



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

KOROZE LETECKÝCH KONSTRUKCÍ

CORROSION OF AIRCRAFT STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Juraj Poláček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Katrňák

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Juraj Poláček**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Katrňák**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Koroze leteckých konstrukcí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je popsat výskyt koroze na letecké technice v závislosti na použitých materiálech a operačním prostředí, definovat možná nebezpečí, a rozebrat možnosti ochrany proti korozi.

Cíle bakalářské práce:

1. Stručný popis letounu.
2. Principy vzniku korozních procesů.
3. Letecké materiály a jejich korozní vlastnosti.
4. Vliv prostředí na vznik rozvoj koroze.
5. Výskyt koroze na typických místech letecké konstrukce.
6. Možnosti ochrany proti korozi.

Seznam doporučené literatury:

PETRÁSEK, M. a V. KRCHŇAVÝ. Vliv koroze na provozní efektivnost bojové letecké techniky. Výzkumná zpráva, UO Brno, Brno, 2005.

CAP1570. Corrosion and Inspection of General Aviation Aircraft. [online], Published by the Civil Aviation Authority, UK, 2017. Dostupné z:
https://publicapps.caa.co.uk/docs/33/CAP1570_Corrosion.pdf.

AOPA PILOT. Airframe and Powerplant, Corrosion Control. [online], USA, 1997. Dostupné z:
[https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/1997/november/pilot/airframe-and-powerplant-\(9\)](https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/1997/november/pilot/airframe-and-powerplant-(9)).

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce se zabývá korozním napadením leteckých konstrukcí a jejich vlivů na mechanické vlastnosti jednotlivých částí leteckých konstrukcí. Rešeršní část práce popisuje principy vzniku korozních napadení a vliv agresivních prostředí na jejich vznik a rozvoj. Vliv agresivních prostředí je demonstrován prostřednictvím korozních zkoušek. Práce mapuje nejpoužívanější materiály v leteckém průmyslu. Současně přiřazuje jednotlivé materiály na typická místa letecké konstrukce. Prostřednictvím informací a pomoci podniku LOM Praha definuje a zobrazuje nejčastější místa výskytu koroze. V práci byl také proveden popis možných nebezpečí plynoucích z koroze na příslušném místě letecké konstrukce. Výstupem práce jsou možnosti ochrany proti korozi. Jedná se zejména o proces anodizace, povrchových úprav, údržby a správném konstrukčním řešení materiálu při vývoji leteckých konstrukcí. V důsledku rozsáhlého použití procesu anodizace a povrchových úprav, byla provedena analýza vlivu těchto procesů na mechanické vlastnosti hliníkové slitiny 6061.

KLÍČOVÁ SLOVA

koroze, letecké konstrukce, letecké materiály, agresivní prostředí, únava materiálu, anodizace, čištění

ABSTRACT

Presented bachelor's thesis deals with the corrosion attack of aircraft structures and their influence on the mechanical properties of individual parts of aircraft structures. The research part of the thesis describes the principles of corrosion attack formation and the influence of aggressive environments on their formation and development. The influence of aggressive environments is demonstrated through corrosion tests. The thesis maps the most commonly used materials in the aerospace industry. At the same time, it assigns specific materials to typical locations of aircraft structures. Through information and assistance with LOM Prague company, the thesis identifies and displays the most common corrosion-prone areas. Additionally, possible hazards arising from corrosion in specific locations of aircraft structures are described. The output of the thesis presents options for corrosion protection. This is especially the process of anodization, surface treatments, maintenance and appropriate material design in the development of aircraft structures. Due to the extensive use of the anodization process and surface treatments, an analysis was conducted to assess their impact on the mechanical properties of aluminium alloy 6061.

KEYWORDS

corrosion, aircraft structures, aircrafts materials, aggressive environment, metal fatigue, anodization, cleaning

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLÁČEK, Juraj. *Koroze leteckých konstrukcí* [online]. Brno, 2023 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/145807>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Ing. Tomáš Katriňák.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Koroze leteckých konstrukcí“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Tomáše Katrňáka s použitím literatury a dalších informačních zdrojů uvedených v části Seznam použitých zdrojů.

V Brně dne 26.05.2023

.....
Juraj Poláček

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych se poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomášovi Katrňákovi, za jeho rady, připomínky a čas strávený konzultacemi během vypracování bakalářské práce. Dále chci poděkovat pracovníkům státnímu podniku LOM Praha za poskytnuté informace, které mi pomohli při zpracování jednotlivých částí práce. V neposlední řadě patří poděkování rodině za podporu.

OBSAH

1. STRUČNÝ POPIS LETOUNU	10
2. PRINCIPY VZNIKU KOROZNÍCH PROCESŮ	13
2.1 KOROZNÍ PROSTŘEDÍ A AGRESIVITA	15
2.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PRŮBĚH KOROZE	16
2.3 ROZDĚLENÍ KOROZE	18
2.3.1 <i>Rozdělení podle druhu korozního prostředí</i>	19
2.3.1.1 Atmosférická koroze	19
2.3.1.2 Koroze v kapalinách	19
2.3.1.3 Půdní koroze	20
2.3.2 <i>Rozdělení podle kombinace s vnějšími činiteli</i>	20
2.3.2.1 Koroze při mechanickém namáhání materiálu	20
2.3.2.2 Koroze při únavě materiálu	20
2.3.2.3 Vibrační koroze	20
2.3.2.4 Koroze bludnými proudy	21
2.3.3 <i>Rozdělení podle druhu korozního napadení</i>	21
2.3.3.1 Rovnoměrná koroze	21
2.3.3.2 Nerovnoměrná koroze	22
3. LETECKÉ MATERIÁLY A JEJICH KOROZNÍ VLASTNOSTI.....	30
3.1 KOROZNÍ VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN	31
3.2 KOROZNÍ VLASTNOSTI ŽELEZA A JEHO SLITIN	34
3.3 KOROZNÍ VLASTNOSTI TITANU A JEHO SLITIN	35
3.3.1 <i>Slitiny typu α</i>	35
3.3.2 <i>Slitiny typu $\alpha+\beta$</i>	36
3.3.3 <i>Slitiny typu β</i>	36
3.4 KOROZNÍ VLASTNOSTI HOŘČÍKU A JEHO SLITIN	37
3.5 KOROZNÍ VLASTNOSTI NIKLU A JEHO SLITIN	39
3.6 KOROZNÍ VLASTNOSTI KOBALTU A JEHO SLITIN	41
4. VLIV PROSTŘEDÍ NA VZNIK A ROZVOJ KOROZE	42
4.1 PODNEBÍ A VLHKOST	42
4.2 VODA A JEJÍ VLIV	43
4.3 TEPLOTA A JEJÍ VLIV	43
4.4 ÚDRŽBA A OPRAVA	44
4.5 KOROZNÍ ZKOUŠKY	45
5. VÝSKYT KOROZE NA TYPICKÝCH MÍSTECH LETECKÉ KONSTRUKCE	49
5.1 ODSTRANĚNÍ KOROZE	64
6. MOŽNOSTI OCHRANY PROTI KOROZI	66
6.1 ANODIZACE V KYSELINĚ SÍROVÉ	67
6.2 ANODIZACE V KYSELINĚ CHROMOVÉ	67
6.3 POVRCHOVÉ ÚPRAVY	70
6.4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ MATERIÁLU	74
6.5 ČISTĚNÍ A ÚDRŽBA	78
ZÁVĚR	80
POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE	82

Úvod

Za vůbec první nastínění letectví a letecké konstrukce jako také se považují kresby italského malíře Leonarda da Vinciho, který nakreslil různá létající zařízení, za podmínky, že bude použita jen lidská síla. To samozřejmě nestačilo a muselo dojít k značnému vývoji. V 18. století se uskutečnil první úspěšný let horkovzdušným balonem sestrojen bratři Montgolfierovými. V následujících desetiletích docházelo k značnému vývoji leteckých konstrukcí přes kluzáky, letadla poháněna parním strojem až po motorová a vojnová letadla.

Požadavky na zvyšování bezpečnosti letecké dopravy vedli ke zkonstruování moderních a bezpečných letadel obrovských rozměrů. Jedná se zejména o dopravní, nákladní letouny a kosmické raketoplány. Postupem času se letecká doprava stala nejbezpečnější dopravou. Avšak aby tato bezpečnost byla dodržena, popřípadě vylepšena, musí být letadla neustále servisována. Při servisování a generální opravě pracovníci servisu častokrát narazí na problém, který dozajista postihoval i prvotní letadla a postihuje i letadla dnešní doby. Jedná se o problém koroze.

Předložená bakalářská práce se zabývá právě problematikou koroze vyskytující se na leteckých konstrukcích. Vzhledem k tomu, že koroze může vést až k úplnému rozpadnutí materiálu, je to velmi nebezpečný a nežádoucí jev. Právě seznámení se s korozí obecně, výskyt koroze na leteckých materiálech a možnosti předcházení koroze byli důvody výběru bakalářské práce. Problematika koroze je velmi důležitým tématem, protože náklady spojené s jejím odstraňováním jsou vysoké. Z toho plyne, že je lepší korozi předcházet a zabraňovat jejímu rozšiřování.

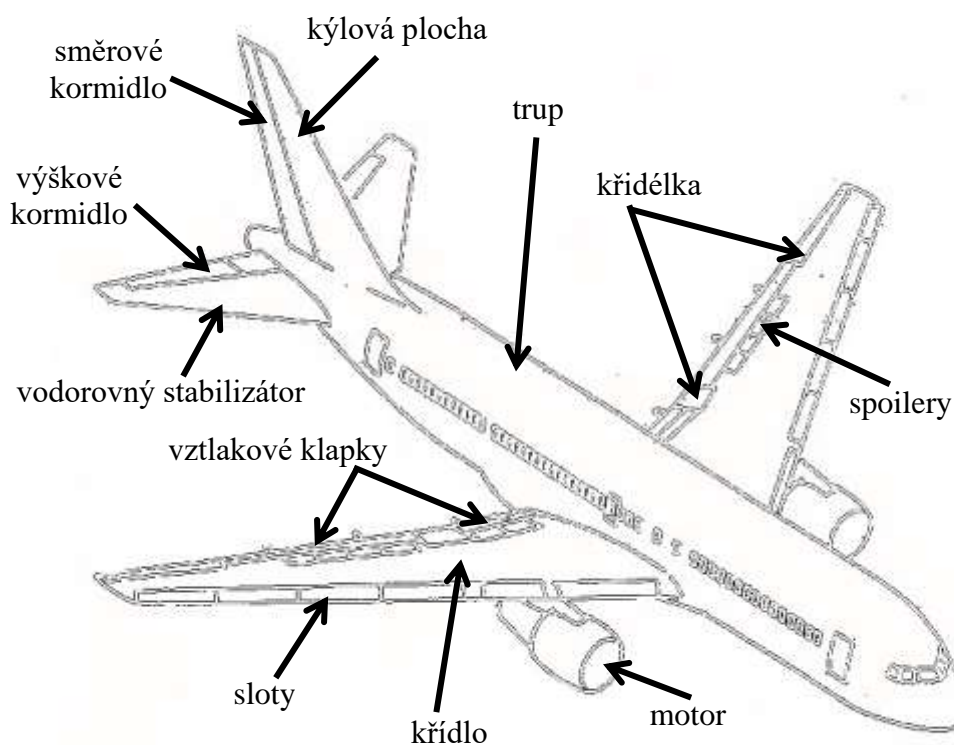
Hlavním cílem bakalářské práce je právě ochrana proti korozi a zjištění možností na zabránění vzniku a rozvoji korozi. Právě díky ochraně můžou letadla dosahovat delší dobu provozuschopnosti, což vede k snížení počtu neplánovaných odstávek letadla a jiných nepředvídatelných problémů spojených s korozí. Moje bakalářská práce analyzuje vznik korozních procesů a mapuje nejčastější druhy, které se vyskytují nejen na leteckých konstrukcích ale i na konstrukcích, nebo materiálech, se kterým docházíme do kontaktu každý den. V leteckém průmyslu se používá široká škála materiálu. Právě na letecké materiály je zaměřen další cíl, který prozkoumává nejčastěji se používající materiály a k jednotlivým materiálům přiřazuje konkrétní typ koroze, kterým je daný materiál postihován nejvíce. Pak se práce zaměřuje na zjištění závislosti mezi korozí a agresivním prostředím, které vede k vzniku a dalšímu nežádoucímu rozvoji korozi materiálu a může způsobovat značné nebezpečí. Tato část je velmi důležitá, z toho důvodu, že koroze daného materiálu se bude chovat jinak v méně agresivním a jinak ve více agresivním prostředí. Práce také identifikuje místa letecké konstrukce, které jsou nejčastěji napadaný korozí.

1. Stručný popis letounu

Beňo [9] definuje letoun jako motorové letadlo těžší než vzduch, používající ke svému pohybu aerodynamické síly, s pevnými nosnými plochami (obvykle s pevnými křídly). Letadla jsou složitým komplexem různorodých prvků, s různým způsobem fungování, které zabezpečují plnění hlavních úloh letadla. Používají se pro různé účely a jsou nejvýznamnější součástí leteckého provozu.

Beňo [9] také definuje letecký průmysl jako souhrn činností a organizací, jejíž cílem je využití vzdušného prostoru na uskutečnění letu. Zdroj [45] rozděluje letectví do 3 odvětví: komerční, obecné a vojenské letectví. Od typu letectví se odvíjí hlavní funkce letadla. Primární funkcí komerčního odvětví leteckého průmyslu (dopravního letadla) je přeprava platících cestujících nebo nákladu. Komerční letectví zahrnuje provoz leteckých společností. Letadla zařazena do obecného letectví jsou v zásadě určena pro osobní dopravu nebo obchodní dopravu, která nepoužívá leteckou společnost. Jedná se zejména o obchodní nebo rekreační lety. Vojenské letectví je použití vojenských letadel a jiných létajících strojů pro účely vedení nebo umožnění vzdušné války. To zahrnuje letecký náklad, který může poskytnout logistické zásoby rozmístěným vojákům, letecký boj nebo špionáž. Informace týkající se jednotlivých odvětví letectví byly převzaty ze zdroje [45].

Letoun jako celek vytváří tři základní sestavy: **drak, pohonná soustava a výstroj**. Obrázek 1.1, převzatý ze zdroje [15, s. 12], popisuje jednotlivé části letecké konstrukce moderního dopravního letadla.



Obrázek 1.1: Popis konstrukce dopravního letadla

Evans [15] detailně popisuje jednotlivé části letadla. Vnější tvar letadla určuje aerodynamika. Letadlo bez motorů se nazývá drak. Schránka na náklad se nazývá trup a zpravidla má válcovitý tvar. Předek trupu se nazývá **příd'**, zadní konec **zád'**. Trup vytváří prostor pro rozmístění posádky, cestujících, nákladu a výstroje. Beňo [9] uvádí, že trup je pevnostně chápán jako soustava, prostorový nosník spojující ostatní části draku v jeden celek. Trup s nákladem se do vzduchu dostává pomocí nosných ploch – **křidel**, které při obtékání proudem vzduchu vytváří vztlakovou sílu. Křídla letadla tedy tvoří nosný systém. Ten obsahuje také podsestavy, které s uvedenou funkcí souvisí – aerodynamická kormidla příčného řízení (**křídélka**), mechanizaci křidel (**klapky, sloty, rušiče vztlaku, brzdy**), včetně prvků jejich ovládní [9]. Na zádi trupu se nacházejí **ocasní plochy**, které jsou rozdělené na svislé a vodorovné ocasní plochy. Hlavní úlohou ocasních ploch je zabezpečit přijatelné letové vlastnosti, stabilitu a říditelnost letadla. [15] Na letounu se vyskytují i části, které nejsou uchyceny pevně, ale jsou pohyblivé. Podél přední hrany křidel, která se nazývá **náběžná hrana**, jsou pohyblivé **sloty**. Podél zadní části křidel (**odtoková hrana**) jsou **vztlakové klapky a křídélka**. Na horní straně křídla jsou **spoilery**. Pohyblivá část svislé ocasní plochy je **směrové kormidlo** a na obou polovinách vodorovné ocasní plochy se nachází **výškové kormidlo**. Jeřábek [19] a Evans [15, s. 12] podrobně popisují pohyblivé části letadla a uvádí, že souhrnně se všechny tyto části nazývají **řídící plochy**.

Aby letadlo setrvalo pevně na zemi, je využíváno přistávacího zařízení (**podvozku**). Umožňuje taky rozjezd před vzletem, dojezd po přistání a je to jediný systém, který během samotného letu nepřenáší žádné zatížení [9, s. 147]. Nejběžnější typ je třibodové uspořádání (dvě podvozkové nohy tvoří hlavní podvozek, jedna předový podvozek). Každá noha hlavního podvozku je uchycena v místě spojení křídla s trupem a nese 2 nebo 4 kola. [15, s. 13] Přistávací zařízení je zatahovací, tedy může být ukryto do draku letadla, jakmile se letadlo vzneslo do vzduchu.

Aby letadla byla lépe viditelná pro ostatní účastníky letového provozu, jsou vybavena **zábleskovými světly** (zpravidla červenými a bílými) na trupu a na koncích křidel. [15]

Na to, aby letadlo letělo, potřebuje pohonnou sílu, která překoná **odpor** ve vzduchu. Pohonnou soustavu letadla tvoří soustava všech zařízení, které slouží na produkci tahu potřebného k překonávání odporu [9, s. 173]. Pohonnou sílu vytvářejí **motory** a jejich hlavním úkolem je pohánět letadlo. Velké dopravní letadla jsou poháněny proudovými motory. Evans [15] i Beňo [9] popisují princip fungování proudového motoru. Dmychadlo nasává okolní vzduch, který se stlačuje a proud stlačeného vzduchu žene směrem dozadu. Na motor působí stejně velká síla opačného směru (**tah motoru**). Část stlačeného vzduchu poté proudí do spalovací komory, kam se vstříkuje palivo, které po zapálení hoří. Spalováním paliva vzniká teplo, které ještě více zvyšuje tlak vzduchu. Tento stlačený vzduch proudí ven ze zadní části motoru a přidává se k proudu nasávaného vzduchu, čímž zvyšuje celkový tah motoru.

Pro lepší přehlednost uvádím tabulku 1.1, převzatou ze zdroje [9], která popisuje jednotlivé soustavy letadla a jejich rozdělení na primární a sekundární funkce (pokud se vyskytuje).

Tabulka 1.1: Základní funkce soustav letadla

Soustava	Primární funkce	Sekundární funkce
KŘÍDLO	vytváření potřebného vztlaku	nosit palivo, pohonné jednotky, zabezpečit žádané letové vlastnosti
TRUP	poskytnout dostatečný prostor pro posádku, cestujících a náklad	likvidovat zatížení od připojených křídel, ocasních ploch a podvozku
OCASNÍ PLOCHY	zabezpečit žádané letové vlastnosti, stabilitu a říditelnost	nemá
ŘÍZENÍ	řídít pohyb letounu v rozpětí všech provozních letových režimů	nemá
PODVOZEK	likvidovat reakce od přistávacího nárazu, umožnit a řídit pohyb po zemi	nemá
VÝSTROJ	zabezpečení funkční způsobilosti letounu, bezpečný let	vybavení kabiny pro cestující (kyslíkové systémy, zabraňování šíření požáru), nákladové prostory
MOTOR	pohánění letadla	generování energie pro práci jiných systémů

Jak bylo zobrazeno v tabulce 1.1, výstroj letadla tvoří soubor všech přístrojů a zařízení, které mají zabezpečit plynulost a bezpečnost letu, ale nejsou přímou součástí draku nebo pohonné soustavy. Beňo [9] uvádí jako příklad výstroje letadla například letové přístroje, navigační vybavení, nouzové vybavení, hasící přístroje, protinámrazová zařízení apod. Všechny soustavy popsané v tabulce 1.1 a jejich jednotlivé části jsou náchylné na korozní napadení. Právě těmto korozním napadením a důsledkům z nich plynoucím se věnuje moje bakalářská práce v následujících částech.

2. Principy vzniku korozních procesů

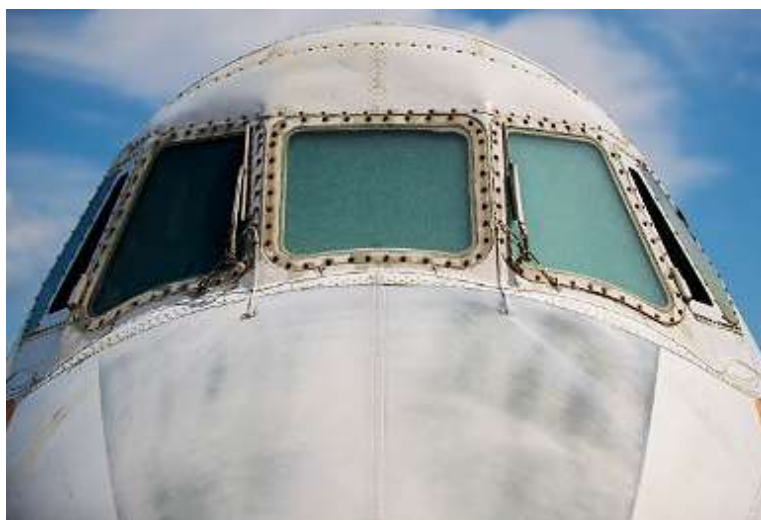
Kusmič [24] definuje korozi jako samovolně probíhající proces postupného narušování a znehodnocování kovů či nekovových organických i anorganických materiálů (například degradace plastu, hornin) vlivem chemické nebo elektrochemické reakce s okolním prostředím.

Koroze je taky dle Kusmiče [24] i autora zdroje [11] chápána jako vzájemné působení mezi prostředím a materiálem, které má za následek znehodnocování materiálu. Toto znehodnocování se může projevit jako změna struktury materiálu, vzhledu, pevnosti, úbytek hmotnosti apod. Znehodnocování a rozrušování materiálu fyzikálními jevy nejčastěji způsobuje eroze a abraze.

Rozrušování materiálu může probíhat chemicky, fyzikálně (eroze, abraze, opotřebení) nebo biologicky (houby, plísně, mikroorganismy) [24]. Mareddy [26] definuje erozi jako přirozený proces rozrušování objektů na zemském povrchu (půda, horniny, skály, apod.). Příčinou eroze je mechanické působení pohybujících se okolních látek – především větru, proudící vody, ledu, sněhu, pohyblivých zvětralin a nepevněných usazenin. Kusmič [24] definuje abrazi jako mechanické obrušování povrchu hornin třením a nárazy horninových částic, které se dostaly do pohybu vlněním vody nebo jsou unášeny tekoucí vodou, větrem nebo ledem.

Korozi nepodléhá pouze samotný materiál, ale i povrchové úpravy materiálu. Hlavním činitelem koroze je atmosférický kyslík, respektive hydroxidová skupina OH a aniony vzniklé z kyselin (CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^-). Vzhled koroze se liší podle kovu. Projevy koroze obecně zhoršují funkci kovu. [24]

Kusmič [24] uvádí další projevy koroze: hloubka průniku koroze a rychlost koroze. Hloubka průniku koroze je vzdálenost mezi původním povrchem kovu a bodem na povrchu kovu napadeného korozí. Rychlost koroze je přírůstek hloubky koroze za jednotku času anebo hmotnost kovu změněného na korozní zplodiny. Obrázek 2.1, převzatý ze zdroje [32], zobrazuje napadení spojovacích prvků na povrchu letecké konstrukce (ve vnější oblasti kokpitu) korozí.



Obrázek 2.1: Napadení povrchu letadla korozí

Koroze představuje u kovů závažný technický a technologický problém zejména z provozního a ekonomického hlediska. Jak již bylo zmíněno, koroze je fyzikálně-chemická interakce kovů a prostředí vedoucí ke změnám vlastností kovů. Vznik korozních procesů je založen zejména na principu mikročlánků, makročlánků, galvanických článků a principu kontaktu dvou kovů. Kusmič [24] a zdroj [22] rozdělují korozi dle podstaty na chemickou a elektrochemickou korozi.

Chemická koroze

Machek [25] i Kusmič [24] uvádí, že chemická koroze probíhá v prostředích, které jsou elektricky nevodivé, jako například plyny nebo neelektrolyty, za normálních i zvýšených teplot. Na chemické korozi se podílí zejména vzdušný kyslík. Při jeho působení na povrchu kovu vzniká vrstva korozních produktů – oxidů. Příkladem může být zpracování ocelí za vyšších teplot, při kterém vzrůstá vrstva oxidů rychleji a vznikají okuje. Princip vzniku je tedy založen na interakci kovu s prostředím, při kterém oxidace kovu a redukce oxidující složky probíhají současně.

Elektrochemická koroze

S pojmem elektrochemické koroze se setkáváme častěji [9]. Princip vzniku elektrochemického korozního procesu vysvětlují Kusmič [24] a Machek [25]. Princip je založen na soustavě elektroda-elektrolyt. Procesy elektrochemické koroze probíhají v elektricky vodivém prostředí (voda, roztoky kyselin, zásad, solí). Princip elektrochemické koroze spočívá v tom, že při vodivém spojení dvou nebo více materiálů s různým elektrodovým potenciálem nebo při vnějším vodivém spojení složek heterogenního materiálu vzniká elektrochemický článek. [25] Elektrochemický článek také poznáme pod pojmenováním galvanický článek, který je tvořen třemi částmi:

- **anodou** – na anodě probíhá oxidace kovu, tedy vlastní koroze, při níž kov ztrácí svůj kovový charakter, přechodem hydratovaných iontů kovu do elektrolytu, stává se z něho materiál s nižším elektrodovým potenciálem, tzv. méně ušlechtilý
- **katodou** – na katodě probíhá redukce některé oxidující složky obsazené v roztoku, nazývané jako depolarizátor, aby mohla dále pokračovat reakce na anodě, materiál s vyšším elektrodovým potenciálem se stává tzv. ušlechtlejší
- **elektrolytem** – vodivý roztok spojující anodu a katodu

Elektrochemický článek je zdrojem pro vytvoření elektrického proudu, který vzniká ve vodivém prostředí mezi čistým kovem a jeho zkorodovanými částicemi. V popsaném elektrickém článku anoda vysílá do spojujícího prostředí více iontů, než sama přijímá. U katody jsou poměry obrácené. Anodická a katodická reakce představují dohromady vznik korozního procesu. Každá reakce probíhá na jiném místě povrchu. Kov s nižším elektrodovým potenciálem bude anodou a bude korodovat. [11, 9]

Galvanický článek také vzniká při styku dvou různých kovů v elektrolytu, přičemž jeden kov tvoří anodu a druhý katodu. Elektrodový potenciál určuje, jestli je daný kov anodou nebo katodou. [24]

Ve struktuře většiny kovových materiálů jsou obsaženy jisté heterogenity (chemické nečistoty). Právě přítomnost nečistot vede ke vzniku mikročlánků na povrchu kovů. Mikročlánky se vyznačují velmi malými, často až neměřitelnými rozměry a parametry. Vznik mikročlánků je

způsoben neustálým pohybem elektronů ve směru z anodového místa ke katodovému. [25] Částice kovů s kladnějším potenciálem tvoří anodová místa, částice se zápornějším katodová místa [24].

Princip vzniku korozního procesu vlivem makročlánků popisuje zdroj [11]. Proces souvisí s oxidačním a redukčním dějem, který probíhá na povrchu kovu při styku s elektrolytem. Makročlánky jsou články, které se vyznačují velkými vzdálenostmi anodického a katodického místa. Vznik makročlánků se obvykle spájí se zařízeními jako jsou ropovody nebo plynovody. Tato zařízení procházejí nestejnoroďým prostředím, kde se často mění vlhkost, chemické složení elektrolytu a přístup kyslíku k povrchu kovu. Jedná se zejména o půdní elektrolyt. Kov, který má zápornější korozní potenciál je anodou, kov s kladnějším korozním potenciálem katodou. Činnost takového článku vede k urychlení koroze anodického kovu, protože zde probíhá oxidační děj a jeho následkem je uvolňování iontů do okolního prostředí. Katodou se tak stává místo, kde probíhá redukční děj, na kterém dochází k vázání uvolněných iontů z anody. [24, 25]

Vzájemné působení mikročlánků a makročlánků má za následek značné narušení povrchů kovů v místech s různou vlhkostí a kyslíkovou regulací. Vznik korozních procesu úzce souvisí s korozním prostředím a agresivitou. **Jednotlivé principy vzniku korozních procesů budou popsány pro každý typ koroze v podkapitole 2.3.**

2.1 Korozní prostředí a agresivita

Koroze může probíhat v:

- zemské atmosféře
- půdách (dálkovody, kabelové spoje, základy budov)
- přírodní vodě a mořské vodě
- průmyslových prostředích (vysoká korozní agresivita – kyseliny, zásady, soli, organické chemikálie, plynná prostřední působící za vysokých teplot a tlaků, spaliny, vodní pára apod.)

Korozní agresivita je schopnost atmosfér vyvolat korozi v daném korozním systému (například atmosférickou korozi příslušného kovu nebo slitiny). Agresivita prostředí je ovlivněna fyzikálně – chemickými vlastnostmi. Může se jednat například o teplotu, chemické složení, hustotu, relativní vlhkost a taky znečištění vzduchu agresivními látkami. [24]

Korozní agresivita prostředí je podle normy ČSN ISO 9223 kvantitativně rozdělena do pěti stupňů korozní agresivity označených C1 až C5. Jednotlivé stupně agresivity popisuje tabulka 2.1 převzatá ze zdroje [24]. Stupně korozní agresivity jsou odvozeny z údajů o úrovních rozhodujících činitelů atmosféry působících korozi kovu a slitin.

Tabulka 2.1: Rozdělení korozní agresivity podle normy ČSN ISO 9223

Stupeň	Korozní agresivita
C1	velmi nízká
C2	nízká
C3	střední
C4	vysoká
C5	velmi vysoká

Norma ČSN EN 12500 rozděluje atmosféru na vnitřní a vnější. V rámci vnitřní atmosféry se může jednat o prostředí s kontrolovaným nebo nekontrolovaným ovzduším. Vnější atmosféru můžeme brát jako volnou (přímé působení klimatických vlivů) nebo pod přístřeškem (bez působení srážek, vysoké vlhkosti, přímého slunečního záření). Tabulka 2.2, převzatá ze zdroje [24], popisuje typický výskyt jednotlivých typů korozní agresivity.

Tabulka 2.2: Rozdělení korozní agresivity podle normy ČSN EN 12500

Stupeň	Korozní agresivita	Výskyt
C1	velmi nízká	vnitřní klimata s řízenými podmínkami
C2	nízká	vnitřní klimata s neřízenými podmínkami s výjimkou vlhkých klimatických oblastí
C3	střední	vnější klimata v suchých, chladných klimatických oblastech, provětrávané přístřešky v mírných klimatických oblastech
C4	vysoká	vnější klimata v mírných klimatických oblastech, neprovětrávané přístřešky v mírných, vlhkých klimatických oblastech
C5	velmi vysoká	vnější klimata ve vlhkých klimatických oblastech, velké neprovětrávané přístřešky

Podrobně se koroznímu prostředí a jeho vlivu na vznik a rozvoj koroze věnuji v kapitole 4.

2.2 Faktory ovlivňující průběh koroze

Faktory, které mají vliv na průběh koroze, označuje Kusmič [24] jako činitele korozního procesu. Podmínky korozního procesu závisí na třech činitelích, které mohou působit jednotlivě nebo zároveň. Mezi podmínky korozního procesu patří: činitel kovového materiálu, činitel konstrukce a činitel prostředí a času. Někdy je obtížné předem správně posoudit, který z činitelů koroze, a který z jeho možných účinků se projeví jako rozhodující pro samotný průběh koroze v daných podmínkách.

Činitel kovového materiálu

Údaje o korozní odolnosti materiálu se obvykle vztahují na kov či slitinu odpovídající chemickým složením k příslušné normě nebo technickým podmínkám [11]. Vlastnosti materiálu rozhodující o korozní odolnosti jsou obsah nečistot, struktura materiálu a stav povrchu. Nečistoty kovového materiálu se rozdělují na složky, které nejsou záměrnými legovacími přísadami k základnímu kovu a zároveň je nelze při výrobě běžnými postupy zcela odstranit (síra v oceli, železo v hořčíkových slitinách) a látky v povrchových vrstvách, které vnikají do povrchu materiálu až při jeho zpracování nebo použití (povrchové vměstky, zaválcované okraje, zbytky pomocných prostředků po pájení nebo svařování). [24]

U látek v povrchových vrstvách, jejich negativní účinek zaniká po adkorodování prvních povrchových vrstev, které obsahují tyto nečistoty [24]. Obecně nebezpečí nečistot kovového

materiálu spočívá v tom, že nečistoty v elektrolytu představují mikroelektrody, které mohou vytvořit nebezpečné korozní články vyloučené na povrchu, narušení souvislosti primárního povrchového ochranného filmu, a to vede ke zvýšení nebezpečí bodového napadení. Proto platí, že vliv nečistot kovového materiálu je tím větší, čím je korozní prostředí, ve kterém se materiál nachází agresivnější. [24, 11]

Činitel konstrukce

V reálných podmínkách je životnost konstrukčního řešení významně ovlivňována nerovnoměrnými formami korozního napadení [11]. Korozní proces ovlivňuje kontakt s jiným materiálem a konstrukční uspořádání částí zařízení. Kusmič [24] nastiňuje důležitý faktor, který ovlivňuje korozní proces, a to vhodný výběr kombinace materiálu konstrukce a ochranného povlaku. Významnou roli taky sehrává správné navržení konstrukčního řešení. Nejvíce používané jsou konstrukce z uhlíkových ocelí, tj. z ocelí vyžadujících přítomnost ochranných povlaků. [33]

Činitel prostředí a času

Průběh koroze je taky závislý na chemickém složení prostředí, ve kterém se daný kov nachází a na časových úsecích, ve kterých kov v prostředí setrvává. V agresivnějším prostředí, jako například vysoké teploty, vysoká vlhkost vzduchu nebo tlaku, probíhá koroze rychleji a častěji než v prostředí, ve kterém není kov vystaven přímému slunečnímu záření a nachází se ve vnitřní klímě s řízenými podmínky [24].

Materiál napaden korozí je znehodnocen v závislosti na míře zasažení a s tím je přímo spojen i pokles technických a mechanických vlastností materiálu. Znaky znehodnocení můžou mít různé formy. Právě tyto formy znehodnocení a jim odpovídající význam na technické a mechanické vlastnosti materiálu popisuje tabulka 2.3 převzatá ze zdroje [24].

Tabulka 2.3: Znaky korozního znehodnocení a následný technický dopad

Znaky znehodnocení	Technický význam
změna lesku, barvy, vzhledu	estetická funkce
hmotnostní úbytek, hloubka průniku koroze	zeslabení nosných průřezů dílů zařízení
změna meze kluzu, pevnosti, houževnatosti	mechanická pevnost kovového materiálu
změna vodivosti	elektrická funkce kovového materiálu
změna koeficientu přestupu tepla	teplosměnná funkce kovového materiálu

Koroze má mnoho forem (jak je podrobněji rozebráno v části 2.3 níže) a lze ji nalézt na povrchu materiálu. Koroze na povrchu však může pronikat dovnitř materiálu. Drobná koroze na povrchu může skrývat výraznější korozi ve struktuře materiálu, což se může týkat mezikrystalové koroze, důlkové koroze i korozního praskání pod napětím [11].

2.3 Rozdělení koroze

2.3.1 Podle druhu korozního prostředí

- 2.3.1.1 atmosférická koroze
- 2.3.1.2 koroze v kapalinách
- 2.3.1.3 půdní koroze

2.3.2 Podle kombinace s vnějšími činiteli

- 2.3.2.1 koroze při mechanickém namáhání materiálu
- 2.3.2.2 koroze při únavě materiálu
- 2.3.2.2 vibrační koroze
- 2.3.2.4 koroze bludnými proudy

2.3.3 Podle druhu korozního napadení

- 2.3.3.1 rovnoměrná koroze
- 2.3.3.2 nerovnoměrná koroze
 - 2.3.3.2A galvanická koroze
 - 2.3.3.2B bodová koroze
 - 2.3.3.2C důlková koroze
 - 2.3.3.2D skvrnitá koroze
 - 2.3.3.2E štěrbinová koroze
 - 2.3.3.2F nitková koroze
 - 2.3.3.2G korozní praskání
 - 2.3.3.2H selektivní koroze
 - 2.3.3.2I erozní koroze
 - 2.3.3.2J únava za koroze
 - 2.3.3.2K napadení vodíkem

2.3.1 Rozdělení podle druhu korozního prostředí

2.3.1.1 Atmosférická koroze

Většina kovových výrobků plní svou funkci v atmosféře, proto se tento druh koroze vyskytuje v největším rozsahu. Zdroj [11] uvádí, že až 80 % výrobků je vystaveno korozním účinkům atmosféry. Jeden z vlivů, které spolupůsobí na atmosférické korozi, jsou klimatické podmínky dané vlhkostí, teplotou vzduchu a jeho znečištěním. Podobně jako koroze kovů v elektrolytech, je i atmosférická koroze založena na principu vzniku elektrochemický korozního procesu. [42] Korozní proces probíhá pod velmi tenkou vrstvou vody nasycené rozpustnými složkami atmosféry, hlavně oxidem siřičitým, oxidem uhelnatým, amoniakem apod. Zdroj [4] vymezuje tloušťku vodního filmu do intervalu 50 až 150 mikrometrů. Film vzniká kondenzací vodních par obsažených ve vzduchu. Atmosférická koroze je typická tím, že vždy napadá celý povrch objektu nebo jeho značnou část. S tímto druhem koroze se můžeme často setkat v leteckých muzeích, kde vyřaděné letouny slouží jako exponáty. Obrázek 2.2, převzatý ze zdroje [1], zobrazuje značné napadení přední části trupu a křídla letounu. Na trupu letounu došlo k výrazné změně barvy a na křídle až k oloupání povrchové barvy.



Obrázek 2.2: Atmosférická koroze

2.3.1.2 Koroze v kapalinách

V technické praxi se vyskytuje převážně voda, ve které jsou rozpuštěné různé chemické látky kyselého a zásaditého charakteru, které přímo ovlivňují intenzitu koroze. Koroze kovů ve vodách je elektrochemický děj. [4] Do styku s vodou přicházejí vodní stroje, zařízení na výrobu páry, chladicí systémy motorů, kompresorů a jiných strojů, rozvodná potrubí a armatury pitných a průmyslových vod. Je způsobována znečištěním vody agresivními látkami ve formě kapalné, plynné, ale i tuhé. Elektrickou vodivost kapaliny jako hlavní příčinu koroze popisoval Machek [25].

2.3.1.3 Půdní koroze

Jedná se o speciální případ koroze, protože půda se skládá z pevné, kapalné i plynné fáze. Největší vliv má kapalná fáze, kterou představují vodné roztoky obsahující například chloridy, sírany, uhličitan, dusičnany. [4] Pro průběh korozního děje v půdě je nezbytná přítomnost půdního elektrolytu, jehož složení závisí na řadě faktorů. Především na druhu půdy, hloubce, ročním období, množství atmosférických srážek, složení povrchových vod, činnosti mikroorganismů a na teplotě. Do půdy jsou převážně ukládána zařízení z oceli, litiny, ve výrazně menším objemu z olova a hliníku. [11]

2.3.2 Rozdělení podle kombinace s vnějšími činiteli

2.3.2.1 Koroze při mechanickém namáhání materiálu

Napětí se soustřeďuje ve vrubech nebo na hranicích zrn a tím se zmenšuje elektrovodný potenciál. Napadení proniká do značné hloubky materiálu, přičemž rychle klesá pevnost bez jakýchkoliv změn na povrchu kovu. Často se vyskytuje v ohybech kotlových trubek. [24]

2.3.2.2 Koroze při únavě materiálu

Tento druh koroze dle Kusmiče [24] vzniká, když je materiál namáhán jakýmkoliv druhem cyklického namáhání za současného vlivu korozního prostředí. Cyklické zatěžování způsobuje porušení celistvosti, a to vede ke vzniku malých trhlin v materiálu. Trhlina se při mechanickém namáhání otevírá a zavírá. Následně začíná pomalý růst trhliny, který vede k poškození materiálu. [11]

2.3.2.3 Vibrační koroze

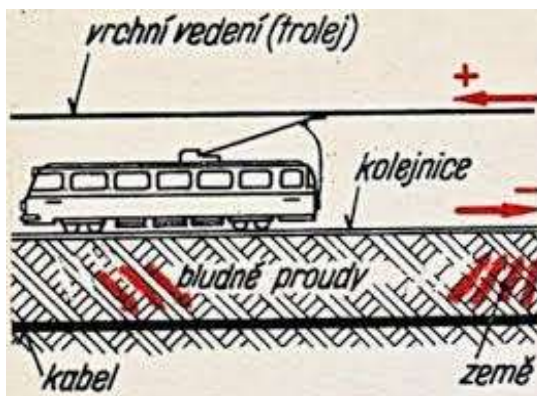
Tento druh koroze vzniká v důsledku vzájemného pohybu kovů. Například vzájemné působení oceli s jakýmkoli materiálem za současného vibračního pohybu při mezních hodnotách součinitele tření. Tento druh koroze se vyskytuje nejčastěji na ložiskách vodních turbín. [24] Právě ložisko narušené vibrační korozí zobrazuje obrázek 2.3, který byl převzatý ze zdroje [24].



Obrázek 2.3: Vibrační koroze ložiska

2.3.2.4 Koroze bludnými proudy

Tento druh koroze popisuje Bařtipán [6] jako nekontrolovaný (bludný) proud z kladného pólu do zařízení. Místo, kde proud vystupuje je anodou a nastává na něm značné rozpouštění kovu. Účinky bludných proudů jsou velmi nebezpečné. Projevují se například na mostní konstrukci, potrubí, vodiče či kovové předměty v továrnách. Původcem bludných proudů jsou zejména stejnosměrné železniční trakce. Bařtipán [6] dává za příklad bludných proudů a jejich vliv tramvajové provozy ve městech. Vznik bludných proudů na trolejových kolejnicích zobrazuje obrázek 2.4, převzatý ze zdroje [6].



Obrázek 2.4: Vznik bludných proudů na trolejových kolejnicích

2.3.3 Rozdělení podle druhu korozního napadení

2.3.3.1 Rovnoměrná koroze

Rovnoměrnou korozi se rozumí rovnoměrné napadení materiálu se stejnou korozní rychlostí po celém povrchu, který je ve styku s korozním prostředím. [24] Postup rovnoměrné koroze je velmi snadno kontrolovatelný a předvídatelný. Jedná se o nejběžnější typ korozního napadení kovových materiálů. Rovnoměrná koroze se taky nazývá plošná koroze [22].

Rychlost rovnoměrné koroze se vyjadřuje v $[g \cdot m^{-2} \cdot den^{-1}]$ nebo $[mm \cdot rok^{-1}]$. Zdroj [16] uvádí typický příklad rovnoměrné koroze – koroze uhlíkové oceli nebo zinku v prostředí zředěné kyseliny sírové nebo atmosférickou korozi uhlíkové oceli.

Projevuje se hmotnostním úbytkem korodujícího kovu $\Delta m_s [g \cdot m^{-2}]$, který se vztahuje na jednotku plochy:

$$\Delta m_s = \frac{m_0 - m_k}{S} \quad (1)$$

kde: m_0 ... hmotnost dílu před korozním napadením [g]

m_k ... hmotnost dílu po odstranění korozních zplodin [g]

S ... plocha sledovaného dílu $[m^{-2}]$

Úbytek rozměru L_r [μm]

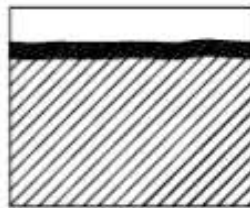
$$L_R = \frac{m_s}{\rho} \quad (2)$$

kde: L_r ... úbytek rozměru kovu [μm]

m_s ... úbytek hmotnosti kovu [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$]

ρ ... hustota kovu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Obrázek 2.5, převzatý ze zdroje [24], zobrazuje řez povrchem kovu a rozložení rovnoměrné koroze na povrchu kovu. Obrázek 2.6, převzatý ze zdroje [21], zobrazuje napadení trupu a ocasní části letounu rovnoměrnou korozí.



Obrázek 2.5: Rovnoměrná koroze



Obrázek 2.6: Rovnoměrná koroze na letounu F-16

2.3.3.2 Nerovnoměrná koroze

Zdroj [11] uvádí, že vznik nerovnoměrné koroze vyvolává nestejně rozložené korozní napadení povrchu kovů. Nerovnoměrná koroze napadá určité části povrchu nebo i vnitřku materiálu. Příčinou může být rozdílná vlastnost kovů, složení korozních zplodin, místní změna teploty a transport korozních produktů na různá místa povrchu materiálu. Je více nebezpečná, protože napadá materiál jen v určitém místě. Na rozdíl od rovnoměrného napadení se výskyt nerovnoměrných forem koroze hůře předpovídá a k selhání výrobku dochází v kratší době. [24, 11] Obrázek 2.7, převzatý ze zdroje [24], zobrazuje řez materiálem a průnik nerovnoměrné koroze ve formě důlku do hloubky materiálu.



Obrázek 2.7: Nerovnoměrná koroze

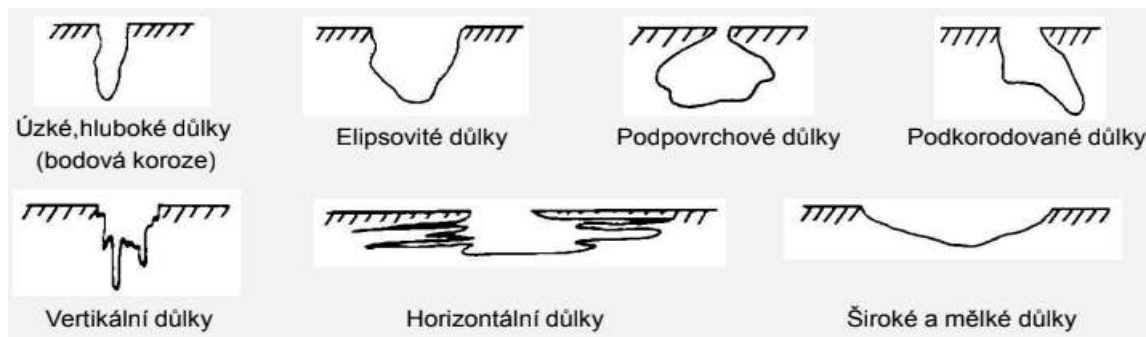
2.3.3.2A Galvanická koroze

Vzniká spojením dvou odlišných kovů a jejich vystavením koroznímu prostředí za přítomnosti elektrolytu. Galvanické korozi se říká i bimetrická či elektrolytická koroze. Ušlechtilejší kov (kатоda) koroduje pomaleji, než by korodoval kov sám. Kov méně ušlechtilejší (anoda) naopak koroduje rychleji než v případě, kdy není s druhým kovem vodivě spojen. [24] Galvanická koroze vzniká hlavně tam, kde se drží vlhkost a kde je povrch znečištěný. Pirolini [35] ve svém článku popisuje místa, kde se tvoří vhodné prostředí pro vznik galvanické koroze. Jedná se zejména o štěrbiny, rýhy a záhyby jako překryvy plechů, podložky pod šrouby apod. Galvanická koroze však neprobíhá, když je mezi kovy izolant nebo kovy nejsou spojeny elektrolytem. [11] Obrázek 2.8, převzatý ze zdroje [11], zobrazuje montážní nástavec z hliníkové slitiny, používaný k montáži kompozitních letových konstrukcí z uhlíkových vláken na trup a průnik galvanické koroze do materiálu. K vytvoření galvanického článku došlo při kontaktu hliníku s uhlíkem.



Obrázek 2.8: Galvanická koroze

Obrázek 2.9, převzatý ze zdroje [24], zobrazuje různé typy důlků, se kterými se můžeme setkat při nerovnoměrném korozním napadení, konkrétně při bodové a důlkové korozi. Právě tyto dva druhy korozního napadení se velmi často vyskytují v letectví, zejména na materiálech vyrobených z hliníkových slitin.



Obrázek 2.9: Typy důlků

Konkrétním materiálům používaných v leteckých konstrukcích a jejich typickými korozními napadeními, se moje bakalářská práce věnuje v kapitole 3.

2.3.3.2B Bodová koroze (pitting)

Kusmič [24] uvádí výskyt bodové koroze zvláště u materiálů odolných proti rovnoměrné korozi, například korozivzdorné oceli a hliník. Korozní napadení se soustředí do několika málo bodů na povrchu kovu, kde vznikají úzké hluboké důlky, které mohou narušit strukturální integritu. [11] Nejčastěji se vyskytuje v místech nespojitého povrchového filmu (póry) a v místech vad materiálu vyúsťujících na povrch [24]. Korozní proces je autokatalytický. Vznik důlku je podmíněn migrací koncentrace agresivních iontů a hydrolyzou korozních produktů – klesá hodnota pH. Vzniklý důlek se dále šíří a malá velikost ústí důlku nedovoluje výměnu roztoku uvnitř. Důlek uvnitř zachycuje elektrolyt a složení elektrolytu se může s postupem koroze měnit. Rychlost pittingu souvisí právě se změnou složení elektrolytu. [11] Ten může rychlost, resp. formu koroze urychlit, resp. změnit.

Vznik a šíření bodové koroze jsou usnadněny zvýšenou koncentrací agresivního iontu, přítomností oxidujících látek, zvýšenou teplotou a nízkým pH. Hloubka napadení je obvykle větší než největší průměr důlku [24]. Z tohoto důvodu je koroze velmi nebezpečná a hrozí nebezpečí vzniku trhlin u cyklicky namáhaných součástí, zeslabení průřezu nebo korozní praskání. Bodovou korozi lze vidět na obrázku 2.10, který byl převzatý ze zdroje [11]. Jedná se o klikový hřídel leteckého motoru, na kterém je bodová koroze viditelná i lidským okem.



Obrázek 2.10: Bodová koroze

2.3.3.2C Důlková koroze

Vznik důlkové koroze popisuje Kusmič [24]. Vzniká v případě lokálně zvýšené aktivity povrchu. Zasažena je pouze malá část povrchu. Hloubka napadení je obvykle menší než největší průměr důlku. K tomuto poškození obvykle dochází v korozním prostředí obsahujícím ionty Cl^- nebo oxidy kyslíku. Vytvoření důlkové koroze může významně podpořit strukturní nestejnorodost povrchu kovů i ochranných vrstev a vlastnosti korozního prostředí.

Důležitým ukazatelem proti důlkové korozi nerezové oceli v prostředí s chlorem je tzv. PRE číslo. Velikost tohoto čísla je ovlivněna hlavně složením nerezové oceli. Důležitými legovacími prvky jsou chrom, molybden, dusík, někdy i wolfram. [24] Vztah pro výpočet PRE je:

$$PRE = 16 \% Cr + 3,3 (\% Mo + 0,5 \% W) + 16 \% N \quad (3)$$

Stanovení rozsahu napadení bodovou nebo důlkovou korozí je velmi důležité v provozních podmínkách, kde je zapotřebí stanovit zbytkovou životnost kovové konstrukce. Kusmič [24] také uvádí normu ČSN ISO 11463, která se zabývá hodnocením a stanovením rozsahu napadení materiálu bodovou korozí. Dle normy se hodnocení těchto dvou typů korozí provádí například rentgenografickou, elektromagnetickou nebo ultrazvukovou metodou. Obrázek 2.11, převzatý ze zdroje [24], zobrazuje porovnání důlkové a bodové koroze materiálu a jejich následný průnik do struktury materiálu.



Obrázek 2.11: Porovnání dvou typů korozí

2.3.3.2D Skvrnitá koroze

Zdroj [22] popisuje skvrnitou korozi jako malé důlky, které lze charakterizovat jako skvrny. U tohoto korozního napadení se projevuje malý poměr hloubky k šířce a tento poměr je zachován i při dalším průběhu koroze. Skvrny nezasahují do příliš velkých hloubek a dalším působením atmosféry se spojují a postupně vytváří napadení rovnoměrné.

2.3.3.2E Štěrbínová koroze

Tento druh koroze souvisí s bodovou korozí a vzniká v případech, kdy je mezi plochami dvou kovů úzké místo, které se nazývá štěrbina, jež je příčinou nerovnoměrného provzdušnění a vzniku korozního napadení. [11] Kyslík rozpuštěný ve vodném elektrolytu je spotřebován depolarizační reakcí a vzhledem k tomu, že je roztok uvnitř štěrbině obtížně vyměňován, je omezen i přístup dalšího kyslíku. Kvůli deficitu oxidačního činidla se povrch štěrbině chová jako anoda. Elektrony uvolňované touto reakcí jsou kovem přenášeny k povrchu mimo štěrbinu, kde není omezen přístup rozpuštěného kyslíku a toto okolí štěrbině se chová jako katoda. Tato místa vznikají často mezi dvěma plechy spojenými nýty nebo šroubovým spojem, pod podložkami, těsněními. [24, 11] Příklad štěrbinové koroze uvádí autor Roberge [43] na námořním hlídkovacím letadle CP-140. Obrázek 2.12, zobrazuje prasklé nýty na vnější části trupu letadla, které vytvořili štěrbinu. Přes štěrbinu se dostala voda způsobující vznik štěrbinové koroze. Obrázek byl převzatý ze zdroje [43].



Obrázek 2.12: Štěrbínová koroze

2.3.3.2F Nitková koroze

Toto korozní napadení vzniká pod vrstvou organických povlaků (nátěry, konzervační prostředky) nebo pod cínovými, stříbrnými a zlatými povlaky [24]. Narušuje pouze vzhled materiálu. Probíhá obdobným mechanismem jako štěrbínová koroze. Novák [29] popisuje šíření nitkové koroze ve tvaru nitek (vláken) mikroskopickými kanálky mezi povlakem a povrchem kovu. Často se může objevit vyboulení barvy. Vyboulení umožňuje pronikání vlhkosti do vláken. [11] Obrázek 2.13, převzatý ze zdroje [11], zobrazuje nitkovou korozi v oblasti nýtů na letecké konstrukci.



Obrázek 2.13: Nitková koroze

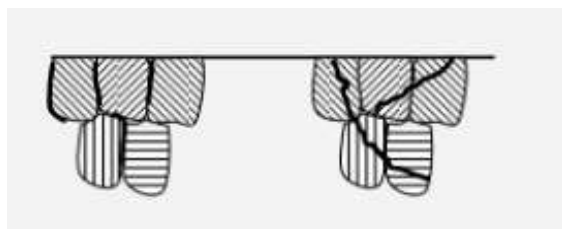
2.3.3.2G Korozní praskání

Novák [29] definuje korozní praskání jako porušení materiálu (prasknutí) vyvolané kombinací účinků tahových pnutí, korozního prostředí a zvýšené teploty. Při korozním praskání dochází ke snížení práce nutné k porušení materiálu oproti namáhání v inertním prostředí. [11] Ve vztahu k vlastnostem poruch materiálu se korozní praskání řadí mezi křehký lom a mez únavy [24]. Trhliny často vycházejí z místa lokálního porušení, většinou z míst napadených bodovou korozi. Rychlý růst trhlin může vést k náhlému a úplnému selhání konstrukčních částí [11].

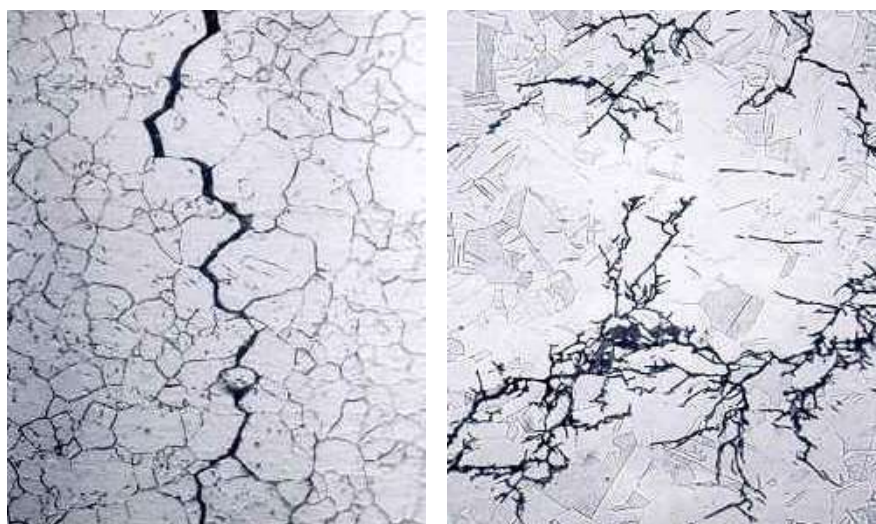
Samotné trhliny působí jako koncentrátor napětí a ve spojení s korozním prostředím dojde k šíření těchto trhlín, které se šíří materiálem buď po hranicích zrn (mezikrystalická koroze) nebo napříč zrny (transkrystalická koroze).

Kovový materiál, který koroduje mezikrystalicky ztrácí mechanickou pevnost díky změnám struktury na hranicích zrn. Změny jsou vyvolány tepelným ovlivněním (zpracováním, svařováním). Kusmič [24] a Novák [29] se shodují, že sklon k tomuto napadení mají velmi často slitiny hliníku a niklu, austenitické korozivzdorné oceli, které jsou vystaveny pnutí za přítomnosti kyslíku, vysoké teploty a chloridových iontů. Při pouhé běžné kontrole povrchu materiálu je koroze velmi špatně viditelná. Probíhá podél rozhraní zrn do značné hloubky, čímž porušuje soudržnost a dochází ke ztrátě mechanických vlastností, a to především pevnosti.

Důsledkem transkrystalického korozního napadení vzniká síť značně rozvětvených trhlinek. Velké množství trhlinek je způsobeno především působením vnitřního napětí spolu s agresivním prostředím. Tento typ koroze je poměrně vzácný a často se vyskytuje u austenitických ocelí vlivem chloridu a u mosazí v parách amoniaku, jak popisují Novák [29] i Kusmič [24]. Transkrystalická koroze je příčinou závažných poruch materiálů, zejména v energetice a chemických provozech. Obrázek 2.13, převzatý ze zdroje [24], zobrazuje (vlevo) průnik mezikrystalické koroze a (vpravo) transkrystalické koroze do materiálu. Obrázek 2.14, převzatý ze zdroje [43], zobrazuje mikroskopickou snímku (vlevo) napadeného tepelného výměníku se slitiny Inconel mezikrystalickou korozi a (vpravo) transkrystalickou korozi nerezové oceli 316.



Obrázek 2.13: Porovnání šíření dvou typů koroze



Obrázek 2.14: Mikroskopické snímky koroze

2.3.3.2H Selektivní koroze

Novák [29] definuje selektivní korozi jako přednostní napadení některé fáze materiálu, jejíž přítomnost je v kovu žádoucí. Příkladem může být třeba odzinkování mosazi, tedy rozpouštění zinku z jeho slitiny s mědí, ale i koroze dvoufázových (duplexních) austeniticko-feritických korozivzdorných ocelí, kdy je přednostně rozpouštěna austenitická fáze, zatímco feritická je odolnější. Vážné problémy způsobuje selektivní rozpouštění železa v šedé litině, jehož výsledkem je pórovitá struktura grafitu s podstatně horšími mechanickými vlastnostmi.

2.3.3.2I Erozní koroze

Rychlost přirozené koroze je umocněna proudícím prostředím, což má za následek rozrušování pasivní vrstvy. Vznikají tak různé rýhy, vlnky, kapkové prohlubně apod. Projevuje se hlavně v potrubích s nějakým proudícím médiem, v němž se vyskytují drobné pevné nebo plynné (bublinky) - nehomogenity. Účinek erozního působení je zvyšován přítomností pevné nebo plynné fáze v proudící kapalině. Při erozní korozi musí být významný podíl anodického rozpouštění na celkovém úbytku kovu. [22, 29] Nejčastěji se vyskytuje na náběžné hraně křídel letounů a na listech rotoru, protože zde proudí vzduch. Právě tento případ zobrazuje obrázek 2.15, převzatý ze zdroje [50], na kterém lze vidět značné napadení listu rotoru vrtulníku erozí.



Obrázek 2.15: Eroze rotorového listu

2.3.3.2J Únava za koroze

Únava za koroze je jev, ke kterému dochází, když jsou materiály v průběhu času oslabovány v důsledku řady stresů, které jsou důsledkem toho, že jsou v korozním prostředí. Když dojde k únavě za koroze, trhliny se začnou objevovat podél povrchu kovu, když se začne degradovat a ztrácet pevnost. [11] Trhliny jsou zpravidla transkrystalické, jak uvádí Kusmič [24]. Jak vystavení střídavému nebo cyklickému namáhání pokračuje, tyto trhliny se zvyšují v počtu a velikosti, případně vytvářejí síť koroze podél povrchu kovu.

2.3.3.2K Napadení vodíkem

Působením vzniklých molekul H_2 uvnitř kovu nastává vodíková křehkost, která způsobuje křehkost kovu, respektive zhoršení mechanických vlastností (tažnost, houževnatost). Vodík difunduje do ocelí, když je na povrchu kovu vysoké množství atomů vodíku a když kov difunduje s vodíkem. Vzrůst tlaku H_2 vede k deformacím okolí, k vzniku a k tvorbě vodíkových vloček. [24]

Rychlost difuze vodíku do ocelí je dána především jeho koncentrací na povrchu kovu. Koncentrace na povrchu kovu je výsledkem rychlosti uvolňování vodíkových atomů. Čím intenzivněji probíhá například elektrolýza, tím více vzniká atomů vodíku. Vznik vodíkových atomů ovlivňují teplota elektrolytu, koncentrace roztoků, intenzita elektrického proudu i vlastnosti kovového povrchu (složení, čistota, drsnost). [24, 29]

Jak již bylo zmíněno, koroze je samovolné a postupné rozrušení kovu a nekovových organických i anorganických materiálů. Je to nežádoucí jev, který probíhá v plynech, kapalinách, zeminách či různých chemických látkách, které jsou s materiálem ve styku. Toto rozrušování se může projevat rozdílně od změny vzhledu, přes zhoršující se mechanické vlastnosti až po úplný rozpad. Míra poškození záleží na prostředí, ve kterém se materiál nachází.

S korozi se prakticky setkáváme skoro všude a je zřejmé, že materiál narušuje a zhoršuje jeho mechanické vlastnosti. Vzhledem k tomu, že materiál napaden korozi se může po čase úplně rozpadnout, je nutné negativním dopadům koroze předcházet. Obzvláště závažní je koroze v letectví. Zvláště pokud se jedná o zhoršení mechanických vlastností a s tím bezprostředním ohrožením bezpečnosti letu. **Podrobně se tématu korozi konkrétních leteckých materiálů a jednotlivých leteckých vybavení a typických míst moje bakalářská práce věnuje v kapitole 3 a 5.** Aby kov mohl plnit svou funkci, musí mít i dostatečnou korozní odolnost, která zajistí, že po celou dobu životnosti kovového výrobku bude bez vážného omezení využitelná primární užitná vlastnost kovu v daném prostředí. **Problematicke korozní odolnosti a ochrany proti korozi se moje bakalářská práce věnuje v kapitole 6.**

3. Letecké materiály a jejich korozní vlastnosti

V leteckých konstrukcích moderních letounů se využívá velké množství konstrukčních materiálů od kovových materiálů přes plasty, keramiku až po kompozity. V konstrukci draku materiály spolu s výrobní technologií doslova podmiňují použití určitých konstrukčních řešení. [9] Při stavbě leteckých součástí se musí důkladně volit optimální vlastnosti materiálu. Každý materiál musí splňovat všechny funkční, cenové ale i technologické požadavky. Při výběru materiálu pro jednotlivé součásti je rozhodující funkce dané součásti, zatížení, kterému bude vystavena a prostředí ve kterém se bude nacházet.

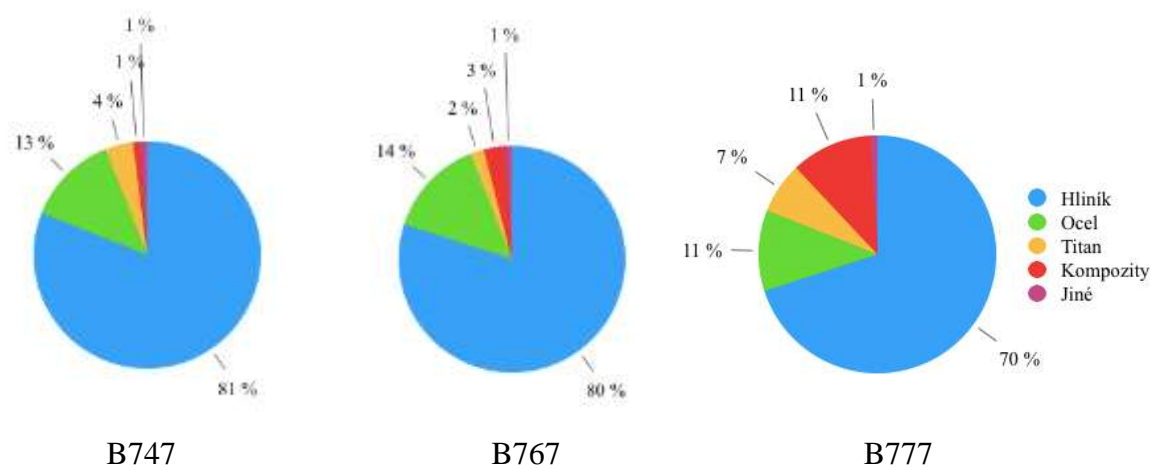
Každá část konstrukce letadla – drak, pohonná soustava, výstroj – vyžaduje jiné a specifické konstrukční materiály. Drak je základní konstrukční jednotkou tvořící až 90 % celkové hmotnosti celého letadla. Drak tvoří nepostrádatelné pevné části konstrukce letadla, které jsou nezbytné k uskutečnění samotného letu. [15]

Na realizaci pohonné soustavy – leteckých motorů, se používají materiály, které jsou schopné odolat vysokým teplotám, které v některých částech motoru vznikají. Neoddělitelnou součástí používaných leteckých materiálů jsou materiály žáruvzdorné a žárupevné. Žáruvzdornost je schopnost materiálu dlouhodobě odolávat vysokým teplotám. Žárupevnost je schopnost materiálu odolávat mechanickému namáhání za dané teploty. Nejvíce specifický požadavek na letecké materiály je minimální hmotnost.

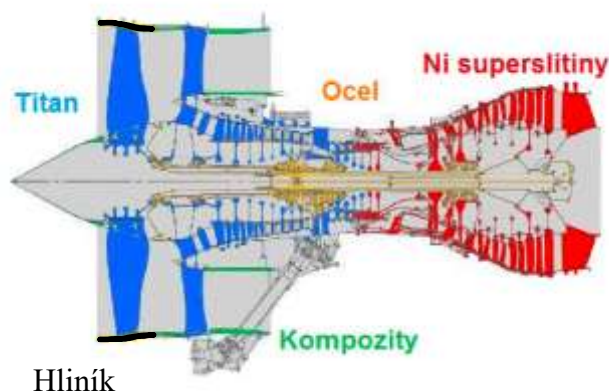
Nejrozšířenější a nejpoužívanější materiály v letectví jsou:

- **hliník a jeho slitiny**
- **železo a jeho slitiny**
- **titan a jeho slitiny**
- **hořčík a jeho slitiny**
- **super slitiny niklu a kobaltu**

Graf 3.1 zobrazuje procentuální podíl materiálů v konstrukci generací dopravních letounů Boeing. Z grafické závislosti plyne, že nejvíce používaným materiálem je hliník a jeho příslušné slitiny. Data byli převzata ze zdroje [9]. Obrázek 3.1, převzatý ze zdroje [52], ilustruje použití jednotlivých materiálů na typických místech proudového motoru letadla.



Graf 3.1: Grafické rozložení konstrukčních materiálů



Obrázek 3.1: Typická místa leteckých materiálů na proudovém motoru

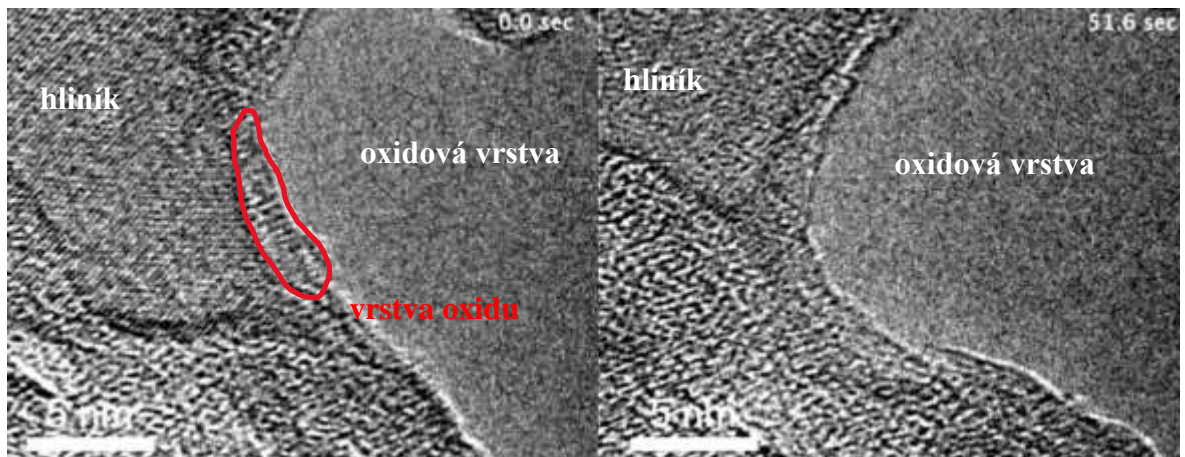
3.1 Korozní vlastnosti hliníku a jeho slitin

Ptáček [41, s. 199] definuje hliník jako neušlechtilý a nepolymorfní kov, stříbrolesklé barvy. Tento měkký kov je za tepla i za studena velice dobře tvářitelný, má malou pevnost, výbornou tepelnou i elektrickou vodivost a je nemagnetický. Nejvýznamnější hliníkovou rudou je bauxit, ze kterého se většinou čistý hliník vyrábí. Hliník je jeden z nejrozšířenějších kovů v zemské kůře a spotřebou druhý nejvýznamnější kov po železe. [41]

Hliník má vysokou odolnost proti korozi, a to především v atmosférických podmínkách. Právě této vlastnosti se nejčastěji využívá v leteckém průmyslu a inženýrství. Nejvyšší odolnost vůči korozi obecně má vysoko čistý kov, proto i hliník jako čistý kov je velice dobře odolný proti korozi [33]. Tato odolnost má ale řadu omezení, které popisuje Petrásek [33], při jejichž překročení hliník degraduje. Právě příměsi v technicky čistém hliníku – kobalt, platina, sodík, stříbro, chrom, tórium apod. snižují jeho korozní odolnost, protože všechny jsou vůči hliníku katodou. Korozní odolnost hliníku můžeme hodnotit podle termodynamické ušlechtilosti, tedy podle jeho imunity nebo jeho praktické ušlechtilosti, která v sobě zahrnuje imunitu i pasivitu. [11]

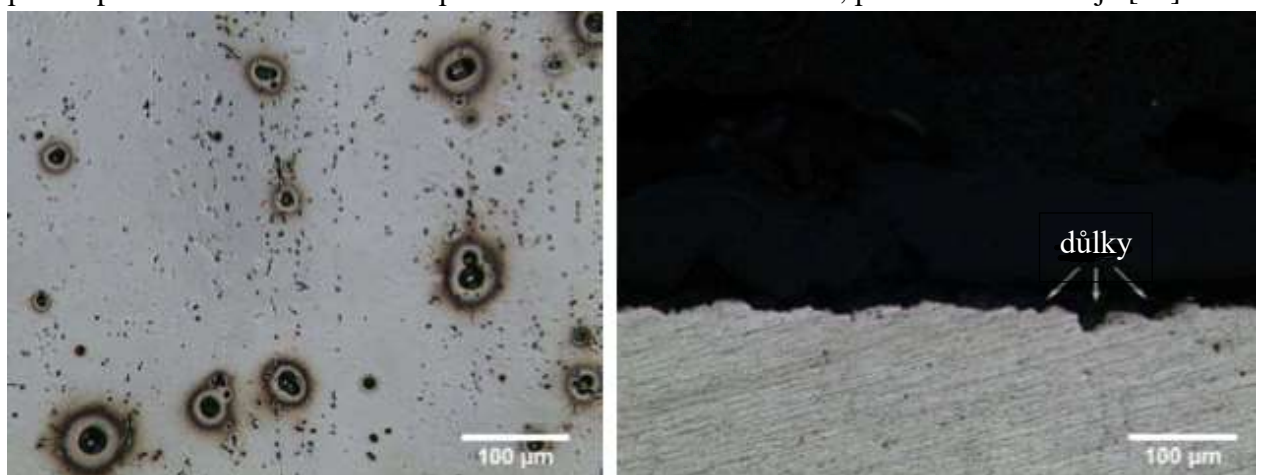
Pro korozní odolnost technicky významných hliníkových slitin je rozhodující, zda jde o slitiny s mědí, nebo bez mědi. Petrásek [33] i Podrábský [36] uvádí, že obecně nejnižší odolnost proti korozi mají slitiny hliníku na bázi AlCuMg, AlCuMn, a AlCuMgSi. Pokud je potřebný požadavek na velmi vysokou korozní odolnost, používají se tyto slitiny plátované s čistým hliníkem, který je jako technicky čistý kov odolný vůči korozi lépe. Obecně však slitiny hliníku bez Cu mají skoro stejné korozní vlastnosti jako technicky čistý hliník. Základní korozní vlastnosti hliníkových slitin jsou dané kritérii jejich pasivního stavu a parametry kritických hodnot korozního procesu.

Hliník na sebe váže kyslík, čímž vzniká tenká oxidová vrstva. Pokud se na povrchu hliníku objeví oxidy – dvouprvkové sloučeniny kyslíku a jiného prvku, hliník začne oxidovat. [33] Obrázek 3.2, převzatý ze zdroje [18], zobrazuje schopnost hliníku tvořit oxidovou vrstvu v průběhu času. Irving [18] ve své studii uvádí, že za čas 51,6 s z povrchu hliníku oxidy kyslíku zmizí, protože je na sebe hliník naváže a vytvoří ochranou vrstvu. Na levém snímku můžeme vidět malou vrstvu oxidů, kdežto na pravém vrstva oxidů zmizela a plocha oxidové ochranné vrstvy se zvětšila.



Obrázek 3.2: Vznik oxidové vrstvy na povrchu hliníku

Zdroj [23] popisuje korozní napadení hliníku a jeho slitin. Nejčastější forma koroze hliníkových slitin je koroze bodová. K bodové korozi dochází v neutrálních prostředích za přítomnosti jiných kovů, kovových iontů tvořících s hliníkem korozní články, ve kterých je hliník anodou a druhý kov katodou. Bodová koroze je velmi nebezpečná při nerovnoměrném provzdušňování, pokud se hliníkové slitiny nacházejí v půdách, roztocích soli nebo organických kyselin. Pereira [30] popisuje a zobrazuje extrémní napadení povrchu čistého hliníku bodovou korozi a mikroskopický průřez povrchem hliníku. Toto napadení lze vidět na obrázku 3.3, převzatého ze zdroje [30].



Obrázek 3.3: Bodová koroze hliníku

Dalším druhem koroze, kterým je hliník často napadán je mezikrystalová koroze. Tento typ koroze je podmíněn bodovou korozi. Slitiny náchylné na mezikrystalovou korozi jsou na bázi AlCuMg, pokud se nacházejí v agresivních prostředích obsahující chloridy, jako jsou mořská voda a přímořská atmosféra. [23] Mezikrystalová koroze probíhá i u čistého hliníku nad teplotou 160 °C a souvisí s absorpcí příměsí na hranicích zrn [35]. U slitin na bázi AlZnMg, AlZnMgCu může vzniknout praskání působením korozního prostředí a zároveň statického napětí. Kombinovaným působením prostředí a napětí může hliníkové slitiny zasáhnout tendence ke zlomu a vytvoření trhliny. Kombinovaným působením vnějšího nebo vnitřního pnutí a korozního prostředí může hliníkové slitiny zasáhnout tendence ke zlomu (praskání). Vzniklá trhlina často nevykazuje viditelné produkty koroze, tudíž často je pozorovatelná jen pomocí mikroskopu [35].

Obrázek 3.4, převzatý ze zdroje [2], zobrazuje mezikrystalickou korozi nosníku z hliníkové slitiny. Lze jasně vidět, že koroze vedla i k odlupování vrstev povrchu kovu.



Obrázek 3.4: Mezikrystalová koroze hliníku

Galvanická koroze vzniká, když hliník přijde do kontaktu s ušlechtilějšími materiály, jako je například železo. Galvanickou korozi urychluje zejména vlhké prostředí se zvýšenou teplotou vzduchu. Kovy jsou ponořené do elektrolytu a materiál, který je méně ušlechtilý se začne rozpouštět. Míra výskytu této koroze závisí zejména na velikosti rozdílu potenciálů mezi kovy v určitém prostředí, elektrické vodivosti prostředí a poměru povrchu mezi kovy. [33] Ptáček [41] řadí mezi nejzávažnější kovy způsobující tento druh napadení zejména mosaz, měď, ale taky slitiny niklu a mědi, slitiny niklu – chromu a molybdenu anebo samotný nikl. Galvanická koroze hliníku je zobrazena na obrázku 3.5, převzatého ze zdroje [17]. Hogewoning [17] neuvádí materiál, se kterým byl hliník v kontaktu, ale z obrázku je patrné, že nebyl použitý vhodný spojovací materiál, který vedl ke vzniku galvanické korozi.



Obrázek 3.5: Galvanická koroze hliníku

Hliník je velmi nízko odolný ve vysoce kyselých nebo silně alkalických roztocích [23]. Právě v těchto prostředích se u hliníkových slitin často objevuje rovnoměrná koroze, která souvisí s tvorbou rozpustných korozních produktů jako přímý následek kyselého, resp. alkalického prostředí.

Mezi nejpoužívanější hliníkové materiály v letectví patří materiály ze série 2xxx, 6xxx a 7xxx. U hliníkové série 2xxx je hlavním legujícím prvkem měď. Největší zastoupení v letectví mají dle Večeřy [52] duraly 2017 ($AlCu_4Mg$), 2024 ($AlCu_4Mg_1$), 2014 ($AlCu_4SiMg$). Vyznačují se vysokou pevností, nízkou měrnou hmotností, snadným zpracováním a přijatelnou cenou. Slitina 2024, kterou poznáme pod názvem superdural, má z celé série nejvyšší pevnost a tvrdost. [33]

Hutními výrobky z těchto slitin jsou plechy, nýty, písty, potahy, rámy a trubky. Slitina 2014 se používá na středně namáhané části draku. Pro zlepšení lomové houževnatosti hliníkových slitin byla slitina 2024 modifikována (snížením obsahu Fe a Si) na slitinu 2124. Na výrobu nýtu se často používá slitina 2117 ($AlCu_2Mg$), která má snížený obsah mědi. Na výkovky listů leteckých vrtulí se používá slitina 2025. I přesto, že hliníková série 2xxx nevykazuje nejlepší odolnost vůči korozi, slitiny jsou velmi rozšířené pro svou pevnost a lomovou houževnatost. U slitin lze zlepšit odolnost proti korozi zejména Mn jako legujícím prvkem. [11, 33]

U hliníkové série 6xxx jsou hlavními legujícími prvky Mg a Si. [41] V porovnání s duraly se vyznačují nižší pevností, ale jsou odolnější vůči korozi, lépe se svařují a jsou tvárnější. Používají se pro kované součásti složitějšího tvaru a na přechody mezi křídlem a trupem. Nejpoužívanější jsou slitiny 6061 ($AlMg_1SiCu$), 6009 ($AlMgSiMnCu$), 6063 ($AlMgSi$).

U hliníkové série 7xxx je hlavním legujícím prvkem Zn. [41] Použití slitin této série je podobné jako u duralů. Z polotovarů se zhotovují žebra, potahy a přepážky. Nejčastěji používanou slitinou je slitina 7075 ($AlZn_6MgCu$), ale v letectví nalezneme taky uplatnění slitin 7055, 7475 nebo 7175.

Hliník a jeho slitiny jsou neodmyslitelnou a ověřenou částí všech typů letounů. Jsou tak významné, že v některých případech jsou nenahraditelné jinými materiály, přestože vznikají a vyvíjejí se nové materiály. Tyto slitiny se využívají na různé aplikace v leteckém průmyslu. Často bývají součástí motorů, přistávacích zařízení, palivových nádrží, ale používají se i v interiéru letadla. Díky svým dobrým vlastnostem, jako jsou dobrá svařitelnost, odolnost proti korozi nebo dobrá zpracovatelnost se využívají k výrobě dílů vystavených vyšším teplotám, lehce namáhaných jednotkách, hydraulické systémy, ale taky na díly při značném zatížení při nízké teplotě [32, 36].

3.2 Korozní vlastnosti železa a jeho slitin

Ptáček [41, s.13] definuje železo jako bílý, lesklý kov, poměrně měkký, feromagnetický s malou odolností proti korozi. Železo je neušlechtilý kov, který se ve zředěných kyselinách rozpouští za vzniku železnatých solí a vodíku. Patří k nejrozšířenějším kovům na Zemi i ve vesmíru [41]. V zemské kůře je obsaženo ve formě sloučenin v mnoha rudách: hematit, magnetit, limonit, siderit. Malá množství doprovázejí rudy jiných kovů, nachází se taktéž v půdě a minerálních vodách. Nejvíce se vyskytuje ve formě oxidů a uhličitánů. [34]

Železo se často kombinuje s jinými kovy, jako například uhlík a chrom. Právě chrom dokáže ve slitinách železa zvyšovat korozivzdornost. Petrásek [34] definuje korozivzdornost jako odolnost materiálu nebo prvku proti elektrochemické korozi za běžných podmínek. Podle legujícího prvku rozlišujeme oceli s různým chemickým složením. [41]

Petrásek [34] podrobně opisuje oceli, ve kterých je základním legujícím prvkem chrom. Jedná se o chromové oceli. Jeho obsah se pohybuje mezi 8 až 30 %. Korozní odolnost je vysoce závislá na kvalitě opracování povrchu a na samotném obsahu chromu. Nejčastěji používané jsou chromové oceli s 13 % Cr a s obsahem 22-30 % Cr. Jejich odolnost vůči korozi se zvyšuje obsahem Cr, stabilizací karbidu pomocí Ti, Nb a přísadou Mo. Poznáme je pod názvem superferity, které se vyznačují vysokou odolností vůči koroznímu praskání, bodové a šterbinové korozi. Nižší korozní odolností se vyznačují oceli s 18 % Cr, které jsou náchylné na mezikrystalickou korozi.

Tato nechtěná vlastnost se potlačuje stabilizací (Ti, Nb), čímž se zabraňuje vylučování karbidů na hranicích zrn.

Petrásek [34] dále uvádí, že chrom-niklové oceli se vyznačují velmi dobrou antikorozií schopností a dobrými technologickými vlastnostmi. Jsou sice náchylné k selektivnímu koroziímu napadení a mezikrystalické korozi, ale vyskytují se velmi sporadicky. Jejich základní složení je 12–25 % Cr a 8–38 % Ni. Z důvodu vysoké ceny chrom-niklových ocelí bylo snahou nahradit nikl lacinějším prvkem. Aby byla zajištěna minimálně stejná korozií odolnost, vhodným prvkem, který nahradí nikl je mangan. Vyznačují se velmi dobrou odolností vůči mezikrystalové korozi, a dokonce i odolnosti vůči kyselinám HNO_3 . Aby byla odolnost vůči korozi ještě lepší, začali se vyrábět chrom-nikl-molybdenové oceli. Molybden má brzdicí účinek koroze. [41]

Ptáček [41] definuje korozií vlastnost železa jako extrémně náchylnou ke korozi, protože velmi snadno reaguje s kyslíkem. Právě koroze ocelových nebo želených konstrukcí je příkladem elektrochemické reakce. Koroze je přeměna železa na oxid železa za splnění 3 podmínek: přítomnost železa, kyslíku a vody. [34] Když voda přichází do kontaktu se želenou konstrukcí, reaguje s oxidem uhličitým v atmosféře za vzniku kyseliny hlinité, která je elektrolyt. Voda, která je na želené konstrukci přítomna, se rozpadá na kyslík a vodík. Železo a kyslík spolu reagují na oxid železitý. V tomto procesu se elektrony uvolňují do anody, která může být buď jiným kovem, nebo jinou částí železné struktury. Koroze se může šířit velmi rychle, a pokud není ošetřena, může způsobit, že veškeré železo v dané struktuře se zcela rozpadne. [34]

3.3 Korozií vlastnosti titanu a jeho slitin

Ptáček [41, s. 229] definuje titan jako polymorfni kov šedé až stříbřitě bílé barvy, který se vyznačuje vysokou pevností a tepelnou odolností. Je poměrně tvrdý a mimořádně odolný proti korozi, a to i ve slané vodě. Titan má vysokou pevnost v tahu, extrémní mechanické vlastnosti a schopnost tepelné zátěže a vysokou biokompatibilitou. Výborná odolnost titanu proti korozi využívá jeho aplikaci v různorodých odvětvích. Je jedním z nejdůležitějších materiálů používaných v kosmických technologiích (družice, vesmírné sondy, vesmírné stanice) a nalézá také uplatnění v konstrukcích letadel a součástech leteckých proudových motorů. [41, 36] Vnouček [53] udává, že titan tvoří až 9 % z celkové hmotnosti letadla. Vnouček [53] také popisuje použití titanu a jeho slitin v letectví. Titanové součástky můžeme nalézt v letadle jak v motoru, tak i v draku. V motoru se používá na části kompresorů jako disky, rotory, prstence a skříně. Dále pak kompresorové lopatky, písty a ojnice.

Ptáček [41, s. 230] rozděluje slitiny titanu obecně do třech základních skupin:

- slitiny typu α
- slitiny typu $\alpha+\beta$
- slitiny typu β

3.3.1 Slitiny typu α

Jsou to slitiny s velkou tepelnou stabilitou, dobrou pevností a odolností proti křehkému porušení i za velmi nízkých teplot. Tyto slitiny vždy obsahují hliník (až 8 %). Mají dobrou žárovečnost do 300°C. Jsou také dobře svařitelné zejména pomocí laseru nebo svazku elektronů. Mezi

nejpoužívanější slitiny uvádí Podrábský [36] i Ptáček [41] slitiny Ti6Al2Sn4Zr2Mo, Ti8Al11MoV, Ti5Al2SN.

3.3.2 Slitiny typu $\alpha+\beta$

Tato skupina slitin je nejrozšířenější a nejpoužívanější ze všech typů slitin titanu. [53] Vyznačují se taky vyšší pevností a lepší odolností proti únavě. Pevnost těchto slitin lze zvýšit tepelným zpracováním. Jsou citlivé na obsah nečistot. Nejvýznamnější roli sehrává vodík, který nepříznivě zvyšuje křehkost. Nejrozšířenější slitinou je dle Podrábského [36] i Vnoučka [53] Ti6Al4V, na jejíž výrobu se spotřebuje asi 50 % veškeré produkce titanu. Používá se na zhotovení disků, lopatky turbín a součástí konstrukce draku letadla. Slitina Ti7Al4Mo se využívá při součástech, které vyžadují pevnost a stabilitu při vysokých teplotách, jako například disky leteckých motorů. Pro součásti, které jsou dlouhodobě zatížené a pracují při středně vysokých teplotách se naopak využívá slitina Ti6Al2Sn4Zr6Mo. Významným představitelem tohoto typu titanových slitin je i slitina Ti6Al5Mo2YrSi, která se používá na výrobu skříní raketových motorů a podvozků letadel. [53]

3.3.3 Slitiny typu β

Vyznačují se také vysokou odolností proti korozi a dobrou svařitelností. Hlavní nevýhoda je způsobena velkým obsahem legujících prvků (V, Mo, Cr), které značně zvyšují měrnou hmotnost oproti ostatním titanovým slitinám. Podrábský [36] a Vnouček [53] uvádějí příklady použití těchto slitin. Pro silně namáhané díly a součásti letadel se využívá slitina Ti8V8Mo2Fe3Al. Na výztuhu konstrukce draku letadla, ale taky součásti kosmických lodí se využívá především slitina, která má vysokou pevnost a nízkou hustotu – Ti13V11Cr3Al.

Korozní odolnost titanu je dána vytvářením velmi stabilní a vysoce přilnavé ochranné oxidické vrstvy TiO₂ na povrchu titanu. Vzhledem ke své vysoké reaktivitě s plyny má titan vysokou afinitu s kyslíkem, a proto oxidická vrstva vzniká okamžitě. Její tloušťka obvykle bývá do cca 10 μm a je porušovaná pouze kyselinou fluorovodíkovou, chlorovodíkovou, sírovou nebo hydroxidem sodným. Tým, že je titan odolný proti korozi používá se zejména v prostředích obsahujících chlor a jeho sloučeniny. [11]

Titan a titanové slitiny podléhají pouze rovnoměrné korozi a korozní rychlost je tak malá, až je prakticky neměřitelná. Proto se vzhledem na cenu titanu a náročnosti technologického zpracování používá v prostředí, kde je korozní rychlost výrazně pod 0,15 mm/rok. Titan je téměř absolutně odolný vůči bodové a štěrbinové korozi. V oxidačních prostředích s halogenidy může velmi omezeně vzniknout korozní praskání. Titan je však náchylný na vodíkovou křehkost. [53, 23] Zdroj [23] uvádí jedno z nejnebezpečnějších prostředí pro titan, kterým jsou roztoky solí obsahující fluoridy. Již při velice malém obsahu fluoridů dochází k intenzivnímu porušení pasivní oxidické vrstvy, která má za následek průnik roztoků pod povrch vrstvy a následné korozní napadení jistého druhu.

Problémem pro titanové slitiny může být kontakt s jiným kovem, který není vůči korozi odolný tak dobře jako titan. Pokud se při kontaktu titanu a jiného kovu (zejména hliníku, zinku, niklu a mědi) začne projevovat i účinek zvýšené teploty a agresivního prostředí, může to vést

k difuzi kyslíku ke kovu a usnadnění propustnosti pro korozi složky. Agresivní prostředí negativně působící na kontaktní plochu titanu a jiného kovu je zejména mořská voda, kyselina octová, HNO_3 , H_2SO_4 a HCl . [23]

3.4 Korozní vlastnosti hořčíku a jeho slitin

Ptáček [41, s. 209] definuje hořčík jako nepolymorfní, paramagnetický, lehký, středně tvrdý kov stříbrolesklé barvy. Mezi jeho základní charakteristiky patří horší tepelná i elektrická vodivost a malá korozní odolnost. Při vyšších teplotách je velmi reaktivní. Za normální teploty reaguje pomalu s kyslíkem a vodou. Na suchém vzduchu se postupně pokryje vrstvou oxidů, která jej chrání před další oxidací, a lze jej takto uchovávat poměrně dlouhou dobu. [36]

Slitiny hořčíku mají nízkou měrnou hmotnost a podobné mechanické vlastnosti jako slitiny hliníku. Slitiny Mg jsou dobře slévateľné, mají nízkou teplotu tání, jsou dobře obrobitelné a poskytují vysoký útlum vibrací. Mezi přednosti hořčíkových slitin patří jejich použití. Většina slitin se dá použít do teploty 150 °C a některá až do 350°C. [36, 52]

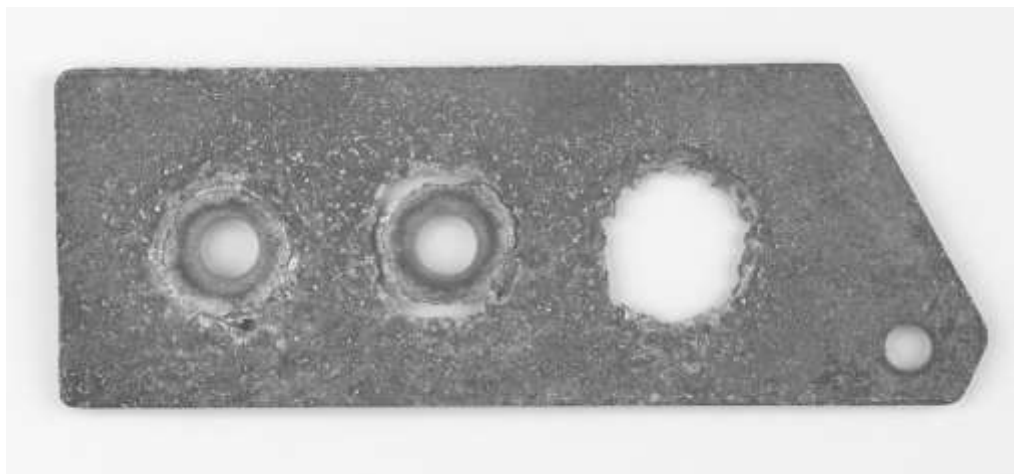
Slitiny Mg mají sklon ke korozi v kontaktu s většinou kovu a slitin. Korozně na ně taky působí atmosféra, mořská voda a příměsi jako jsou Fe, Cu, Ni. Slitiny hořčíku nacházejí svoje uplatnění zejména v letectví. Mohou výrazně zlepšit aerodynamický výkon letadla a mohou významně snížit hmotnost jeho konstrukce. Večeřa [52] i Podrábský [36] popisují využití hořčíkových slitin v letectví v současné době. V civilním i vojenském letectví tvoří součásti letadel, vrtule, převodovky, nosnou konstrukci a některé části rakety, satelitní a raketové komponenty.

Mezi nejpoužívanější hořčíkové slitiny používané v letectví patří slitiny na bázi Mg-Al-Zn (AZ). Standardně je poznáme pod názvem elektron. Jedná se zejména o slitiny AZ31B, AZ80A, AZ91 (výborná korozní odolnost v mořské vodě), AZ81. [52] Tyto slitiny našli v leteckém průmyslu různorodé použití. Používají se na výrobu přístrojových desek kokpitu, ovládání směrového kormidla, vnitřní dveře pro obsluhu a údržbu, části motorů a dalších přístrojů. Petrásek [32] popisuje používání hmotnostně velmi lehkých slitin na bázi Mg-Li. Použití těchto lehkých slitin plyne z nároků na nízkou hmotnost leteckých materiálů. Svoje uplatnění v leteckém průmyslu našli slitiny na bázi Mg-Si, Mg-Al-Sr a speciální slitiny s ytriem. Jednou z jejich nejlepších vlastností je zvýšená odolnost proti creepu [32]. Creep (tečení materiálu) dle zdroje [13] můžeme charakterizovat jako pomalou časově závislou trvalou deformaci, ke které dochází v průběhu dlouhodobého působení vysokých teplot při konstantním zatížení nebo konstantním napětí nižším než mez kluzu.

Beneš [8] uvádí další slitiny jako jsou slitiny RZ5, ZRE1, MSR a EQ21 široce používány pro kryty leteckých motorů a převodovek. Výkivky ze slitin hořčíku se používají jako díly převodovek pro vrtulníky nebo kola letadel. Kované díly nacházejí taky uplatnění v aplikacích leteckých motorů.

Koroze hořčíkových slitin je obvykle rovnoměrná. Jejím výsledkem je zmatnění a zdrsnění povrchu. Pokud ale dojde k mechanickému poškození vytvořené vrstvy, může to vést k nebezpečnému bodovému napadení slitiny a následnému prasknutí. Korozi slitin hořčíku výrazně ovlivňují nečistoty obsažené v hořčíku nebo vytvoření korozního článku s mědí, niklem nebo železem, které korozi podporují. [41, 36] Slitina na bázi MgAlZn s rostoucím obsahem Al mají sklon ke korozi pod napětím.

Významným korozním napadením hořčíkových slitin je galvanická koroze, která vzniká při kontaktu s kovem s rozdílným elektrochemickým potenciálem. Hořčík v prostředí elektrolytu působí jako anoda a rozpouští se. Obrázek 3.6, převzatý ze zdroje [20], zobrazuje desku používanou v letištních autobusech. Deska je vyrobená ze slitiny AM50 (MgAlMn) a používána v průběhu jednoho roku. Slitina byla upevněna pomocí uhlíkové oceli, což vedlo k silné galvanické korozi.



Obrázek 3.6: Galvanická koroze desky

Obrázek 3.7, převzatý ze zdroje [14], zobrazuje příklady aplikaci vybraných hořčíkových slitin na konkrétních místech letounu.



Obrázek 3.7: Aplikace hořčíkových slitin

Koroze hořčíkových slitin je častokrát viditelná lidským okem a ze všech materiálů používaných v letectví se právě u hořčíkových slitin jedná o nejjednodušší detekci koroze. Tak, jak zobrazuje obrázek 3.8, převzatý ze zdroje [2]. Abbot [2] popisuje korozi na této hořčíkové slitině. Nejdříve došlo k zvednutí nátěrových vrstev a objevili se bílé skvrny. Ty se dále vyvíjejí do vyboulených míst na povrchu.



Obrázek 3.8: Ukázka koroze hořčíkové slitiny

3.5 Korozní vlastnosti niklu a jeho slitin

Ptáček [41, s. 223] definuje nikl jako nepolymorfní, feromagnetický kov bílé barvy, velmi odolný nejen proti působení atmosférické koroze, ale odolává i korozi ve vodě a v alkalických roztocích. Právě vysoká odolnost niklu vůči korozi má za následek široké spektrum použití. Slitiny niklu jsou stejně jako čistý nikl velmi odolné proti korozi a jsou neoddelitelnou součástí leteckého průmyslu. Zdroj [28] udává, že proudový motor moderního letadla obsahuje až 1,8 tony niklových slitin.

Jednou se základních skupin niklových slitin jsou monely – slitiny na bázi Ni-Cu. Vykazují výborné mechanické vlastnosti a chemickou odolnost v náročném prostředí, např. v dlouhodobém kontaktu se slanou vodou. Základní monelová slitiny obsahuje až 67 % niklu, asi 30 % mědi, 2,5 % železa a zbytek 2,5 % připadá na ostatní prvky, které se v monelu vyskytují. [28] Tyto prvky se mohou vyskytovat buď jako znečištění nebo jsou přidávány záměrně na zlepšení vlastností. Často se používají v letectví a kosmonautice zejména při výrobě rámu a plášťů experimentálních raketových letadel, aby odolávaly velkému teplu generovanému aerodynamickým třením během letu extrémně vysokou rychlostí. Tyto informace udává jak Podrábský [37], tak i zdroj [28]. Dále je můžeme nalézt taky ve spalovacích komorách, přistávacích zařízeních, jako jsou ozubené kola a řetězy, trubky, nýty v motoru a výfukovém systému. Často používaným leteckým materiálem je monel typu K-500 a monel 400. [27]

Vzhledem na rychlý vývoj techniky jako také a vysoce náročných požadavků na materiály používané v plynových a parních turbínách, součásti reaktorů, raketových motorů a celkově součástí pracujících za vysokých teplot a tlaku, došlo k vývoji žáruvzdorných a žárovevných slitin – superslitin. Superslitiny na bázi niklu jsou precipitačně zpevněné fází γ' [37]. Jedná se o slitiny na bázi NiCr, které jsou legovány Co, Ti, Al, V, Fe, W, Nb. Jsou žádané nejen kvůli vysokým pevnostním charakteristikám za vysokých teplot a výborné odolnosti vůči creepu, ale také díky své

odolnosti vůči oxidaci za vysokých teplot. Mezi výborné vlastnosti niklových superslitin patří schopnost pracovat za vysokých teplot (až 1150 °C) a rozměrová stálost za vysokých teplot. Díky této vlastnosti nedochází k plastické deformaci materiálů na lopatkách motoru. Dále je charakterizuje chemická odolnost v různě agresivních prostředích a odolnost vůči náhlým teplotním šokům.

Zdroj [47] uvádí použití niklové slitiny typu 80A při konstrukci výfukových ventilů a rotorů turbín letadel, tedy tam, kde si musí slitina uchovat pevnost při vysoké míře namáhání. Zdroj [54] se zaměřuje konkrétně na typickou slitinu používanou v leteckém průmyslu, kterou je slitina typu Inconel, zejména Inconel 718, 713LC, 625. [27] Používá se v proudových motorech, lopatky, šrouby, spojovací prvky a části přístrojů. Svoje uplatnění taky našla ve výrobě komponentů pro rakety, různé tvarované díly pro turbínové motory. Inconel 713LC je precipitačně vytvrzena a má snížený obsah uhlíku. Obrázek 3.9, převzatý ze zdroje [54], zobrazuje slitinu Inconel 718 a její použití na lopatkách leteckého motoru.

Často používanou slitinou je Mar-M247. Tato slitina našla uplatnění při výrobě statorových kol plynových turbín, rotorových lopatek apod. Vyniká velkou pevností, korozní a teplotní odolností. Pod speciálním názvem – Hastelloy, poznáme niklové žárovečné slitiny s vyšším obsahem Mo. Používají se do velmi vysokých teplot až 1200 °C, ale nesmí být vystaveny mechanickému namáhání. Díky vysokým pracovním teplotám se využívá na výrobu částí spalovacích komor, statorových částí turbín a plynových turbín. [52] Zdroj [28] uvádí často používanou slitinu Waspaloy, která se taky používá pro kritické součástky spalovacích turbín.

Ve slitinách niklu jsou hlavními legujícími prvky Cr, Fe, Mo, Cu a to maximálně v desítkách procent. Tyto prvky, v uvedeném pořadí (kromě Fe), především zvyšují odolnost niklových slitin proti oxidaci za vysokých teplot, odolnost proti pittingu (bodové korozi), štěrbinové a mezi-krytalové korozi, chloridům a redukčním kyselinám. Nikl je považován za materiál odolný proti korozi [41]. Používá se k pokovování železa a mosazi. Jisté omezení však niklové slitiny mají. Slitiny niklu s molybdenem jsou nevhodné pro použití v prostředích, ve kterých se vyskytuje kyselina dusičná HNO_3 a kyselina sírová H_2SO_4 . Pro slitiny s chromem jsou nebezpečné silně oxidační prostředí. U těchto slitin se projevuje korozní praskání, které se zvyšuje se zvyšujícím se obsahem niklu. Nejlepší odolnost vůči jakékoliv korozi mají monely. Významná je však zejména odolnost v prostředí obsahující halogeny. [52]



Obrázek 3.9: Slitina Inconel 718

3.6 Korozní vlastnosti kobaltu a jeho slitin

Ptáček [41, s. 228] definuje kobalt jako polymorfní, velmi tvrdý a pevný kov stříbrolesklé barvy s namodralým nádechem. V porovnání s niklem je jeho výskyt na Zemi i ve vesmíru výrazně nižší, a i proto je jeho cena díky nízkému výskytu i obtížnosti výroby dosti vysoká. Má velice podobné vlastnosti jako nikl, dobře odolává atmosférické korozi a s kovy blízkými v periodické tabulce (Cr, Ni, Mo, W) tvoří žárovevné slitiny.

Slitiny na bázi kobaltu jsou korozivzdorné a žáruvzdorné. [41] Mají vynikající odolnost proti opotřebení a ořezu. Podrábský [37] uvádí, že díky dobré odolnosti proti abrazi a korozi je možné tyto slitiny použít jako biokompatibilní materiálů.

Místa, kde dochází k vysokým teplotám a s nimi spojenému riziku tečení materiálu, se používají kobaltové žárovevné superslitiny, které si zachovávají svou pevnost a odolávají proti korozi. Základ těchto slitin je tvořen tuhým roztokem Co-Cr-Mo-Ni. [37] Večeřa [52] uvádí často používané slitiny kobaltu v leteckém průmyslu. Zejména slitina na bázi Co-Cr-Mo (ASTM F75). Tato slitina vyniká výjimečnými mechanickými vlastnostmi a odolností vůči opotřebení. V leteckých konstrukcích se uplatňuje zejména její dobrá korozivzdorná vlastnost a creepová odolnost. Odlévají se z ní části leteckých turbínových motorů. Další důležitou slitinou je slitina Haynes 188, která velice dobře odolává sulfidaci. Odolnost proti sulfidaci je jedna ze základních požadavků materiálu, které budou umístěny do turbín spalujících palivo při nižších teplotách. [52]

Moderní dopravní letadla se staví převážně z duralu a slitin, která jsou pevná a zároveň lehká. Některé části konstrukce mohou být vyrobeny i z nekovových materiálů, například z kompozitů s uhlíkovými vlákny, který je stejně pevný jako dural, ale ještě lehčí. [15] V leteckém průmyslu je využívána obrovská škála různých materiálů. Jak již bylo zmíněno, základními požadavky materiálů na použití letecké konstrukce a součástí, jsou nízká hmotnost, vysoká odolnost vůči korozi a schopnost odolávat extrémním podmínkám, jako jsou vysoké teploty, kombinace namáhání a střídání různých povětrnostních podmínek. Když je letadlo sestavené z hmotnostně lehčích materiálů, nepotřebuje tak výkonné motory jako letadlo sestavené s hmotnostně těžkými materiály, a spotřebuje méně paliva. Úspora hmotnosti letadla explicitně souvisí s množstvím přepravených pasažérů a s vyššími výnosy z využívání letounu.

4. Vliv prostředí na vznik a rozvoj koroze

Ke korozi leteckých konstrukcí a systémů dochází buď v přirozeném prostředí daném přírodou anebo v prostředí, které vytváří člověk. Za faktory přírodního prostředí, které ovlivňují korozi můžeme považovat vlhkost, teplotu, slané prostředí, ozón, písek, prach a sluneční záření. [33] Typ, rychlost, příčinu a závažnost koroze kovu ovlivňuje mnoho faktorů. Některé z těchto faktorů lze ovlivnit a některé nikoli. [11] Vlivem jednotlivých prostředí se zabývá Petrásek a Krchňavý [31] ve svojí výzkumné zprávě.

4.1 Podnebí a vlhkost

Zcela nejběžnějším prostředím ovlivňujícím vznik a rozvoj koroze je podnebí, klima. Tento faktor je zčásti neovlivnitelný. Podmínky prostředí, za kterých je letadlo udržováno a provozováno, značně ovlivňují rozvoj koroze [11]. Interakce suchého vzduchu s kovy je bez opakovaného erozního účinku za běžných teplot zcela zanedbatelná [32]. Ve velmi suchých podmínkách tedy ke korozi nedojde. Pokud se však vlhkost atmosféry začne zvyšovat, je to první impuls na vznik koroze (atmosférické). Vlhkost je ve vzduchu přítomna jako plyn (vodní páry) anebo jako kapičky kapaliny (opar nebo mlha). Vzduch zpravidla obsahuje i jiné příměsi, které kategoricky podporují vznik koroze. Jedná se zejména o chloridy, sulfidy a nitridy. Teplý vlhký vzduch, normálně se vyskytující v tropických klimatech vede k urychlování korozních procesů, naopak studený suchý vzduch z arktických oblastí spíše korozi zpomaluje. Při tzv. nadkritické vlhkosti vzduchu dochází již ke vzniku dostatečně tlustého filmu elektrolytu na povrchu kovu nutného pro průběh korozních reakcí. Takové podmínky jsou splněny, pokud relativní vlhkost vzduchu překročí hodnotu 60 až 80 % (odpovídá to 10 až 14 g H₂O m⁻³ vzduchu při 20 °C). [11, 32]

Vlhkost se dostává do všech částí letadla, kde se může dostat vzduch. Na základě rozdílů tlaků mezi vnitřním a vnějším prostředím dovolují plochy letadla, která nejsou těsněné, aby vzduch cirkuloval. Tyto tlakové rozdíly vznikají, když letadlo mění výšku anebo se zvyšuje teplota uvnitř letadla. Pokud se vzduch dostává do chladnějšího prostředí, dochází ke kondenzaci. V důsledku chladných nocí se na povrchu letadla objevuje rosa. Kondenzovaná vlhkost se obvykle odpařuje, jakmile se okolní vzduch ohřívá, ale zůstávají kontaminanty jako je například sůl. [32] Proto je taky přítomnost mořského prostředí v blízkosti letadla považováno za jedno z nejagresivnějších prostředí, která zcela ovlivňuje korozi. Primárním zdrojem soli je oceán, který obsahuje od 3,5 do 3,9 % soli [33]. V mořském prostředí (s expozicí mořské vody a slanému vzduchu) je vzduch plný vlhkosti pro letadlo mnohem škodlivější, než v suchém klimatu [11].

Pásma, která řadíme do skupiny mírných teplotních pásem jsou charakteristická teplotami v zimě od -32 do 15 °C a v létě od 15 do 52 °C [31]. Mírní teplotní pásmo se táhne od Severní Ameriky a jihu Kanady, přes západní a střední Evropu až po západní a střední Asii. Nejkritičtější místa jsou pobřežní oblasti. Vznikají tady vážné korozní problémy, zejména ráno a večer, kdy vlhkost, která přijala soli a jiné nebezpečné látky, může kondenzovat. V důsledku celkem mírného ovzduší je toto pásmo také nejvíce osídleno, a proto jsou v ovzduší přítomny také kouř, smog, ozón.

Největší výzvou pro letecký průmysl je projektovat letouny s protikorozní ochranou a poklesem její účinnosti, ke kterému dochází především v tropickém teplotní pásmo [31]. Tropické

pásmo pokrývá krajiny od Mexika a Jižní Ameriky, přes velkou část Afriky až po Indii a severní Austrálii. Tropické pásmo se vyznačuje vysokou vlhkostí (až 100 % při teplotě 29 °C [31]). Tato vlhkost představuje obrovské riziko ke vzniku a rozvoji korozi na nejen leteckých konstrukcích a součástech. Všechny jmenované státy, resp. kontinenty jsou pobřežní. Je tedy jasné, že ve vzduchu se vyskytuje velké množství soli. Za působení vysoké teploty, vlhkosti a množství obsažené soli, představuje tropické pásmo extrémně nebezpečné prostředí pro vývoj koroze. Velká část těchto států, resp. kontinentu je pokryta pouští. Při kombinaci výše zmíněných charakteristických znaků pro tropické pásmo spolu s pískem, hovoříme o pouštním klimatu. Teplota vzduchu se může vyšplhat až na 50°C. Spolu s horkým pouštním větrem, může práškový prach pronikat i utěsněnými místy [31]. Proto kombinace těchto podmínek může způsobit markantní poškození. Pro letadlo provozované v těchto podmínkách a pro všechny jeho součásti se vyžaduje vysoká úroveň údržby a pokud možno nejlepší dostupné a ekonomicky přijatelné ochranné technologie [31]. Písek a pískový prach jsou extrémním problémem, protože suchý a práškový písek se snadno přenáší větrem. Písek a prach mohou během písečných bouří pronikat i do utěsněného a uzavřeného prostoru draku. Pokud se však písek jenom jemně pohybuje a vibruje, může vyvolat abrazivní opotřebení.

4.2 Voda a její vliv

Agresivita vody je ovlivněna obsahem kyslíku, množstvím a typem rozpuštěných solí, přítomností organických látek a mikroorganismů, hodnotou pH, teplotou a rychlostí proudění. Z plynů rozpuštěných ve vodě má největší vliv na korozi kyslík, což je dáno tím, že koroze ve vodách je většinou řízená rychlostí redukce kyslíku. Důležitá je i rovnoměrnost přístupu kyslíku k povrchu – pokud je elektrolyt omezen na některé ploše, pak kov na této ploše koroduje rychleji. Petrásek a Krchňavý [31] tento typ koroze definují jako dutinu koncentrovaného kyslíku. Dochází zde ke zrychlení koroze, protože kov s větším obsahem elektrolytu se stává anodičtější než kov v přímém působením atmosféry.

4.3 Teplota a její vliv

Letadla jsou z povahy svého provozu vystavena častým změnám atmosférické teploty a tlaku a měnícím se podmínkám relativní vlhkosti [11]. Všechny části konstrukce, dokonce i ty, které jsou považovány za uzavřené nebo utěsněné, mohou být časem vystaveny progresivnímu vnikání vlhkého vzduchu vedoucímu ke kondenzaci. Příkladem může být samotný kokpit a klimatizační systém. Teplý vzduch, který je chlazen v chladičích klimatizace může uvolnit dostatečné množství vlhkosti na vznik a případný rozvoj už vzniklé koroze [31]. Proto se při vyvíjení a stavbě letadla musí brát do úvahy nejen to, kam bude letadlo dopravováno, ale taky i to, v jakém prostředí bude probíhat údržba. Právě voda přijímá z atmosféry řadu korozivních činidel a látek. Postupně se tak přeměňuje na slabou kyselinu, která podporuje samotný vznik nebo rozvoj koroze.

Za významným poškozováním materiálů může taky být sluneční záření. Sluneční záření poškozují zejména nekovové materiály a prvky elektronických soustav [33]. Jedná se o ultrafialové (UV) a infračervené (IR) záření, které popisuje Bencko [7]. UV záření je neviditelné elektromagnetické záření s vlnovou délkou kratší, než má viditelné světlo. Přírodným zdrojem UV záření

je Slunce. Pokud by veškeré záření pronikalo až na zemský povrch, mělo by to pro život na Zemi fatální důsledky. Avšak UV záření je pohlcováno při průchodu plynnými obaly Země v ionosféře a další část poté v nižších vrstvách atmosféry. [7] Právě tropické pásmo je pásmo, kde UV dosahuje nejvyšší a nejnebezpečnější hodnoty. Jako přímý důsledek záření je změna barvy plastů, ztráta ochranné schopnosti materiálu a snížení pevnosti a tuhosti. Sice většina leteckých elektrických zařízení je umístěno v uzavřených prostorech, stále je tu řada kabelu a nekovových popruhů, které jsou vystaveny přímému slunečnímu záření.

Teplota vzduchu má samozřejmě taky vliv na vznik a rozvoj koroze. Nízká teplota vzduchu nemá na vznik a rozvoj koroze velký význam. Je to způsobeno tím, že bez přítomnosti vody v jakékoli formě v kontaktu s kovovým povrchem nedojde ke vzniku elektrolytu, který je podmínkou vzniku koroze [11]. Nízké teploty ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a víc), která se objevuje zejména v polárních oblastech, může mít za následek jistý úbytek těsnění a těsnících hmot. Vysoká teplota je taky nebezpečná, protože koroze se při vysoké teplotě zrychluje. Nežádoucím jevem je pak prosakování a křehnutí. Střídání nízkých a vysokých teplot má taky nežádoucí vliv na rozvoj koroze.

4.4 Údržba a oprava

Mezi faktory, které jsou do značné míry ovlivnitelné a často můžou způsobovat vhodné prostředí, které může vést ke vzniku korozi jsou zbytky tavidla po svařování nebo pájení, zbytky oleje a maziva, půda a prach. Konstrukční části letadla, které jsou vystaveny výfukovým plynům, jsou náchylné ke korozi kvůli vysokému obsahu síry ve výfukových plynech. Rizikovým faktorem je taky údržba a oprava letadla, kterou rozebírá zdroj [11]. Při údržbě a opravě trpí na korozi hlavně opravované části a podlahové konstrukce. Často dojde k rozliti a následného úniku kapaliny jako jsou motorové oleje, chladicí kapaliny nebo dokonce rozliti občerstvení, jako jsou minerální vody nebo káva. Prostory pro baterie a konstrukce v bezprostřední blízkosti baterie jsou v důsledku špatného odvětrávání častokrát vystaveny korozi kyselinou. Zvlášť nebezpečné jsou kyselina sírová a kyselina dusičná. Na tyto kyseliny a na rtuť zvlášť intenzivně reaguje hliník a hliníkové slitiny. Rtuť vytváří amalgám s jakýmkoli volně dostupným hliníkem, odstraňuje jeho ochrannou vrstvu a vede k rychlé degradaci materiálu [11]. Proto je důležité, aby bylo letadlo udržované v čistém prostředí. V závislosti na modelu letadla, typu provozu a geografické polohy.

Dalším extrémně důležitým faktorem, který podporuje růst koroze je přítomnost vulkanických sopek, a tedy vulkanický prach. Petráskova výzkumná zpráva [31] popisuje složení vulkanického prachu a dopad na leteckou konstrukci. Prach obsahuje velmi škodlivé chloridy a sulfidy, které výrazně podporují korozi v přítomnosti vlhkosti. Jen malá kombinace těchto kontaminantů za přítomnosti vlhkosti může být iniciátorem rozvoje koroze.

4.5 Korozní zkoušky

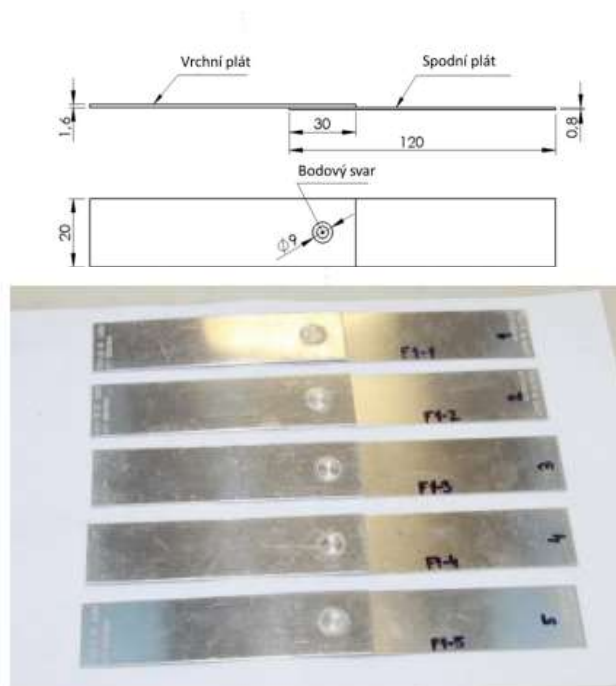
V průběhu času má kov tendenci přirozeně korodovat. V některých případech probíhají korozní procesy stejnou rychlostí bez ohledu na to, jak dlouho byl materiál vystaven působení korozního prostředí. Postupem času se však koroze může zpomalit (v důsledku bariér tvořených korozními produkty), nebo urychlit (poškození ochranných vrstev). Pro demonstraci různých korozních prostředí a jejich vlivů na vznik a rozvoj koroze, se využívají klimatické komory a korozní zkoušky. Klimatickým komorám a zkouškám v nich probíhajících se věnuje ve své technické zprávě Pospíšil [39]. Klimatická komora slouží pro simulaci teploty a vlhkosti provozního prostředí. Dokáže urychlit vznik koroze a pomáhá tak při výběru optimálního materiálu. Komora disponuje servisními otvory pro napájení přístrojů během zkoušky a možností přesného měření teploty na vzorku [39]. Mezi základní korozní zkoušky patří zkoušky v solné mlze, cyklické korozní testy, kondenzační testy.

Atmosférické korozní zkoušky

Pravidla pro korozní zkoušky za přítomnosti činitelů zesilujících korozi kovových materiálů a slitin (teplota, relativní vlhkost, korozní činidla) udávají normy **ČSN ISO 8565 a 7384**. Normy specifikují, že zkušební vzorky musí mít tloušťku 0,3 – 3 mm, na povrchu nesmějí být viditelné vady, vzorky musí být jednoznačně označeny, povlaky na vzorcích musí splňovat požadavky příslušných norem, teplota uvnitř komory se reguluje s přesností ± 2 °C a relativní vlhkostí ± 5 %, teplota uvnitř komory se musí zvyšovat rychlostí nejméně 1 °C/minuta. Před samotným testováním se musí povrch vzorků odmastit inertní látkou, důkladně zkontrolovat, jestli nevykazuje známky poškození nebo koroze a umístí se na držáky do komory. Celková doba zkoušení závisí od účelu zkoušky, ale doporučuje se 24, 48, 96, 240 hodin. Doba trvání zkoušky se měří od okamžiku, kdy jsou vzorky do komory vloženy a jsou splněny všechny předepsané podmínky. V průběhu zkoušky se musí všechny vzorky prohlédnout a některé z nich vyjmout – periodické prohlídky. Během periodických prohlídek se vzorky prohlédnou a vrátí zpět do komory. Po uplynutí doby zkoušky jsou vzorky z komory vyjmuty, nechají se 0,5 – 1 hodinu oschnout a opláchnou se pod šitou tekoucí vodou nepřesahující teplotu 40 °C. Se vzorky se pracuje pečlivě v rukavicích, a kontrola je zaměřována zejména na změnu vzhledu vzorky, doba, za kterou se objeví první ohniska koroze, počet korozních vad, změna tloušťky, hmotnosti, mechanických, elektrických i jiných vlastností. Po dokončení zkoušky se vzorky uskladní v exsikátoru s vysoušedlem za podmínek, které vylučují vznik a rozvoj další koroze. Informace ohledně atmosférických korozních zkoušek popisuje jak samotná norma, tak i Pospíšil [39] ve své technické zprávě.

Pro demonstraci agresivního prostředí uvádím praktické podmínky použité na praktických testech. Praktické testy sloužili jako návrh materiálu pro letecké konstrukce. Experiment byl založen na testování vzorků, které se skládali ze dvou obdélníkových plechů, které byly svařeny. Testy probíhali v klimatické komoře ESPEC ARS-0680. Testovány byli dvě sady vzorků po 15 kusech. Vzorky byli vyrobeny z hliníkových slitin EN AW-7075 T6.

Jednotlivé obrázky týkající se praktického testu, informace o testu i samotná tabulka 4.1 byly převzaty z technické zprávy autora Pospíšila [39], který tento test prováděl.



Obrázek 4.1: Rozměry a označení testovaných vzorků

Po přípravě vzorků na experiment (důkladné očištění, označení, zhotovení fotografie) proběhlo nastavení klimatické komory na požadované podmínky a následné vložení vzorků do komory. Vzorky spojené základní metodou byly označeny F1-1 až F1-5 a vzorky obsahující přídatný materiál L1-1 až L1-5. Testování probíhalo za konstantní teploty 80 °C a konstantní relativní vlhkosti 95 %. Posléze byli z komory vytahováni ve 3 etapách a to po 20, 30 a 42 dnech. První skupina vzorků byla testována 20 dní a po uplynutí této doby byla vyjmuta z klimatické komory. Stav vzorků je zobrazen na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Vzorky po degradaci po 20 dnech

Tabulka 4.1 zobrazuje vybrané metody používané k vyhodnocování koroze v klimatických komorách za daných podmínek teploty a relativní vlhkosti. Dále nám dává přehled o době zkoušky, cyklování a druhu vzorků testovaných pomocí dané metody.

Tabulka 4.1: Přehled jednotlivých metod pro klimatické komory

Metoda	Teplota [°C]	Prostředí	Cyklování	Doba zkoušky [dny]	Počet vzorků	Použití zkoušky
ČSN EN 2243-5	70 ± 3	Relativní vlhkost 95–100 %	Bez cyklování	10	5	Lepené spoje, jednoduché přelátování
				20	5	
				30	10	
MIL-STD-202 H103	40 ± 2	Relativní vlhkost 90–95 %	Bez cyklování	4	5	Elektrické komponenty
				10	5	
				21	5	
				56	5	
MIL-STD-202 H106	25/65	Relativní vlhkost 80–100 %	Cyklováno	10	5	Elektrické komponenty, polovodiče, mikroobvody
MIL-STD-810 H507.6	30/60	Relativní vlhkost 95 %	Cyklováno	10	5	Všeobecné využití
				30	5	
				45	5	
AEC-Q200	85 ± 3	Relativní vlhkost 85 %	Bez cyklování	42	10	Pasivní elektronické součástky
ČSN 03 8131	35 ± 2	Relativní vlhkost 100 %	Bez cyklování	1	5	Kovové díly
				až		
				28		
Praktický test [39]	80 ± 3	Relativní vlhkost 95 %	Bez cyklování	20	5	Svarové spoje
				30	5	
				42	5	

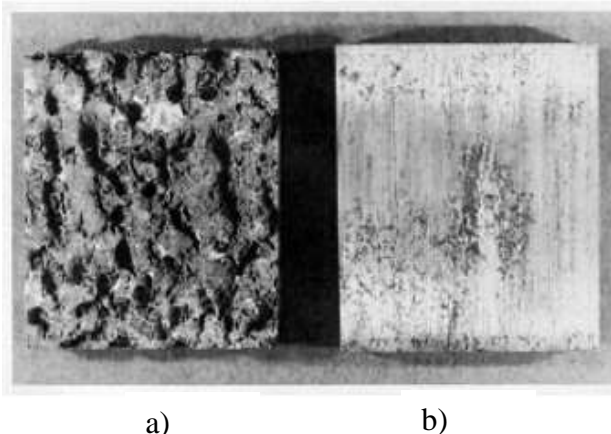
Tabulka 4.1 udává přehled vybraných metod (norem) využívaných pro testování účinku prostředí na materiál. Norma ČSN ISO 2243-5 se využívá pro testování konstrukčních lepidel využívaných v letectví a kosmonautice [39]. Normy MIL-STD-202 H popisuje metody testování elektrických a elektronických součástek. Příklad H103 vyhodnocuje vlastnosti a funkčnosti součástek v důsledku absorpce vlhkosti. Příklad H106 zahrnuje cyklování, kdy vzorek cykluje mezi dvěma teplotami.

Do tabulky 4.1 byl taky zahrnutý praktický test. Podle praktického testu byla u vzorků vyjmutých z komory zaznamenána změna hmotnosti a začínající koroze. Znamky koroze byli patrné i lidským okem, protože slitina hliníku, ze které byly pláty vyhotoveny, obsahuje podíl mědi a je tedy ke korozi více náchylná. Po uplynutí doby 20 dnů došlo tedy ke změnám. Test však nebyl dokončen a proveden na více dnů. Dá se předpokládat, že kdyby vzorky byly testovány více dnů, popřípadě by do klimatické komory vstupovali i jiné parametry (například solná mlha, cyklování apod.), bylo by dosaženo výraznějších změn týkajících se úbytku hmotnosti, mechanických vlastností i viditelných změn na povrchu plechů (rozvoj koroze).

Korozní zkoušky solnou mlhou

Pravidla pro korozní zkoušky solnou mlhou udává norma **ČSN ISO 9227**. Norma pracuje s třemi druhy solné mlhy: neutrální, okyselená s kyselinou octovou, okyselená s chloridem měďnatým. Neutrální solná mlha se používá pro kovy a jejich slitiny, kovové, konverzní a anodické oxidové povlaky, kdežto okyselené solní mlhy se používají na dekorativní povlaky měď-nikl-chrom a nikl-chrom. Po přípravě požadovaného zkušební roztoku jsou zkušební vzorky umístěny do komory, ve které je udržovaná stálá teplota $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Pomocí rozprašovacího zařízení je na vzorky rozprašován předem připravený roztok po doporučenou dobu (2, 6, 24, 48, 96, 168 a víc hodin). Po uplynutí doby trvání zkoušky se vzorky z komory vyjmou, nechají se 0,5-1 hodinu oschnout a následně se opláchnou čistou tekoucí vodou nepřesahující $40 \text{ }^\circ\text{C}$, po kterém následuje osušení proudem vzduchu o tlaku nepřesahující 200 kPa. Následně dochází k vyhodnocení výsledků zkoušky, které zahrnují zkoumání změny hmotnosti, mechanických vlastností, vzhled materiálu, počet korozních defektů (důlky, trhliny, puchýře). Informace ohledně pravidel pro zkoušky solní mlhou popisuje samotná norma a zdroj [40].

Obrázek 4.3, převzatý ze zdroje [8], zobrazuje účinek solní mlhy na hořčíkovou slitinu AZ91. Při zkoušce byla použita neutrální solná mlha. Zkouška probíhala při konstantní teplotě $35 \text{ }^\circ\text{C}$, za přítomnosti solné mlhy a 5 % roztoku NaCl. Část a) obrázku 4.3 je slitina s obsahem 0,016 % železa a část b) obrázku 4.3 slitina s obsahem 0,0019 % železa. Testované vzorky byly z komory vyjmuty po 240 hodinách.



Obrázek 4.3: Testovaná vzorka slitiny AZ91

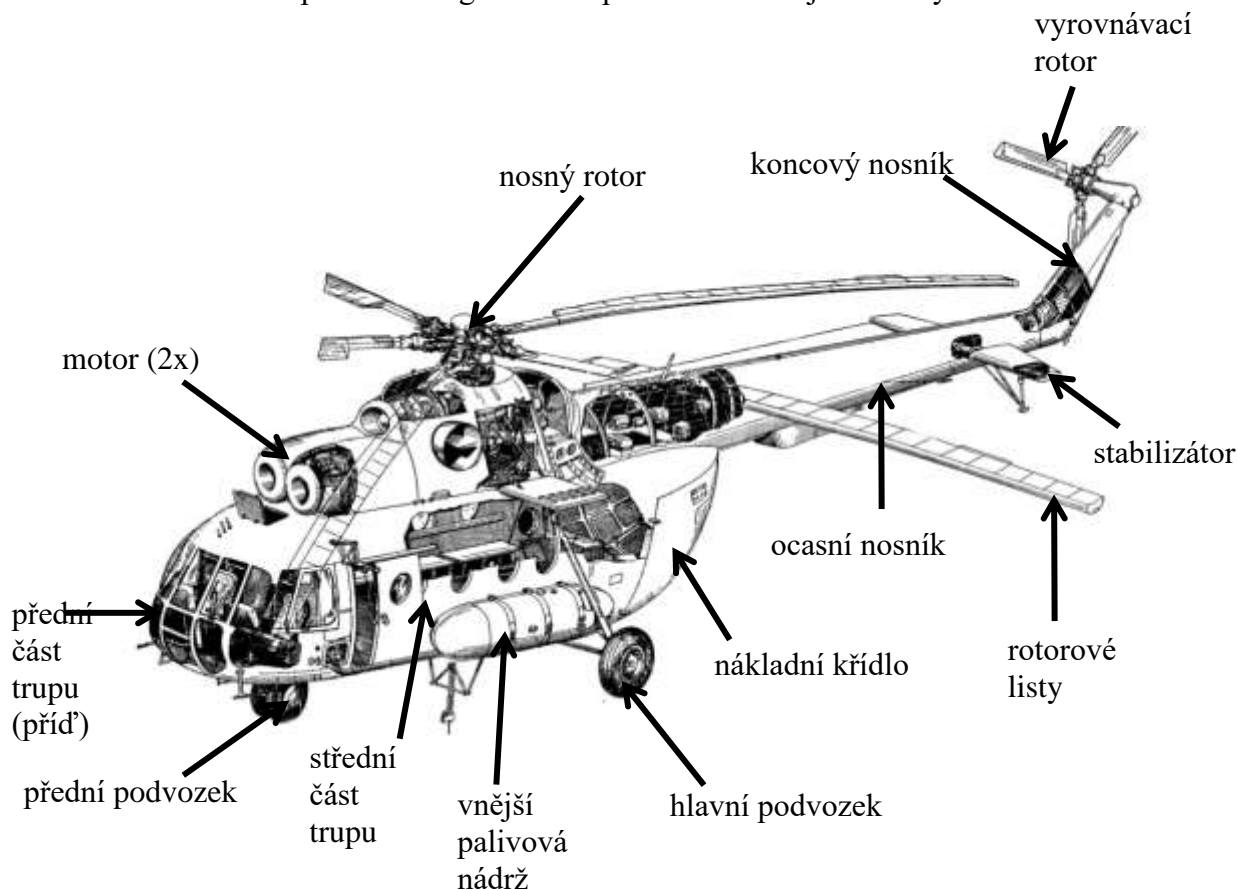
Z obrázku lze jasně vidět, že za přítomnosti solné mlhy a vyššího obsahu železa ve slitině je koroze mnohem výraznější než u slitiny s menším obsahem železa. Beneš [8] udává, že rychlost koroze u slitiny s menším obsahem železa je 15 mm/rok, s menším obsahem železa 0,15 mm/rok. Podle hodnot je rychlost koroze u slitiny s vyšším obsahem železa $100\times$ vyšší, a to už za dobu jen 10 dnů. Lze jasně vidět, že nízká odolnost železa proti korozi sehraává ve slitinách významnou roli.

Všechna výše vyjmenována prostředí mají vliv na vznik a rozvoj koroze. Největším problémem pro letecké součásti je vlhkost, přítomnost solí a jiných agresivních látek a střídání nízkých a vysokých teplot. Pokud se na letounu objeví malé vruby, rýhy nebo důlky, ve kterých se zachytává vlhkost, představují tak tyto místa ideální prostředí a místo pro vznik a rozvoj koroze. Tyto místa většinou vznikají oškrábáním ochranné vrstvy prostřednictvím kamínků nebo písku. Pokud se letoun nachází ještě v blízkosti moře, tak se tyto místa stávají mimořádně nebezpečnými. Kombinace výše zmíněných agresivních prostředí může výrazně urychlit rozvoj koroze.

5. Výskyt koroze na typických místech letecké konstrukce

Letecká konstrukce je složena z materiálů uvedených v kapitole 3, tudíž celá konstrukce může být náchylná na korozi. Pravděpodobnost výskytu koroze na letadle závisí na více faktorech, jako jsou poskytnutá ochrana při údržbě, údržba ochranných povlaků po dobu životnosti a prostředí, ve kterém letadlo operuje. Koroze leteckých konstrukcí a příslušných vybavení je způsobena jak přírodními, tak člověkem způsobenými faktory a prostředími. I přes to, že se v leteckém průmyslu používají speciální ochrany proti korozi a pracovníci údržby se snaží korozi předcházet a minimalizovat její dopady, koroze se stále může objevovat na určitých místech. Podle konstrukčního materiálu jsou některá místa letadla na korozi náchylnější než jiná. [11]

Pro zpracování této části méj bakalářské práce jsem se rozhodl kontaktovat letecké opravárny, servisy a údržby, které by mi mohli poskytnout odborné materiály o korozi a samotnou korozi na letecké konstrukci ukázat. Zajímal jsem se taky o odstranění koroze z leteckých materiálů a o moment, kdy už je nutno součást napadnutou korozí vyměnit za novou. Kontaktoval jsem několik míst a některé místa v čase psaní práce neměli relevantní materiály anebo pracovali se studenty jen na diplomových pracích. Nakonec jsem se zaměřil na státní podnik LOM Praha a samostatnou prohlídku leteckého muzea v Kunovicích. LOM Praha se zaměřuje zejména na údržbu, generální opravy a modernizaci vrtulníků Mi-8/17/24. Obrázek 5.1, převzatý ze zdroje poskytnutý navštíveným podnikem, popisuje základní části vrtulníku Mi-8. Právě tento typ vrtulníku se nacházel i v opravárně ke generální opravě v čase méj návštěvy.



Obrázek 5.1: Popis částí vrtulníku Mi-8

Dle ústního sdělení zaměstnanců podniku, lze vrtulník definovat jako jedno-rotorové motorové letadlo s pětistým nosným rotorem a třílístým vyrovnávacím rotorem. Mi-8 je určen pro přepravu 20 osob a 4 tony nákladu. Trup je celokovový proměnného průřezu, slouží k umístění posádky, cestujících, nákladu, paliva, výstroje a výzbroje, transmise a podvozku. Trup se skládá z přední, střední a ocasní části, kostra trupu se skládá z nosných stykových žeber a podélníků zhotovených z duralových profilů. Podlaha a potah spojuje kostru trupu v tuhou konstrukci. Potah je ke kostře trupu přinýtován. Trup je možné rozpojit na zesílených přepážkách č. 1 a č. 23 střední části a střední část na č. 1 a 17 přepážce v ocasním nosníku pomocí přírub, které jsou staženy a zajištěny šrouby.

Nosný rotor vrtulníku vyvolává vztlakovou a tahovou sílu kromě toho se ním řídí pohyby vrtulníku kolem podélné a příčné osy. Listy nosného rotoru jsou chráněny elektricky vyhřívanou protinámrazovou soustavou. List nosného rotoru je kovové konstrukce. Hlavním silovým prvkem je lisovaný dutý profilovaný nosník z hliníkové slitiny složený z 22 úseků, které jsou odděleny žebry z lehké slitiny.

Přední podvozková noha je upevněna horní uzlem k přepážce číslo 1 a vidlicovou vzpěrou k přepážce číslo 2 střední části trupu. Hlavní podvozkové nohy pyramidového typu jsou umístěny na obou stranách trupu. Jedná se o prostorový nosník složený z dvoukomorového tlumiče, vzpěry, poloosy a kola.

Vrtulník se ovládá ve všech třech osách změnou velikosti a směru tahové síly nosného rotoru a změnou velikosti tahové síly vyrovnávacího rotoru. Podélné a příčné řízení ovládá pilot nakláněním páky cyklíky. Směr letu se řídí pedály, jejich natáčení působí změnu celkového nastavení stoupání listu vyrovnávacího rotoru. Ke zlepšení stability a říditelnosti vrtulníku slouží stabilizátor – má symetrický profil skládá se z levé a pravé poloviny které jsou spojené podélným nosníkem.

Pohonná jednotka je tvořena dvěma turbohřídelovými motory TV2-117 a hlavním reduktorem, který přenáší výkon motoru na nosný a vyrovnávací rotor. Motory jsou uloženy nad trupem souměrně k podélné ose vrtulníku. Jsou skloněny dopředu pod úhlem $4^{\circ}30'$ ke konstrukční ose trupu a pracují nezávisle, což umožňuje let s jedním pracujícím motorem.

Dle zaměstnanců státního podniku je provozní doba vrtulníku 25 let a mezi opravní lhůta je přísně dána po 8 letech anebo po 1500 letových hodinách. Po uplynutí této doby musí vrtulník podstoupit generální opravu. Příprava vrtulníku na generální opravu zahrnuje množství úkonů, jejíž chronologický postup je následovný:

- po přistání vrtulníku v blízkosti hangáru a umístění na místo, kde se bude konat generální oprava je vrtulník **uzemněn** – pomocí uzemňovacích kabelů se zajišťuje ochrana před úrazem elektrinou
- **demontáž** – odstranění všech odnímatelných částí vrtulníku (podvozek, ocasní část, motory, rotor apod.) a jejich umístění na speciální stanoviště
- **odstranění nátěru** pomocí chemického produktu, který na povrchu působí několik hodin
- po odstranění nátěru se povrch vrtulníku **brousí** za účelem vyhlazení škrábanců, odstranění zbytku nátěru a koroze cca 0,5-0,8 mm
- **odmaštění** povrchu – odstranění zbytků po broušení, zbytků oleje a mastnoty

- takto připravený a vyschnutý povrch je připraven na **inspekci** stavu, kterou provádějí pracovníci, za účelem nálezu koroze, trhlin, poškozených a opotřebovaných součástek
- **oprava** zjištěných závad na vrtulníku a jeho jednotlivých částí a výměna částí, které nejsou provozuschopné za nové
- **montáž** opravených částí vrtulníku zpět
- **testování** funkčnosti

Obrázek 5.2 porovnává povrch vrtulníku těsně po přivezení do hangáru (vlevo) a povrch obroušen a připraven k inspekci (vpravo).



Obrázek 5.2: Zahájení generální opravy vrtulníku

Mezi nejčastější místa, na kterých se může koroze vyskytnout, jsou místa, které jsou vystavena atmosférickým vlivům, a to zejména vlhkosti, přítomnosti soli, vysoké teploty, kyselým prostředím a chloridům. Teda všechny nebezpečné agresivní prostředí popsány v kapitole 4. Typická místa výskytu koroze na letecké konstrukci vyplývající zejména z generálních oprav jsou:

- **TRUP** – zejména spodní část trupu
- **KŘÍDLA** – klapky, náběžné hrany, podélníky
- **MOTORY** – kryty, hřídele, vstup do motoru, výfukový výstup
- **ROTORY A ROTOROVÉ LISTY**
- **PODVOZEK** – kola, brzdy, nápravy
- **PODVOZKOVÉ ŠACHTY** – hydraulické a elektronické součástky
- **SOUČÁSTI POUŽÍVANÉ NA SPOJOVÁNÍ jednotlivých částí po celé letecké konstrukci** – šrouby, matice, nýty, klouby, trubky

Trup a podvozek

Oblast spodní části trupu a podvozek letounu jsou nejkritičtější místa výskytu koroze. Obzvláště když je letadlo provozováno v podmínkách jako jsou vzlety a přistávání na mokřích, solených a písečných površích.

Při vzletu i přistávání na mokřím povrchu voda častokrát stříká do otevřených podvozkových šachet, ve kterých se nacházejí palivové, hydraulické hadice a různé přívodové kabely, kterých poškození může vést k úniku paliva anebo hydraulického oleje.

Nežádoucím faktorem je písek, prach a jiné nečistoty, které se mohou usazovat na kolách a brzdových systémech podvozku. Při víření vzduchu kolem podvozků se tyto malé nečistoty

dostávají i přes malé štěrby do hloubky a poškozují ochranné vrstvy, a to vede ke korozi. Nejvíce zasažené korozí bývají kola a brzdy. V důsledku koroze vznikne jistá vůle v oblasti brzdných destiček a kotoučů, a tedy není zajištěn plnohodnotný styk s brzdovou destičkou, což snižuje brzdící účinky – přímé ohrožení bezpečnosti. Tohle může vyústit i do špatné přilnavosti pneumatik na přistávací dráhu, což vede k prokluzování a zhoršení řízení během přistání. Zároveň to snižuje i životnost kol.

Celkově má na korozi jednotlivých částí podvozku negativní vliv použití protinámrazových chemikálií a solení drah. Malé částičky ledu jsou za potřeby odstranit i z křídel a vrchní části trupu. Na to se používají tekutiny, které stékají k podvozkům. Jedná se většinou o tekutiny smíšené z vícerozých korozně agresivních látek.

Nebezpečné jsou také malé kamínky, které se nacházejí na dráze a tlakem vzduchu se dostávají do pohybu a narážejí na celou spodní část trupu. Zde oškrabávají ochrannou a pasivační vrstvu. Vzhledem k tomu, že trup letounu se skládá hlavně z hliníkových slitin, poškození ochranné vrstvy může být nebezpečné. Poškrábání trupu vede ke vzniku malých a dlouhých důlků, do kterých se snadno dostane vlhkost, kyselá dešť, znečištěné ovzduší, a tak důlky představují optimální prostředí pro vznik koroze. Pokud je letoun provozován v blízkosti mořské atmosféry anebo továrny, která do ovzduší produkuje agresivní plyny, riziko vzniku koroze se zvyšuje.

Koroze vyskytující se na trupu může vést ke snížení pevnosti zasaženého materiálu. Častokrát se korozní napadení vyvíjí v malé trhliny v důsledku vibrací. Trhliny a praskliny mohou mít za následek únik hydraulické kapaliny a paliva, což může vést k požáru. Tyhle trhliny a nerovnosti způsobené korozí často negativně ovlivňují aerodynamiku letadla, protože mění proudění vzduchu kolem letadla, což zvyšuje odpor a letoun spotřebovává více paliva.

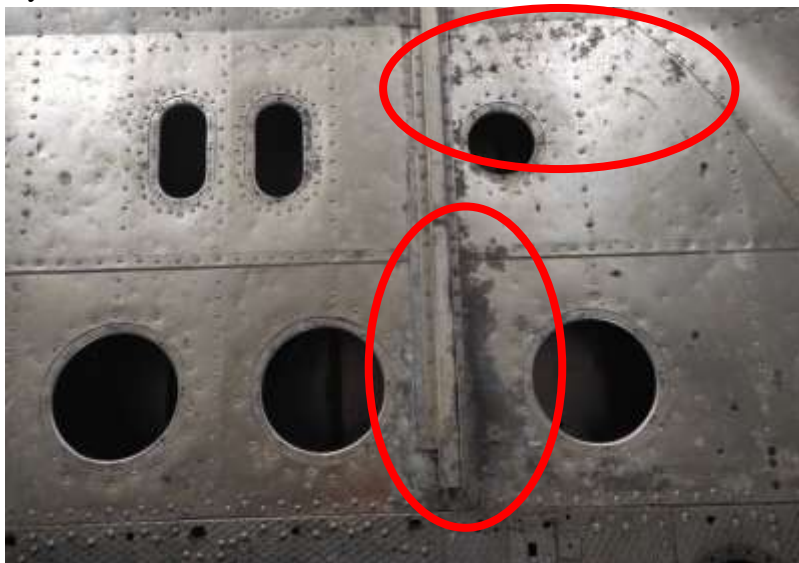
Koroze dramaticky snižuje statickou pevnost a životnost materiálu. Je zdrojem vzniku trhlin, urychluje jejich šíření a tím zvyšuje riziko únavy materiálu. Součástky, které jsou namáhány cyklicky a vystaveny korozivnímu prostředí, mají vyšší tendenci k praskání, ztrátě pevnosti a nižší životnosti. U trupu a podvozku lze vidět propojení s některými agresivními prostředími, které ve své technické zprávě popisovali Petrásek a Krchňavý [31].

Na obrázku 5.3 lze vidět zmíněnou kritickou část spodní části trupu vrtulníku v oblasti upevnění vzpěry předního podvozku. Koroze zasahuje i pod zhotovenou záplatu po předešlé opravě. Spodní část trupu je vyrobena z hliníkové slitiny 2224.



Obrázek 5.3: Koroze spodní části trupu

Obrázek 5.4 zobrazuje pokročilou korozi vnitřní podlahy trupu vrtulníku v nákladní části vyrobenou z hliníkové slitiny 6060.



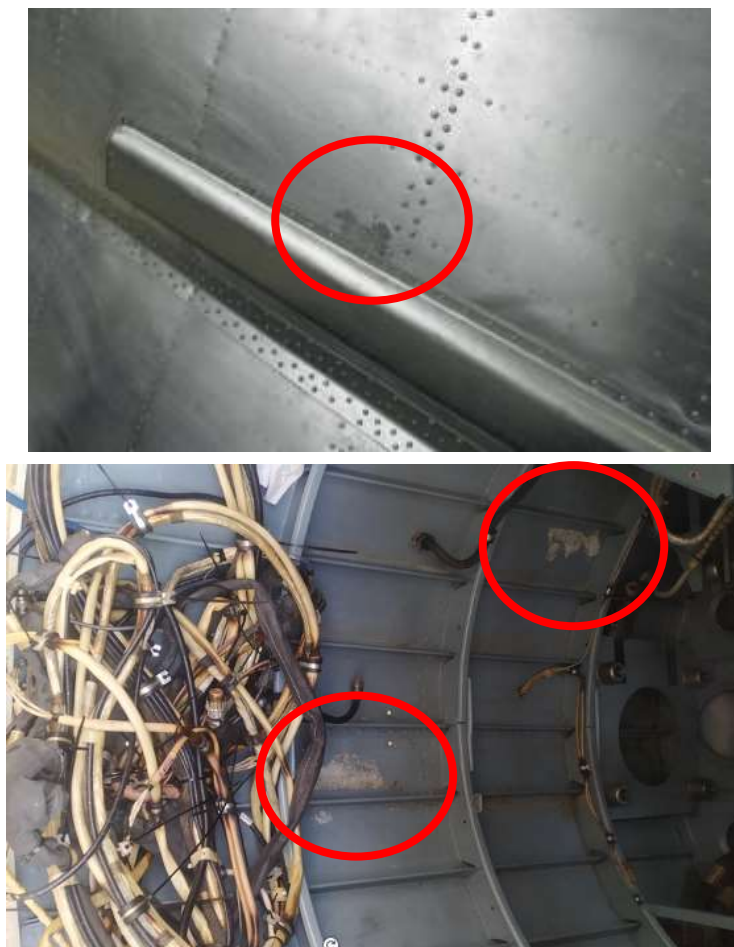
Obrázek 5.4: Koroze vnitřní podlahy

Obrázek 5.5 zobrazuje dvě trhliny v důsledku koroze na vnějším potahu trupu vrtulníku (hoře) a ošetřený povrch (dole). Potah je znovu vyroben z hliníkové slitiny 2224.



Obrázek 5.5: Trhliny v důsledku koroze na potahu

Obrázek 5.6 zobrazuje postihnutí vnějšího potahu rádioprostoru (hoře) pronikající potahem a vnitřního potahu na dvou místech (dole). Potah je vyroben z hliníkové slitiny 2024-T4.



Obrázek 5.6: Koroze potahu v rádioprostoru

Obrázek 5.7 zobrazuje korozi na podlaze pod vstupními dveřmi. Podlaha je vyrobená z hliníkové slitiny 6061.



Obrázek 5.7: Koroze podlahy na vstupu

Vysoko náchylným místem na korozi vrtulníku Mi-8 je rám kabiny. Na obrázku 5.8 lze vidět korozi vnějšího rámu zasklení kabiny vyrobeného ze speciální hořčkové slitiny – elektron.



Obrázek 5.8: Koroze rámu kabiny

Častým místem na vrtulníku, které postihuje koroze jsou různé konzoly a přepážky. Konzoly slouží na uchycení prvků potřebných k uskutečnění letu jako například: nádrží, motorů, ventilátoru, reduktoru apod. Tyhle místa často postihuje koroze, protože mezi malé mezery se dostává vlhkost, a to často vede až k destruktivnímu stavu, jak je zobrazeno na Obrázku 5.11, který zobrazuje korozi vedoucí k rozpadu části protipožární přepážky.

Koroze na základnách uchycení antén vyrobených z oceli 14 221 je zobrazena na obrázku 5.9.



Obrázek 5.9: Koroze v místě uchycení antén

Koroze konzole uchycení podvozku vyrobená z oceli 1.4301 je zobrazena na obrázku 5.10.



Obrázek 5.10: Koroze podvozkové konzole



Obrázek 5.11: Destrukce protipožární přepážky

Obrázek 5.12 zobrazuje korozi v prostoru šachty příďového podvozku vyrobené z hliníkové slitiny 7075.



Obrázek 5.12: Koroze šachty podvozku

Obrázek 5.13 zobrazuje korozi na tlumiči podvozku letounu Mig-21 MF vyrobeného z oceli 16 341.



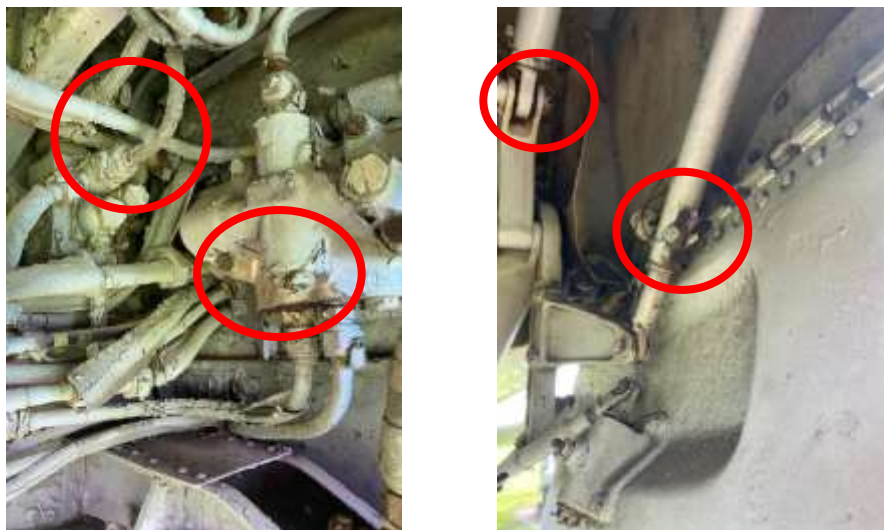
Obrázek 5.13: Koroze tlumiče podvozku

Obrázek 5.14 zobrazuje korozi v místě průchodky mezi pístem a spodní schránkou přední podvozkové nohy a v místě spojení ojnice spodní schránky nohy pomocí oka k upevňovací páce. Noha a ojnice jsou vyrobeny z oceli 18CrNiMo7-6. Spojení k páce je provedeno pomocí bronzových pouzder.



Obrázek 5.14: Koroze předního podvozku Mi-8

Koroze potrubí a součástí v podvozkové šachtě a samotné podvozkové šachty je zobrazena na obrázku 5.15. Jedná se o podvozkovou šachtu letounu Aero L-19 A (vlevo) a letounu Tu-154 M (vpravo).



Obrázek 5.15: Koroze podvozkové šachty

Křídla

Křídla letounů jsou náchylná na korozi ze stejných důvodů jako trup a podvozek, a tedy vlhké, prašné a písečné prostředí, odmrazování křídel, solení. Celý povrch křídel je vystaven atmosférickým vlivům zejména dešti, sněhu, ledu. Typická místa výskytu koroze jsou spodní část křídel a spoje křídla s jinými částmi, jako jsou pylony motorů, spojení křídla k trupu, spoj klapek, spoilerů a křídélek ke křídlům. V těchto spojích můžou vznikat malé mezery, do kterých se snadno dostane

vlhkost, která přispívá ke vzniku koroze. Obzvláště nebezpečné je místo spoje ke trupu na spodní straně křídla, kde při vzletu i přistávání stříká voda z přistávacích drah.

Dalším místem náchylným na korozi je náběžná hrana křídla. Tato hrana je vystavena jak atmosférickým vlivům, tak turbulentnímu proudění a oškrábání kamínky a pískem. To poškozuje ochranní nátěry a pasivační vrstvu použitých slitin (zejména pevných hliníkových slitin třídy 7xxx). Takto poškrábanou náběžnou hranu křídla letoun Avia Il-14 FG zobrazuje obrázek 5.16.

Klapky, spoilery a křídélka jsou jedny z aerodynamických prvků letadla. Koroze na těchto prvcích tedy může značně ovlivnit aerodynamiku letadla. V extrémních případech může koroze na těchto prvcích vést k jejich nenávratnému poškození, což může vést ke ztrátě kontroly nad letadlem.



Obrázek 5.16: Poškození náběžné hrany křídla

Na obrázku 5.17 vlevo lze vidět pomalý rozpad zadní části křídla letounu MIG-23 MF v důsledku koroze. Vpravo lze vidět postupné odlupování materiálu po vrstvách spodní strany křídla vyrobeného ze slitiny 2124.



Obrázek 5.17: Degradace křídla MIG-23 MF

Na obrázku 5.18 lze vidět vícero forem koroze na křídle letounu Avia I1-14 T. Povrch křídla je postihnutý atmosférickou korozí, odlupováním barvy a laku, a taky korozí ve spojích, kde byli použity šrouby a nýty.



Obrázek 5.18: Koroze na povrchu křídla

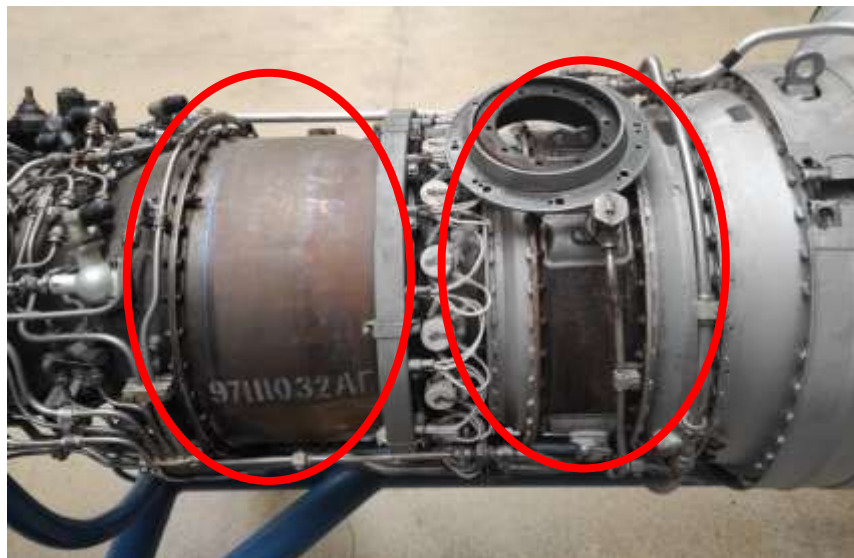
Motory

Další náchylnou typickou částí letecké konstrukce jsou motory. Tyto části jsou také vystaveny vlhkosti, slanému prostředí, dešti a obzvláště vysokým teplotám a vibracím. Koroze se často vyskytuje na krytech leteckých motorů, které jsou vystaveny atmosférickým vlivům. Je důležité, aby kryty motorů byly nepoškozené, protože přes nepoškozené kryty je riziko vniknutí vlhkosti a jiných korozivních faktorů přes trhliny, které způsobí korozi, malé. Koroze však zasahuje i vnitřní součástky motorů jako jsou: lopatky dmyhadla, ložiska, písty, klikové hřídele, turbíny, ozubená kola a jiné. Část motoru, která musí odolávat extrémně vysokým teplotám a korozně agresivním výparům z leteckého paliva je výfuková část motoru. Tato část je taky náchylná na korozi. Výfukové plyny jako například oxidy síry a dusíku jsou velmi nebezpečné, protože za přítomnosti vlhkosti tvoří kyselinu. Tato část je taky náchylná na korozi.

Motory jsou pohonnou jednotkou letounu, takže je zřejmé, že koroze na jakékoliv součástce leteckého motoru je vysoce nebezpečná. Korozní nález na jakékoliv součástce leteckého motoru musí být okamžitě odstraněn, aby byla zabezpečena plynulost a bezpečnost letu. To je právě důvod, proč se v leteckých motorech používají pevné materiály odolné vůči vysokému namáhání, vysokým teplotám, otáčkám a ochrana proti korozi musí být prioritní. Součásti jako jsou ventilátor, dmyhadlo a lopatky sloužící k nasávání vzduchu, resp. stlačování vzduchu, se mohou v důsledku koroze deformovat, snižovat celkový výkon motoru. Tyto součástky jsou vystaveny vysokému cyklickému namáhání, takže jsou náchylné na únavové porušení. Tah motoru často nasává kamínky a nečistoty nacházející se na dráze, což může znovu poškrábat ochranné vrstvy jednotlivých materiálů anebo významně poškodit hlavně dmyhadlo a lopatky, přes které nasávaný vzduch proudí. Koroze často zasahuje i palivové, hydraulické a elektronické součástky motorů a jejich selhání v důsledku neošetřené koroze může mít katastrofické následky. Například poškození palivových součástí může vést k úniku paliva, vyšší spotřebě paliva a s tím přímo spojené riziko vzniku požáru. Únik kapalin narušuje ochrannou vrstvu, což při agresivních prostředích může mít

závažný dopad na součást, do které se uniklá kapalina dostala. Poškození hydraulických součástí naopak může způsobit únik hydraulické kapaliny anebo omezit řízení částí jako jsou přetlakové mechanismy, hydraulické ventily na ovládání průtoku kapalin.

Obrázek 5.19 zobrazuje korozi vnějšího povrchu v oblasti volné turbíny (vlevo) vyrobené z materiálu Ti6Al4V, a korozi tělesa materiálů vyrobeného z hliníkové slitiny 1561 (vpravo).



Obrázek 5.19: Koroze částí motoru TV2-117A

Obrázek 5.20 zobrazuje korozi vnějšího povrchu motoru v oblasti výfukových spojů vyrobených se slitiny Inconel 718.



Obrázek 5.20: Koroze spojů v oblasti výfuku

Obrázek 5.21 zobrazuje jednotlivá potrubí motoru TV2-117A zasažené korozi zejména v místech, kde se spájejí k jiným součástkám motoru.



Obrázek 5.21: Koroze potrubí motoru

Koroze na kompresorových lopatkách proudového motoru Ivchenko AI-25 vyrobených se slitiny Inconel 718 je zobrazena na obrázku 5.22.



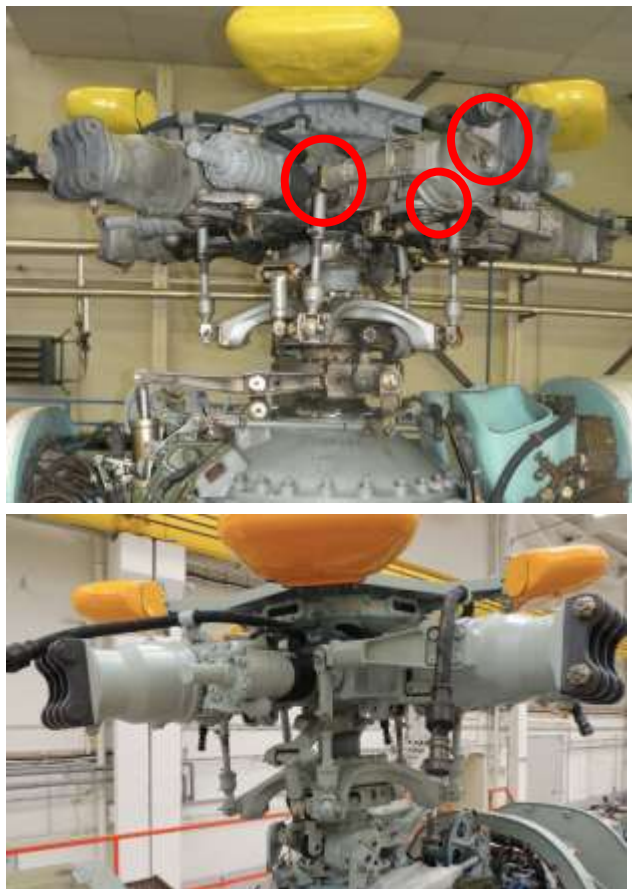
Obrázek 5.22: Koroze kompresorových lopatek

Rotor a rotorové listy

Rotory vrtulníků jsou taky velmi náchylné na korozi za přítomnosti agresivních látek. Zvláště písečné a prašné prostředí je nebezpečné pro rotory a celkově povrch vrtulníku, kdy při víření vzduchu pomocí listů rotoru písek proudí kolem vrtulníku a poškozuje jak rotor, tak i všechny části, na které naráží. Z tohoto důvodu dochází k poškrábání ochranné vrstvy a při rotaci rotoru dochází k zadírání. Postupně se povrch rotoru obrušuje, což může vést k úbytku materiálu, snížení statické pevnosti a vytvoření větší (nežádoucí) vůle mezi rotorovými součástkami. Při neřešení tohoto problému může dojít k zvýšení vibrací a postupnému vydrolování materiálu a s tím přímo spojenému snížení pevnosti a odolnosti proti únavě. Tohle všechno má vliv i na snížení výkonu vrtulníku.

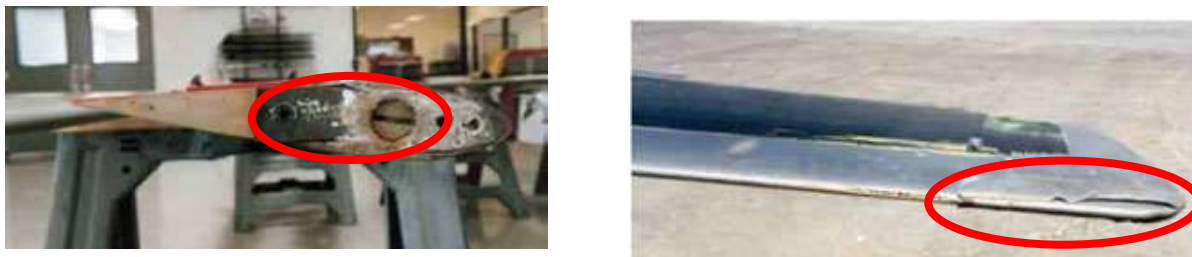
Rotorové listy zasažené korozi mají tendenci k praskání a ztenčování, což je může výrazně oslabit a vést ke selhání. Kritickými místy jsou i spoje listů k rotorové hlavě. Listy musí během letu odolávat vysokému odporu vzduchu, což při korozi oslabených spojích může vést i k uvolnění listu v tomto spoji. V době návštěvy podniku Lom Praha bylo nalezeno mnoho korozních napadení na nosném rotoru, ale jen na velmi malých plochách. Jedná se o počáteční napadení, takže jeho odstranění v závislosti na materiálu, z kterého je daný prvek rotoru vyroben, není složité. Jednotlivé postupy odstranění koroze jsou popsány v podkapitole 5.1. Proto uvádím obrázek 5.23, na

kterém je nahoře zobrazen rotor vrtulníku Mi-8, kdežto dolů je zobrazen zcela nový rotor vrtulníku Mi-17.



Obrázek 5.23: Porovnání rotorů dvou různých typů vrtulníků

Obrázek 5.24, převzatý ze zdroje [50], zobrazuje korozi na rotorových listech. Zdroj uvádí, že se jedná o korozi listů, které pracovali v pobřežních místech a v silných deštích.



Obrázek 5.24: Koroze rotorových listů

Spojovací součásti

Mezi nejpoužívanější spojovací prvky na letecké konstrukci patří nýty. Najdeme je v podstatné míře na trupu letounů. Zde spojují plechy vytvářející kostru letounu k přepážkám. Najdeme je taky na křídlech, ocasních plochách a oknech. Mezi další spojovací prvky patří šrouby a příruby, používající na upevnění motoru ke křídlům, křídla ke trupu, upevnění stabilizátoru na ocasní plochy, ale šrouby najdeme i ve vnitřní části letadla, například na montáž sedadel, dveří, přístrojů v kokpitu. Jeden ze spojovacích prvků, který umožňuje pohyb a ohyb vzájemně připojených dvou nebo více částí jsou klouby. Najdeme je nejčastěji v oblasti podvozku a rotoru. U spojů a spojovaných součástí se typicky vyskytuje galvanická koroze, koroze pod napětím, únavová a nitková koroze.

Obrázek 5.25 zobrazuje korozi ocelových šroubů v oblasti pilotní kabiny letoun L-410.



Obrázek 5.25: Koroze v místě šroubů

Obrázek 5.26 zobrazuje korozi ocelových šroubů třídy 12 v oblasti spoje křídla ke trupu letounu Tupolev Tu-154M.



Obrázek 5.26: Koroze v místě spoje křídla ke trupu

Obrázek 5.27 zobrazuje spojení uzavíracího prostoru raketnice k trupu letounu Suchoj Su-7. Uzavírací prostor je vyroben se slitina 6061 a je k trupu připevněn pomocí šroubů ocelové třídy 10.9.



Obrázek 5.27: Koroze v místě spoje uzavíracího prostoru

5.1 Odstranění koroze

Potom co pracovník inspekce objeví korozní nález, následuje jeho odstranění za dodržování předem připravených pravidel. Pravidla odstranění koroze se liší pro každý typ materiálu použitého na stavbu letecké konstrukce. Při odstraňování musí pracovníci dodržovat všechny předpisy při práci s chemikáliemi, používat ochranné štíty a brýle, rukavice. Informace o odstranění koroze z jednotlivých materiálů mi byly sděleny v průběhu návštěv pracovníky podniku.

Odstranění z ocelových součástí

Pro odstraňování koroze z ocelových součástí vrtulníku se pracovníci údržby v LOM Praha řídí předpisem MP1007.A. Příprava povrchu na odstranění koroze zahrnuje zbavení zasažených dílů mastnoty benzínem, ponechat k vysušení 15 minut při teplotě minimálně 15 °C. Pomocí kartáče zkorodované plochy narušit, ale pečlivě tak aby nedošlo k narušení i jiných ploch.

Na drsněný zkorodovaný povrch detailu nanést odrezovač Chema „T“ anebo odrezovač s taninem tak, aby vzniklý kysličník byl nasycen chemickým přípravkem. Tento nasycený povrch nechat k chemickému působení 2-3 hodiny při teplotě 15 °C (kde vznikne zeleno-fialový povlak). Tento povlak je pak nutno odstranit ocelovým kartáčem za účelem zjištění, zda se většina koroze rozpustila. Je-li korozní napadení středního stupně je za potřeby odrezovač nanést znovu, je-li korozní napadení velmi silné může se nanést odrezovač i po třetí. Na odřezaný kov se nanáší kumarínová barva 0-2005 včetně okolních obnažených ploch v jedné vrstvě a ponechat k vyschnutí 24 hodin při minimální teplotě 18 °C. Odrezovač vytváří pouze tenkou pasivační vrstvu, která musí být vždy opatřena nátěrovou hmotou, nejčastěji syntetickou barvou S-2003/0660/0600 nástríkem podle požadavků technologie nebo výkresové dokumentace.

Na zabránění stékání chemického přípravku je nutno použít hadry a vaty, aby se chemikálie nedostala na plechu s vyhovujícím povrchem.

Odstranění z hliníkových součástí

Znakem koroze pro hliníkové slitiny je výskyt bílých nebo šedých skvrn na povrchu nebo výskyt jednotlivých těžko rozeznatelných korozních kráterů, které se někdy zobrazují jako bod na povrchu. Hliníkové slitiny jsou často ošetřeny základním nátěrem AK-069 a AK-070. Pokud je na površích chráněných základním nátěrem zjištěna koroze je důležité odstranit poškozenou vrstvu nátěru brusným papírem číslo 5, 6 do hloubky zasažení koroze. Zkorodované místo je nutné oříti čistým hadříkem navlhčeným v neetylovaném benzínu a následně odstranit produkty koroze pomocí hrubých štětin. Potom pomocí rozprašovače nebo štětce nanést základní nátěr a dvě vrstvy základního nátěru AK-069, vysušit při 18–35 °C na 1,5 - 2 hodiny. V zimním období (teplota okolo pod 12 °C) po odstranění korozních produktů a po odmaštění je nutno natřít ošetřené místo vrstvou maziva AMC-3. Když se mazivo zahřeje, musí se odstranit hadříkem namočeným v benzínu. Až pak se může ošetřit postižená oblast podle popsaného postupu. Tenhle postup v zimním období platí jak pro hliníkové slitiny, tak i pro hořčíkové a železné součásti.

Odstranění z hořčíkových součástí

I hořčíkové slitiny jsou chráněny nátěrem anebo oxidovým filmem na povrchu. Při detekci korozi na takovémto povrchu je nutné odstranit korozní produkty pomocí škrabky nebo brusného papíru (číslo 8) na části přesahující poškozenou oblast. Škrábané místo několikrát omyt benzínem a vytrít do sucha hadříkem. Po zaschnutí je nutno chránit ošetřený povrch nanesením třech vrstev nátěru následujícím způsobem: nanést dvakrát vrstvu základního nátěru AK-070 pomocí štětce nebo rozprašovače a vysušit při 15-23 °C po dobu jedné hodiny. Poté nanést smalt příslušné barvy rozprašovačem nebo štětcem a vysušit po dobu 5 hodin.

Odstranění ze železných součástí

Při detekci korozi na povrchu železných součástí je nutno otřít korozně poškozené místo čistým hadříkem namočeným v benzínu nebo petroleji. Korozní produkty odstranit kartáčem s tvrdými štětinami. Pokud nelze korozní produkty odstranit kartáčem, místa koroze lze očistit brusným papírem číslo 10. Ošetřený povrch součásti přetrít hadříkem navlhčeným v benzínu s přimíchaným antistatickým prostředkem Sigbol. Pak povrch nechat vyschnout po dobu 5-10 minut a usušit místo do sucha čistým hadříkem. Následuje nanášení základního nátěru AK-070, vysušení při 18-30 °C po dobu 1-2 hodin, poté natřít emailem příslušné barvy a nechat schnout 5-6 hodin.

Při detekci koroze na pochromovaném povrchu: otřít korozi poškozené místo hadříkem navlhčeným v petroleji, odstranit produkty koroze pomocí kartáče s tvrdými štětinami, otřít místo do sucha hadříkem, aby se zabránilo vzniku koroze na pochromovaných součástech v provozu za atmosférických podmínek je pravidelně natírat tenkou vrstvou maziva AMC-3.

Obecně platí, že údržba laku a nátěru vnějšího povrchu natřeného epoxidovými emaily se koná pravidelně každé dva měsíce leštící vodou BA3-3 na vysušeném povrchu v povrchu při teplotě 5-35 °C. Je přísně zakázané používat leštící vodu, pokud na povrchu vrtulníku nachází prach, písek a jiné nečistoty. V této situaci je důležité nejdříve povrch umýt potašovým mýdlem a nechat dobře vyschnout

Vzhledem k tomu, že koroze postihuje mnoho míst na letecké konstrukci, je důležité jejímu vzniku předcházet a už vzniklé korozní napadení co nejdříve odstranit. Nejtypičtější místa letecké konstrukce, které jsou často napadány korozi jsou podvozek, motory a křídla. Tyto části se často skládají z velmi drahých součástí a materiálů. Proto je odstranění koroze důležité zejména za účelem prodloužení životnosti drahých materiálů a součástí, zabezpečit tak výkonnost daných součástí a v neposledním řadě zvyšovat bezpečnost samotného letu.

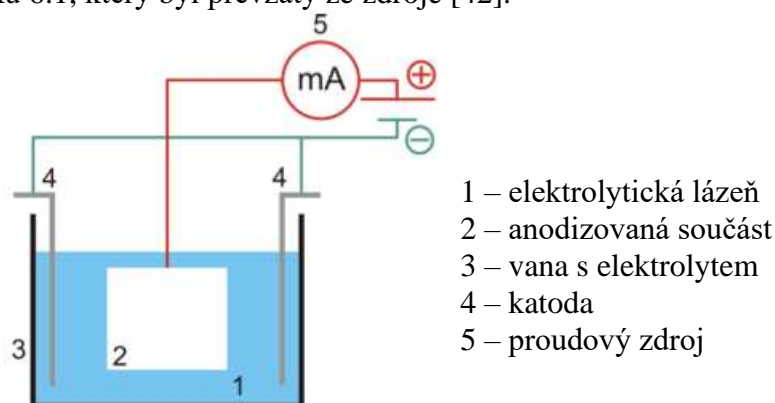
6. Možnosti ochrany proti korozi

Koroze je nežádoucí jev, který způsobuje problémy obrovských rozměrů velkým společnostem ale i jednotlivcům. Náklady spojené s odstraňováním koroze jsou obrovské, a proto je cílem chránit materiály proti korozi vhodnými inhibitory koroze. Právě korozní ochrana může značně prodloužit životnost materiálu nebo součástky a ušetřit tak peníze spojené s opravami. Nejjednodušší způsob, jak zabránit vzniku koroze je vytvořit mezi povrchem kovu a korodujícími činidly ochrannou bariéru. Mezi nejúčinnější a nejpoužívanější metody na ochranu proti korozi patří různé povrchové úpravy, inhibitory koroze, anodická oxidace, nátěry, tmely, pokovování, vhodná konstrukce tvaru součástky a správná volba materiálu.

Pasivace hliníkových slitin

Jak již bylo zmíněno, hliník a jeho slitiny jsou nejpoužívanějšími leteckými materiály. Jak uvádí Berka [10], hliník má tu vlastnost, že se váže na kyslík, čímž vzniká tenká transparentní pasivační (oxidová) vrstva – vrstva oxidu hlinitého Al_2O_3 . Oxidová vrstva chrání hliník nejen proti korozi ale i proti dalším poškozením. Zdroj [40] uvádí, že tloušťka pasivační vrstvy se pohybuje kolem $15\ \mu\text{m}$. V praxi se však využívá metoda, která pasivační vrstvu hliníku nahradí kvalitnější, a ještě odolnější vrstvou. Jedná se o anodickou (elektrolytickou) oxidaci.

Remešová [42] popisuje proces anodické oxidace jako princip ponoření anodizované součásti do elektrolytu, kde je součást zapojena jako anoda do obvodu se zdrojem střídavého nebo stejnosměrného proudu. Systém musí být uzavřený katodou. Na uzavření se používá olovo, titan nebo korozivzdorná ocel [42]. Průchodem elektrického proudu lázní dochází na anodě k rozpouštění hliníku a vzniku iontů OH^- . Chemickou interakcí mezi ionty Al^{3+} a OH^- se na povrchu vytváří povlak hydroxidu hlinitého. Tento povlak postupně zabraňuje průchodu elektrického proudu a dochází k ohřevu anodizovaného hliníku (vlivem vzniknutého odporu). Výsledkem procesu je vrstva oxidu hlinitého Al_2O_3 . Anodizaci poznáme taky pod názvem **eloxování**. Princip anodické reakce je zobrazen na obrázku 6.1, který byl převzatý ze zdroje [42].



Obrázek 6.1: Princip anodické oxidace

Samotné anodické oxidaci předchází důkladná příprava hliníkového povrchu. Proces anodizace speciálně pro letecký průmysl udává norma LeN 54311, kterou definuje zdroj [40]. Podle toho, do jakého elektrolytu je anodizována součást ponořena, rozdělujeme 2 typy anodizace:

1. Anodizace v kyselině sírové
2. Anodizace v kyselině chromové

6.1 Anodizace v kyselině sírové

Metoda eloxování v prostředí kyseliny sírové se v praxi využívá zejména z hlediska cenové přijatelnosti, vysoké provozní spolehlivosti a nízké spotřeby energie. [40] Večeřa [52] uvádí, jednu z nevýhod anodizace, a to zhoršování únavových vlastností materiálu. Jestli je toto tvrzení pravdivé, zkoumám v podkapitole 6.3. Proces dle zdroje [40] probíhá v těchto krocích:

- a) čištění – odmašťování v organických rozpouštědlech (benzín, trichloretylen, perchloretylen) nebo v alkalických roztocích
- b) čištění – otryskávání brusným materiálem (pískování, broušení nebo omílání v omílačích bubnech)
- c) montáž anodizované součásti na stojan
- d) moření – odstranění původních oxidů v kyselině chromsírové nebo v roztoku NaOH po dobu 15-60 sekund
- e) ponor do kyseliny dusičné HNO_3 (5-10 minut)
- f) oplach v studené vodě (minimální hodnota $\text{pH}=5$)
- g) oplach v teplé vodě ($t > 25\text{ }^\circ\text{C}$)
- h) oplach v studené vodě (minimální hodnota $\text{pH}=8$)
- i) opakovaný ponor do kyseliny dusičné (5-10 minut)
- j) oplach v studené vodě (minimální hodnota $\text{pH}=5$)
- k) proces anodizace v kyselině sírové H_2SO_4

Doba anodizace závisí na požadované tloušťce, kterou je potřeba vytvořit na povrchu hliníku. Tabulka 6.1, převzatá ze zdroje [40], zobrazuje hodnoty tloušťky vrstvy a jejich příslušný čas procesu eloxování.

Tabulka 6.1: Závislost tloušťky oxidické vrstvy na čase

Tloušťka [mm]	Čas [min]
0,5 – 0,6	50
0,8	45
1,0	40
>1,2	35

- l) oplach v studené vodě
- m) těsnění vrstvy oxidů
 - v horké vodě ($90\text{--}95\text{ }^\circ\text{C}$, 20–25 minut, $\text{pH} = 6\text{--}7$)
 - vodný roztok dvojchromanu sodného ($88\text{--}95\text{ }^\circ\text{C}$, 4–20 minut, $\text{pH} = 6,6\text{--}7,5$)
- n) sušení při teplotě $40\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$, 10–15 minut

6.2 Anodizace v kyselině chromové

Metoda eloxování v prostředí kyseliny chromové je typická pro letecký průmysl, při které se vytváří tvrdá, kvalitní vrstva s malou tloušťkou. Bařtipán [6] popisuje povrch hliníku po elektrolytické oxidaci (eloxovaný povrch) jako pórovitý, tvrdý a odolný proti korozi. Proces anodizace v kyselině chromové je téměř stejný, jako proces popsáný v podkapitole 6.1. Anodizovaná součást se ponoří do roztoku kyseliny chromové (oxid chromový CrO_3 + kyselina sírová H_2SO_4 , $38\text{--}45\text{ }^\circ\text{C}$, 60 minut za stálého míchání).

Po oxidaci se anodizovaná součást barví v organických nebo anorganických barvicích lázních. U hliníku se nejčastěji využívá roztoku chromanu sodného a uhličitanu sodného, ve kterém se dosahuje šedé až šedočerné barvy povrchu hliníku [6]. Barvivo se infiltruje do pórů ve vrstvě oxidů. Pro dosažení ještě lepší ochranné funkce proti korozi se součást ponoří do horké vody a následně do dvojchromanu sodného (bod m) v podkapitole 6.1) [40]. V důsledku ponoru se oxid vyplní, uzavře pór a dojde tak k utěsnění jednotlivých oxidů. Obrázek 6.2, převzatý ze zdroje [40], porovnává vzorky slitiny Al-Cu po 2 letech vystavené atmosférickému prostředí. Vzorka slitiny v části a) je bez úprav a má jasné znaky korozního procesu, kdežto v části b) vzorka, která je anodizována v kyselině sírové a zároveň má utěsněný povrch, je bez viditelných znaků korozního procesu.



Obrázek 6.2: Slitina Al-Cu

Berka [10] a Remešová [42] uvádí speciální případ anodické oxidace, která probíhá v kyselině sírové s aditivy a výsledkem je hrubší vrstva, která má vysokou tvrdost a je odolná proti opotřebení. Jedná se o tvrdou anodickou oxidaci. Tabulka 6.2, převzatá ze zdroje [40], zobrazuje doporučené tloušťky oxidických vrstev pro součástky používané v letectví.

Tabulka 6.2: Doporučené tloušťky oxidických vrstev

Umístění	Tloušťka [μm]	Typ anodizace
prvky kokpitu	5	kys. sírová, utěsněno
nýty	4–6	kys. sírová, utěsněno
konstrukční díly	8	kys. sírová, utěsněno
trup letadla a jiné části	3	kys. chromová, netěsněno

Anodizace v kyselině vinné

Poslední dobou se do popředí dostává metoda anodizace v kyselině vinné. Setianto [46] uvádí, že se jedná se o metodu, která je šetrnější vůči životnímu prostředí než anodizace v kyselině chromové a odpovídá nejnovějšímu nařízení REACH. Tloušťka eloxovaného povrchu má většinou 5–7 μm . Proces spočívá ve vyčištění, vysušení a následném alkalickém leptání hliníkových slitin po dobu 1 minuty. Po každé fázi následuje oplach pomocí vody. Eloxování se provádí při teplotě 37 °C po dobu 20 minut. Nakonec je součást oplachována ve vodě po dobu 5 minut a utěsněna ve vroucí vodě po dobu 50 minut. Eloxovaná vrstva má hrubší strukturu zrna a poréznější povrch, ale poskytuje zcela stejnou ochranu jako anodizace v kyselině chromové. Informace o anodizaci v kyselině vinné byly převzaty jako kombinace informací ze zdrojů [46] a [48].

Nařízení REACH

Za cílem ochrany lidského zdraví a životního prostředí v souvislosti s riziky, která mohou představovat chemické látky, dne 1.6.2007 vstoupilo do platnosti nařízení REACH. Jedná se o nařízení Evropské unie, jehož cílem je zlepšit ochranu. Jedná se o všechny chemické látky používané jak v průmyslových procesech, tak i v každodenním životě. Jednotlivé společnosti jsou povinné registrovat látky, které používají, předat informace o látkách agenturám (ECHA) a příslušné orgány rozhodují, zda lze látky používat nebo nikoliv. Informace ohledně nařízení REACH byly převzaty ze zdroje [38].

Pasivace hořčíkových slitin

Nejefektivnější ochranou hořčíkových slitin před korozi je vytvořit na jejich povrchu ochranný povlak. Možnosti povlakování hořčíkových slitin popisuje Ruttkayová [44] ve své práci. Mezi nejběžnější metody patří: galvanické pokovování, eloxování, kondenzační povlaky, konverzní a organické povlaky. Při metodě pokovování hořčíkových slitin se na povrchu upravované slitiny vyredukuje čistý kov, který je čerpán z okolního roztoku soli.

Při eloxování se na povrchu hořčíkových slitin vytváří silná a stabilní vrstva oxidů. Eloxování probíhá v lázních 10 % dichromanu sodného a 2-5 % fosforečnanu sodného. Před eloxováním je nutné povrchy důkladně očistit a odmastit. Samotný proces eloxování probíhá 30-60 minut při teplotě 50 °C a hodnotě pH roztoku 4-4,8. Barva výsledného ochranného povlaku se liší podle složení upravované slitiny. Povlak může přecházet od zelené až po leskle černou barvu. Čím vyšší obsah hliníku ve slitině, tím tmavší je vzniklý povrch na upravované slitině.

Ochranné povlaky hořčíkových slitin mohou být vyrobeny z plynné fáze. Jedná se o proces kondenzačních povlaků. Kovové a organické povlaky se vyznačují malou tloušťkou a jsou nanášený na povrch slitiny žárovým vstříkáním.

Ruttkayová [44] ve své práci také uvádí technologii konverzních povlaků, a to zejména chromátové a fosfátové povlaky, které se provádí chemickými nebo elektrochemickými postupy. Podstatou fosfátování je tvorba povlaku reakcí kyseliny fosforečné s kovem. Fosfátováním se dosahuje korozně dobře odolná vrstva fosforečnanů. Chromátováním se dosahuje jedné z nejefektivnějších protikorozi povlaků. Technologie chromátování se provádí ponorem, stříkáním nebo naválcováním. Nejčastěji se však využívá ponor do kyselého roztoku, který obsahuje šestimocný chrom. Vzniklý povlak má pak podle rozdělení ochrany proti korozi žlutou a zelenou barvu (střední ochrana), hnědou barvu (vysoká ochrana). Pro dekorativní účely a nízkou ochranu proti korozi může být povlak i bezbarvý.

6.3 Povrchové úpravy

Pro zlepšení odolnosti proti korozi se často využívá nanášení chemických konverzních povlaků (oxidových, fosfátových nebo chromátových povlaků). Na rozdíl od anodických, vznikají oxidačně-redukční reakcí na povrchu hliníku a jeho slitin. Hlavní výhodou konverzních povlaků je, že se dají využívat při sériové výrobě a mají jednoduchý postup (čistění, odmaštění, moření v HNO_3 , oxidace v lázni, oplach, sušení).

Pokovování a chromátování

V leteckém průmyslu se často setkáme taky s pokovováním. Pokovování se týká zejména ocelových a spojovacích materiálů (šrouby, čepy, matice) nanesením vrstvy kadmia, zinku nebo chromu. Pokovování probíhá v elektrolytu (v lázních), kde anoda je sestavena z nanášeného materiálu a katoda je pokovovaný díl. [40] Bařtipán [6] uvádí, že pokovování může probíhat i prostřednictvím difuze nebo parami kovů ve vakuových komorách. Kadmiování a zinkování probíhá v lázních, konkrétně v kyanidových, chloridových nebo síranových.

Po pokovování může být využito chromátování (dle ČSN EN 2437). Chromátování je povrchová úprava hliníkových slitin, která na povrchu vytváří vodivou chromátovou vrstvu [40]. Tato vrstva vzniká reakcí kovu s roztokem kyseliny fluorovodíkové, chromové, fosforečné anebo solí chromu. Při dané reakci dochází k rozpouštění povrchové vrstvy a následného vytvoření ochranné vrstvy, která obsahuje komplexní sloučeniny chromu. Chromátováním se dosahuje světle žluté až hnědé barvy. [40] Tabulka 6.3, převzatá ze zdroje [40], zobrazuje příklady chromátovacích postupů dle metody Protal a Alodin.

Tabulka 6.3: Chromátovací postupy dle metody Protal a Alodin

Metoda	Složení lázně	Koncentrace [g/l]	pH	Teplota [°C]	Čas [min]
Protal	CrO_3	4	1,2 - 2,2	15–45	10–20
	NH_4HF_2	2			
	SnCl_2	3			
Alodin	CrO_3	10	1,2 – 2,2	40–80	1–10
	H_3PO_4	64			
	NaF	5			

Metoda HVOF

V současné době se jako alternativa k chromátování začala ve velké míře používat metoda HVOF (High Velocity Oxygen Fuel). Tuto metodu popisuje zdroj [51]. Jedná se o proces, který vystřeluje práškový kov na součást extrémně vysokou rychlostí. Hlavní výhodou metody HVOF je, že šetří finanční prostředky a je bezpečnější než chromátování za pomoci šestimocného chromu, který je velmi karcinogenní. Celý proces trvá jen pár hodin, takže šetří i čas, má lepší odolnost proti abrazivnímu opotřebení (jak je možné vidět na obrázku 6.3, převzatý ze zdroje [51], část a) je součást po chromátování a část b) součást po aplikaci HVOF metody), ve struktuře se nevyskytují žádné mikrotrhliny, takže má perfektní odolnost proti korozi. Metoda HVOF je šetrná i k okolnímu prostředí, nezanechává po procesu žádné nebezpečné chemikálie, tak jako chromátování. Dokáže na součástku nanést vrstvu o tloušťce až 12 mm a dá se využít ne jenom v letectví ale i jiných odvětvích a průmyslech.



Obrázek 6.3: Porovnání metody chromátování a HVOF

Fosfátování a nanášení ochranných nátěrů

Proces fosfátování probíhá v roztoku kyseliny fosforečné. Součást je ponořena do lázně a na povrchu vznikne vrstva fosforečnanů, která je porézní a vytváří vhodný podklad pod nátěry. Tloušťka povlaku je v rozmezí 2–50 μm . [40]

Další metodou na ochranu proti korozi je nanášení nátěrů na povrch součástí. Nátěry jsou organické povlaky, které se nanáší ve více vrstvách. Výborným substrátem pro takovéto nátěry je hliník, kterého povrch musí být řádně očištěný a připravený [40]. Na povrch se nejprve nanáší základová barva, která je přílnavá a na ni se nanáší vrchní (krycí) barva, jejíž úkolem je zlepšit vzhled. Anodická oxidace vytváří výborný povrch pro organické nátěry [40]. Konverzní povlaky taky poskytují dobrý povrch pro nátěry. Rovněž lze na povrch součástí nanést laky, které se vyznačují svojí průhledností.

Proto, že anodizace zhoršuje mechanické vlastnosti, se v praxi před anodizací uplatňuje provedení procesu zvýšení meze únavy. Tento proces probíhá prostřednictvím válečkování, deformační zpevňování otvorů pro šrouby a leštění (odstranění vrubů), ale zejména kuličkování, při kterém se například u slitiny 2024 a 2017 zvýší mez únavy až o 20–30 %, jak uvádí zdroj [40]. Svoje uplatnění při ochraně proti korozi nachází taky proces plátování, kdy se na základní materiál nanáší tenká vrstva ochranného kovu válcováním, navařením nebo pájením.

Vliv povlaků na mechanické vlastnosti a únavovou životnost hliníkových slitin 6061

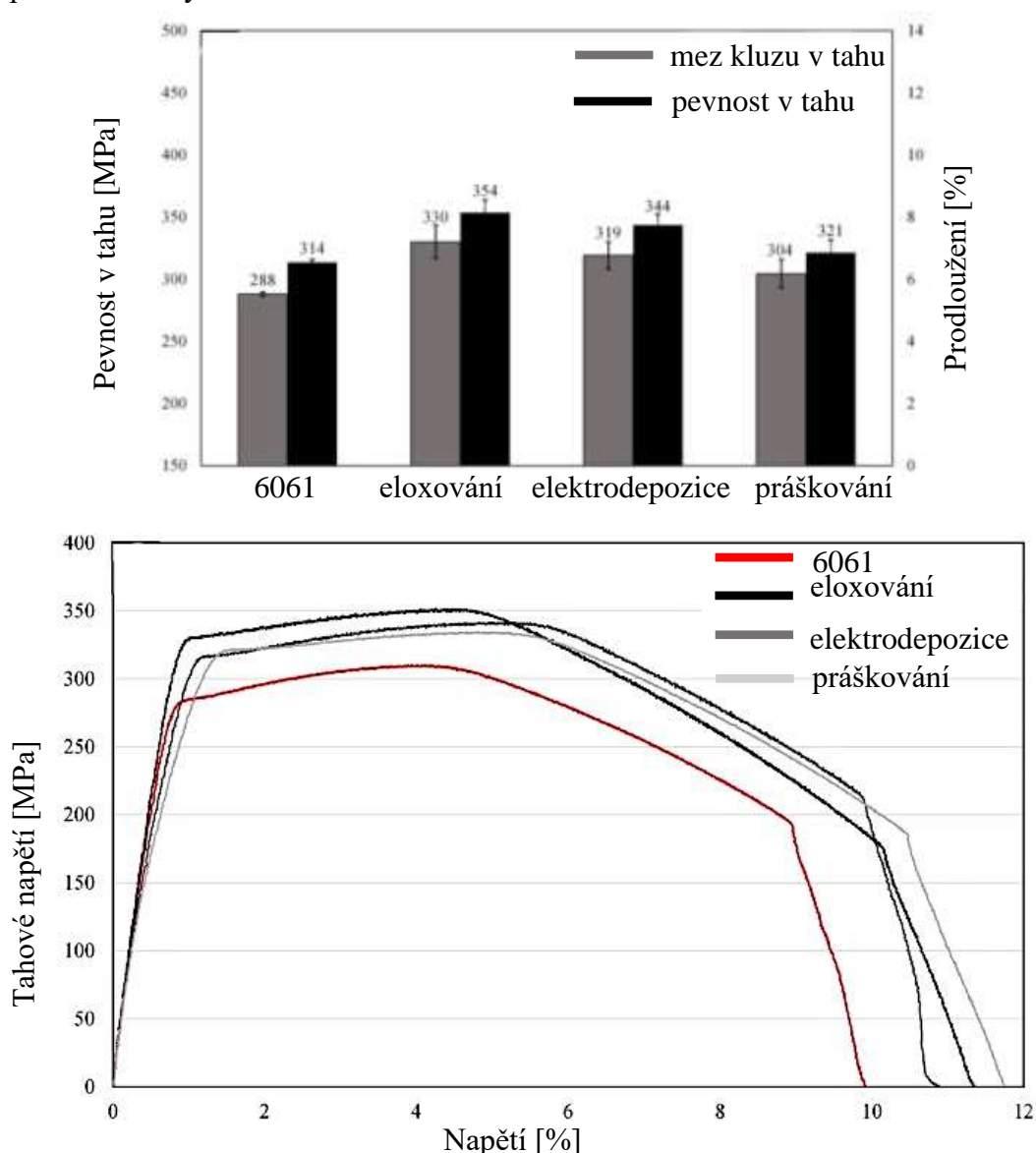
Povlaky vznikající povrchovými úpravami mohou mít významný vliv na mechanické vlastnosti a únavovou životnost povlakovaných slitin. Vlivem povlaků na tyto vlastnosti se zabývala studie, o jejíž informacích jsem čerpal ze zdroje [55]. Witthaya [55] se ve svojí studii zaměřil na hliníkovou slitinu 6061, která je často používána v leteckém průmyslu. Studie zkoumala vliv 4 upravených povrchů: leštěný, eloxovaný, elektrodepoziční a práškový povrch slitiny 6061. Právě eloxování je jedna z nejběžnějších povrchových úprav hliníkových slitin, v důsledku přijatelných nákladů, vysoké korozní odolnosti a všestrannosti barevných povlaků. Eloxace sice zvyšuje korozní odolnost, ale výrazně snižuje odolnost vůči únavě. Cílem studie bylo zkoumat vliv povlaků na jednotlivé vlastnosti. Z hliníkové slitiny byly připraveny vzorky ve formě tyče o průměru 16 mm, které podstoupili únavové zkoušky, prováděny pomocí zkoušky ohybu za rotace. Tahové vzorky byly vyrobeny o měrné délce 12,5 mm a podstoupili tahovou zkoušku.

Proces eloxování se skládal z čištění, alkalického leptání, oplachování, odmašťování, samotného eloxování, barvení a následného těsnění ve vodě o teplotě 95 °C po dobu 5 minut. Tloušťka vrstvy byla 10 μm .

Vzorek potažen elektrolytickým povlakem pozůstával ze 2 vrstev: první vrstva byla eloxace a druhá elektrolytické pokovování. Důvodem první vrstvy na vzorce je, že elektrolytická vrstva je bezbarvá, proto musí být vzorky nejdříve eloxovány, aby bylo dosaženo barevných povrchů [55]. Každá vrstva měla tloušťku 10 μm .

Před procesem práškového lakování byl povrch vzorky očištěn a odmaštěn. Proces se skládal ze 2 postupů: nejdříve byl použitý suchý prášek, který se pomocí elektrostatické stříkací pistole nastříkal na povrch a následovalo vytvrzení v peci při teplotě 180 $^{\circ}\text{C}$ po dobu 20 minut. Tloušťka vrstvy byla 100 μm .

Výstupem studie bylo vícero grafických závislostí a mikroskopických snímků povrchu před a po testu. Do své bakalářské práce jsem vybral 2 grafy. Grafické závislosti zobrazeny na obrázku 6.4, převzatý ze zdroje [55], vykazují charakteristiky tahového chování jednotlivých upravených povrchů slitiny 6061.



Obrázek 6.4: Grafické závislosti získané z tahové zkoušky

Z grafické závislosti lze jasně vidět, že všechny povrchové úpravy ovlivňují mez kluzu v tahu a celkovou mez v pevnosti. Všechny povrchové úpravy tyto dvě charakteristiky zvyšují. Tabulka

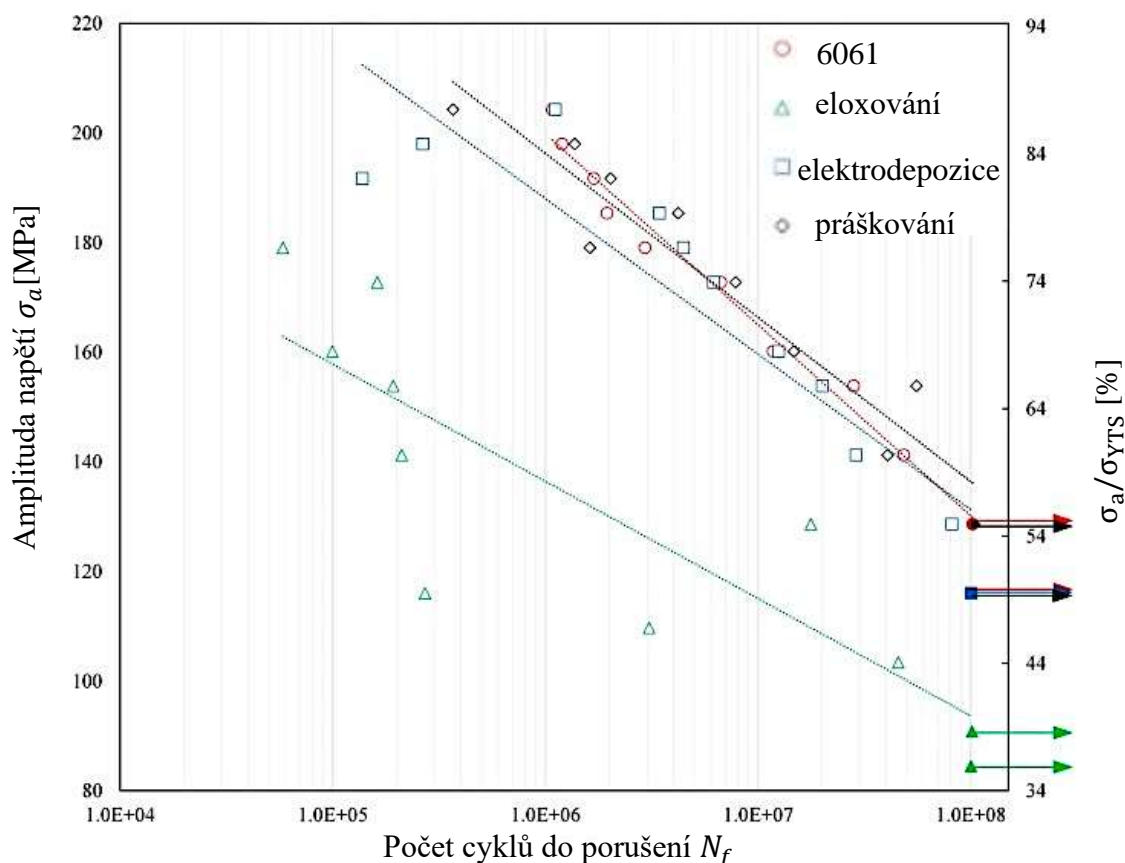
6.4 udává přehled zvýšení meze kluzu a meze pevnosti u jednotlivých povrchových úprav v porovnání s leštěným povrchem slitiny 6061.

Tabulka 6.4: Porovnání navýšení charakteristik

Metoda	Změna meze kluzu [MPa]	Změna meze kluzu [%]	Změna meze pevnosti [MPa]	Změna meze pevnosti [%]
eloxace	42	14,5	40	12,7
elektrodepozice	31	10,7	30	9,5
práškování	16	5,5	7	2,2

Metoda práškování navyšuje mez kluzu i mez pevnosti ze všech metod nejmíň, kdežto eloxace nejmíň. Tuto skutečnost lze vidět i na deformačních křivkách. Všechny deformační křivky potažených vzorků vykazují vyšší hodnoty tahového napětí než leštěný povrch slitiny 6061.

Graf zobrazen na obrázku 6.5, převzatý ze zdroje [55], zobrazuje S-N křivky pro jednotlivé povrchové úpravy slitiny 6061.



Obrázek 6.5: S-N křivky jednotlivých povrchových úprav

Z grafické závislosti plyne, že eloxovaný povrch snižuje únavovou životnost zkoumané slitiny. Odolnost hliníkové slitiny 6061 s leštěným povrchem vůči únavovému porušení je zaznamenán na 55 % YTS, což odpovídá 129 MPa. Zatímco eloxovaný povrch slitiny vykazuje odolnost při 39 % YTS, což odpovídá 91 MPa. Je to méně o 38 MPa, což je pokles přibližně o 29,5 %.

Vzorek potažený povlakem elektrolyticky zachovává únavovou životnost slitiny 6061. Vzhledem k tomu, že proces elektrodepozice se skládá i z eloxovaného povrchu, který

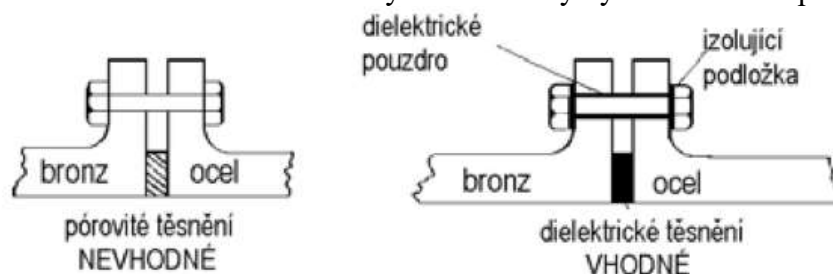
únavovou pevnost snižuje, je nutné se zabývat tím, jak eloxovaný povrch ovlivní celkové vlastnosti povlakovaného povrchu. Lze vidět, že limit odolnosti vůči únavovému porušení je zvýšen z hodnoty 39 % YTS (91 MPa) na hodnotu 50 % YTS (116 MPa). Jedná se o nárůst o přibližně 22 % (11 % YTS) vůči eloxovanému povrchu. Hodnota 50 % YTS se blíží k výchozí hodnotě slitiny 6061, z toho vyplývá, že povrch upraven tímto procesem snižuje únavovou životnost slitiny o 10 %. Jedná se o značné přiblížení k výchozí hodnotě slitiny 6061 v porovnání jen s leštěným povrchem.

Povrch slitiny potažen práškovaným povrchem vykazuje hodnotu únavové pevnosti blízké slitině 6061, takže únavovou životnost prakticky nezměnil.

Tvrzení Večeřy [52], že anodizace zhoršuje únavové vlastnosti materiálu, hodnotím na základě provedené studie Witthayaem [55] a grafických závislostí jako pravdivé.

6.4 Konstrukční řešení materiálu

Významným aspektem, jak zabraňovat korozi je taky konstrukční řešení a výběr vhodných materiálů. Právě tyto dva vstupy jsou důležité k tomu, aby nedocházelo k zrychlování korozního procesu, vytváření galvanického článku, nevhodnou kombinací materiálů, tvarem nebo nevhodnou konstrukcí. Konstrukčním řešením se zabývá zdroj [23]. Při volbě materiálu se musí dbát nejen na jejich elektrodové potenciály, ale i na schopnost pasivovat v daném korozním prostředí. Všechny obrázky týkající se konstrukčního řešení v podkapitole 6.4, byly převzaty ze zdroje [23] a zobrazují porovnání vhodného a nevhodného konstrukčního řešení nebo volby materiálu. Obrázek 6.6 zobrazuje pórovité těsnění (vpravo) a dielektrické těsnění (vlevo). Obrázek se sice zaměřuje na těsnění, ale značný problém zde může taky představovat izolační podložka, pokud je vyrobena z nízko korozně odolného materiálu. Vhodným řešením by bylo umístit zde podložku plastovou.



Obrázek 6.6: Konstrukční řešení těsnění

Tabulka 6.2 podrobně zobrazuje vhodné kombinace spojení plechu (velkého dílu) a šroubu (malého dílu), tak aby bylo, co v největší možné míře zabráněno vzniku korozních článků. Data tabulky byly převzaty ze zdroje [17].

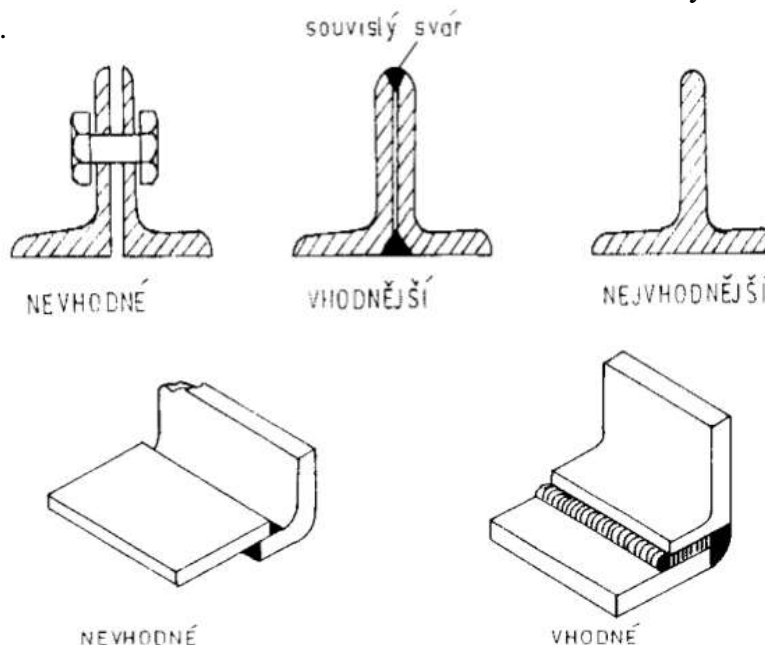
Tabulka 6.2: Vhodné kombinace spojovacích materiálů

Velký díl	Vhodná kombinace	Malý díl
uhlíková ocel, litina	ano	uhlíková ocel, nerez, zinek, pozinkovaná ocel
	ne	hliník, měď
zinek, pozinkovaná ocel	ano	zinek, nerez
	ne	uhlíková ocel, hliník, měď

hliník	ano	hliník, nerez
	ne	uhlíková ocel, zinek, pozinkovaná ocel, měď
měď	ano	měď, nerez
	ne	hliník, zinek, uhlíková ocel
nerez	ano	nerez
	ne	měď, uhlíková ocel, zinek, pozinkovaná ocel, hliník

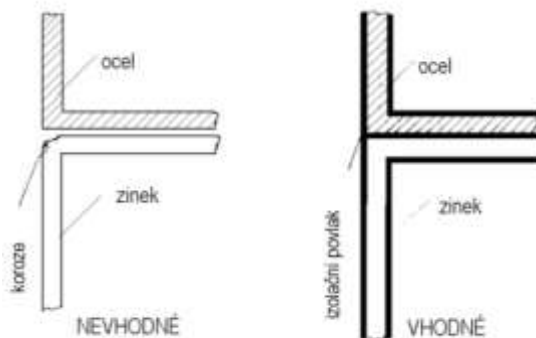
Banis [5] dává do souvislosti grafitové vlákna, které se používají na vyztužení některých plastových struktur a jejich vhodnou kombinaci se spojovacími materiály. Vlákna jsou dobré elektrické vodiče a vytvářejí velký galvanický potenciál s hliníkovými slitinami. Jedinou možnou ochranou proti korozi je zabránit hliníkovým slitinám a vláknům kontaktu s vlhkostí a utěsnění.

U spojů jak už to šroubových, svarových, nýtových nebo lepených, taky vzniká nebezpečí tvorby korozních článků a jejich podnět na vznik koroze. Obrázek 6.7 zobrazuje spojení dvou materiálů za pomoci šroubu a svaru. Čím menší štěrbina se mezi dvěma materiály nachází, tím je riziko vzniku koroze nižší.



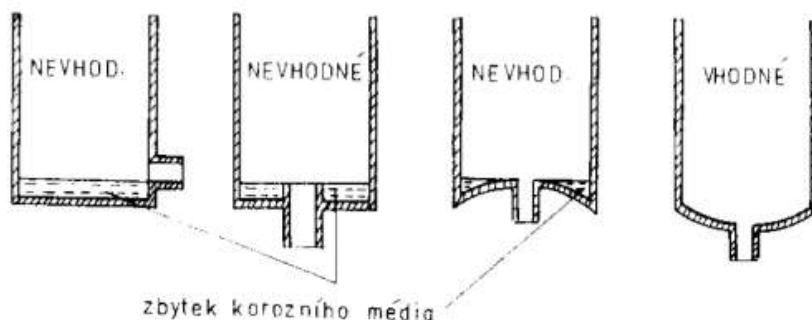
Obrázek 6.7: Konstrukční řešení svarových spojů

Obrázek 6.8 zobrazuje spojení ocelové a zinkové součásti a zavádí do praxe použití izolačního povlaku, který zabraňuje vzniku koroze.



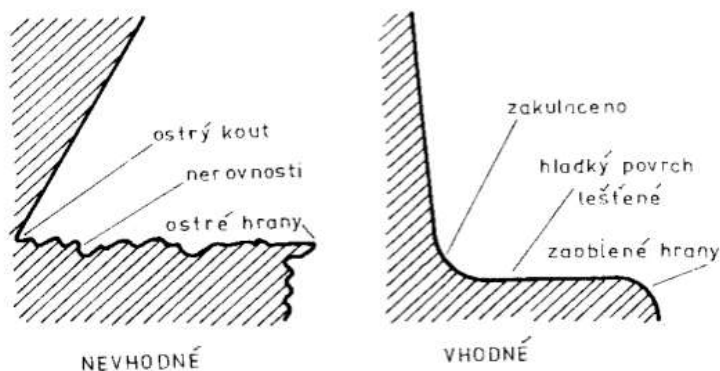
Obrázek 6.8: Použití izolační vrstvy

Příklad konstrukčního řešení součásti je zobrazeno na obrázku 6.9. Nevhodná konstrukce tvaru má za následek zachytávání zbytkového korozního média, které představuje riziko vzniku koroze.



Obrázek 6.9: Zobrazení vhodné konstrukce dané součásti

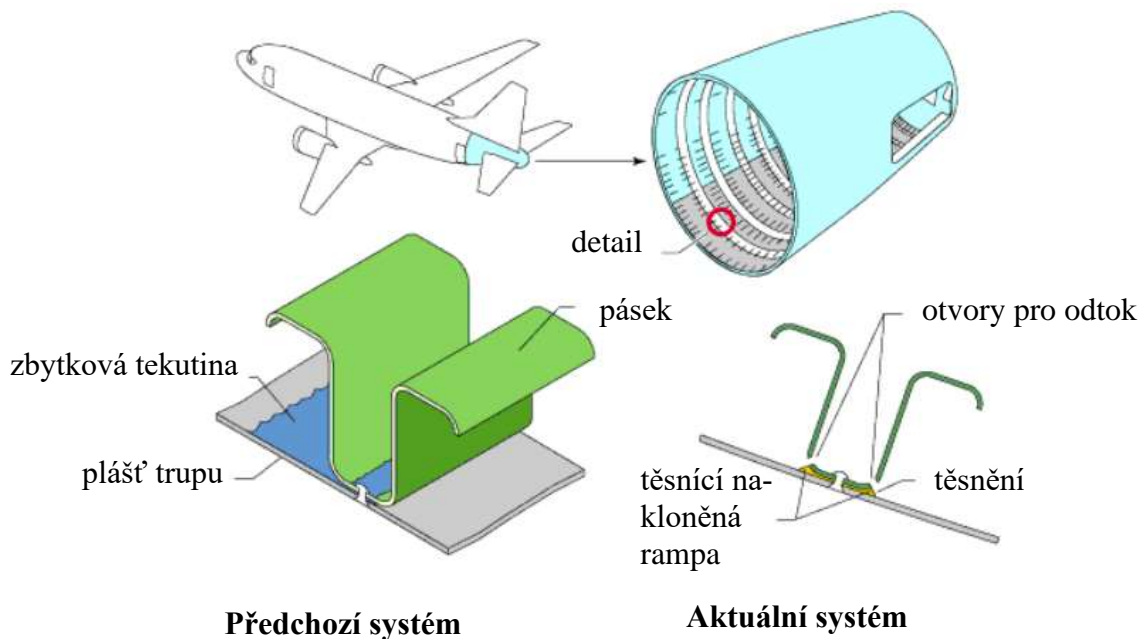
Obrázek 6.10 zobrazuje porovnání geometrie povrchu. Ostré hrany a nerovnosti na povrchu mohou být významným iniciátorem koroze. Proto je vhodnější využití zaoblených hran a vyleštění povrchu (vyšší jakost povrchu).



Obrázek 6.10: Porovnání geometrie povrchu

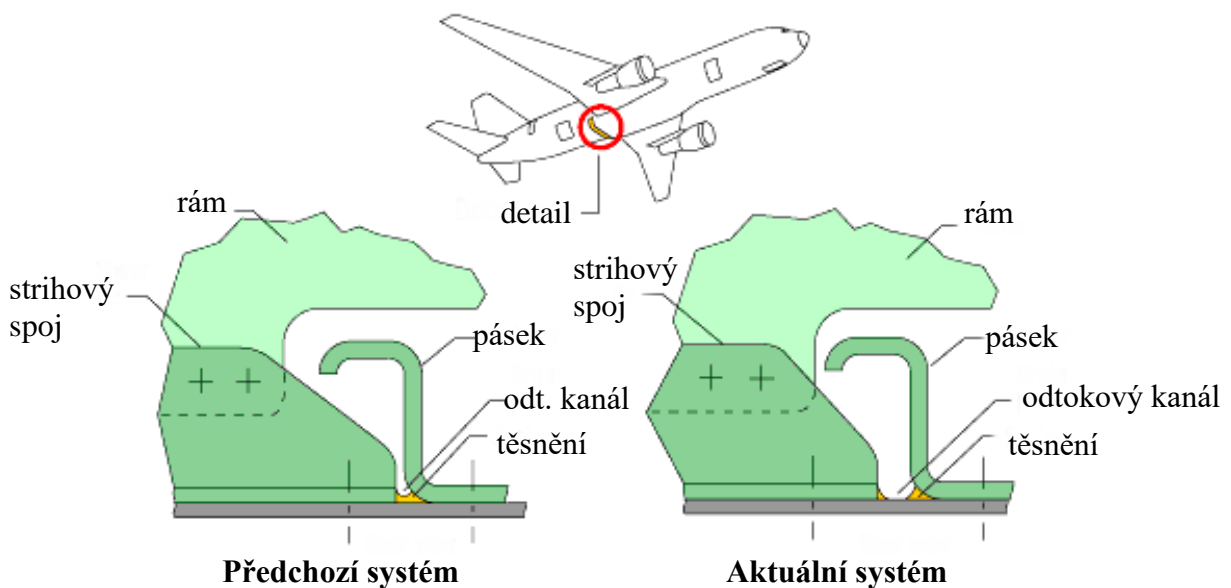
Drenáž

Účinnou ochranou proti korozi je drenáž celé konstrukce, kterou se zabývá Banis [5]. Drenáž zabraňuje zachytávání tekutiny v malých otvorech a štěrbinách. Banis [5] uvádí typický příklad, kterým je spodní část trupu letadla, která je odvodňována systémem odtokových otvorů. Obrázek 6.11, převzatý ze zdroje [5], porovnává předchozí a současný systém provedení drenáže s detailním zobrazením na zadní části trupu letadla. Odvodnění v aktuálním systému je provedeno prostřednictvím otvorů o malých průměrech a pomocí nakloněné těsnící rampy, která nesmí blokovat odtok vody.



Obrázek 6.11: Provedení drenáže v zadní části trupu letadla

Obrázek 6.12, převzatý ze zdroje [5], porovnává předchozí a současný systém provedení drenáže s detailním zobrazením v místě přichycení rámu k trupu letadla. Drenáž v aktuálně používaném systému zabezpečuje lepší odtok tekutiny z postiženého místa z důvodu větší plochy pro odtok.



Obrázek 6.12: Provedení drenáže v místě spoje rámu a trupu

6.5 Čistění a údržba

Všechny povrchové úpravy a konstrukční řešení leteckých součástí mají svůj specifický vliv na zabránění vzniku korozi. Ale riziko vzniku koroze je zde neustále přítomné. Aby se minimalizovala pravděpodobnost výskytu koroze, je extrémně důležité na letounech provádět kontrolu, pravidelnou údržbu a udržovat je v čistotě. Je jasné, že prevence koroze je finančně výhodnější než náklady spojené s jejím odstraňováním. Nejdůležitějším faktorem na zabránění korozi v letadle (interiéry i exteriéry) je udržovat letadlo na suchých místech bez vlhkosti. Možnostmi zabránění průchodu vlhkosti do letadla se zabývá zdroj [3]. Pro zabránění průniku vlhkosti do letadla, jsou letadla téměř ve všech případech, pokud se nenacházejí v provozním stavu, umístěné v hangárech. V hangárech se taky používají kryty na motory, okna a kabinu, aby byli částí, kde by vlhkost mohla potenciálně vniknout do letadla, utěsněné [3]. Mytí letadla a důkladné opláchnutí odstraní soli a jiné korozivní látky. Zvýšit pozornost by se měla právě v oblastech jako jsou chladicí otvory, podvozek, nýty a jiní spoje, kde se shromažďují nečistoty. Je velmi důležité, aby čisticí prostředky, používané na údržbu, neměli nepříznivý vliv na čisté části. Na čistění v letadlech se využívají zejména rozpouštědla, emulzní prostředky mýdla a syntetické detergenty. [11]

Exteriér letadla se obvykle myje v stínu, aby čisticí prostředky nevytvářeli šmouhy. Části, které potřebují neustálou čisticí péči jsou zejména okna, podvozky, části, kde se zachytávají výfukové plyny a olejové skvrny, křídla apod. Před samotným čistěním se musí na všechny otvory, do kterých může vniknout voda, umístit kryty. Lehkou povrchovou korozi lze odstranit pomocí kefy, ale nesmí se používat tvrdé kefy (ničí nátěr), zejména na oblasti letadla s radarem a oblasti natřené nátěrem [11]. Olejové a výfukové skvrny by se měli nejdříve odstranit rozpouštědlem. Takto vyčištěné povrchy se musí opláchnout vodou, aby se zamezilo vysychání povrchu. Usazeniny písku a prachu se nejlépe očistí jemnou, vlhkou utěrkou. Na plasty by se za žádných okolností neměl používat benzín a aceton, protože plasty by změkli a mohli popraskat.

Udržování čistoty interiéru je taky velmi důležitým krokem v prevenci proti korozi. Jedná se zde zejména o části jako jsou sedadla, okna, dveře, plastové části, přístrojové desky, štíty proti oslnění, elektrické kabely a přístroje na řízení letu. Nejdůležitější je odstranit všechny kovové částice, které by se mohli dostat na těžko dostupná místa a způsobit zde po určitém čase fatální následky. Na odstranění kovových a prachových částic je možno využít vysávač nebo jemné utěrky. Na pokrývky hlavy, koberce a tkaniny mohou být použité alkalické čisticí prostředky a desinfekční prostředky.

Frekvence čistění závisí od prostředí, ve kterém letadlo plní svou funkci. Ku příkladu zdroj [12] uvádí, že letadla námořnictví se čistí každý 30 dnů. Výjimku tvoří letadla, nacházející se na lodích, které se musí čistit každý 7 dnů. Pokud se nacházejí na souši, každých 14 dnů. Při letě pod 3000 stop (914,4 metrů) nad slanou vodou se musí čistit každý den. V provozu v blízkosti mořské atmosféry nestačí na čistění jen oplachování vodou, protože voda odstraňuje jen lehce rozpustné látky. Je za potřeby použít speciální čisticí prostředky. [12]

Obrázek 6.13, převzatý ze zdroje [49], zobrazuje pracovníků letecké údržby při procesu čistění vrtulníku, resp. oblasti podvozku, pomocí systému TAWS (Total Aircraft Washing). Systém pracuje při teplotě 60 °C a je založen na umývání a přeplachování za přítomnosti vysokotlakové pěny.



Obrázek 6.13: Čistění pomocí systému TAWS

Jako příklad inhibitorů koroze uvádím emulzi ACF-50, která je navržena tak, aby pronikla korozními usazeninami do korozního článku, uvolnila vlhkost a nečistoty a zabránila korozi. Proniká přes nýty, přeplátované spoje a praskliny a často se používá jako preventivní ochrana při každé údržbě, tam, kde je riziko vzniku koroze velice pravděpodobné. Druhým produktem je Boeshield T-9, vyrobený z 13 rozpouštědel a olejů. Dokáže rozpustit menší ložisko koroze a vytáhnout vlhkost. [11] Pokud jsou znaky koroze znatelné a riskantní a nejdou odstranit dostupnými prostředky, jediným řešením je výměna celého komponentu.

I když je eloxace nejběžnějším typem korozní ochrany leteckých konstrukcí zejména v důsledku vysoké ochrany proti korozi, vysoké tvrdosti vytvořené ochranné vrstvy a estetického vzhledu, je nutné jednotlivé letecké součásti a konstrukce ochraňovat různými typy eloxace. To se provádí za účelem nejoptimálnější ochrany proti korozi. Například součásti, které jsou vystaveny vysokým teplotám, agresivním prostředím a vysokému namáhání, by podle mého názoru měly být opatřeny tvrdší ochrannou vrstvou. Jedná se zejména o podvozky, podvozkové šachty a motory. Velkým problémem u podvozkových šachet mohou být agresivní látky, které se při uzavření šachet odpařují přímo na součásti podvozku nebo na ně kapou. Taky výfuková část leteckých motorů, která je vystavena spalinám a chemickým nečistotám z paliva, potřebuje důkladnější ochrannou vrstvu. Na tyto součásti letadla je nejvhodnější metoda eloxování v prostředí kyseliny chromové anebo tvrdá eloxace. Na křídla a trup letadla je možné využít metodu eloxace v prostředí kyseliny sírové. Stejně pravidlo platí i u vrtulníků. Motor, rotor a rotorové listy by měly být opatřeny tvrdší ochrannou vrstvou

V současné době se zvyšují nároky nejen na bezpečnost letu ale i na životní prostředí. Proto předpokládám, že eloxace v prostředí kyseliny vinné bude mít rozsáhlejší použití, protože nároky na ochranu životního prostředí se neustále zvyšují. Dalším důležitým aspektem předcházení korozi je pravidelné čištění, údržba a generální opravy. Čištění a údržba letounů mohou výrazně prodloužit životnost jak jednotlivých leteckých součástí, tak i celého letounu. Skloubení všech výše zmíněných procesů ochrany by poskytovalo téměř dokonalou ochranu dané letecké součásti před korozi.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo popsat principy vzniku korozních procesů, jejich výskyt na leteckých konstrukcích, definovat možná nebezpečí plynoucí z jejich výskytu, rozebrat vlivy prostředí, která působí agresivně na letecké materiály a rozebrat možnosti ochrany proti korozi.

V bakalářské práci byla provedena podrobná analýza jednotlivých korozních procesů. Následně byla koroze rozdělena do několik skupin. Z každé skupiny byla provedena rešerše těchto napadení. V bakalářské práci jsem se pak zaměřil na konkrétní materiály používané na leteckých konstrukcích. Ke každému materiálu bylo přiřazeno korozní napadení z rešeršní části práce, kterým je nejčastěji napadán. Zároveň u každého materiálu byly uvedeny příklady použití na letecké konstrukci. Aby bylo zřejmé, na jakých částech letecké konstrukce se tyto materiály nacházejí, uvedl jsem stručný popis letecké konstrukce na úplném začátku mé práce.

Na letecké konstrukci se vyskytují místa, které jsou na korozi náchylnější více než jiná místa. Jedná se zejména o trup, podvozky, motory, křídla a spojovací součásti. Tyto místa jsem se rozhodl zobrazit na fotografických snímkách pořízených v státním podniku LOM Praha a v leteckém muzeu v Kunovicích. Snímky dokazují, že právě výše uvedená místa jsou opravdu náchylná na korozi. Koroze na konkrétních místech může způsobovat vážné nebezpečí, které byly definovány pro každé místo jednotlivě. Snímky potvrzují i informace uváděné v bakalářské práci, a to, že nejpoužívanějším materiálem na leteckých konstrukcích je hliník a jeho slitiny (zejména 2024, 2014, 6061, 7075 apod.).

V práci bylo zjištěno, že prostředí, ve kterém se letecké konstrukce nacházejí, má velký podíl na vzniku a rozvoji koroze. Právě vlhkost, přítomnost mořského prostředí, nečistoty na dráze, střídání nízkých a vysokých teplot, prostředí obsahující chloridy a nebezpečné kyseliny, mohou výrazně ovlivnit vznik a rozvoj koroze. Ve většině případů dojde k urychlení rozvoje koroze. Proto je vhodná volba materiálu odolného proti korozi primárním faktorem při návrhu letounů. K vyvíjení a zkoumání korozních vlastností materiálů mohou do velké míry dopomoci korozní zkoušky v klimatických komorách, které dokážou nahradit agresivní prostředí a zkoumat v něm chování materiálů.

Hlavním a nejdůležitějším cílem bakalářské práce bylo definovat a popsat možnosti ochrany proti korozi. Bylo zjištěno, že nejpoužívanější metodou na ochranu proti korozi je anodizace a různé druhy povrchových úprav. Zkoumáním bylo zjištěno, že povrchové ochranné vrstvy (konkrétně anodizace, elektrodepozice a práškování) zvyšují mez kluzu. Ku příkladu anodizace zhoršuje únavový život součásti až o 29,5 %. Jako další postup bych navrhol zkoumat chování jednotlivých povrchových úprav v některém z agresivních prostředí, jako například zvýšená vlhkost, prostředí s NaCl nebo alkalické roztoky, kyseliny. Z mého pohledu jednou z nejdostupnějších a nejefektivnějších metod ochrany proti korozi je pravidelné čištění, údržba letadel a neodkladná oprava a odstranění korozních nálezů.

Jakékoliv použití materiálu je dáno především jeho primárně užitnými vlastnostmi, kterými jsou především mechanické vlastnosti (pevnost, pružnost apod.), často elektrické a tepelné vlastnosti, vzhled povrchu a nejčastěji jejich kombinace. Koroze vede ke snížení primárních užitných vlastností materiálu, tj. snížení statické pevnosti, zhoršení přestupu tepla, estetických vlastností, až po úplnou ztrátu funkce součásti. Koroze dramaticky snižuje statickou pevnost materiálu a často vede k únavě materiálu. Výsledky nebezpečí plynoucí z koroze na napadených místech interpretují mechanické vlastnosti materiálu popsané výše.

Riziko vzniku koroze je velmi důležité brát v úvahu už při návrhu, samotné výrobě a stavbě letounu. Vhodné konstrukční řešení leteckých konstrukcí spolu s vhodnými protikorozními ochrannami uvedenými výše, dokážou výrazně eliminovat vznik a rozvoj koroze. Vzhledem k tomu, že důsledkem koroze je jak snížení statické pevnosti materiálu a riziko vzniku trhlin, tak i vysoké náklady spojené s odstraňováním, popřípadě nutnou výměnou napadnuté části, je eliminace koroze už při návrhu vhodným vstupním médiem. Toto médium může pomoci předcházení nebezpečných a nechtěných situací.

S ohledem na zadání bakalářské práce lze prohlásit, že všechny cíle byly úspěšně splněny.

Použité informační zdroje

1. A Complete Guide to the Types of Corrosion in Aircraft. In: *Maaero.com* [online]. West Fargo, 28.10.2021 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.maaero.com/guide-to-the-types-of-corrosion-in-aircraft/>
2. ABBOT, Richard. *Analysis and Design of Composite and Metallic Flight Vehicle Structures* [online]. George Town, 2019 [cit. 2023-05-19]. ISBN 978-1-5272-3825-1. Dostupné z: <https://www.abbottaerospace.com/downloads/analysis-and-design/>
3. AOPA PILOT. *Airframe and Powerplant, Corrosion Control*. [online], USA, 1997. Dostupné z: [https://www.aopa.org/news-and-media/allnews/1997/november/pilot/airframe-and-powerplant-\(9\)](https://www.aopa.org/news-and-media/allnews/1997/november/pilot/airframe-and-powerplant-(9)).
4. *Atmosférická koroze. Korozní agresivita atmosféry* [online]. Brno: ÚMVI [cit. 2023-02-15]. Výuková prezentace k předmětu WKO Koroze a protikorozi ochrana. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/koroze_a_protikorozi_ochrana/prednasky/05_Atmosfericka_koroze_Korozni_agresivita_atmosfer.pdf
5. BANIS, David, J. Arthur MARCEAU a Michael MOHAGHEGH. Design for corrosion control. *Aero magazine* [online]. Seattle, © 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_07/corrosn.html#methods
6. BAŘTIPÁN, Luboš. *Koroze a ochrana proti korozi* [online]. [cit. 2023-03-14]. Výuková prezentace. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2894028/>
7. BENCKO, Vladimír. Účinky ultrafialového záření. In: *Wikiskripta.eu* [online]. Praha: 2002. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Účinky_ultrafialového_záření%C3%AD
8. BENEŠ, Libor. *Slitiny horčíku* [online]. Praha: ČVUT. [cit. 2023-03-26]. Výuková prezentace. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/Slitiny_Mg.pdf
9. BEŇO, Luděk. *Letadla 2, přepracované vydání*. Praha: Česká technika, 2022. ISBN 978-80-01-06959-2.
10. BERKA, Pavel. Anodická oxidace. In: *Alunet.cz* [online]. Pardubice, © 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/anodicka-oxidace>
11. CAP1570. *Corrosion and Inspection of General Aviation Aircraft*. [online], Published by the Civil Aviation Authority, UK, 2017. Dostupné z: https://publiscapps.caa.co.uk/docs/33/CAP1570_Corrosion.pdf.

12. *Cleaning and corrosion control: volume II aircraft* [online]. Citace technického manuálu: Naval air systém command, 1.3. 2005 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://iwrc.uni.edu/sites/default/files/Cleaning_Corrosion_Control_vII_Aircraft.pdf
13. *Creep* [online]. Brno: ÚMVI. [cit. 2023-02-15]. Výuková prezentace k předmětu 6MS Mezní stavy materiálů. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/mezni_stavy_kombinovane_studium/prednasky/07_MS6K.ppt
14. DZIUBINSKI, Mieczyslaw a Anna DZIUBINSKA. The forming og magnesium alloy forgings for aircraft and automotive applications. *Advances in Science and Technology Research Journal* [online]. Lublin, 2016. [cit. 2023-02-02]. ISSN 2299-8624. Dostupné z: <https://doi.org/10.12913/22998624/64003>
15. EVANS, Julien. *Jak létají dopravní letadla*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-3933-5.
16. Galvanická koroze kovů II. – zvolte správnou kombinaci materiálů. In: *Kutil.cz* [online]. 29.01.2020 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://www.kutil.cz/dilna/galvanicka-koroze-kovu-ii-zvolte-spravnou-kombinaci-materialu/>
17. HOGEWONING, Albert. Galvanic corrosion in bolted Aluminium joints. In: *Highrise.nl* [online]. Rusthofflaan, © 2023 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://highrise.nl/galvanic-corrosion-in-bolted-aluminium-joints/>
18. IRVING, Michael. Aluminum oxide coatings move like liquids to combat corrosion. In: *Newatlas.com* [online]. New Atlas: New Technology & Science News, © 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://newatlas.com/aluminum-oxide-self-healing-coating/54118/>
19. JEŘÁBEK, Ivan. *Základy letadlové techniky* [online]. Praha: FS ČVUT [cit. 2023-02-14]. Výuková prezentace. Dostupné z: http://webdav.agents.fel.cvut.cz/data/teaching/bep/BEP2_2014.pdf
20. JÖNSSON, Martin. *Atmospheric Corrosion of Magnesium alloys* [online]. Stockholm, 2007 [cit. 2023-03-14]. Disertační práce. Kungliga Tekniska Högskolan. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/277874356_The_Atmospheric_Corrosion_of_Magnesium_Alloys_Influence_of_Microstructure_and_Environments
21. KLINE, Mikaley. Corrosion shop gives aircraft new 'shades'. In: *Acc.af.mil* [online]. 21.9. 2015 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.acc.af.mil/News/Features/Display/Article/661933/corrosion-shop-gives-aircraft-new-shades/>
22. *Koroze a protikorozi ochrana kovů* [online]. Brno: ÚMVI [cit. 2023-02-15]. Výuková prezentace pro předmět WKO Koroze a protikorozi ochrana. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/koroze_a_protikorozi_ochrana/prednasky/02_Koroze_kovu.pdf

23. *Korozní charakteristika vybraných kovů a slitin* [online]. Brno: ÚMVI [cit. 2023-03-14]. Výuková prezentace pro předmět WKO Koroze a protikorozi ochrana. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/koroze_a_protikorozi_ochrana/prednasky/09_Korozni_odolnost_materialu_konstrukcni_usporadani.pdf
24. KUSMIČ, David. *Koroze materiálu ukládání vojenské techniky*. Brno: Univerzita obrany. Výuková prezentace.
25. MACHEK, Václav. Přehlížené aspekty koroze. In: *Engineering.sk* [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/8490-prehlizene-aspekty-koroze>
26. MAREDDY, Anji Reddy. *Erosion* [online]. 2017. [cit. 2023-01-05]. ISBN 978-0-12-811139-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-06055-5>
27. *Nickel and nickel alloys* [online]. Brno: Bibus Metals. [cit. 2023-05-25]. Katalog. Dostupné z: <https://prokcssmedia.blob.core.windows.net/sys-master-images/hc2/hb2/8820186284062/Katalog%20nikové%20slitiny%202013.pdf>
28. Nickel-Based Alloys in the Aerospace Industry. In: *Jamesduva.com* [online]. Branchburg: James Duva, © 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://jamesduva.com/nickel-based-alloys-in-the-aerospace-industry/>
29. NOVÁK, Pavel: *Koroze kovů* [online]. Praha: VŠCHT [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kovů.pdf>
30. PEREIRA, M. C., J. W.J. SILVA et al. Morphology Characterization and Kinetics Evaluation of Pitting Corrosion of Commercially Pure Aluminium by Digital Image Analysis. *Materials Sciences and Applications* [online]. 03.05.2012 [cit. 2023-03-14]. ISSN 2153-1188. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2012.35042>
31. PETRÁSEK, Miloslav a Vít KRCHŇAVÝ. *Vliv koroze na provozní efektivnost bojové letecké techniky*. Výzkumná zpráva. Brno: Univerzita obrany, 2005.
32. PETRÁSEK, Miloslav. *Koroze letecké techniky*. Brno: Univerzita obrany. Výuková prezentace.
33. PETRÁSEK, Miloslav. *Korozní vlastnosti hliníku a jeho slitin*. Brno: Univerzita obrany. Výuková prezentace.
34. PETRÁSEK, Miloslav. *Korozní vlastnosti železa a jeho slitin*. Brno: Univerzita obrany. Výuková prezentace.

35. PIROLINI, Alessandro. *Galvanic Corrosion of Steel and Other Metals* [online]. Manchester: AZO Materials, 11.03.2015 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11833>
36. PODRÁBSKÝ, Tomáš, Karel NĚMEC a Martin JULIŠ. *Neželezné kovy a jejich slitiny I* [online]. Brno: ÚMVI. [cit. 2023-03-15]. Výuková prezentace pro předmět 3SV Struktura a vlastnosti materiálu. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/09 - Nezelezne kovy A.pdf
37. PODRÁBSKÝ, Tomáš, Karel NĚMEC a Martin JULIŠ. *Neželezné kovy a jejich slitiny II* [online]. Brno: ÚMVI. [cit. 2023-03-15]. Výuková prezentace pro předmět 3SV Struktura a vlastnosti materiálu. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/10%20-%20Nezelezne%20kovy%20B.pdf
38. Porozumět nařízení REACH. In: *Echa.europa.eu* [online]. Helsinky, © 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://echa.europa.eu/cs/regulations/reach/understanding-reach>
39. POSPÍŠIL, Jakub. *Návrh environmentálních testů pro kovové a kompozitní materiály*. Brno, 2022. Technická zpráva. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Letecký ústav. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Katrňák.
40. KATRŇÁK, Tomáš. *Povrchové úpravy*. Brno: LÚ, FSI VUT v Brně. Výuková prezentace.
41. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
42. REMEŠOVÁ, Michaela: *Anodická oxidace hliníku a jeho slitin* [online]. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce: Ing. Ladislav Čelka, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/27521>
43. ROBERGE, Pierre. *Examples of Aircraft corrosion examples* [online]. © 2023 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://corrosion-doctors.org/Aircraft/Examples.htm#Crevice>
44. RUTTKAYOVÁ, Veronika. *Ochrana hořčkových slitin* [online]. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce: Ing. Martin Zmrzlý, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/31417/final-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
45. Sector of aviation. In: *Naa.edu* [online]. New England, © 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.naa.edu/sectors-of-aviation/>
46. SETIANTO, M H a Akhmad A. KORDA. Characterization of Tartaric-Sulphuric Acid Anodized 2024-T3 Aluminium Alloys with Anodizing Potential Variation [online]. Journal of Physics: Conference Series, 2019 [cit. 2023-01-15]. ISSN 1742-6596. Dostupné z: <https://iop-science.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1204/1/012039/pdf>

47. Slitiny niklu. In: *Neonickel.com* [online]. Blackburn. [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/alloys/slitiny-niklu/>
48. Tartaric Sulphuric Acid Anodising. In: *Poeton.co.uk* [online]. Gloucester: © 2019 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.poeton.co.uk/standard-treatments/tartaric-sulphuric-acid-anodising/>
49. TAWS: Total Aircraft Washing System. In: *Riveeraviation.com* [online]. South haven: Copyright © 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://riveeraviation.com/total-aircraft-washing/>
50. The great maintenance headache corrosion/erosion. In: *Helicoptermaintenancemagazine.com* [online]. 12.01.2012 [cit. 2023-04-11] Dostupné z: <https://helicoptermaintenancemagazine.com/article/great-maintenance-headache-corrosionerosion>
51. Top 10 Benefits of HVOF Coating (over Hard Chrome plating). In: *Bandbprecision.co.uk* [online]. Clayton West, 01.02. 2021 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.bandbprecision.co.uk/top-10-benefits-of-hvof-coating-over-hard-chrome-plating>
52. VEČEŘA, Jiří. *Materiály používané v leteckém průmyslu* [online]. Brno, 2011 [cit. 2023-03-14]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Ing. Simona Pospíšilová, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/4293/final-thesis.pdf?sequence=-1>.
53. VNOUČEK, Milan: *Nikl a jeho slitiny. Titan a jeho slitiny* [online]. Plzeň, 03.01.2020 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/nikl-titan-09_10.pdf
54. Why choosing Inconel 718 for aerospace additive manufacturing. In: *Farinia.com* [online]. Paris, 19.11.2014 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.farinia.com/blog/why-choosing-inconel-718-aerospace-additive-manufacturing>
55. WITTHAYA, Samit a Kittisak CHANYETHUNYAROJ et al. Effect of coatings on the mechanical properties and fatigue life of 6061 aluminium alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals* [online]. 01.06.2021. [cit. 2023-05-14]. ISSN 0975-1645. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02296-5>