

ANALYSIS OF NEW PROGRESSIVE DIAGNOSTIC METHODS IN THE AREA OF AIRCRAFT MAINTENANCE

ANALÝZA NOVÝCH PROGRESÍVNYCH DIAGNOSTICKÝCH METÓD V OBLASTI ÚDRŽBY LETECKEJ DOPRAVY

Matej Supuka

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
matejsupuka22@gmail.com

Michal Hruz

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
michal.hruz@stud.uniza.sk

Abstract

In the area of aircraft maintenance, we commonly meet with the problem of corrosion, detection of which is one of the primary obstacles. Implementation of modern sensing techniques has a potential to bring many benefits. The objective of this work is to analyze technologies, their potential applications, and viability of switching to autonomous detection using computer aided sensing. Primary source of information were research articles from science databases such as ResearchGate and ScienceDirect. Available documents were analyzed and subsequently, useful information was extracted. First part deals with theoretical knowledge about corrosion, based on which potential technologies were chosen. Those were then described, and their viability was analyzed, based on how well they could achieve our goals. Selected technologies have shown potential, however necessary solutions could not be found to enable fully switching to autonomous computer detection. Although data acquired show many potential benefits that could arise from partial implementation of these technologies combined with old fashioned visual inspection.

Keywords

corrosion, detection, analysis, digitalization, sensors, effectiveness, time savings

1. Úvod

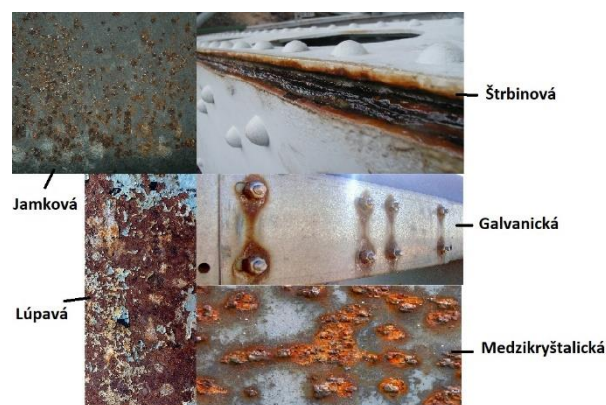
V leteckej doprave je štandard bezpečnosti veľmi vysoký. Avšak udržanie takéhoto štandardu si vyžaduje dôkladnú údržbu jednotlivých lietadiel. Pri tomto procese sa od nepamäti stretávame s koróziou. Korózia sa vyskytuje v mnohých formách, a často aj v ťažko prístupných miestach. Predstavuje serióznu hrozbu pre letuschopnosť lietadla, nakoľko oslabuje integritu kovových komponentov. Práve preto je detekcia korózie prioritou číslo jedna. V súčasnosti sa odborný personál stále primárne spolieha na vizuálnu inšpekciu. Preskúmali sme technológie, ktoré majú potenciál identifikovať prítomnosť korózie, a ideálne aj určiť rozsah a závažnosť poškodenia. Ďalším skúmaným faktorom bolo, do akej miery použitie daných technológií šetrí čas potrebný na kontrolu, ale s dôrazom na to, aby neuprela spoľahlivosť údržby. V neposlednom rade sme prihliadali aj na možnosti integrácie do väčšieho, automatizovaného, a preferabilne počítačom riadeného systému.

2. Prezentácia práce

2.1. Teoretické poznatky

Ako prvé je potrebné oboznámiť sa s teóriou. Poznáme niekoľko základných typov korózie s ktorými sa bežne stretávame.

2.1.1. Typy korózie



Obrázok 11: Typy korózie. Zdroj: Autori.

Jamková korózia naberá formu dierok na povrchu, a vo väčšine prípadov je spôsobená prítomnosťou elektrolytov v priamom kontakte s materiálom.

Štrbinová korózia, ako už napovedá názov sa vyskytuje v medzerách a priehlbínach, kde často stagnuje kondenzát a cirkulácia je limitovaná. Tento typ korózie je veľmi deštruktívny a ťažko detekovateľný.

Galvanická korózia, taktiež nazývaná bimetalická korózia, vzniká pri kontakte dvoch rozdielnych kovov. Jeden zaujme pozíciu katódy a druhý pozíciou anódy. Následne dochádza k odovzdávaniu iónov od anódy ku katóde.

Medzikryštalická korózia sa vyskytuje pozdĺž zrna materiálu pri kolmom pôsobení tlaku na okraj štruktúry. Môže sa vyskytnúť v prípade, ak pevný hliník bol nesprávne tepelne ošetrený.

Lúpavá korózia sa vyskytuje na povrchu materiálu, a je výsledkom oddelenia zŕn vo vrstvách kovových štruktúr. Jej vrstevnatý charakter spôsobuje pomernú ľahkosť jej detekcie.

Skrytá korózia je najťažšie detekovateľná, nakoľko na povrchu nie sú viditeľné žiadne známky degradácie. Príznakom je znížená hrúbka materiálu alebo povrchové deformácie, nakoľko molekulárny objem oxidu hliníka sa líši od čistého hliníka.

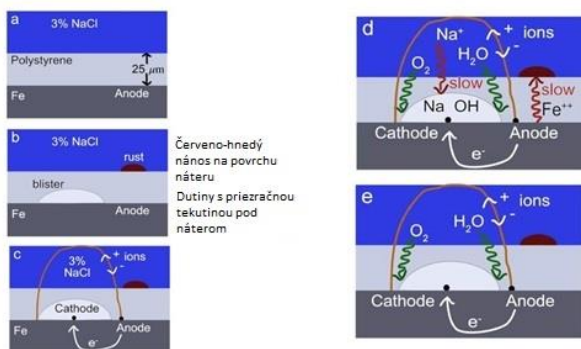
2.1.2 Prostredie

Prostredie v ktorom je lietadlo alokované má tiež citeľný vplyv na rýchlosť vytvorenia korózie. Prítomnosť morskej soli v prímorských oblastiach, alebo chemicky žieravých zlúčenín v priemyselných oblastiach značne urýchľujú narušenie kovových zliatin. Na základe toho rozdeľujeme atmosféru na nasledovné typy: vidiecka, mestská, priemyselná a morská. Vidiecka je z hľadiska korozivity najvhodnejšia pre lietadlá, pretože koncentrácia škodlivých látok je v tomto type atmosféry najnižšia.

2.1.2 Prevencia

Najlepšou formou ochrany pred koróziou je proaktívny prístup. Je potrebná častá kontrola a umývanie lietadla na odstránenie usadených elektrolytov. Najlepšou formou prevencie je však zabránenie kontaktu medzi kovom a elektrolytom. Na to nám slúžia nátery.

Organické nátery sú dobrou voľbou pre civilných prevádzkovateľov nakoľko sú dostupné a neprinášajú zdravotné riziko pre aplikujúce osoby. Pozostávajú z pigmentov rozpustených v polymetrickej fáze známej ako "spojivo". Formujú pigmentovú bariéru ktorá oddeľuje kov od vonkajšieho prostredia a tým zamedzuje kontaktu s elektrolytom. Aj napriek desaťročiam výskumu však dochádza k porušeniu tejto bariéry a vytvoreniu "vankúšikov" oxidu pod náterom. Tento proces stále nie je plne objasnený



Obrázok 2: Tvorba korózie pod náterom. Zdroj: [1].

Chrómové nátery sa často používajú na ochranu vojenských lietadiel a vrtuľníkov. Pozostávajú z anorganického konverzného náteru, epoxidového základného náteru a polyuretánového vrchného náteru. Donedávna sa používali nátery obsahujúce šesťmocný chróm, pretože má výborné vlastnosti pri spomaľovaní odovzdávania iónov medzi anódou a katódou. Tiež má dobré ochranné vlastnosti naprieč širokým rozsahom pH. Bohužiaľ šesťmocný chróm je nebezpečný pre životné prostredie a je známym karcinogénom. Preto vo vyspelých krajinách, ktoré majú prísne štandardy na ochranu životného prostredia, trojmocný chróm sa začína využívať ako vhodná náhrada.

2.1.4 Protikorózne zmesi

Jedná sa o pomerne jednoduchú a efektívnu metódu prevencie. Aplikuje sa chemický postrek látkou, ktorá zamedzuje tvorbe novej korózie, ale tiež je schopná potlačiť koróziu aj tam, kde sa už vytvorila. Používajú sa po ukončení výrobného alebo opravného procesu. Pracujú na základe jedného alebo viacerých z nasledujúcich mechanizmov: 1. Blokovanie sformovania povlaku, 2. Kinetická inhibícia povrchových reakcií, 3. Odpudzovanie vody a 4. Lokálna modifikácia elektrolytu.

Tabuľka 1: Zlúčeniny na prevenciu korózie. Zdroj: [2].

CPC	Špecifikácie	Farba	Popis	Typ povlaku
Amgard	Mil-C-85054	Tmavo modrá / zelená	Univerzáln e použitie	Tvrдый suchý
Dinitrol AV30	-	Svetlo hnedá	Korozívny inhibitor	Voskový
Dinitrol AV8	BMS 3-23	Svetlo hnedá	Korozívny inhibitor	Nelepivý
LPS3	BMS 2-23 BMS 3-29	Tmavo žltá	Mazací povlak	Voskový

2.2. Súčasný stav problematiky

2.2.1. Detekcia

V súčasnosti existujú technologické riešenia, no stretávajú sa s mnohými problémami, preto je stále primárnou metódou detekcie vizuálna inšpekcia. Jedná sa o originálnu nedeštruktívnu metódu. Je všeobecne akceptované, že vizuálna inšpekcia neodhalí pod 10% straty hrúbky materiálu. V spojení s možnosťou dôjdenia k chybe ľudského faktora, vizuálna inšpekcia má nedostatky v oblasti spoľahlivosti.

Ultrazvukové metódy sú rozšírené, a aplikujú sa najčastejšie dvomi spôsobmi: Pulzná echolokácia a riadené vlny. Pulzná echolokácia vie vykonať presné merania hrúbky, no v niekoľkovrstvových štruktúrach je limitovaná len na prvú vrstvu. Takisto je táto metóda veľmi pomalá. Limitácia pri meraní v hlbších vrstvách sa vyskytla aj pri pomerne novej technológii ultrazvuku s riadenými vlnami, ktorá je ale citlivejšia na celistvosť spojitých hmôt.

Metódy vírivého prúdu sú ďalšou nedeštruktívnou alternatívou. Poznáme metódu jednofrekvenčného prúdu, niekoľkofrekvenčného prúdu a pulzovaného vírivého prúdu. Jednofrekvenčný prúd sa stretáva s rovnakými problémami ako ultrazvukové metódy, a to neschopnosť detekcie v hlbších vrstvách materiálu. Multifrekvenčná metóda volí viacero frekvencií na optimalizáciu citlivosti detekcie hrúbky prvej a druhej vrstvy. Je schopná dodať viac informácií, no je ovplyvňovaná rovnakými nežiaducimi faktormi. Najnovším vývojom vírivého prúdu je nahradenie konštantného prúdenia pulzným. Cievka v sonde vyšle pulzované magnetické pole, ktoré prejde cez materiál, a jeho meniace sa vlastnosti vytvárajú vírivé prúdy na povrchu. Vlastnosti týchto prúdov indikujú hrúbku materiálu.

2.2.2. Klasifikácia poškodenia

Tabuľka 2: Klasifikácia podľa USAAF. Zdroj: [3].

Závažnosť	Hrúbka	Odstránenie
Ľahká	Max 0,025mm	Brúsny papier
Mierna	Max 0,25 mm	Pieskovanie
Závažná	Nad 0,25 mm	Výmena dielu

Tabuľka 3: Klasifikácia podľa FAA. Zdroj: [4].

Závažnosť	Popis
Úroveň 1	Lokálna korózia odstrániteľná v rámci výrobných limitov
Úroveň 2	Korózia vyžadujúca opravu a presahuje výrobné limity
Úroveň 3	Korózia vyžadujúca okamžitú výmenu komponentu

2.2.3. Odstraňovanie korózie

Na odstránenie korózie sa môžu použiť chemikálie ako fenoly, krezoly, kyselina fosforečná, kyselina fluorovodíková, kyselina dusičná a trikrezylfosfát, ktoré sú ale veľmi nebezpečné, preto je potrebné zabezpečiť ochranné vybavenie. Pred začatím odstraňovania je potrebné zhodnotiť, či je poškodenie v limitoch. Ak poškodenie 2 a 3 úrovne presahuje výrobcom určené limity, je možné zahájiť výmenu bez akéhokoľvek úsilia na odstránenie korózie. Na zistenie hĺbky poškodenia sa používa hĺbkové meradlo, alebo modelovacie materiály. Odstraňovanie samotnej korózie a farebného poťahu sa vykonáva pomocou brusnej trysky. Tento proces nazývame pieskovanie. Na dokončenie sa používa brusný papier.

2.3. Progresívne metódy

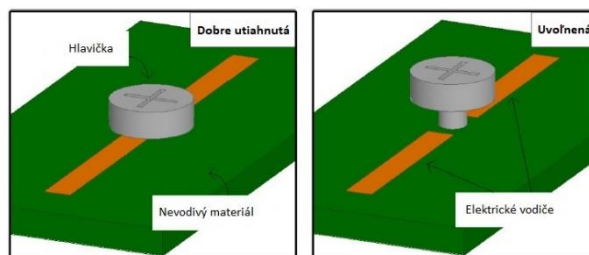
Súčasný stav diagnózy sa spolieha na princíp nájsť a oprav, čo znamená že proces zaberie značné množstvo času, nehovoriac o tom že môže dôjsť ku chybám. V ideálnom prípade by detekcia bola prenechaná na autonómny, počítačom riadený systém, ktorý by vyhodnotil potrebu opravy.

2.3.1. Vysokofrekvenčná identifikácia (RFID)

Skratka RFID znamená Radio Frequency Identification. Princíp pozostáva z komunikácie medzi štítkami s informáciami, čítačkou a počítačom, ktorý vyhodnocuje získané dáta. Štítky môžu byť pasívne aj aktívne, ale pre účely aplikácie na lietadlo sú vhodnejšie pasívne štítky, ktoré sú aktivované čítačkou.

Signál medzi štítkom a čítačkou môže byť čiastočne alebo kompletne prerušený nanosením elektromagnetickej tieniacej vrstvy. V našom prípade je to kompozitný náter o hrúbke niekoľko desiatok mikrometrov. Kompozitný náter by bol zvolený tak, aby korodoval podobným tempom ako materiál na ktorom je aplikovaný. Hrúbka náteru v desiatkach mikrometrov bola zvolená na základe toho, že pri nižších hrúbkach je signál obnovený instantne, a informácia je poskytnutá len o tom, či je poťah narušený alebo nie. Pri zvolení väčšej hrúbky je však možné pozorovať postupné obnovenie signálu, z čoho sa dá odvodiť intenzita poškodenia.

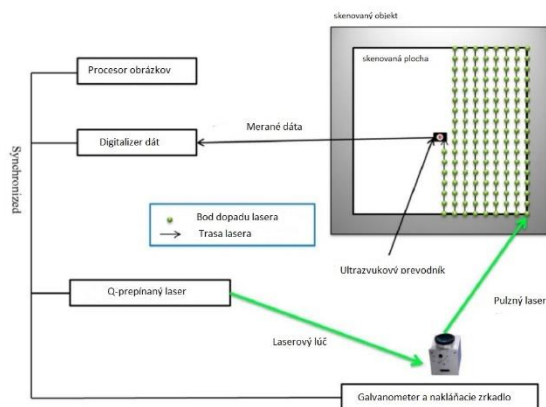
Prítomnosť korózie pod hlavičkou skrutky môže spôsobiť jej uvoľnenie. Toto sa dá pomocou RFID detekovať princípom prepínača v elektrickom obvode. Ten prepína medzi stavom zapnutý a vypnutý. Ideálny prípad je, ak je skrutka pripevnená na elektricky nevodivom materiáli. Dva elektrické vodiče prerušené presne pod hlavičkou skrutky spôsobujú, že skrutka sa stáva súčasťou elektrického obvodu. V prípade jej uvoľnenia sa elektrický obvod preruší, stav spínača sa prepne a RFID štítok vyšle signál čítačke že obvod je prerušený.



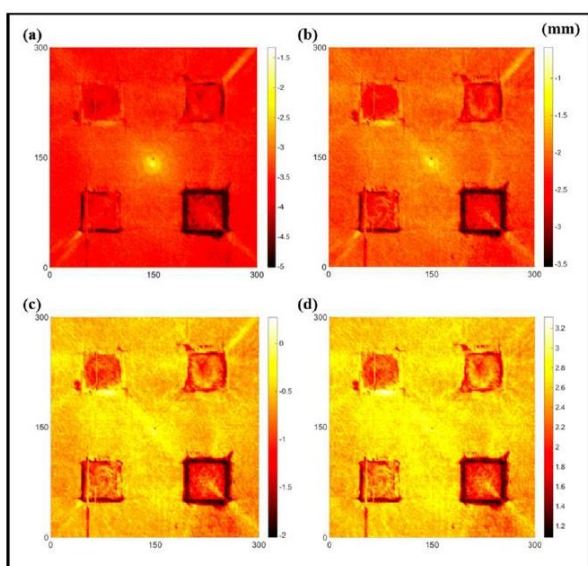
Obrázok 3: Princíp detekcie uvoľnenia skrutky. Zdroj: [4].

2.3.2. Skenovanie pulzným laserom

Skenovanie pulzným laserom využíva neodýmový laser s yttriovo hliníkovým granátom ako fázové médium. Dopad lasera na povrch kovového plátu spôsobuje ultrazvukové vlny ktoré sa šíria materiálom. Toto šírenie ultrazvuku spôsobuje mechanické zaťaženie, výsledkom ktorého je piazoelektrina. PZT (piazoelektrický) senzor zachytí tieto signály a vyhodnotí výsledky. UWPI (Ultrasonic Wave Propagation Imaging) systém pozostáva z nasledovných komponentov: Q-prepínaný laser, zrkadlový systém na základe galvanometra, ultrazvukový senzor, vysokorýchlostný digitalizér a spracovávač obrazu. Laser postupuje po dopredu nastavenej mriežke s rozstupmi 2 mm. Ako prvé sú merané signály vlny odrážanej pozdĺž dráhy lúča a získa sa časový záznam. Dáta pre každý dopadový bod sú naskladané vo vertikálnej štruktúre. Následne sú naskladané sériovo a tabuľka je integrovaná do horizontálnej roviny. Ako posledná je horizontálna rovina transformovaná do 3D obrázku.



Obrázok 4: Vytvorenie skenu. Zdroj: [5].



Obrázok 5: Výsledky skenu. Zdroj: [5].

2.3.3. LiDAR

Light Detection And Ranging je metóda vzdialenej detekcie, ktorá využíva svetlo vo forme laserových pulzov na meranie vzdialenosti. Vygeneruje sa „point cloud“ 3D model, ktorý sa porovnáva s CAD modelom lietadla v databáze. Nevýhodou tohto systému je, že nedetekuje priamo koróziu, ale deformácie. Príčinou deformácii však nemusí byť iba korózia, ale aj kolízia s cudzími objektmi ako sú vtáky.

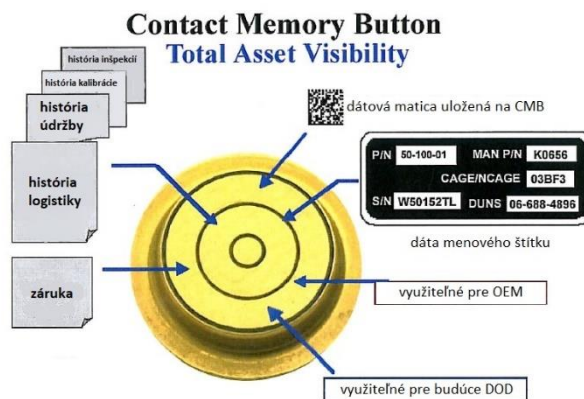
2.3.4. Koncepcia Smart Hangar

Technológia smart hangar je sústava vybavenia hangáru, ktorá má za cieľ urýchlenie, spresnenie a zvýšenie spoľahlivosti údržby lietadla. Snaha je digitalizovať prostredie a využiť robotické a autonómne prostriedky. Stojí na štyroch pilieroch. Digitalizácia prostredia tvorí základ, na ktorom celý systém pracuje. Všetky procedúry je potrebné prekonvertovať do digitálnej formy. Informácie o stave lietadla, informácie senzorov rozmiestnených po hangári, údaje z predchádzajúcich údržieb a informácie doplnené personálom musia byť dostupné a integrované v jednom digitálnom systéme. Analytické nástroje sú tiež nevyhnutnou súčasťou, pretože sú zdrojom dát. Hlavné

výhody digitalizácie sú efektívne spracovanie dát, optimalizácia interných procesov a optimalizácia manažmentu v oblasti plánovania logistiky. Automatizácia a robotizácia prostredia zvyšuje efektívnosť pracovnej sily a rýchlo vykonáva opakujúce sa procedúry, ktoré vykonáva s menšou deviaciou ako ľudský pracovník. Inteligentná produkcia zabezpečuje výrobu súčiastok tesne pred tým, ako sú potrebné na pracovisku. Tým predchádza nedostatkom komponentov, čo spôsobuje zdržanie. Alebo prebytku komponentov, čo spôsobuje nadbytočné náklady.

2.3.5. Evidencia údržby – CMB

Contact Memory Button je čip určený na zapisovanie a čítanie elektronických dát bez pomoci batérie. Funguje v extrémnych prostrediach a je schopný uchovávať až 2 GB dát. Dáta sa získavajú pomocou kontaktnej sondy ButtonLink. Táto technológia eliminuje mnohé časové zlyhania spojené s logistikou, zrýchľuje zápis informácií o komponente a takisto sprístupňuje informácie v rámci niekoľkých sekúnd.



Obrázok 6: Rozloženie čipu CMB. Zdroj: [6].

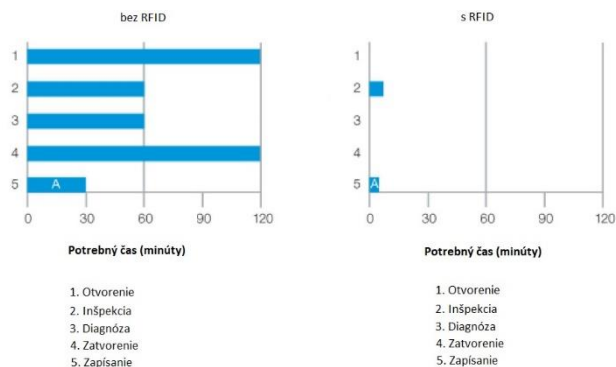
2.4. Výsledky

Tabuľka 4: Aplikovateľnosť technológií na typy korózie. Zdroj: Autori.

	Jamková korózia	Štrbinová korózia	Galvanická korózia	Medzikryštalická korózia	Lúpavá korózia	Skrýta korózia
RFID	✓	x	✓	✓	✓	x
Pulzný laser	✓	x	✓	✓	✓	✓/x
Lidar	✓	✓/x	x	x	✓/x	✓/x
Smart Hangar	x	x	x	x	x	x
CMB	x	x	x	x	x	x

Tabuľka 5: Cena vývoja. Zdroj: Autori.

	Nákup hardware	Implementácia do systému	Vývoj aplikácie pre detekčné zariadenie	Vývoj databázovej štruktúry	Údržba a servis
Cena za položku	50 000 € – 100 000 €	500 000 € – 1 000 000 €	200 000 €	150 000 €	100 000 €



Obrázok 6: Časová úschova RFID. Zdroj: Autori.

Zvolené technológie prejavili potenciál v detekcii s koróziou, avšak kvôli nedostatkom schopnosti odhalenia niektorých typov korózie je prechod na plne autonómnou, inteligentnú detekciu nemožný. Prítomnosť odborného personálu je stále nutná na vykonanie vizuálnej inšpekcie. Čo sa týka časovej úschovy, väčšina metód ju prináša, okrem prípadu pulzného lasera, ktorého aplikácia je veľmi zdĺhavá. Odporúčaná prístup je kombinácia odborného personálu a prostredia vylepšeného o tieto moderné detekčné metódy. Okrem toho, tieto technológie prejavili potenciál aj v iných oblastiach ako je boj s koróziou a majú pred sebou budúcnosť.

Referencie

- [1] LYON S. 2016. Advances in corrosion protection by organic coatings: What we know and what we would like to know. *Researchgate*. DOI 10.1016/j.porgcoat.2016.04.030, s. 1-14, dostupné online: https://www.researchgate.net/publication/302553481_Advances_in_corrosion_protection_by_organic_coatings_What_we_know_and_what_we_would_like_to_know
- [2] GUI F., FURROW K., WILLIAMS J., COOPER K., KELLY R.G. 2005. Laboratory evaluations of corrosion prevention compounds for aircraft. *Researchgate*. s. 1-75, dostupné online: https://www.researchgate.net/publication/242439476_Laboratory_Evaluations_of_Corrosion_Prevention_Compounds_for_Aircraft
- [3] FORSYTH D.S., KOMOROWSKI J.P. 1998. Probability of detection of corrosion in aircraft structures. *Researchgate*. s. 1 – 9, dostupné online: https://www.researchgate.net/publication/44076249_Probability_of_Detection_of_Corrosion_in_Aircraft_Structures
- [4] INSERRA D. 2020. Screw relaxing detection with UHF RFID tag. *IEEE*. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2986891, s. 1-12, Dostupné online: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9063480>
- [5] INBOK L., ZHANG A., CHANGGIL L., PARK S. 2016. A visualisation method od corrosion damage on aluminum plates using an Nd:YAG pulsed laser scanning system. *MDPI*. DOI: 10.3390/s16122150. s. 1 – 18, Dostupné online: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/12/2150>

- [6] MacSema Inc, Buttonmemory Product Catalog. [online] Dostupné online: <http://www.ruggedhardware.de/macsema/catalog.pdf> (citované 10.4.2021)
- [7] Boeing Corporation. [online]. Dostupné online: [boeing.com: https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012_q1/2/](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012_q1/2/) (citované 14.4.2021)
- [8]