anodické oxidace 30
4.4 Korozní odolnost nátěrových hmot 30
4.5 Korozní odolnost kadmiování 30
Praktická část 32
5. Popis experimentální části 32
5.1 Použitý materiál a povrchová úprava 34
5.2 Kondenzační komora 36
5.2.1 Výsledek experimentu 38
5.3 Vytvořená solná lázeň 39
5.3.1 Výsledek experimentu 42
6. Závěr 44
Použitá literatura 45
Normy 49
Seznam použitých zkratek a symbolů 50
Použité rovnice 51
Seznam obrázků 52
Seznam tabulek 53
Seznam grafů 54

Úvod

Tato závěrečná práce zkoumá materiály a povrchové úpravy používané v leteckém průmyslu, a především se zabývá jejich korozní odolností.

Ve světovém leteckém průmyslu byl učiněn přechod na slitiny hliníku. Světoví lídři v leteckém průmyslu – Boeing a Airbus – v posledních letech významně rozšířili podíl slitin hliníku na konstrukci letadel. Tyto materiály našly uplatnění v rámci pláště trupu, panelů, křídel a v řadě silových prvků draku letadla.

Jak je známo, v letectví se používá několik typů oxidace. Jedna z nejznámějších je anodická, ale svět pomalu přechází na plazmatickou elektrolytickou oxidaci (PEO).

Eloxování je elektrolytický proces, který se používá k vytvoření ochranné oxidové vrstvy na povrchu hliníkových součástí. Jeden z nejčastějších způsobů je eloxování v kyselině sírové a kromě toho, že dodává dobrou odolnost proti korozi, umožňuje aplikace různých druhů pigmentů na povrch materiálu. Dalším rozšířeným způsobem eloxování je eloxování v kyselině chromové, která materiálu také dodává vysokou odolnost proti korozi, ale má škodlivý vliv na životní prostředí, neboť obsahuje toxickou kyselinu chromovou v množství 30 g/l až 100 g/l .

Na rozdíl od klasického eloxování, PEO oxidace je šetrnější pro přírodu a má lepší mechanické vlastnosti a vyšší korozní odolnost.

Teoretická část

V této části je popsán mechanismus porušující povrch součástí pro letecký průmysl – koroze. Je zde uvedeno, v jakých prostředích ke korozi dochází. Tato část se dále zabývá popisem v letectví nejčastěji používaných slitin, jejich chováním při porušení korozí a výčtem povrchových úprav zabraňující korozi.

1. Přehled materiálů a povrchových úprav v letectví

1.1 Materiály v letectví

Samozřejmě existuje velká škála materiálů používaných v letectví, ale v dané části popisuji jenom nejčastěji používané materiály.

1.1.1 Hliník

Prvek hliník (chemická značka Al) se řadí mezi kovy. Jeho povrch je stříbrný a lesklý, s nádechem do šeda nebo do modra. Jeho vnitřní strukturu tvoří kubická plošně středěná mřížka (FCC). Tato mřížka obsahuje 12 skluzových systémů a vyznačuje se nízkým skluzovým napětím. Tyto dva fakty z hliníku dělají velmi tvárný materiál, tvářitelný za tepla i za studena. K dobrým vlastnostem hliníku patří nízká hustota a malá teplotní roztažnost. [34]

1.1.1.1 Hliníkové slitiny Al–Cu–Mg

Nejčastěji se jedná o slitiny ze třídy s označením 2xxx (podle evropské normy), kde je hlavní přísadou Cu (měď). Dané slitiny mají dobré mechanické vlastnosti, ale zároveň nižší odolnost vůči korozi. Pro dosažení vyšší pevnosti je potřeba využití povrchové úpravy – vytvrzování. Obsah přidané mědi se pohybuje v rozmezí 4 až 4,8 hm %. Další přísadou, jak je vidět, je Mg (hořčík). Ten zlepšuje precipitační vytvrzování do slitiny a zároveň navyšuje pevnostní vlastnosti slitiny. Obsah Mg je nejčastěji v rozmezí 0,4 až 1,8 hm % v závislosti na slitině. Občas se do slitiny typu Al-Cu-Mg přidává i Mn (mangan) pro zjemnění zrna slitiny. [34,35]

1.1.1.2 Hliníkové slitiny Al–Zn–Mg

Daný typ slitin je označován jako 7xxx (podle evropské normy). Slitiny s přísadou zinku vykazují vysoké korozivzdorné vlastnosti a mají nejvyšší pevnostní charakteristiky ze všech hliníkových slitin. Nevýhodou je snížení plasticity hliníku zinkem. Občas se jako přísada do tohoto typu slitin používá Ti (titan), Zr (zirkonium) nebo dokonce i obojí. Tyto dva prvky snižují výskyt trhlin při svařování. [34, 35]

Tento typ slitin se využívá na konstrukce, které vyžadují vyšší pevnost, houževnatost a korozní odolnost, např. vzpěry, žebra, potah křídel. [34, 35]

1.1.1.3 Hliníkové slitiny Al–Cu–Li

Patří sem typy slitin s označením 2xxx a 8xxx (podle evropské normy). Podmínkou při použití daného typu slitin je umělé stárnutí během vytvrzování. Jednou z přísad je Li (lithium), který snižuje výskyt pomalejší plastické deformace materiálu (creepovost) při svařování. Vytvrzování je nezbytným prvkem pro dosažení nejlepších vlastností. [34, 35]

Uplatňování slitin Al-Cu-Li je u součástí, které vyžadují vysokou houževnatost, např. vstupní plechy na kryt motoru. [34, 35]

1.1.1.4 Hliníkové slitiny Al-Mg-Si

Tento daný typ slitin je označován jako 6xxx (podle evropské normy). V porovnání s binárními slitinami (např. slitiny Al-Mg), slitiny daného typu vykazují lepší svařitelnost, odolnost vůči korozi. Přidáním Si (křemíku) zvyšujeme odolnost proti otěru celé slitiny díky své tuhé části. [34, 35]

Tento typ slitiny je nejčastěji využíván na spodní části trupu letadla. [34, 35]

1.1.2 Titan

Titan je kov s řadou výborných vlastností. Disponuje korozní odolností, malou tepelnou roztažností ($8{,}15 \times 10^{-6}$ cm/cm×°C), nízkou tepelnou vodivostí ($16\ \mathrm{W/m \times K}$) a velkou mezí únavy. Na rozdíl od jiných kovů má titan také velkou měrnou tepelnou kapacitu a vysoký bod tání, který se rovná 1665 °C. Pevností odpovídá konstrukčním ocelím, modul pružností má však nižší. Jeho vzhled je bílé barvy. [36]

1.1.2.1 Titanová slitina Ti-13V-11Cr-3Al

Do tohoto typu patří slitiny pod názvem B120VCA. Využívá se za extrémních podmínek při teplotách -54 °C až +315 °C. Tento typ slitin zaručuje vysokou pevnost (dosaženou pomocí stárnutí), která nabývá velečiny až 825 MPa. Díky svým vlastnostem je slitina B120VCA známá jako konstrukční materiál. [37]

Nejčastěji se tento typ slitin využívám při konstrukci draků. [37]

1.1.2.2 Titanová slitina Ti-6Al-4V

Tato slitina je jedna z nejrozšířených slitin titanu a v leteckém průmyslu má využití kolem 80 % celého objemu produkce titanu. Přísadou hliníku je dosažena stabilizace fáze α a přísadou vanadu je dosažena stabilizace fáze β. Občas se vyskytuje i kyslík, dusík. Pro lepší pevnostní vlastnosti je potřeba navýšení obsahu dusíku a kyslíku ve slitině. Nejběžnější obsah těchto prvků

činí 0,08 až 0,2 % a dusík nabývá maximálně 0,05 %, ale při opačném jevu (snížení obsahu těchto prvků) se zlepšují vlastnosti jako: tažnost, korozní odolnost, odolnost proti výskytu trhlin a samozřejmě i houževnatost. [37]

Slitina Ti-6Al-4V se používá na výrobu lopatek kompresoru, na konstrukce draků a skříně motoru. [37]

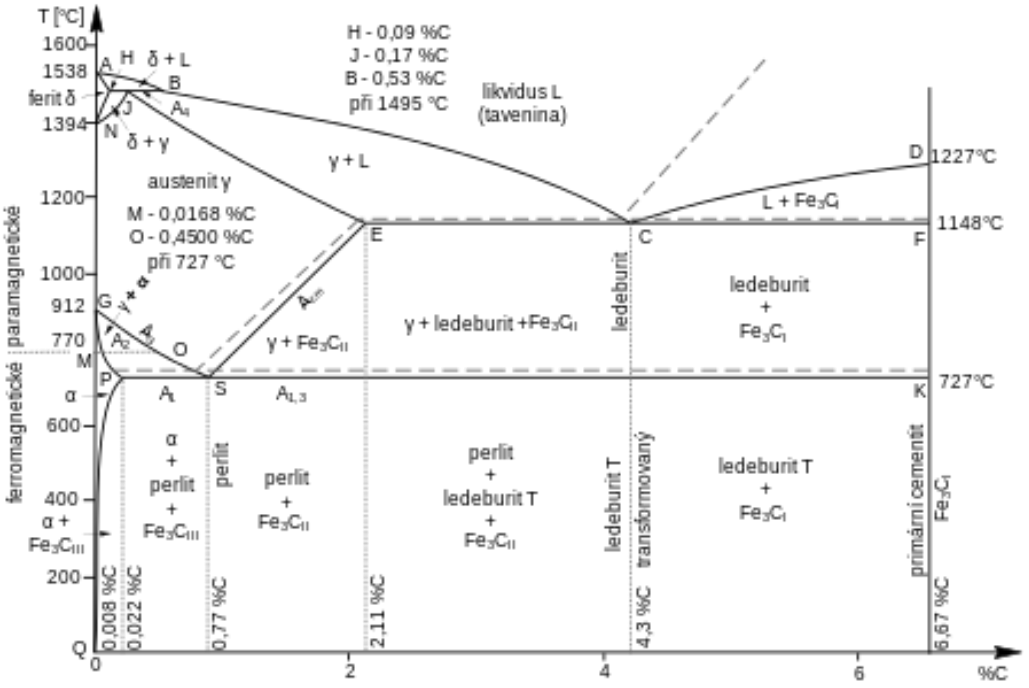
1.1.2.3 Titanová slitina Ti-7Al-4Mo

Velkou výhodou této slitiny je vyšší pevnost oproti slitině typu Ti-6Al-4V. Využívá se nejčastěji při teplotách maximálně 480 °C. Přísadou molybdenu je dosahována i poměrně vysoká teplota využití a snadnější aplikace tepelného zpracování. Na druhou stranu se zvyšuje odolnost vůči deformaci při kování. [37]

Slitina Ti-7Al-4Mo se nejčastěji využívá pro odlévání disku leteckého motoru, kvůli požadované stabilitě za vyšších teplot. [37]

1.1.3 Železo

S technickou praxí je nejčastěji spojováno železo, dokonce je označováno jako nejvýznamnější technický kov. V čisté formě je velmi měkké a má nízkou pevnost. Parametr, který ovlivňuje vlastnosti a chování železa, je teplota. Podle rostoucí teploty železo postupně přechází do různých modifikací, obvykle do 3 až 4. První modifikací je železo alfa. Strukturu Fe alfa tvoří kubická prostorově středěná mřížka (BCC). V této fázi se Fe vyznačuje feromagnetickými vlastnostmi, které se však ztrácí při překonání teploty 768 °C – tzv. Currieho teploty. Poté se Fe alfa označuje jako paramagnetické. Ke vzniku druhé modifikace dochází při dosažení teploty první rekrystalizace – 910 °C. Fe alfa se mění na Fe beta. Překročení teploty 1. rekystalice je provázeno změnou krystalické mřížky z BCC na kubickou plošně středěnou FCC – Fe beta přechází do třetí modifikace – Fe gama. V této modifikaci setrvá do teploty 2. rekrystalizace 1394 °C. Po překročení dojde ke změně krystalické mřížky zpět na BCC. Mezi teplotami 1394 až 1538 (bod tání) je Fe ve 4. modikaci – Fe delta. [38]



Obrázek 1 Binární diagram Fe-Fe3C [39]

1.1.3.1 Žáropevné oceli v letectví

Třídění žáropevných ocelí:

1) Podle struktury:
    a. Feritické
    b. Austenitické
2) Podle chemického složení:
    a. Nelegované
    b. Nízkolegované
    c. Vysokolegované oceli
    d. Chrom-niklové oceli

Tyto slitiny jsou vhodné u součástí namáhaných za vyšších teplot díky svým vlastnostem, jako jsou: zachování mechanických vlastností za vyšších teplot, pevnost při tečení, vysoká pevnost v tahu, odolnost proti křehkému porušení, poměrně vysoká mez kluzu, dobrá tažnost. Součásti vyrobené z žárupevných ocelí bývají nejčastěji v přímém kontaktu s plamenem, a proto musí mít dobrou odolnost vůči korozi ve spalinách. [40]

1.1.3.2 Nelegované oceli

Pracovní teplota daného typu oceli je stanovena maximální hodnotou meze tečení. Mez tečení je závislá na různých faktorech a jeden z nejdůležitějších faktorů je napětí. Kvůli tomu mez tečení nemůže byt konstantní. Maximální rozsah teplot nejčastěji nabývá hodnoty až 400 °C. Sem patří oceli, které se nazývají podeutektoidní, a jsou to například: 11 366, 11 418, 11 531, 11 364. [40]

1.1.3.3 Nízkolegované oceli

Povrchová úprava zastává jednu z nejdůležitějších rolí v leteckém průmyslu. Povlaky a nátěrové hmoty přidávají nejen dekorační funkce (například přidání pigmentu na díly, který se využívá jako označení po využití anodické oxidace v kyselině sírové), ale také jako aktivní ochrana všech komponentů nejen proti korozi. [40]

1.1.3.4 Vysokolegované oceli

Tyto oceli jsou založené na feritické struktuře. Rozlišuje se velká řada typů ocelí a slitin s odlišným typem chemického složení, s různou aplikací tepelného zpracování, a odlišným užíváním. Mikrostruktura ovlivňuje míru žárupevnosti. Odolnost vůči korozi jako je žáruvzdornost tvoří rozmezí pracovních teplot. [40]

Pro zpevnění vysokolegovaných ocelí se nejčastěji používá zpevnění:

- Substituční – provádí se vytvářením tuhého roztoku mezi přidávaným elementem a železem. Zpevnění probíhá jen v případě, pokud přidaný prvek zvětšil mřížkovou konstantu daného tuhého roztoku. [40]
- Precipitační – zpevnění se dá provést buď koherentními částicemi nebo nekoherentními. Existuji rozdílné modely zpracování pro oba případy. Nejznámější je rozpouštěcí žíhání a vytvrzení stárnutím. [40]

1.1.3.5 Chrom-niklové oceli

Patří sem oceli s obsahem chromu od 8 do 12 %. Toto množství bylo stanoveno z hlediska dosažení nejlepších korozivzdorných vlastností, pevnosti za vyšších teplot a žáruvzdornosti. V případě navýšení obsahu Cr (chromu) začíná být ocel křehká. Přísadou hliníku lze dodat vysokolegovaným ocelím dobrou svařitelnost bez škodlivého vlivu na pevnost. Tento typ ocelí odolává maximální teplotě 620 °C. [40]

Legujícími prvky jsou W (wolfram), Mo (molybden), Nb (niob), V (vanad), N (dusík), B (bór). Wolfram a molybden vytváří pevnější tuhý roztok díky navýšení stability matrice při vyšších teplotách. Vanad je vynikající legující prvek díky navýšení žárupevnosti oceli. [40]

1.1.4 Kompozitní materiály v letectví

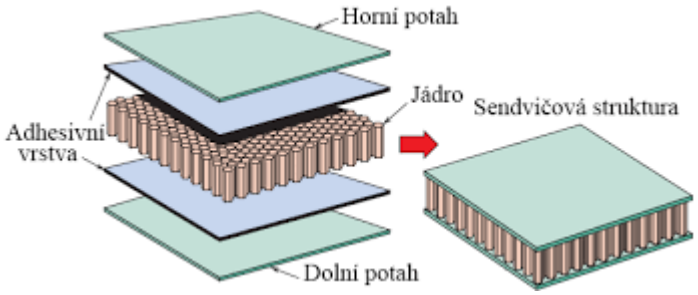
Kompozity lze označit jako materiály složené z více navzájem odlišných fází. Odlišnost spočívá v různých mechanických, chemických a fyzických vlastnostech. Fáze je tvořená matricí a výztuží. Matrice je pevná fáze kdežto výztuž je nespojitá a vyznačuje se lepšími mechanickými vlastnosti– modul pružnosti, pevnost. [38]

Hlavní výhodou kompozitních materiálů je nižší hmotnost oproti kovovým materiálům. Ten rozdíl je přibližně o 20 %, nebo 30 % menší. [42]

1.1.4.1 Sendvičové materiály

Tento typ kompozitních materiálů je tvořen z:

- Jádra, který se vyrábí z nejlehčích materiálů, např. polymerní pěnou nebo kovovou pěnou.
- Dvě povrchové vrstvy, které přidávají tuhost v ohybu. Povrchové vrstvy se dělají buď z kompozitních materiálů, hliníku nebo oceli. [42]



Obrázek 2 Schéma sendvičového panelu [41]

1.1.4.2 Kompozitní materiály s uhlíkovými vlákny

Jedním z nejpoužívanějších kompozitních materiálů v letectví je kompozit tvořený polymerní matricí s uhlíkovými vlákny, označovaný jako CFRP). Kompozity jsou složeny z výztuže a matrice. V tomto případě výztuž tvoří uhlíková vlákna a matrice tvoří oxidované pryskyřice. Samotná uhlíková vlákna jsou vůbec nejčastěji používaná vlákna v leteckých konstrukcích. [42]

Obliba používání uhlíkových vláken v letectví je způsobená zejména jejich nízkou hustotou a velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Značnou nevýhodu však představuje křehkost těchto vláken. Dobré mechanické vlastnosti zapříčiňuje hexagonální struktura grafitu. Pokud je nutné zlepšit mechanické vlastnosti kompozitů – tvrdost a modul pružnosti, lze tak učinit pomocí nanočástic. [42]

1.2 Povrchové úpravy v letectví

Všechny komponenty letadla musí zvládnout extrémní podmínky a musí odolávat rázovým teplotním změnám. Letadla mohou začít svůj let například nad pouští, kde teplota dosahuje až +55 °C a za pár vteřin být ve výšce více než 10 km při teplotě -30 °C a při působení vysokého UV záření. [1]

Povlak musí odolat vlivu abraze, motorové vibrace, ohýbání a namáhání části letadla vlivem turbulence a vzduchu. Nátěrové hmoty a povlaky jsou před každým letem vystavované působení chemikálií potřebných k čištění nebo odmrazování. Nesmí se zapomenout ani na vliv soli z oceánů a na vliv kyselin vzniklých uvolněním zplodin z továren do vzduchu. Oba tyto vlivy působí na nátěrový systém. [1]

1.3 Systém nátěrových hmot

Nátěrové hmoty používané v leteckém a kosmickém průmyslu mohou mít speciální složení používaný právě pro tyto účely. Základ nátěrových hmot tvoří pigment, plnivo a rozpouštědlo. Povlaky jsou navrženy pro dosažení průmyslových standardů. Nátěrový systém je složen z různých typů vrstev a tyto vrstvy mají specifické vlastnosti. Vrstvy potahů můžou být jak anorganické, tak i organické v závislosti na požadovaných vlastnostech nátěrového systému. [23, 24]

Obsah organických těkavých látek (VOC) pro nátěrové hmoty výrobci stanovili jako hodnotu menší než 350 g/l a v případě základního nátěrového systému tato hodnota činí méně než 500 g/l. [57]

1.3.1 Epoxidové nátěry základního systému

Většina základních nátěrů na trhu leteckých povlaků je na principu dvousložkové epoxidové / aminové nátěrové hmoty. Základní složka zahrnuje epoxidové pryskyřice, pigmenty, inhibitory koroze, přísady a rozpouštědla. Druhá složka – vytvrzovací roztok – zahrnuje amin nebo polyamid a různá rozpouštědla. Používá se technologie epoxidové pryskyřice kvůli jejím velmi univerzálním vlastnostem. Mají dobrou přilnavost k základnímu materiálu, dobrou odolnost proti korozi a lze je využít tak, aby vyvážily požadavky na chemickou odolnost, pružnost, odolnost proti nárazu a tvrdost. Nevýhodou těchto systémů je dlouhá doba zasychání základního nátěru a omezená trvanlivost vůči vlivům prostředí. [23]

1.3.2 Vrchní nátěrový systém

Vrchní nátěrový systém je nátěr, který využívané na interiér i na exteriér po celém letadle. Epoxidové vrchní nátěry se využívají pro ochranu konstrukčních dílů díky vysoké odolnosti vůči

korozi a otěruvzdornosti (jejich odolnost vůči tekutinám zajišťuje vysoké kvality protikorozní ochrany). Základní složení epoxidových vrchních nátěrů se podobají základním nátěrovým systémům přičemž se nedají využit jako vrchní nátěrový systém na exteriér kvůli nedostačující odolnosti. [23]

Hustota zesítění je závislá především na chemickém složení. Čím vyšší polyoly mají hydroxylovou funkčnost, tím vyšší je i hustota zesítění a následně tvoření filmu, který není tak flexibilní, ale je chemicky odolnější. Pro zajištění vyšší odolnosti vůči tekutinám a kapalinám ve letectví se využívá vyšší stechiometrický poměr isokyanátových a hydroxylových skupin. [23]

1.4 Dekorativní anodická oxidace

Tato oxidace je jedna z nejpoužívanějších typů anodické oxidace. Vrstva, která vznikne, bude mít po aplikaci nižší otěruvzdornost a korozní odolnost než tvrdá anodická oxidace. Tento způsob úpravy povrchu má četné využití v mnoha odvětvích. Dekorativním eloxem jsou upravovány součásti v leteckém průmyslu a také stěny pražského metra. Výhodou této oxidace je velká porozita, která umožňuje barevnou úpravu oxidické vrstvy celého produktu. Zanášením organických nebo anorganických barevných pigmentů do pórů vrstvy a jejich následným utěsněním lze dostat stabilní barevný vzhled. Díky utěsnění zajistíme dobrou odolnost vůči odírání, blednutí a ztrácení barevných pigmentů. [6]

Obrázek 3 Ukázka dekorativní anodické oxidace [25]

1.5 Tvrdá anodická oxidace

Z chemického hlediska probíhá metoda stejně jako anodická oxidace, která je dekorativní, ale za nižších teplot lázně elektrolytu (až -26 °C). Nejčastěji se používá lázeň s kyselinou sírovou o koncentraci 10-25 hm.%, a to buď s využitím přísad nebo bez využité přísad. Zároveň se také využívá stejnosměrný proud (metoda GS). V důsledku tvrdé anodizace vzniká méně porézní vrstva, která má tloušťku 20 až 150 μm a vysokou tvrdost 350 až 400 HV. [6,7,9,10]

Při využití této metody anodizace je potřeba zajistit hladší povrch aplikovaného materiálu, protože během procesu tvrdé anodizace je riziko vzniku vyšší drsnosti materiálu a tím pádem je kladen vyšší důraz na předúpravu povrchu. Drsnost povrchu se oproti výchozímu stavu zvyšuje přibližně o 0,25 až 0,5 μm u tvářených hliníkových slitin a o 1,25 až 2,5 μm u hliníkových slitin slévárenských. [6]

Slitiny s obsahem Cu ≥ 3 hm.% a Si ≥ 7,5 hm jsou nevhodné pro využití tvrdé anodické oxidace. [11]

Slitinám hliníku s vzrůstající tloušťkou tvrdě anodizované vrstvy dochází k poklesu pevnosti v tahu. Zároveň porezita je nižší a pohybuje se kolem 12 % oproti 25 %, která se získává při dekorativní anodické oxidace. Z toho plyne, že při tvrdé anodické oxidaci se mez únavy materiálu nezmění a nebo mírně vzroste. Při použití dichromanu draselného nebo vroucí deionizované vody se u cyklicky namáhaných součástí výrazně sníží mez únavy. Mezi další důsledky patří snížení tvrdosti a snížení porezity. Tvrdě oxidickou vrstvu není možné barvit pomocí pigmentů. V závislosti na tloušťce během procesu tvrdé anodické oxidace povlak nabývá odstínu ve stupních šedé až černé. [6]

Kluzné vlastnosti anodicky oxidovaných vrstev lze zlepšit například přidáním částic teflonu. Tímto postupem je zabráněno vzniku trhlin a následnému drolení vrstvy neboli efektu vaječné skořápky. Pokud do oxidované vrstvy není přidán teflon po tvrdé oxidaci se na měkkém základním materiálu vytvoří tvrdá a zároveň křehká vrstva, která vede k výše zmíněným trhlinám. [12]

Obrázek 4 Ukázka tvrdé anodické oxidací [26]

1.6 Chromování

1.6.1 Vlastnosti a výskyt

Chrom se řadí mezi velmi tvrdé kovy. Dle Moshovy stupnice je jeho tvrdost 8.5, dle tvrdosti podle Brinella dosahuje tvrdosti až 1 120 MPa. [28]

Jedná se o lesklý bílý a křehký prvek s chemickou značkou Cr, vyznačující se chemickou odolností a stálostí vůči působení většiny chemikálií. Existují pouze dvě sloučeniny, které dokážou chrom rozpustit, a těmi jsou kyselina chlorovodíková a v případě znečištěného chromu kyselina sírová. [28]

Teplota vlastnosti chromu ovlivňuje velmi zřídka. Za běžných teplot není pozorována žádná reakce s ostatními prvky. Při vyšších teplotách nastává reakce s halogeny. Některé kovy s chromem reagují až za teplot okolo 1 000 °C. [28]

Chrom se dále vyznačuje odolností proti korozi – již při nízkém stupni oxidace dojde k pasivaci a povrch získá lesklý vzhled. Má tedy schopnost mít vlastnosti jako ušlechtilý kov. Povrch chromu je nesmáčivý – odpuzuje nečistoty, vodu i mastnotu. [28]

Chrom je kov s vysokou tvrdostí, odolností proti otěru a odolností vůči většině chemikálií (výjimku tvoří HCl a horká H_2SO_4). Přestože se chrom neřadí mezi ušlechtilé kovy, je odolný vůči korozi. Tuto vlastnost způsobuje proces pasivace, jehož spuštění nastartuje i velmi nízká oxidace (např. vlhkost ve vzduchu). Povrch chromu je charakteristicky lesklý a nesmáčivý (odpuzuje vodu, vodné roztoky i mastnotu). Výše zmíněná odolnost proti korozi a nesmáčivost mají však za následek nemožnost chromovaný povrch pájet. [28]

1.7 Kadmiování

Kadmiový povlak, stejně jako zinkový povlak, ale používá se hlavně k ochraně železných kovů před korozí. Pokud je však zinkový povlak za téměř všech podmínek anodický, pak povlak kadmia za určitých podmínek může být anodický a za jiných katodický. V roztocích obsahujících chloridy je kadmium anodou železa. K ochraně mořských produktů lze proto použít kadmiové povlaky. Tomu také napomáhá skutečnost, že kadmium je chemicky stabilnější než zinek. [56]

Ke zvýšení ochranných vlastností kadmiových nátěrů se používá chromátování a fosfátování, jakož i dodatečné využití nátěrových hmot. [55]

Kadmiový povlak není vhodný pro výrobky vystavené kapalinám obsahujícím síru (plynové nádrže, benzínová čerpadla). V uzavřených zařízeních obsahující organické látky, z nichž se zejména v oblastech s tropickým podnebím uvolňuje kyselina mravenčí, octová, propionová nebo máselná, se povlak kadmia ničí tvorbou korozních produktů ve formě bílých vláken. [54]

Vysoká tažnost kadmiového povlaku se používá při potahování závitových částí, čímž je zajištěna těsnost závitových spojů. [54]

1.8 Současné trendy anodické oxidace

S vývojem technologií se mezi povrchovými úpravami neželezných kovů a jejich slitin začíná častěji objevovat mikroobloukova oxidace (MAO), neboli plazmatická elektrolytická oxidace (PEO). [16]

Elektrolytická oxidace bez použití plazmy – anodizace – je převládající technikou po mnoho let. Zavedení plazmy zásadním způsobem mění povlaky a výkonové charakteristiky v náročných aplikacích pro konečné použití. Použití plazmy přináší několik výhod:

- Vývoj tvrdších keramických fází (včetně krystalizace).
- Chemická pasivita – většina PEO keramiky je chemicky inertní.
- Začlenění prvků z elektrolytu do keramiky dává různé vlastnosti.
- Snížená tuhost zajišťuje vysokou přilnavost při mechanickém namáhání nebo tepelném cyklování.
- Hrany jsou bez trhlin.

Povrchové povlaky vytvořené plazmovou elektrolytickou oxidací mohou nabídnout 2–4x větší tvrdost než tvrdé eloxování nebo ocel a poskytují zvýšenou odolnost proti opotřebení.

Kombinace těchto vlastností a komplexnosti ochrany učinila PEO průlomovou inovaci v oblasti povrchového inženýrství. [16]

1.8.1 Proces elektrolytické oxidace v plazmě

1.8.1.1 Oxidace substrátu

Při této oxidaci se součást z lehkého kovu nebo slitiny umístí do elektrolytické lázně. Složení lázně se liší podle požadovaných vlastností PEO povlaku, ale obvykle se jedná o proprietární zředěný vodný roztok. Neobsahuje chrom a jiné těžké kovy. Roztoková kompozice je na jedno použití a je čistá na rozdíl od technik tvrdého eloxování, které používají kyselinu sírovou (H_2SO_4). [16]

V závislosti na požadovaných vlastnostech povlaku lze použít různé elektrické režimy. Například střídáním polarity hliníkového substrátu lze dosáhnout různých tlouštěk povlaků. Vyšší napětí se obvykle používají k vytvoření plazmového výboje. [16]

1.8.1.2 Povrchová úprava plazmatem

U běžného eloxování způsobuje mechanismus růstu trhliny povlaku nebo praskliny v ochranné vrstvě na rozích nebo na nerovném povrchu. Z tohoto důvodu jsou nutná další těsnění nebo ošetření ke zvýšení odolnosti tvrdých eloxovaných dílů proti korozi. Trhliny také snižují únavovou pevnost součástí, které v místě vzniku zvyšují napětí. [16]

U PEO se plazma používá k úpravě povlaku během procesu růstu. To mění mikrostrukturu, což nemá za následek žádné praskliny v tloušťce, a poskytuje následné výhody v korozní odolnosti a únavové pevnosti. [16]

V mnoha případech plazma také způsobuje krystalizaci oxidové vrstvy, což zvyšuje tvrdost a potenciál odolnosti proti opotřebení. Mikro a nanokrystaly, jako je Al_2O_2 (korund v hliníku), periklasa na hořčíku a anatasa / rutil v titanu, mohou být zavedeny do keramické vrstvy pro zvýšení tvrdosti. [16]

Plazmová modifikace také vytváří další atraktivní vlastnosti, jako je chemická pasivita, nízká tuhost a tepelná stabilita. [16]

Obrázek 5 Plazmový výboj kolem součásti ponořené v elektrolytu [29]

1.8.1.3 Začlenění prvků elektrolytu do povlaku

Proces plazmové modifikace umožňuje zabudování prvků elektrolytu do keramického složení vrstvy. To znamená, že existuje možnost vybrat prvky k přizpůsobení vlastností nátěru konkrétně pro aplikaci komponentů. Takto lze například vytvářet černé a bílé povlaky nebo povlaky se stejnými základními vlastnostmi, jako je pórovitost, tvrdost a účinnost procesu. [16]

Právě tato úroveň flexibility a ovladatelnosti vlastností povlaku učinila z PEO tak atraktivní volbu pro praxi. [16]

1.8.2 Parametry procesu

Procesy zapojené do PEO jsou vysoce flexibilní, zvláště ve srovnání s alternativami jako je tvrdé eloxování. Použitím těchto procesů vzniká možnost zvolit si vlastnosti vrstvy tak, aby vybrané vlastnosti co nejlépe vyhovovaly konečnému použití komponentů:

- Předběžná úprava je u PEO jednodušší. V mnoha případech můžou hliníkové součásti před ošetřením vyžadovat pouze lehké odmaštění. Pro srovnání, většina procesů eloxování a pokovování vyžaduje čistší povrch, který vyžaduje kroky odmašťování, leptání a odstraňování, aby byla zajištěna vysoce kvalitní povrchová úprava.
- Aplikované elektrické parametry lze upravit na základě preferované morfologie povrchu. Morfologie povlaků mohou být vytvořeny pomocí stupnic střední délky od rozsahu nanometrů po mikrony.
- Lze vyvinout procesní chemii pro vytvoření různých povlaků a zpracování různých kovů a slitin.

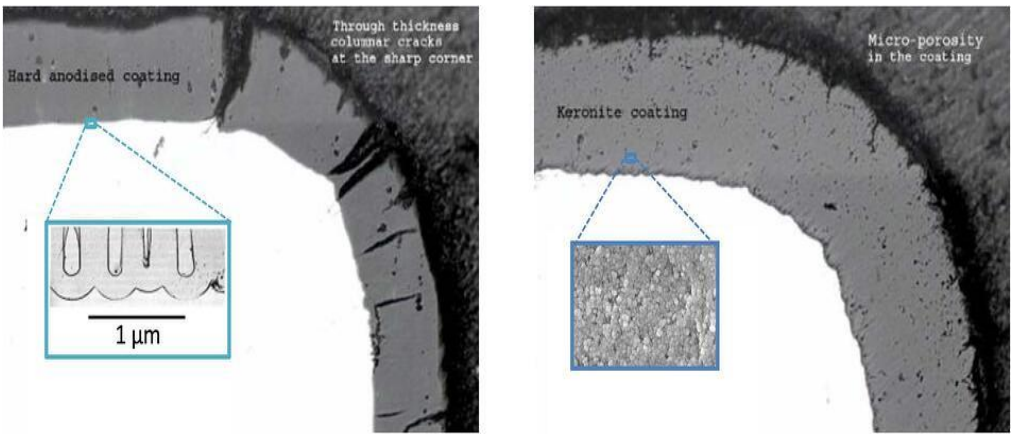
Při optimalizaci PEO vrstvy pro konkrétní použití je v celkové kvalitě a udržitelnosti součásti zásadní schopnost zlepšit vlastnosti povlaku. [16]

1.8.3 Vlastnosti povlaku

1.8.3.1 Povrch

Obecně se PEO povlaky se vyznačují dobrým pokrytím komponentů ve srovnání s přímými procesy, jako je lakování, práškové lakování a plazmové nebo plamenové stříkání. Izolační vlastnosti povlaku také zajišťují dobrou rovnoměrnost v rozích a na okrajích. Barvy mají tendenci ředit se v rozích, zatímco techniky galvanického pokovování mají tendenci v rozích zesilovat. [16]

Jak je znázorněno na obrázku 4, vrstvy PEO se vyznačují svou komplexní mikrostrukturou. Přítomnost mikrokrystalů nepravidelného tvaru a dalších vlastností poskytuje v rozích komplexnější ochranu než praskliny v tloušťce jasně viditelné v tvrdých eloxovaných povlacích. [16]



Obrázek 6 Srovnávaní struktury tvrdého eloxu (vlevo) a PEO (vpravo) [30]

1.8.3.2 Extrémní tvrdost

Vzhledem k tomu, že je stále více žádoucí pracovat s lehkými slitinami, a to jak z hlediska výkonu, tak z hlediska nákladů, vzrostla potřeba inovativních povrchových povlaků [16].

Jednou z takových vlastností je extrémní tvrdost vytvořená v PEO. Typické povlaky na hliníku jsou tvrdší než ocel (1600 HV proti 500 HV), přesto může být samotná součástka vyrobená z hliníku až o 66 % lehčí než součástka z oceli. Vlastnosti zvyšující výkon PEO povlaků umožnily lehkým slitinám – dokonce i hořčíku – prominentní využití v leteckém a automobilovém průmyslu. [16]

Tato extrémní tvrdost se získává kombinací krystalizace (oxidů) a společného ukládání prvků z elektrolytu v keramické vrstvě. [16]

1.8.3.3 Šetrnost k životnímu prostředí

Povlaky a povrchové úpravy, které používají těžké kovy (nikl, kobalt, chrom) často obsahují vysoce nebezpečné chemikálie. Předpisy týkající se jejich používání se zpřísňují, což ztěžuje práci s nimi. Konvenční eloxování používá silné kyseliny, což zvyšuje bezpečnost při používání, přepravě a likvidaci. [16]

PEO je ekologicky bezpečnější volba. Elektrolytické lázně jsou obvykle nízké koncentrace, chemicky neškodné, vodné roztoky. Toky procesního odpadu lze obvykle po úpravě pH vypouštět přímo do odtoku, takže provozní licence lze snadno získat. Z tohoto důvodu se tato technika stala

populární ve vysoce technických odvětvích, která vyžadují vysoce výkonné povrchové vrstvy v náročných prostředích. [16]

Následně je vidět srovnání vlastnosti technologie MAO s tvrdou anodickou oxidací hliníku a jeho slitin v tab. 1 [14].

Tabulka 1 Srovnání MAO oxidace s tvrdou anodickou oxidací [14].

	Tvrdá anodická oxidace	**MAO oxidace**
Napětí [V]	20-120	150-800
Proudová hustota [$\mathbf{A/dm^2}$, $\mathbf{g/l^-}$]	1,5-3	5-20
Doba expozice [min]	30–120	desítky minut
Teplota lázně [℃]	< 10	< 50
Typ elektrolytu	kyselý	slabě alkalický
Tvrdost [HV]	300–600	800–2000
Tloušťka oxidické vrstvy [µm]	40–70	> 200
Struktura vrstvy	amorfní	amorfní a nanokrystalický
Odolnost proti opotřebení	vysoká	velmi vysoká
Odolnost proti korozi	střední	vysoká
Porozita	vysoká	nízká
Elektrický izolant	střední	vysoká
Ztráta únavy	vysoká (až 47 %)	střední (až 23 %)
Ekologický dopad	ano	minimální

Teprve později PEO pronikla i do světového vědeckého prostředí. V současné době se tato technologie využívá nejen ve vědě, ale také v různých odvětvích průmyslu. Oproti procesu anodizace Al, Mg nebo Ti představuje PEO nižší zátěž pro životní prostředí. [15]

1.8.4 Zkoušky povlaku a jeho kontrola

1.8.4.1 Vizuální kontrola

Povlak anodické vrstvy vyžaduje velkou spojitost, hladkost, nesmí mít drobivé oblasti, praskliny nebo rýhy a jiné vady, které by snížily praktickou upotřebitelnost eloxovaných dílů a sestav. [17]

Rozdíly ve vzhledu anodického povlaku v důsledku přirozené heterogenity základního kovu v některých částech, jako je přítomnost takových svarů, použitých dílů nebo zpracovaných povrchů, jakož i rozdíl ve velikosti zrna u výkovků, by neměly sloužit jako základ pro odmítnutí anodového povlaku. [17]

1.8.4.2 Kontrola tloušťky

Tloušťka materiálu na který byl nanasen povlak se obecně definuje jako délka mezi povrchem povlaku a jeho fázovou hranicí se základním materiálem. Tato zkouška se provádí pomocí nedestruktivní metody vířivými proudy. Minimální požadovaná tloušťka eloxované vrstvy dle MIL-A8625 je 1 µm. [10]

1.8.4.3 Hmotnostní test

Norma, která určuje hmotnost anodického povlaku je ASTM B 137-95. [19]

Postup zkoušky:

Před provedením zkoušky je potřeba zkušební vzorky zvážit přímo po aplikaci oxidace a tím pádem i před barvením. Na to jsou využívány analytické váhy a podobné stroje, které mají citlivost minimálně 10% celkové hmotnosti anodického povlaku na zkušebním vzorku. Před zvážením se musí vzorky vyčistit a sušit minimálně 30 min při teplotě 200° ± 10 °C a následně nechat vychladnout na teplotu okolí. [19]

Ihned po zvážení povlaku se zkušební vzorek ponoří do roztoku kyseliny fosforečné a chromové po dobu minimálně 5 minut (ne více než 6 minut) při teplotě 212° ± 10 °C. Složení roztoku by mělo být následující:

• Kyselina fosforečná, 85 % - 35 ml.

• Kyselina chromová (CrO3) - 20 g.

• Voda – zbývající objem do 1 000 ml. [19]

Zkušební vzorek musí být odstraněn z roztoku, opláchnut destilovanou vodou, vysušen a zvážen. Ponoření vzorku do roztoku po dobu 5 minut musí být opakováno, dokud není zcela odstraněn povlak, což znamená, že hmotnost vzorku zůstává konstantní. Po rozpuštění 5g anodického povlaku v 1 l roztoku je nutno elektrolytický odstraňovač zlikvidovat. [19]

Po posledním vážení je nutné přesně určit celkovou plochu zkušebního vzorku. [19]

Objemová hustota povlaku se stanoví odečtením miligramové hmotnosti vzorku před odstraněním povlaku a odstraněním výsledku dělením plochy na čtvereční stopy. [19]

1.8.4.4 Korozní zkouška

Odolnost vůči korozi se stanoví na zkušebních vzorcích o rozměrech 7,62 x 25,4 cm a tloušťce 0,08 cm. [20]

Zkušební vzorky by měly být opláchnuty v destilované nebo deionizované vodě, otřeny do sucha měkkým hadříkem a poté testovány v 5 % solném postřiku v souladu s ASTM B 117-11 [20], s výjimkou toho, že kritický povrch by měl být nakloněn ze svislé polohy o 6 stupňů. Vzorky tedy musí být exponovány po dobu 336 hodin. [20]

Po zkoušce solným postřikem by měly být zkušební vzorky vizuálně zkontrolovány, aby se zjistilo, zda jsou splněny všechny následující podmínky:

1) Zkušební vzorky nesmějí mít na celkové zkušební ploše 968 cm^2, stávající se z pěti nebo více zkušebních kusů, ukazovat více než 15 izolovaných korozních prohlubin o průměru nepřesahující 0,08 cm. Plochy do vzdálenosti 0,15 cm od identifikační značky, od okrajů a ze stop kontaktů elektrod zbývajících na povrchu po zpracování. [20]
2) Vzorky pro testování by neměly mít více než 5 izolovaných korozních otvorů o průměru nejvýše 0,08 cm na celkové ploše 193 cm^2 od jednoho nebo více vzorků. Je nutné vyloučit oblasti do 0,15 cm od identifikační značky, od okrajů a od stop kontaktů elektrod, které po zpracování zůstaly na povrchu. [20]
3) Kromě požadavků uvedených v číslech 1. a 2. nesmí zkušební vzorky mít nerovných tmavě šedých ploch (kruhy, pruhy nebo skvrny). [20]

2. Koroze

Koroze je samovolně probíhající nevratný proces postupného narušování a znehodnocování materiálu chemickými a fyzikálně chemickými vlivy prostředí. Je to děj, při kterém kov obvykle přechází do oxidovaného stavu. [2]

2.1 Podle druhu korozního prostředí

2.1.1 Atmosférická koroze

- Venkovská – nejčastěji se jedná prostředí s nejnižší korozní agresivitou. Obecně nemá znečišťující látky, ale obsahují organické nebo anorganické pevné nebo kapalné částice. Složky působení koroze jsou: O2 a CO2. [2]

- Městská – tento typ atmosféry nevyvolává velké napadení koroze v důsledku toho, že tady je nízká průmyslová aktivita. Složky způsobující korozi jsou: SO a NO jako výfukové plyny vozidel. [2]

- Průmyslová – atmosféra je spojená s velkou průmyslovou výrobou (např. farmaceutická továrna, výroba ropy atd.) obsahuje velkou koncentraci oxidu siřičitého, chloridů, fosfátů a nitrátů. [2]

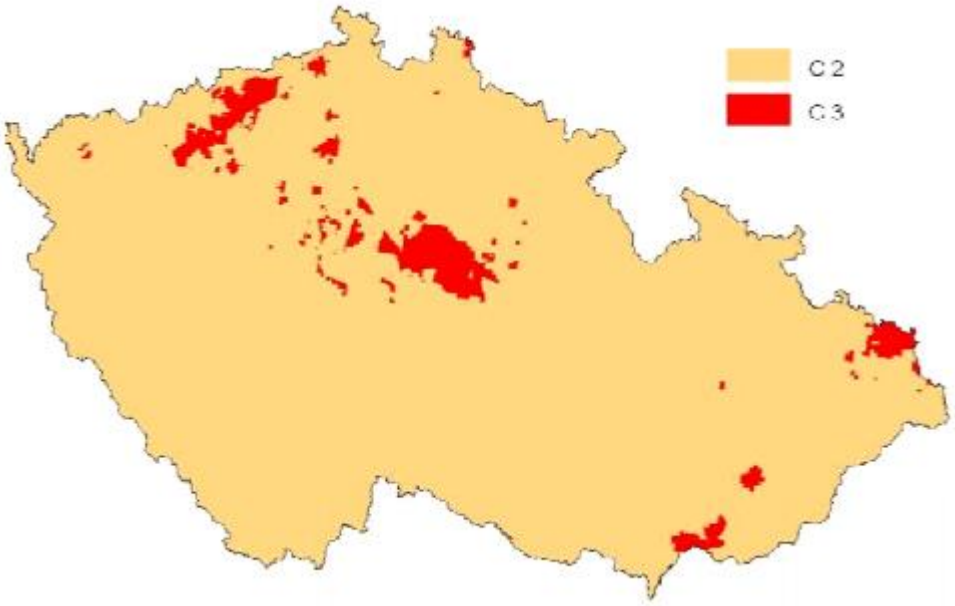
- Mořská – vítr roznáší chloridové částice, které se můžou usazovat na povrchu letadla, turbín. Mořská atmosféra je velice korozivní a míra koroze je spojitá s prouděním vzduchu. [2]

Taky existuje i další systém, který popisuje stupeň atmosférické koroze. Dle stupně korozní agresivity se volí jak materiál, povrchová úprava tak i konstrukční řešení pro návrh požadované součásti. Ten je zobrazen v následující tabulce:

Tabulka 2 Stupně korozní agresivity [52]

Stupeň	Korozní agresivita	Korozní úbytek materiálu	
		Ocel (µm/rok)	Zinek (µm/rok)
C1	velmi nízká	méně než 1,3	méně než 0,1
C2	nízká	1,3-25	0,1-0,7
C3	střední	25–50	0,7-2,0
C4	vysoká	50-80	2,0-4,0
C5	velmi vysoká	80-200	4,0-8,0
CX	extrémní	80-200	8,0-25

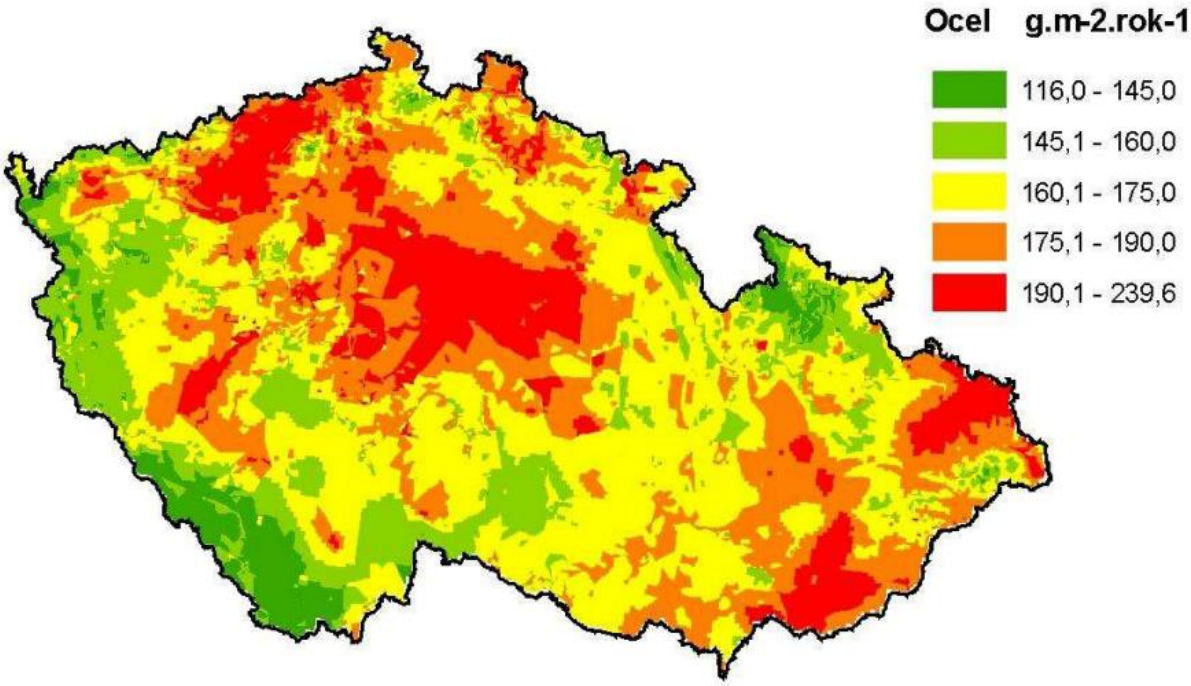
Tabulka 2 popisuje agresivitu korozního prostředí. Každý stát, město je charakterizováno svým stupněm agresivity. Například v oblastech s vyšší koncentrací průmyslových podniků je korozní agresivita vyšší než v chráněných krajinných oblastech. Toto je patrné na následujících obrazcích:



Obrázek 7 Stupně korozní agresivity pro uhlík z roku 2013 [51]

Obrázek 8 Stupně korozní agresivity pro zinek z roku 2013 [51]

Na dalším obrázku 9 je zobrazená podrobnější mapa korozní rychlosti uhlíkové oceli v České republice pro rok 2001.



Obrázek 9 Mapa korozní rychlosti uhlíkové oceli v České republice pro rok 2001 [51]

2.1.2 Koroze v kapalinách

Vznikají elektrochemické korozní články, které vedou ke zničení kovů. K tomuto elektrochemickému procesu dochází pouze v přítomnosti elektrolytu, jako jsou: voda, roztoky kyseliny, soli atd. [5]

K tomu dochází prostřednictvím dvou vzájemně na sobě závislých reakcí – anodické a katodické. Anodická reakce odpovídá oxidaci kovů, tj. koroze. Během tohoto procesu procházejí hydratované kovové ionty do elektrolytu z anody, ale to vytváří přebytek elektronů v kovu, které nemohou přejít do roztoku. Kov je tedy záporně nabitý a roztok je kladně nabitý. Tato elektrická delaminace způsobuje vznik sil vzájemné přitažlivosti a tím zpomaluje průběh koroze. Tento stav se nazývá polarizace. Aby rozpuštění pokračovalo kontinuálně takovou rychlostí, jak ve skutečnosti probíhá, je nutné neutralizovat přitažlivé síly odstraněním elektronů na katodě – depolarizací. [5]

Čím větší je rozdíl ve velikosti elektromotorických sil dvou kovů, tím rychleji dochází ke korozi. Během koroze se mění i složení elektrolytu. Jeho pH se během koroze zvyšuje. To způsobuje přebytek kovových iontů s tvorbou nerozpustných sloučenin, které se pak usazují v místě kontaktu anody s katodou na povrchu kovu. Na části povrchu se vytvoří vrstva ve formě usazenin, která má v některých případech také ochranné vlastnosti, což zpomaluje další vývoj koroze. [5]

2.1.3 Půdní koroze

Agresivitu půdy jako korozivního prostředí ovlivňuje hlavně množství přítomné vody, provzdušňování půdy, pH, teplota a biologická aktivita. Agresivitu půdy lze také charakterizovat pomocí rezistivity, která vyjadřuje elektrický odpor půdy. Čím nižší je rezistivita, tím rychleji v ní probíhá korozní proces. Velikost částice půdy má vliv na přítomnost vody a kyslíku. Hrubozrnná půda s větším zrnem zadržuje menší množství vody a je více provzdušněná, u jemnozrnné půdy je to naopak. V hrubozrnných půdách, na které působí dešťová voda mají menší obsah soli, což vede k zpomalení korozního napadení. V případě jemnozrnných půd soli se usedají a tím pádem snižují rezistivitu půdy, a to vede k rychlejšímu koroznímu napadení. [25]

2.2 Podle vnitřního mechanismu

2.2.1 Chemická koroze

Tento typ koroze probíhá nejčastěji v plynném prostředí za vyšších teplot a v elektricky nevodivém kapalném prostředí. Nejznámějším prostředím je kyslík. V tomto případě jsou kovové materiály napadány za vyšších teplot a probíhají dílčí procesy, v důsledku čehož vzniká koroze na povrchu kovu. Vlivem charakteru korozní vrstvy zde dochází při oxidaci k difuzi částic iontů na povrchu této vrstvy a taky k difuzi kyslíku vrstvou korozních produktů. Čím rychleji probíhá difuze, tím rychleji probíhá oxidace. Čím vyšší je teplota, tím vyšší je rychlost difuze, a tím pádem dochází k růstu koroze. [3]

2.2.2 Elektrochemická koroze

Nastává, když dva nebo více kovů ze slitiny nebo materiálu přijdou do styku s povrchem předmětu vyrobeného z jiného kovu pomocí roztoku elektrolytu. V tomto případě se vytvoří galvanický článek, jehož elektrodami jsou kovy v roztoku elektrolytu (voda, ve které je rozpuštěný oxid uhličitý, kyseliny a další). Vzniká zde elektrochemický proces a to znamená, že spolu s chemickými procesy spojenými s uvolňováním elektronů a oxidací kovu dochází také k elektrickým procesům (přenos elektronu z jedné části kovu předmětu do druhého). Když dojde ke galvanickému páru je síla výsledného elektrického proudu větší, čím dále budou kovy od sebe v řadě napětí. V tomto případě jde tok elektronů z ušlechtilejšího kovu do méně ušlechtilejšího kovu. Ušlechtilejší kov je v tomto případě zničen. Takže ve dvojici Fe – Zn bude zinek zničen. [4]

2.3 Ochrana proti korozi

Korozní napadení lze ovlivnit správně vybranou ochranou. Dále jsou popsány ochrany materiálů podle kategorií. [21]

2.3.1 Povrchové ochranné povlaky kovů

- Kovové – existuje velké množství kovových ochran a nejznámějšími jsou plátování, galvanické pokovování, chemické pokovování a ponoření do roztaveného kovu. [43]
- Chemické povlaky – vytváří se za působením chemického činidla. Buďto fosfátování, aplikace chromu nebo i oxidování. [43]

2.3.2 Úprava prostředí

Ochrany proti korozi lze dosáhnout také změnou složení korozivního prostředí dvěma způsoby. Jedním z nich je odstranění korozivní složky ze systému. Druhým je přidání takových látek, které zpomalují průběh koroze. Inhibitory koroze se velmi často používají v kapalinách, které mohou způsobit korozi. Jedná se o látky, které průběh koroze zpomalují. Inhibitory působí prostřednictvím různých mechanismů, například pasivují kovový povrch díky své oxidační schopnosti, nebo blokují kovový povrch nebo inhibují některé částečné korozní reakce. [21]

2.3.3 Volba materiálu

Různé kovy za stejných korozních podmínek korodují různými rychlostmi, proto je důležité zvolit vhodný konstrukční materiál jako primární akci, aby se snížila pravděpodobnost koroze. Při výběru materiálu lze použít vlastnosti materiálů, jako je termodynamická stabilita, schopnost snadno a účinně pasivovat nebo tvorba silnějších vrstev korozních produktů s možností účinné ochrany. Volbu materiálu také ovlivňuje jeho konstrukční využití a také prostředí ve kterém bude použit. Například materiál, který se využívá při stavbě budovy poblíž oceánu nebude využit při stavbě budovy v extrémních podmínkách ruské Sibiře. Materiál je nutné volit tak, aby těmto vnějším vlivům odolal. Zlepšení vlastností materiálů je možné úpravou složení kovů za účelem zlepšení pasivity (například přidáním ušlechtilých prvků do pasivovaných kovů a slitin). [22]

2.3.4 Konstrukční řešení

Změnou konstrukce nebo pomocí správně zvolené technologii je možné dosáhnout zmenšení napadení korozního procesu. Koroze působí na materiál zhoršením jeho mechanických vlastností průřezem materiálu. Proto při volbě strojů a zařízení je potřeba uvažovat i tyhle změny. Jako jedena z možnosti je volba materiálu, na který tyto změny vliv nemají anebo správně dimenzovaný průřez součásti. Další možnost je specifikovat přídavek na korozi, který bude časem zničen. [21]

Při volbě konstrukčního řešení plochy mají být hladké, neměli by se používat ostré hrany a přechody, jelikož voda nebo jiná kapalina může do těchto spár zatéct. Kvalitní povrchová úprava požaduje zaoblené hrany, ostré přechody by se taky měli upravovat. Po aplikaci tohoto konstrukčního řešení ochranný povlak bude aplikován ve své plné tloušťce podle dokumentace. Spoje musí být pevné a musí být v těsném spojení, aby nedošlo k shromažďování dešťové vody. [44]

2.4 Korozní zkoušky

Výsledek korozního napadení lze vidět buď na materiálu nebo jako vznik sloučenin. Tyto účinky se dají rozdělit podle složení, skupenství, hmotnosti, morfologie. Jak už bylo řečeno na začátku, koroze je nevratný proces, který vykazuje vizuální změny, které se dají vyhodnotit jako trhliny, díry, lom, vznik žlábků. [46]

Pokud je materiál poškozený, nemusí to být pouhým okem patrné. Vady, které je možné zachytit pouze optickým nebo elektronovým mikroskopem se nazývají mikroskopická poškození. Tato poškození se objevují ve vnitřní struktuře materiálu – uvolnění struktury, přednostní napadení určitých složek struktury; na úrovni zrn – zvýraznění hranic zrn, korozní zplodiny na hranicích zrn. Dalšími vadami jsou například mezikrystalové nebo transkrystalové trhliny nebo mikrovruby. Jakým způsobem ovlivní materiál jeho napadení korozí závisí na stavu, v jakém se materiál nacházel při napadení nacházel. Typicky je to složení, tepelné zpracování, odolnost proti tváření a vnitřní pnutí. U povlaků má vliv tloušťka povlaku. [46]

Korozní zkoušky se řídí dle normy ČSN EN ISO 11845: Koroze kovů a slitin – všeobecné zásady pro korozní zkoušky [47]. Jedním z typů korozních zkoušek je dlouhodobá korozní zkouška. Provádí se v určitém místě atmosféry a to v půdě nebo v přírodním zdroji vody. Doba trvání zkoušky může být až 15 let. Vzorky jsou po celou dobu pozorovány – pravidelně se zjišťuje jejich váha a pořizují se barevné snímky. Dalším typem jsou zkoušky laboratorní. V prostředí laboratoře jsou simulovány podmínky přírodní koroze. Pro dřívější získání výsledků lze tyto zkoušky urychlit, na výsledky tak stačí počkat například pouze hodinu či den. Při urychlených laboratorních zkouškách se pozorují uměle vzniklý činitelé koroze. [48, 49]

3. Korozní odolnost slitin Al a Mg

3.1 Koroze hliníku

Hliník, i když je to neušlechtilý kov, má docela dobré korozní vlastnosti. To lze vysvětlit schopností pasivovat se v mnoha agresivních prostředích. Korozní odolnost hliníku závisí na mnoha faktorech: čistota kovu, korozivní prostředí, koncentrace agresivních nečistot v prostředí, teplota a PH roztoků má silný účinek. [13]

3.1.1 Atmosférická koroze

Hliník při interakci se vzduchem přechází do pasivního stavu. Když čistý kov přijde do styku se vzduchem, na hliníkovém povrchu se okamžitě objeví tenký ochranný film z oxidu hlinitého. Růst filmu se dále zpomaluje. [13]

Výše uvedené popisují následující rovnice:

$$Al_2O_3 \text{ nebo } Al_2O_3 \cdot H_2O \quad (1)$$

$$4Al + 3O_2 \rightarrow 2Al_2O_3 \quad (2)$$

Tloušťka tohoto oxidového filmu se pohybuje od 5 do 100 nm (v závislosti na provozních podmínkách). Oxid hlinitý má dobrou přilnavost k povrchu a splňuje podmínku kontinuity oxidových filmů. Při skladování ve skladu je tloušťka oxidu hlinitého na povrchu kovu přibližně 0,01 - 0,02 μm. Při interakci se suchým kyslíkem - 0,02 - 0,04 μm. Během tepelného zpracování hliníku tloušťka oxidového filmu dosáhnout 0,1 μm. [13]

Hliník je dostatečně odolný jak v čistém venkovském vzduchu, tak v průmyslové atmosféře (obsahující páry síry, sirovodík, plynný amoniak, suchý chlorovodík atd.). Protože koroze hliníku v plynných médiích není ovlivněna sloučeninami síry. [13]

3.1.2 Kapalné prostředí

Koroze hliníku není téměř pozorována při interakci s čistou čerstvou destilovanou vodou. Zvýšení teploty na 180 ° C nemá žádný zvláštní účinek. Horká vodní pára také nemá žádný vliv na korozi hliníku. Pokud se do vody přidá trochu alkálie, dokonce i při pokojové teplotě, rychlost koroze hliníku v takovém prostředí mírně vzroste. [13]

Interakci čistého hliníku (nepokrytého oxidovým filmem) s vodou lze vyjádřit:

$$2Al + 6H_2O = 2Al(OH)_3 + 3H_2 \uparrow \quad (3)$$

Při interakci s mořskou vodou začíná čistý hliník korodovat, protože je citlivý na rozpuštěné soli. Pro provoz hliníku v mořské vodě se do jeho složení zavádí malé množství hořčíku

a křemíku. Korozní odolnost hliníku a jeho slitin je při vystavení mořské vodě významně snížena, pokud je v kovu obsažena měď. [13]

3.1.3 Kyselá prostředí

Koroze hliníku v kyselině sírové

Pro hliník a jeho slitiny je kyselina sírová (hliník má oxidační vlastnosti) střední koncentrace velmi nebezpečná. [13]

Reakce hliníku se zředěnou kyselinou sírovou je popsána:

$$2Al + 3H_2SO_{4(zředěná)} \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + 3H_2 \quad (4)$$

Koncentrovaná studená kyselina sírová nemá na hliník žádný účinek. A při zahřátí hliník koroduje:

$$2Al + 6H_2SO_{4(\text{koncent})} \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + 3SO_2 \uparrow + 6H_2O \quad (5)$$

Pak vznikne rozpustná sůl – síran hlinitý. [13]

Koroze hliníku v kyselině chlorovodíkové

Hliník nebo jeho slitiny se rychle rozpouštějí v kyselině chlorovodíkové, zejména při zvyšování teploty.

Korozní rovnice pro hliník v kyselině sírové je popsána následovně:

$$2Al + 6HCl \rightarrow 2AlCl_3 + 3H_2 \uparrow \quad (6)$$

Roztoky kyseliny bromovodíkové a fluorovodíkové působí podobně. [13]

Koroze hliníku v kyselině dusičné

Koncentrovaný roztok kyseliny dusičné má vysoké oxidační vlastnosti. Hliník v kyselině dusičné je za normální teploty výjimečně odolný. Používá se dokonce k výrobě koncentrované kyseliny dusičné přímou syntézou. [13]

Korozní reakce hliníku při zahřátí v kyselině dusičné je popsána následovně:

$$Al + 6HNO_{3(\text{koncent})} \rightarrow Al(NO_3)_3 + 3NO_2 \uparrow + 3H_2O \quad (7)$$

3.1.4 Alkalické prostředí

Alkálie snadno rozpouštějí ochranný oxidový film na povrchu hliníku, začíná reagovat s vodou v důsledku čehož se kov rozpouští s uvolňováním vodíku (koroze hliníku s depolarizací vodíku). [13]

Oxidový film může být taky zničen solemi iontů rtuti, mědi a chloru. [13]

3.2 Koroze hořčíku

Během atmosférické koroze vznikají korozní zplodiny. Jejích množství je závislé na vlhkosti a čistotě prostředí, ve kterém materiál bude udržován neboli používán. V atmosféře, na kterou nepůsobí nečistoty a znečištění plynem působí koroze o rychlosti přibližně 1 μm za rok. Pokud se povrch ošetří oxidací ionty $CrO4_4^{2-}$ (chromátování), přes tuto vrstvu koroze už nebude působit a nedokáže proniknout do materiálu. [5]

3.2.1 Kapalné prostředí

Na hořčík a jeho slitiny má velký vliv voda a vodní prostředí. Zde dochází k velkému působení koroze. V případě změn teplot (teplotním rázům) se korodování zrychluje. Jakákoliv povrchová úprava nebude dostačující pro ochranu v daném prostředí. Na organické povlaky mají vliv také alkalické výluhy korozních produktů a vodík, který vniká korozí. Tyto faktory vlastně ovlivňují povlaky a kvůli tomu i jejích rychlé zkorodování. [5]

3.2.2 Roztoky solí

V tomto prostředí je koroze závislá na druhu přítomných kationtů i aniontů. Kationy těžkých kovů urychlují vznik koroze, kvůli kterým vyloučení na povrchu hořčíku se objevují mikro katody. [5]

Anionty jsou závislé na reakci s hořčíkem, jestli vytvoří rozpustné nebo nerozpustné sloučeniny. Mezi nerozpustné sloučeniny patří: chromany, fosforečnany, dusičnany, fluoridy. Spojením hořčíku s těmito aniony vznikne ochranná vrstva, která zabraňuje vznik koroze. V případě stálého množství pH, výskyt koroze v těchto prostředích je minimální. Ke špatnému důsledku vede reakce hořčíku s anionty jako jsou například chloridy, bromidy, sírany, které brání vzniku ochranné vrstvy. Kvůli tomu hořčíkové slitiny korodují velmi rychle. [5]

3.2.3 Kyselá prostředí

Slitiny hořčíku jsou velmi citlivé ke všem anorganickým i organickým kyselinám. Pouze kyselina fluorovodíková o koncentraci nad 2 % je v tomto případě výjimkou. Za normálních teplot je v důsledku vznikajícího MgF_2 rychlost koroze až 10-20 mikronů za rok. [5]

Některé organické kyseliny, například mastné kyseliny, tvoří s hořčíkem nerozpustnou sloučeninu, která chrání kov před korozí.

3.2.4 Alkalické prostředí

Hořčík a jeho slitiny mají velkou odolnost vůči korozi v alkalickém prostředí díky reakci se zředěnými alkalickými roztoky za vzniku málo rozpustného $Mg(OH)_2$. Korozivzdornost se nezmění až do bodu varu. Korozivzdornost u koncentrovaných alkalických roztoků je tím nižší,

čím vyšší je teplota. V případě výskytu v roztoku například chloridového iontu (agresivní aniont), tak koroze se začne působit rychleji. [5]

3.2.5 Organické sloučeniny

Hořčíkové slitiny jsou velmi korozivzdorné v organických kapalinách, zejména v organických kyselinách. Metylalkohol a chlorované organické sloučeniny působí na hořčík velice špatně a agresivně, což způsobí vznik hydrolytického uvolnění chloridových iontů, které za následek vedou zrychlenou korozi. [5]

3.2.6 Plyny za vyšších teplot

Díky mechanickým vlastnostem lze hořčík využít ve velkém množství plynných prostředích za vysokých teplot. Hořčík a hořčíkové slitiny jsou odolné vůči suchým halogenům, kyselině fluorovodíkové. Odolnost hořčíku vůči SO_2 je docela pozoruhodná díky tomu, že jenom při koncentraci oxidu siřičitého nad 0,5 % dochází ke snížení oxidace materiálu na vzduchu za vyšších teplot. [5]

4. Korozní odolnost povrchových úprav používaných v letectví

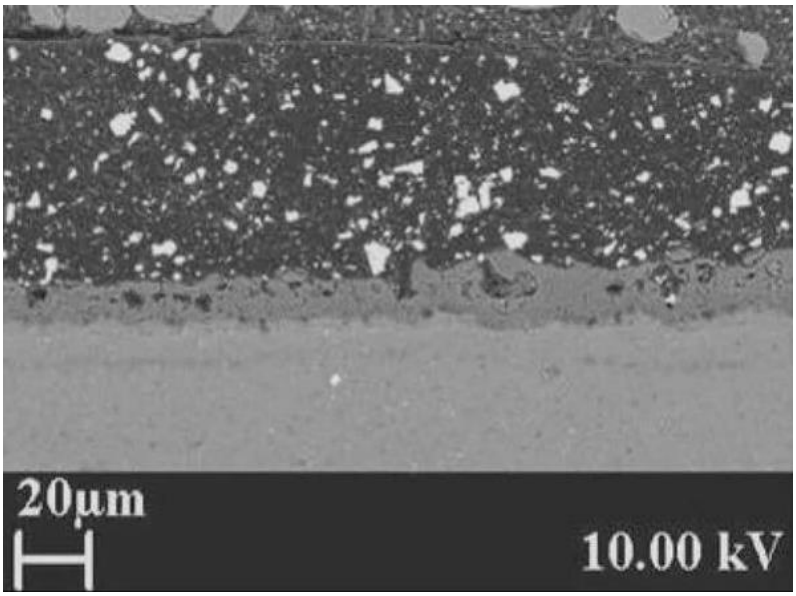
4.1 Korozní odolnost chromování

Povrchová úprava chromováním je využívána u součástí, které musí splnit vysoké požadavky na spolehlivost, přesnost a odolnost proti vnějším vlivům. Chromování součástí zajistí ochranu proti korozi, tvrdost a otěruvzdornost. Z tohoto důvodu se touto metodou upravují měřidla, řezné a tvářecí nástroje nebo součásti, které jsou vystaveny otěru – např. hřídele nebo ozubená kola. Chromování je dále užíváno v leteckém a automobilovém průmyslu, kde součásti pracují za vysokých teplot, působí na ně chemické látky obsažené ve zplodinách a palivu, kde jsou podrobeny mechanickému opotřebení. Jmenovitě se takto upravují součásti motorů – válce, vložky do válců nebo pístní kroužky. [27]

4.2 Korozní odolnost oxidace plazmatem

Pro optimální výkonnost proti korozi funguje PEO nejlépe jako předúprava pro následné těsnění, barvy a další polymery. [16]

Obrázek 5 ukazuje strukturu polyesterového práškového laku aplikovaného na PEO vrstvu na substrátu ze slitiny hořčíku. Silná vazba mezi dvěma vrstvami zvyšuje odolnost proti korozi a také vytváří vlastnosti odolné proti poškrábání. Polyesterový povlak účinně vyplňuje pórovou architekturu vytvořenou při tvorbě PEO vrstvy. [16]



Obrázek 10 Práškový lak na PEO povlaku na Mg substrátu [31]

Obecně je PEO vhodný pro různé typy lepení, protože jeho síťovaná mikrostruktura vytváří fyzický nátěr a nespoléhá se na chemickou kompatibilitu mezi dalšími vrstvami, na rozdíl od alternativních mechanismů potahování. Stejný princip platí pro adhezi oleje a jiných maziv v aplikacích s kluzným opotřebením. [16]

4.3 Korozní odolnost anodické oxidace

V důsledku využití anodické oxidace vznikne vrstva, která chrání povlakováný materiál v neutrálním prostředí v rozmezí 6,5 pH až 8 pH a ta vrstva chrání materiál vlivem atmosféry nebo chemickým napadením. Schopnost chránit povlakovaný materiál je závislá na mnoha faktorech, ale především na tloušťce chráněné vrstvy. Například povlakovaný materiál o tloušťce vrstvy 20 µm bude mít dobré protikorozní vlastnosti ve venkovní atmosféře. [45]

4.4 Korozní odolnost nátěrových hmot

Spolehlivost a trvanlivost antikorozního nátěru a laku je dána schopností materiálu, ze kterého je vyroben, dlouhodobě udržovat své vlastnosti za provozních podmínek chráněné struktury, správnou volbou nátěrového systému a přesné dodržování technologie její aplikace. Povlak by měl být vyroben z vodotěsného materiálu s vysokou přilnavostí a dielektrickými vlastnostmi, pružností, odolností proti oděru a dynamickými účinky, odolností proti korozi, chemickou inertností s ohledem na kov potrubí a biologickou stabilitou. [50]

Vysoká korozní odolnost anodických povlaků barvami a laky je vysvětlena pórovitostí a vysokou absorpční schopností anodických povlaků jejich chemickou a elektrickou inertností a zvýšenou odolností proti oděru. [50]

Nevýhodou je, že v případě poškození nátěrového systému, ten ztratí své protikorozní vlastnosti a v tomto místě materiál se začne korodovat. [50]

4.5 Korozní odolnost kadmiování

Kadmiové povlaky se získávají zcela výlučně elektro-depozicí. Rozdíl v potenciálech mezi kadmiem a železem není tak velký jako mezi zinkem a železem, proto stupeň katodické ochrany oceli krycí vrstvou kadmia klesá rychleji s nárůstem velikosti defektů v povlaku. Menší rozdíl potenciálu poskytuje důležitou výhodu kadmiových povlaků pro ochranu vysokopevnostních ocelí. Pokud je potenciál udržován pod kritickým potenciálem korozního praskání napětím aniž by spadl do ještě negativnějšího rozsahu, který odpovídá vodíkovému praskání, pak kadmiové povlaky chrání ocel před praskáním ve vlhké atmosféře spolehlivěji než zinkové povlaky. Kadmium je dražší než zinek, ale zachovává si silný kovový lesk déle, poskytuje lepší elektrický

kontakt, snáze se pájí, a proto našlo uplatnění v elektronickém průmyslu. Navíc je odolnější vůči kondenzační vodě a solné mlze. Na druhé straně však nejsou kadmiové povlaky v atmosférických podmínkách tak stabilní jako zinkové povlaky stejné tloušťky. [53]

Praktická část

Cíl práce:

1) Provedení experimentů
2) Vyhodnocení zkoušek podle norem

Cílem dané práce bylo zkoumání a vyhodnocení korozní odolnosti dekorativního typu anodické oxidace (černé anodické oxidace, stříbrné anodické oxidace) a práškové barvy. Cílem bylo porovnat vlastnosti povlaku, resp. korozní odolnost vybraných vzorků.

5. Popis experimentální části

Zkušební vzorky byly dodány jako jeden kus, proto byly nastříhány na tabulkových nůžkách na dané rozměry stejného charakteru. Celkem bylo nastříháno 21 vzorků a následně na 14 z nich byla aplikována dekorativní anodická oxidace. Prvních 7 z nich bylo nabarveno na černo a dalších 7 z nich na stříbrno. Na posledních 7 vzorků byla aplikována prášková barva. Každý vzorek ze vzniklých 3 sad byl označen číslem od 1 do 7. Poté se změřila tloušťka každého ze vzorků.

Obrázek 11 Zkušební vzorky černé anodické oxidace

Obrázek 12 Zkušební vzorky práškové barvy

Obrázek 13 Zkušební vzorky stříbrné anodické oxidace

5.1 Použitý materiál a povrchová úprava

Zkušební vzorky byly vyrobené ze slitiny hliníku EN AW-5754 (ČSN 42413). To je slitina hliníku s obsahem hořčíku, která má velkou odolnost vůči korozi v mořské vodě a je vhodná k svařování. Nejčastěji se používá při stavbě lodí a v potravinářském průmyslu. Mají uplatnění taky v jaderném průmyslu při stavbě svařovaných konstrukcí. Další výhodou je snadná aplikace anodické oxidace, proto se často používá v architektuře. [59]

Dále je uvedeno chemické složení dané slitiny:

Tabulka 3 Chemické složení materiálu EN AW – 5754 [60]

Název	**Si**	**Fe**	**Cu**	**Mn**	**Mg**		**Cr**	**Zn**	**Ti**	**Ostatní**
	Max	Max	Max	Max	Min	Max	Max	Max	Max	Min
EN AW-5754	0,4	0,4	0,1	0,5	2,6	3,6	0,3	0,2	0,15	0,15

Příprava vzorků se stříbrnou a černou anodickou oxidaci probíhala podle technologického postupu:

Tabulka 4 Technologický postup dekorativní anodické oxidace

Operace
Alkalické odmaštění
Oplach 1°
Moření
Oplach 1°
Zesvětlení
Oplach 1°
Anodická oxidace
Oplach 1°
Vypírání
Barvení
Oplach 1°
Utěsnění
Sušení

Příprava vzorků s práškovou barvou probíhala se stejnou předúpravou podle technologického postupu:

Tabulka 5 Technologický postup aplikace práškové barvy

Operace
Alkalické odmaštění
Oplach 1°
Moření
Oplach 1°
Zesvětlení
Oplach 1°
Sušení
Nanášení práškové barvy
Vytvrzení práškové barvy

Výsledkem měření slouží tabulka:

Tabulka 6 Zprůměrovaný výsledek měření tloušťky povlaku na vzorcích

Tloušťka vrstvy [µm]				
Prášková barva				
Č. vzorku	**Přední strana [µm]**	**Zadní strana [µm]**	**Směrodatná odchylka [µm]**	
1	88	107	9,08	7,52
2	100	95	8,33	11,84
3	94	85	9,84	9,72
4	97	93	11,88	10,22
5	98	85	7,95	6,85
6	82	102	7,04	10,57
Stříbrný elox				
1	56	47	9,73	9,37
2	45	62	7,35	12,43
3	65	51	13,73	12,39
4	85	87	18,87	11,87
5	70	54	11,82	14,03
6	71	48	12,5	14,33
Černý elox				
1	70	68	15,77	14,75
2	69	64	16,23	14,5
3	55	72	12,15	11,27
4	69	57	12,11	13,38
5	66	58	14,99	11,09
6	56	57	9,17	10,67

Tloušťka se měřila pomocí tloušťkoměru od firmy **ELCOMETER**, model **224**. Každý vzorek byl změřen 20krát z obou stran pro dosažení vyšší přesnosti výsledku tloušťky povlaku.

Obrázek 14 Tloušťkoměr ELCOMETER [33]

Část daných vzorků byla vložena do kondenzační komory a další část byla vložená solné lázně, která byla pro tyto účely zhotovená (solná lázeň obsahovala 5% roztok chloridu sodného).

Pro kondenzační komoru byly kontrolní hodiny stanoveny na 240, 720 a 1 000 hodin.

Hodnocení vzorků v případě kondenzační komory bylo provedeno pomocí normy ČSN EN ISO 6270-2: *Nátěrové hmoty – Stanovení odolnosti proti vlhkosti – Část 2: Kondenzace (expozice v komoře se zásobníkem ohřáté vody* [8], kde se sledovala stálost povlaků a vrstev, korozní odolnost a puchýřkování. Této normě podléhají pouze vzorky s aplikovanou práškovou barvou. Vzorky s dekorativní anodickou oxidací byly hodnoceny vizuálně.

Pro solnou lázeň byly kontrolní hodiny stanoveny na 0, 24, 48, 72, 168, 336, 504 a 672 hodin.

5.2 Kondenzační komora

Norma na kondenzační komoru hodnotí převážně puchýřkování povlaku, popř. korozní odolnost celkově.

Puchýřky se neobjevily a korozní odolnost aplikovaných povrchových úprav je v tomto případě dobrá, vzorky odolaly pracovnímu prostředí kondenzační komory.

Obrázek 15 Kondenzační komora Fakulty strojní

Obrázek 16 Připravené vzorky pro zkoušku

5.2.1 Výsledek experimentu

První kontrola proběhla při 240 hodinách. Na povrchu není vidět žádné porušování.

Obrázek 17 Výsledek experimentu v kondenzační komoře (240 hodin)

Další kontrola proběhla při 720 hodinách. Na povrchu není vidět žádné porušování.

Obrázek 18 Výsledek experimentu v kondenzační komoře (720 hodin)

Poslední kontrola proběhla při 1 000 hodinách, žádné vady nebyli zjištěny.

Obrázek 19 Výsledek experimentu v kondenzační komoře (1000 hodin)

Vzorky byly v komoře po dobu 1 000 hodin. Tato zkouška hodnotí puchýřkování, resp. kolik puchýřků je na dané ploše. Z výše uvedených fotografií vyplývá, že dané povrchové úpravy ve zkoušce obstály a žádné vady se neobjevily. Ani jiné defekty a vady nebyly pozorovány po cca měsíci po uplynutí zkoušky, kdy vzorky byly umístěny v laboratoři v okolí atmosféře při pokojové teplotě.

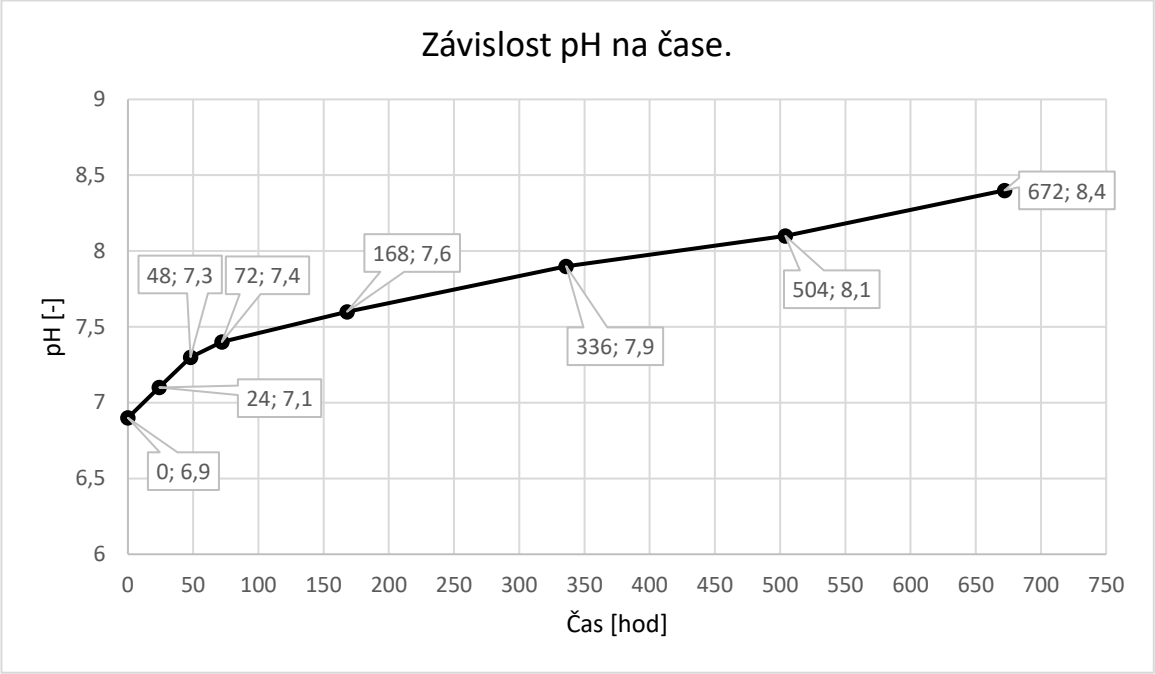
5.3 Vytvořená solná lázeň

Jak už bylo psané, kontrolní hodiny toho experimentu začínaly od 0 hodiny, teda od doby, kdy vzorky byly ponořené. Při tomto experimentu bylo pozorováno pH ve 5% roztoku chloridu sodného. Vzorky byly umístěny do nádob s objemem cca 1 litr. Tady je potřeba zmínit, že během toho experimentu se odpařilo 100 ml vody při 336 hodinách, a pak dalších 50 ml vody při 504 a 672 hodinách.

Vývoj pH v závislosti na čase pro dekorativní černou anodickou oxidaci:

Tabulka 7 Vývoj pH pro černou anodickou oxidaci, solní lázeň

Čas [hod]	0	24	48	72	168	336	504	672
pH [-]	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,9	8,1	8,4

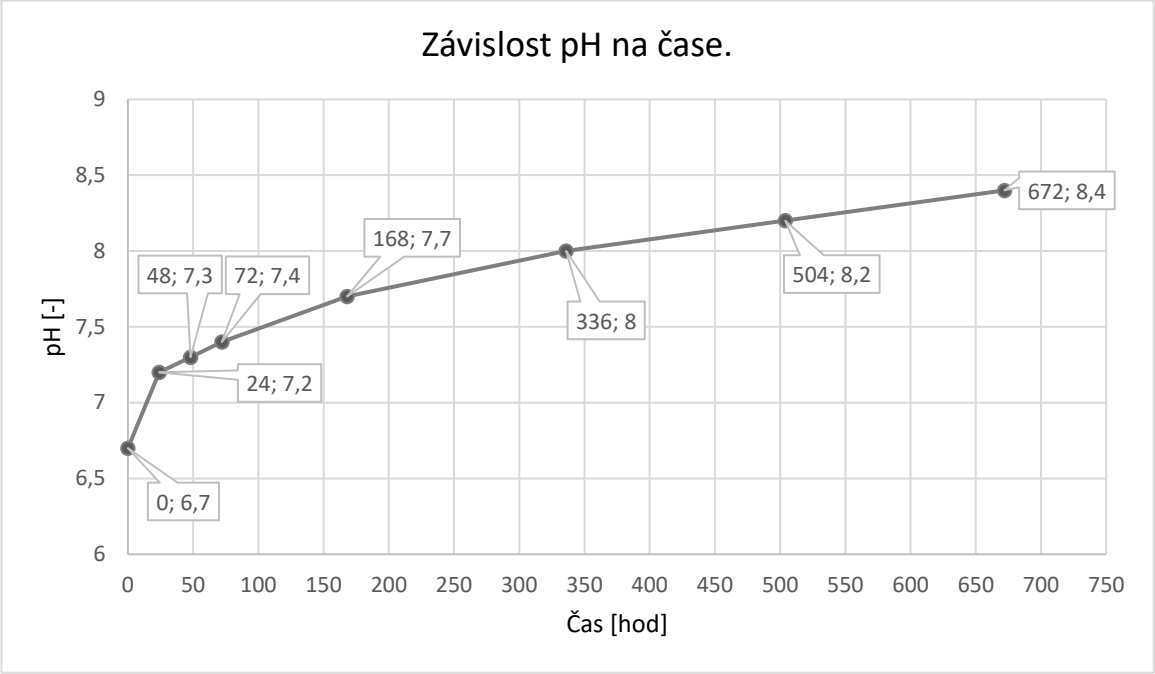


Graf 1 Vývoj pH na čase, černá anodická oxidace

Změna pH v závislosti na čase pro dekorativní stříbrnou anodickou oxidaci:

Tabulka 8 Vývoj pH pro stříbrnou anodickou oxidaci, solní lázeň

Čas [hod]	0	24	48	72	168	336	504	672
pH [-]	6,7	7,2	7,3	7,4	7,7	8	8,2	8,4

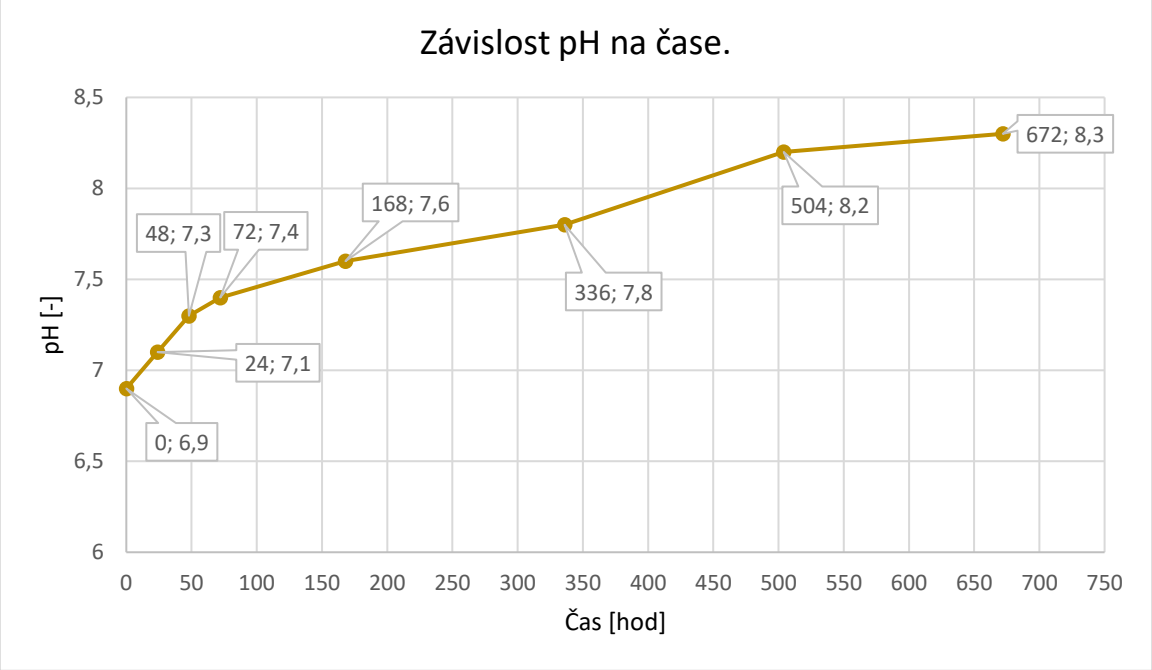


Graf 2 Vývoj pH na čase, stříbrná anodická oxidace

Vývoj pH v závislosti na čase pro práškovou barvu:

Tabulka 9 Vývoj pH pro práškovou barvu, solní lázeň

Čas [hod]	0	24	48	72	168	336	504	672
pH [-]	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,2	8,3



Graf 3 Vývoj pH na čase, prášková barva

5.3.1 Výsledek experimentu

Obrázek 20 Výsledek experimentu v solní lázně po 672 hodinách, černá anodická oxidace

Obrázek 21 Výsledek experimentu v solní lázně po 672 hodinách, stříbrná anodická oxidace

Obrázek 22 Výsledek experimentu v solní lázně po 672 hodinách, prášková barva

Vzorky byly ponořené do solní lázně po dobu 672 hodin. Tato zkouška hodnotí korozní odolnost materiálu. Z výše uvedených fotografií vyplývá, že dané povrchové úpravy ve zkoušce obstály a žádné vady se neobjevily. Ani jiné defekty a vady nebyly pozorovány po cca měsíci po uplynutí zkoušky, kdy vzorky byly umístěny v laboratoři v okolní atmosféře při pokojové teplotě.

6. Závěr

Cílem této práce bylo zpracovat přehled materiálu a povrchových uprav používaných v letectví. Další kapitola je věnována problematice koroze. Pozornost je věnována také korozní odolnosti slitin hliníku a hořčíku. Popsány jsou také korozní odolnosti povrchových úprav, které se používají v leteckém průmyslu.

V praktické části byl proveden experiment, jehož cílem bylo vyhodnotit korozní odolnost vybraných vzorků. Použité zkušební vzorky byly vyrobeny ze slitiny hliníku EN AW-5754 s různou povrchovou úpravou. Část vzorků byla upravená dekorativní anodickou oxidaci, na druhé části vzorků byla nanesená prášková barva. Poté byla část vzorků umístěná do kondenzační komory a část do solné lázně.

Pro kondenzační komoru bylo vyhodnocení vzorků realizováno s pomocí normy ČSN EN ISO 6270-2: *Nátěrové hmoty – Stanovení odolnosti proti vlhkosti - Část 2: Kondenzace (expozice v komoře se zásobníkem ohřáté vody* [8]. Tato zkouška hodnotí puchýřkování povlaku, popřípadě korozní odolnost, toto však platí pouze pro vzorky s aplikaci práškové barvy. Vzorky s dekorativní anodickou oxidací byly hodnoceny pouze vizuálně. Zkoumaly se defekty vytvořené eloxované vrstvy. V průběhu zkoušky bylo provedeno několik vizuálních kontrol. Jednalo se o urychlenou laboratorní zkoušku. První vizuální kontrola byla provedena po 240 hodinách, druhá po 720 hodinách a poslední kontrola po 1000 hodinách. Ani při jedné z kontrol nebyla zjištěna žádná vada, či jiný typ defektu. Experimentem bylo ověřeno, že zkoušené vzorky s danými povrchovými úpravami nebyly zkorodovány ani nebyl pozorován vznik puchýřků na povrchu materiálu po dobu 1000 hodin.

Při experimentu v solné lázní byly vzorky umístěny do 3 nádob o objemu 1l s 5% roztokem chloridu sodného. V průběhu 28 dní byla zaznamenávána změna pH a bylo sledováno, zda dojde k poškození korozí, či jiným defektům. Po skončení zkoušky ani na jednom ze vzorků nebylo pozorováno žádné korozní napadení. Po dobu 672 hodin nedošlo k degradaci povrchové úpravy vlivem koroze.

Obě provedené zkoušky nezpůsobily napadení korozí a lze tedy říci, že povrchová úprava dekorativní anodickou oxidaci i úprava nanášením práškové barvy byly pro vzorky z hliníkové slitiny zvoleny vhodně. Dalším důvodem, proč vzorky ve zkouškách obstály je správnost volby materiálu.

Použitá literatura

[1] GUSEVA, Olga, Samuel BRUNNER a Peter RICHNER. Analysis of the environmental parameters for aircraft coatings. Macromol. Symp. [online]. 2002(883-894), 187 [cit. 2020-12-2]. Dostupné z: https://doi.org/10.1002/1521-3900(200209)187:1<883::AID-MASY883>3.0.CO;2-M

[2] TULKA, Jaromír; RŮŽIČKA, Milan. Koroze a stárnutí materiálu. Brno: Vojenská akademie, 1986. 84 s.

[3] *Koroze kovů. ASB [online]. 2009 [cit. 2020-12-2]. Dostupné z: https://www.asb-portal.cz/aktualne/nazory-a-rozhovory/koroze-kovu*

[4] *Полный школьный курс*. Первое. Pětrohrad: Издательская группа "Весь", 2008, s. 446-447. ISBN 978-5-9573-0428-9.

[5] ČERNÝ, Miroslav. Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.

[6] FIALA, Tomáš. Tvrdé vrstvy na slitinách hliníku [online]. Praha, 2007 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/history/2007/sbornik/Papers/S2/Fiala_Tomas_12123.pdf. Experiment. ČVUT.

[7] MICHNA, Štefan. Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-890-4188-4.

[9] COTTEL, Catherine, Fred SMIDT a J.A. SPRAGUE. Surface engineering Vol. 5. 10. Ohio: Materials Park : ASM International, 1994.

[11] KREIBICH, Victor a Vladislava OSTRÁ. Chyby při eloxování hliníku a jeho slitin. Povrcháři [online]. Březen 2009, (3) [cit. 2021-01-16]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/200903_povrchari.pdf

[12] PAPÍK, MArtin. Tvrdé eloxování [online]. Praha, 2015 [cit. 2021-8-6]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63616/F2-DP-2015-Papik-Martin-Martin_Papik_Tvrde_eloxovani.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČVUT.

[13] Коррозия алюминия. *Все о корозии* [online]. [cit. 2021-01-16]. Dostupné z: https://www.okorrozii.com/korrozia-aliuminiya.html

[14] DONG, H. Urface Engineering of Light Alloys: Aluminum, Magnesium and Titanium Alloys. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-84569-537-8.

[15] SONG, G.L. Corrosion prevention of magnesium alloys. Philadelphia: Woodhead Pub., 2013, s. 586. ISBN 978-0-85709-437-7.

[16] What is Plasma Electrolytic Oxidation? *Keronite* [online]. 2017 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: https://blog.keronite.com/what-is-plasma-electrolytic-oxidation-article

[17] Specifications for the QUALANOD Quality Label for Sulfuric Acid-Based Anodizing of Aluminium [online]. Zurich: QUALANOD c/o ARCO Association Management, 2021 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: https://www.qualanod.net/current-edition.html?file=files/qualanod/downloads/QUALANOD%20Spec_ED%2001.01.2021.pdf

[21] BARTONÍČEK, Robert. Koroze a protikorozní ochrana kovů. 1. Praha: Academia, 1966, s. 720.

[22] SKÝBA, Pavel. Hodnocení koroze u vybraných typů hliníkových slitin pro letecký průmysl [online]. Brno [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/18109. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Bohumil Pacal.

[23] VISSER, Peter, Herman TERRYN a Johannes M.C. MOL. Aerospace Coatings. Active protective coatings: New Generation Coatings for Metals. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 9789401775380.

[24] PENG, Hua-Xin. Polyurethane Nanocomposite Coatings for Aeronautical Applications. Multifunctional polymer nanocomposites. Boca Raton: CRC Press, c2011, 338 - 379. ISBN 1439816824.

[25] ALUMAL. *Donauchem* [online]. b.r [cit. 2021-7-12]. Dostupné z: https://www.donauchem.cz/getattachment/Products-Solutions/Range-of-goods/Galvanization/ALUMAL/Fotka_hlinik-1.jpeg.aspx?lang=cs-CZ&width=555&height=227

[26] Tvrdé eloxování. *Rosma* [online]. b.r [cit. 2021-7-12]. Dostupné z: https://rosma.cz/media/widgetkit/DSC07535-e53fb466a48d73ba749b851b1bff4d73.JPG

[27] MUDROCH, O. Chromování. Tvrdé a korosní povlaky. Praha: SNTL, 1959.

[28] BENEDIKT, V. Povrchové úpravy kovových materiálů. Plzeň: Ediční středisko VŠSE, 1985.

[29] Plazmový výboj. *Keronit* [online]. b.r [cit. 2021-7-13]. Dostupné z: https://blog.keronite.com/hs-fs/hubfs/blog-images/what-is-peo-article/PEO-plasma-discharge.jpg?width=397&name=PEO-plasma-discharge.jpg

[30] Srovnání elox a PEO. *Keronit* [online]. b.r [cit. 2021-7-13]. Dostupné z: https://blog.keronite.com/hs-fs/hubfs/image1-3.png?width=785&name=image1-3.png

[31] Práškový lak na PEO povlaku na Mg substrátu. *Keronit* [online]. b.r [cit. 2021-7-13]. Dostupné z: https://blog.keronite.com/hs-fs/hubfs/image4.png?width=357&name=image4.png

[33]Elcometer 224. GAMIN [online]. b.r [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: https://www.elcometer.cz/fileadmin/user_upload/Elcometer_224_3.jpg

[34] MICHNA, Štefan a kol. Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-890-4188-4.

[35] USTOHAL, Vladimír. Současný stav a trendy vývoje lehkých slitin v konstrukci drakůletadel. Brno: Klub české společnosti pro nové materiály a technologie při VUT v Brně, 2000, s. 120.

[36] SEDLÁČEK, Vladimír: Titan a jeho slitiny. Praha: Státní nakladatelství technické literatuy, 1963. 203 s.

[37] BOYER, Rodney, Gerhard WELSCH a E.W. COLLINGS. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys [online]. ASM International, 1994 [cit. 2021-7-6]. ISBN 978-0-87170-481-8. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=x3rToHWOcD8C&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

[38] VOJTĚCH, Dalibor. Kovové materiály. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, s. ISBN 80-7080-600-5.

[39] Binární diagram železo-uhlík. Wikipedia [online]. b.r [cit. 2021-8-4]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/56/Fe-C-cs.svg/450px-Fe-C-cs.svg.png

[40] JONŠTA, Zdeněk. Žárupevné oceli a slitiny. Žilina: ZUSI, 2002. ISBN 80-968-6056-9.

[41] CALLISTER, William D. a David G. Rethwisch. Materials science and engineering: An Introduction. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2010, 885 s. ISBN 978-0-470-41997-7

[42] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. Perspektivní materiály. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.

[43] Kolektiv autorů. Projektování a provoz povrchových úprav. Sborník je součástí 30. konference s mezinárodní účastí. PhDr. Zdeňka Jelínková- PKK, únor 2004 Praha.

[44] BARTONÍČEK, Robert. Navrhování protikorozní ochrany. Praha: SNTL, 1980. Koroze a ochrana materiálů.

[45] ELOXOVÁNÍ. *CHROMTech* [online]. b.r [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: https://www.chromtech.cz/nabidkamenu/elox

[46] PLUHAŘ, Jaroslav. Nauka o materiálech. 1. Praha: SNTL, 1989, s. 153. ISBN 04-205-89.

[48] BENEŠ, Antonín. Mechanická technologie kovů: vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty : určeno pro studenty průmyslových škol strojnických a pro provozní techniky strojírenského průmyslu. 2. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1967. Řada strojírenské literatury.

[49] MÍŠEK, Bohumil a Jan HRSTKA. Strojírenské materiály a povrchové úpravy: koroze a povrchová úprava kovů. 2., nezm. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1982.

[50] САФРОНЧИК, Виктор. *Защита подземных трубопроводов антикоррозионными покрытиями*. 1. Ленинград: Стройиздат, 1977.

[51] GEIPLOVÁ, Hana. Protikorozní ochrana ocelových konstrukcí [online]. Praha: SVÚOM . [cit. 2021-8-01]. Dostupné z: http://www.izolplastik.cz/files/download/seminare-2013/vyuziti-ons-pri-defektech-nasloupech-vo-ok-a-plechovych-strechach.pdf/

[52] DLOUHODOBÁ OCHRANA PRO VAŠÍ OCEL. *Zinkpower* [online]. b.r [cit. 2021-8-2]. Dostupné z: https://www.zinkpower.com/cs/zarove-zinkovnani.html

[53] REVIE, Winstin a Uhlig HERBERT. *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*. 4th ed. Hoboken: Wiley, c2008, s. 276. ISBN 978-0-471-73279-2.

[54] КУДРЯВЦЕВ, Николай. *Прикладная электрохимия*. 2. Москва: ХИМИЯ, 1975. УДК 621.35 (075.8).

[55] НИКОЛЬСИЙ, Борис. Справочник химика: Сырье и продукты промышленности неорганических веществ. Процессы и аппараты коррозия. Гальванотехника. Химические источникитока. 2. Москва: ХИМИЯ, 1968. УДК 54/083, s. 915.

[56] ФЕДОТЬЕВ, Николай. Прикладная электрохимия. 2. Ленинград: ХИМИЯ, 1967, s. 170.

[57] Vývoj nátěrového systému pro letecký průmysl se zaměřením na snížení VOC. Engineering [online]. b.r [cit. 2021-8-3]. Dostupné z: https://www.engineering.sk/strojarstvo-extra/3006-vyvoj-nateroveho-systemu-pro-letecky-prumysl-se-zamerenim-na-snizeni-voc

[59] Slitina EN AW-5754 (AlMg3). Proal [online]. b.r [cit. 2021-8-4]. Dostupné z: https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-5754/

[60] EN AW-5754. Alumeco [online]. b.r [cit. 2021-8-4]. Dostupné z: https://www.alumeco.cz/hlink/plechydesky/prodn-plechydesky/en-aw-5754/8-x-1020-x-2020-mm/p/391/3792

Normy

[10] MIL-A-8625F MILITARY SPECIFICATION, ANODIC COATING FOR ALUMINIUM AND ALUMINIUM ALLOYS, WBDG Dostupné z: http://www.wbdg.org/ccb/FEDMIL/a8625.pdf

[19] ASTM B 137-95 (2014) Standard Test Method for Measurement of Coating Mass Per Unit Area on Anodically Coated Aluminum

[20] ASTM B 117-11 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus

[8] ČSN EN ISO 6270-2. *Nátěrové hmoty - Stanovení odolnosti proti vlhkosti - Část 2: Kondenzace (expozice v komoře se zásobníkem ohřáté vody)*. Česká republika: SVÚOM, 2018.

[47] ČSN ISO 11845. *Koroze kovů a slitin - všeobecné zásady pro korozní zkoušky*. Česká republika: Český normalizační institut, Září 1997.

Seznam použitých zkratek a symbolů

PEO – plazmatická elektrolytická oxidace

MAO – mikroobloukova oxidace

FCC – kubická plošná středěná mřížka

Rekr. – rekrystalizace

BCC – kubická prostorově středěná mřížka

CFRP – kompozit tvořený polymerní matricí s uhlíkovými vlákny

VOC – obsah organických těkavých látek

pH – vodíkový exponent

Použité rovnice

(1) Vzorec oxidu hlinitého

(2) Reakce hliníku s kyslíkem

(3) Interakce čistého hliníku (nepokrytého oxidovým filmem) s vodou

(4) Reakce hliníku se zředěnou kyselinou sírovou

(5) Reakce hliníku s koncentrovanou studenou kyselinou sírovou

(6) Korozní rovnice pro hliník v kyselině sírové

(7) Korozní reakce hliníku při zahřátí v kyselině dusičné

Seznam obrázků

Obrázek 1 Binární diagram Fe-Fe3C [39]....5
Obrázek 2 Schéma sendvičového panelu [41] 7
Obrázek 3 Ukázka dekorativní anodické oxidace [25] 9
Obrázek 4 Ukázka tvrdé anodické oxidací [26] 11
Obrázek 5 Plazmový výboj kolem součásti ponořené v elektrolytu [29] 14
Obrázek 6 Srovnávaní struktury tvrdého eloxu (vlevo) a PEO (vpravo) [30] 15
Obrázek 7 Stupně korozní agresivity pro uhlík z roku 2013 [51] 20
Obrázek 8 Stupně korozní agresivity pro zinek z roku 2013 [51]....20
Obrázek 9 Mapa korozní rychlosti uhlíkové oceli v České republice pro rok 2001 [51] 21
Obrázek 10 Práškový lak na PEO povlaku na Mg substrátu [31]....29
Obrázek 11 Zkušební vzorky černé anodické oxidace....32
Obrázek 12 Zkušební vzorky práškové barvy 33
Obrázek 13 Zkušební vzorky stříbrné anodické oxidace 33
Obrázek 14 Tloušťkoměr ELCOMETER [33]....36
Obrázek 15 Kondenzační komora Fakulty strojní....37
Obrázek 16 Připravené vzorky pro zkoušku 37
Obrázek 17 Výsledek experimentu v kondenzační komoře (240 hodin) 38
Obrázek 18 Výsledek experimentu v kondenzační komoře (720 hodin) 38
Obrázek 19 Výsledek experimentu v kondenzační komoře (1000 hodin) 39
Obrázek 20 Výsledek experimentu v solní lázně po 672 hodinách, černá anodická oxidace 42
Obrázek 21 Výsledek experimentu v solní lázně po 672 hodinách, stříbrná anodická oxidace....43
Obrázek 22 Výsledek experimentu v solní lázně po 672 hodinách, prášková barva 43

Seznam tabulek

Tabulka 1 Srovnání MAO oxidace s tvrdou anodickou oxidací [14]. 16
Tabulka 2 Stupně korozní agresivity [52] 19
Tabulka 3 Chemické složení materiálu EN AW – 5754 [60] 34
Tabulka 4 Technologický postup dekorativní anodické oxidace 34
Tabulka 5 Technologický postup aplikace práškové barvy 35
Tabulka 6 Zprůměrovaný výsledek měření tloušťky povlaku na vzorcích 35
Tabulka 7 Vývoj pH pro černou anodickou oxidaci, solní lázeň 40
Tabulka 8 Vývoj pH pro stříbrnou anodickou oxidaci, solní lázeň 41
Tabulka 9 Vývoj pH pro práškovou barvu, solní lázeň 42

Seznam grafů

Graf 1 Vývoj pH na čase, černá anodická oxidace 40
Graf 2 Vývoj pH na čase, stříbrná anodická oxidace 41
Graf 3 Vývoj pH na čase, prášková barva 42