

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Teoretické využití technologických nástřiků při generálních opravách podvozků  
B737 ve společnosti CZECH AIRLINES TECHNICS, a.s.

Jakub Hönig

Bakalářská práce

2024

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub Hönig**  
Osobní číslo: **D23304**  
Studijní program: **B0716P040001 Technika, technologie a řízení letecké dopravy**  
Téma práce: **Teoretické využití technologických nástřiků při generálních opravách podvozků B737 ve společnosti CZECH AIRLINES TECHNICS, a.s.**  
Zadávající katedra: **Katedra letecké dopravy**

## Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Popis letadla Boeing 737
3. Současná údržba podvozků v ČSAT
4. Technologie povrchových úprav
5. Teoretické využití alternativních povrchových úprav v rámci ČSAT
6. Zhodnocení a závěr návrhu

Rozsah pracovní zprávy: **minimálně 35 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle pokynů vedoucího práce**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Company, The Boeing. Application and Finishing of Thermal Spray Coating. The Boeing Company, 2017. ECCN 9E991.

Company, The Boeing. Component Maintenance Manual

G.Tauchert, C.Matz. HVOF, Service Experience with 737 NLG Inner Cylinder. Hamburg : Lufthansa Technik, 1999. LHT HAM TQ 23.

Ruml RNDr. Vladimír, CSc – Ing. Miloslav Soukup, CSc. Galvanické pokovování. Praha : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981. L16-B2-IV-31/61 930.

Thomson, Michael. (1996). Zinc alloys – the Boeing alternative to cadmium. 74. 3-5.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Hůlek, Ph.D.**  
Katedra letecké dopravy

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Martin Vábr, MBA**  
Czech Airlines Technics, a.s. – údržbová organizace

Datum zadání bakalářské práce: **13. října 2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2024**

L.S.

---

**doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Petr Mrázek, Ph.D.**  
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Práci s názvem Teoretické využití technologických nástřiků při generálních opravách podvozků B737 ve společnosti CZECH AIRLINES TECHNICS, a.s. jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 20.6.2024

Jakub Hömig v.r.

Rád bych poděkoval za vstřícný přístup a cenné rady při zpracovávání bakalářské práce mému externímu konzultantovi Ing. Martinu Vábřovi, MBA, dále pak mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Hůlkovi, Ph.D. za jeho trpělivost a odbornou pomoc při zpracování této bakalářské práce a na závěr pak mé rodině a přátelům za jejich podporu a pochopení během mého studia.

## **ANOTACE**

Tato bakalářská práce se zaměřuje na technologické nástřiky v leteckém průmyslu, konkrétně na jejich využití při generálních opravách podvozků letounů typu Boeing 737. Práce se zabývá konstrukcí podvozků, druhy materiálů použitými v jejich konstrukci, povrchovými úpravami a speciálními technologiemi, jako jsou HVOF, pokovení zinkem/niklem, metoda Cold Spray a plazmové pokovování. Dále se věnuje environmentálním aspektům a změnám v průmyslu s ohledem na ochranu životního prostředí. Cílem práce je poskytnout ucelený přehled o této problematice a zhodnotit využití technologických nástřiků v údržbě letadlových podvozků.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

letectví, povrchové úpravy, technologie, materiály, letadlový podvozek

## **TITLE**

Theoretical Application of Spraying Technologies in Landing Gear Overhauls at CZECH AIRLINES TECHNICS, a.s.

## **ANNOTATION**

This bachelor's thesis focuses on spray technology in the aerospace industry, specifically its use in the overhaul of Boeing 737 aircraft landing gear. The thesis looks at the design of landing gear, the types of materials used in its construction, surface treatments and special technologies such as HVOF, zinc/nickel plating, cold spray and plasma plating. It also focuses on environmental aspects and changes in the industry with regard to environmental protection. The aim of this thesis is to provide a comprehensive overview of these issues and to evaluate the use of spray technology in the maintenance of aircraft landing gear.

## **KEYWORDS**

aviation, surface treatment, technology, materials, aircraft landing gear

# OBSAH

ÚVOD .....	12
1. PŘEDSTAVENÍ LETOUNU TYPU BOEING 737 .....	14
1.1 Konstrukce a využití letounu Boeing 737 .....	14
1.2 Přistávací zařízení – podvozek .....	15
1.3 Členění dle ATA 100 .....	17
2 CZECH AIRLINES TECHNICS, MRO .....	20
2.1 Současný průběh generálních oprav letadlových podvozků .....	21
2.2 Jednotlivé činnosti MRO .....	23
3 DRUHY MATERIÁLŮ POUŽITÉ V KONSTRUKCI PODVOZKU .....	25
3.1 Vysokopevnostní oceli .....	26
3.2 Nerezové oceli .....	26
3.3 Slitiny hliníku .....	27
3.4 Titanové slitiny .....	27
3.5 Slitiny mědi .....	28
4 DRUHY POŠKOZENÍ MATERIÁLU .....	29
4.1 Provozní opotřebení .....	29
4.2 Mechanické opotřebení .....	31
4.3 Koróze .....	32
5 STANDARTNÍ POVRCHOVÉ ÚPRAVY .....	35
5.1 Mechanické povrchové úpravy .....	35
5.1.1 Obrábění .....	35
5.1.2 Tryskání .....	36
5.2 Chemické povrchové úpravy .....	36
5.3 Elektrochemické pokovování .....	37
5.3.1 Chemické niklování .....	38
5.3.2 Chromování .....	39
5.3.3 Kadmiování .....	41
5.4 Anorganické povlaky .....	42
5.5 Organické povlaky .....	43
6 ENVIROMENTÁLNÍ ASPEKTY S OHLEDEM NA ZMĚNU TECHNOLOGIÍ V PRŮMYSLU .....	46

6.1	REACH .....	47
7	ALTERNATIVNÍ A SPECIÁLNÍ POVRCHOVÉ OCHRANY MATERIÁLU .....	50
7.1	HVOF .....	50
7.1.1	Technologický postup procesu HVOF .....	51
7.1.2	Hlavní komponenty zařízení pro HVOF technologii .....	52
7.1.3	Druhy prášků .....	52
7.2	Technologie pokovení zinek-nikl .....	55
7.2.1	Průběh procesu Zi-Ni .....	56
7.3	Technologie Cold Spray .....	57
7.3.1	Hlavní komponenty pro technologii Cold Spray .....	57
7.4	Plasma Spray .....	58
7.4.1	Druhy prášků používané pro Plasma Spray .....	59
7.4.2	Proces metody Plasma Spray .....	60
7.4.3	Hlavní komponenty Plasma Spray .....	60
8	VYUŽITÍ SPECIÁLNÍCH A ALTERNATIVNÍCH POVRCHOVÝCH ÚPRAV A OCHRAN MATERIÁLŮ V ÚDRŽBĚ LETADLOVÝCH PODVOZKŮ .....	61
8.1	Náhrada pokovení chromem a niklem technologií HVOF .....	61
8.1.1	Hlavní parametry technologie HVOF oproti galvanickým procesům .....	62
8.1.2	Teoretické zavedení HVOF v organizaci CSAT .....	65
8.2	Náhrada pokovení kadmíem technologií pokovení zinkem-niklem .....	66
8.2.1	Hlavní parametry technologie pokovení zinkem-niklem .....	66
8.2.2	Teoretické zavedení metody pokovení zinkem-niklem v organizaci CSAT .....	69
8.3	Speciální opravy základního materiálu .....	69
8.3.1	Zavedení oprav pomocí technologie Plasma Spray .....	70
8.3.2	Zavedení oprav pomocí technologie Cold Spray .....	70
	ZÁVĚR .....	71
	POUŽITÉ ZDROJE .....	73



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Popis podvozku letounu Boeing 737 .....	16
Obrázek 2	Schéma tlumiče podvozku .....	17
Obrázek 3	Rozdělení údržby .....	23
Obrázek 4	Provozně opotřebené pouzdro ložiska .....	30
Obrázek 5	Nové pouzdro ložiska.....	30
Obrázek 6	Kolize pushbacku s letounem .....	31
Obrázek 7	Povrchová koroze duralového plechu .....	33
Obrázek 8	Proces elektrolýzy .....	38
Obrázek 9	Schéma procesních postupů při galvanických pracích .....	38
Obrázek 10	Chromový povlak vnitřního válce.....	41
Obrázek 11	Čep před a po nanesení maskovací pásky před kadmiováním.....	42
Obrázek 12	Vnitřní válec s povlakem Cd (část vlevo) a povlakem Cr (část vpravo) .....	42
Obrázek 13	Základová vrstva uvnitř horizontálního stabilizátoru Boeingu 737.....	44
Obrázek 14	Schéma žárového nástřiku HVOF–Top gun .....	51
Obrázek 15	Povrch vnitřního válce po žárovém nástřiku niklem .....	54
Obrázek 16	Proces HVOF .....	55
Obrázek 17	Schéma Technologie Cold Spray .....	58
Obrázek 18	Schéma procesu Plasma Spray.....	60
Obrázek 19	Graf porovnání metody HVOF a galvanických procesů chrom nebo nikl .....	63
Obrázek 20	Platforma systému HVOF od firmy GTV.....	66
Obrázek 21	Graf porovnání metody pokovení kadmíem a zinkem-niklem .....	67
Obrázek 22	Porovnání inovativních metod oprav povrchu .....	69

## SEZNAM TABULEK

<b>Tabulka 1</b>	Překlad pojmů z obrázku č. 1.....	16
<b>Tabulka 2</b>	Rozdělení dle členění ATA 100.....	18
<b>Tabulka 3</b>	Složení vysokopevnostních ocelí.....	26
<b>Tabulka 4</b>	Složení nerezových ocelí.....	27
<b>Tabulka 5</b>	Složení hliníkových slitin.....	27
<b>Tabulka 6</b>	Pevnostní charakteristiky tříd titanu.....	28
<b>Tabulka 7</b>	Složení měděných slitin.....	28

## SEZNAM ZKRATEK

<b>AD</b>	Airworthiness Directives
<b>ATA</b>	Air transport Association
<b>BAC</b>	Boeing Aerospace Company
<b>CAMO</b>	Continuing Airworthiness Management Organisation
<b>CMM</b>	Component Maintenance Manual
<b>CPCP</b>	Corrosion Prevention and Control Program
<b>CRES</b>	Corrosion – Resistant Steel
<b>CSAT</b>	Czech Airlines Technics
<b>ČSA</b>	České Aerolinie
<b>ČSN</b>	Česká Technická Norma
<b>EASA</b>	European Union Aviation Safety Agency
<b>EMS</b>	Systém enviromentálního managmetu
<b>EU</b>	Evropská unie
<b>FMS</b>	Flight Management System
<b>FOD</b>	Foreign Object Debris
<b>GO</b>	Generální oprava
<b>HVOF</b>	High velocity oxygen fuel
<b>ISO</b>	Mezinárodní organizací pro normalizaci
<b>KSI</b>	Kilo Pounds per Square Inch
<b>MPa</b>	Mega Pascal
<b>MPD</b>	Maintenance Planning Document
<b>MRO</b>	Maintenance, Repair, Overhaul
<b>NASA</b>	National Aeronautical and Sprace Administration
<b>NG</b>	Next Generation
<b>OHM</b>	Overhaul Manual
<b>PDCA</b>	Plan, do, check, act
<b>SB</b>	Service Bulletins
<b>SL</b>	Service Letters
<b>ULPO</b>	údržby letadlových podvozků

# ÚVOD

Letadlové podvozky jsou kritickou součástí každého letounu. Jejich bezpečnost, spolehlivost a životnost jsou klíčové pro provoz a údržbu letecké flotily. V posledních letech se technologie v oblasti údržby podvozků stále rychleji vyvíjejí. Jednou z inovativních metod, která přispívá k vyšší spolehlivosti a bezpečnosti, je použití technologických nástřiků.

Právě inovativní technologie žárových nástřiků (HVOF), které pomáhají při údržbě konstrukčních materiálů, jsou hlavním předmětem této bakalářské práce. Téma bylo vybráno ve spolupráci s odborníky v leteckém průmyslu, s ohledem na nové a moderní požadavky v tomto oboru. Zvláštní důraz je kladen také na environmentální aspekty, a tím na snižování negativního vlivu leteckého průmyslu na životní prostředí. Hledání inovativních řešení, jako je využití žárových nástřiků a šetrnějších galvanických procesů, je cesta ke snížení negativních aspektů na životní prostředí, zlepšení bezpečnosti práce a zvýšení kvality údržby letadlových podvozků a dalších součástí.

Hlavním tématem této bakalářské práce je tedy možnost nahrazení klasických povrchových ochranných materiálů novými postupy oprav, které eliminují negativní vlivy na životní prostředí a ochranu zdraví. Dnes nejvíce diskutovanými technologiemi, které jsou dle platné legislativy EU hodnoceny jako nebezpečné kvůli použitým látkám a materiálům, jsou především pokovování chromem a kadmíem. Dále se do běžné praxe zavádějí nové metody aplikace ostatních materiálů, které mají pozitivní vliv na průmyslové postupy ve výrobě i údržbě.

Bakalářská práce je rozdělena do čtyř částí. V první z nich nalezneme představení a popis letounu Boeing 737 NG, jeho konstrukční provedení a detailní popis letadlového podvozku. Dále pak představení společnosti Czech Airlines Technics (CSAT), která zajišťuje jak generální opravy podvozků těchto letounů, tak i těžkou údržbu, tzv. Heavy Maintenance, lehkou údržbu, tzv. Light Maintenance, a v neposlední řadě traťovou údržbu, tzv. Line Maintenance. V této části je také odborně popsán rozbor všech technologických prací, které jsou provedeny v rámci generální opravy podvozku.

Druhá, technologická část práce se zaměřuje detailněji na materiály, které se v moderním letectví používají. Jsou zde zmíněny také druhy poškození, která mohou nastat při standardním provozu, ale také při zanedbání údržby. Hlavním tématem této části jsou standardní povrchové úpravy, které se dnes běžně využívají. Mezi ně patří mechanické, chemické, elektrochemické, anorganické a organické úpravy povrchu.

Třetí, environmentální část zahrnuje popis evropské politiky pro nakládání s chemickými látkami REACH, jejímž cílem je zlepšit ochranu lidského zdraví a životního prostředí.

Do čtvrté a poslední části jsou zahrnuty alternativní a speciální povrchové úpravy jako jsou HVOF, pokovení zinkem-niklem, metoda Cold Spray a plazmové pokovování. Tato část se zaměřuje na jejich představení, porovnání se standardními metodami a návrhy na jejich využití v leteckém průmyslu. Poslední oddíl této kapitoly zahrnuje předpoklady, které by bylo nutné brát v úvahu v případě, že by společnost CSAT měla zájem zavést některou z těchto inovativních metod, ať už z důvodu zajištění konkurenceschopnosti, nebo z důvodu nařízení Evropské unie.

# 1. PŘEDSTAVENÍ LETOUNU TYPU BOEING 737

Boeing 737 je úzkotrupý dopravní letoun vyráběný od rok 1967 až po současnost. Stal se doplňkem a později i náhradou, za v té době velmi populární, třímotorový Boeing 727. Boeing 737, který můžeme považovat za nejdéle vyráběný dopravní letoun, prošel od svého vzniku spoustou změn a vylepšení.

První generaci tohoto letounu se přezdívá Original, zahrnuje verze 737-100 a 200. Byl vybaven analogovými přístroji a motory s velmi nízkým obtokovým poměrem typu JT8D-7, které byly používány na předchozím modelu Boeing 727 a také na letounu DC-9.

Další generace nesoucí název Classic, označovala verze 737-300/400/500. Byla to modernizovaná verze s částečně digitálními přístroji, palubním počítačem (FMS) pro plánování letu, větší kapacitou cestujících a novými motory s větším obtokovým poměrem typu CFM-56.

Tou nejkoničtější generací je bezesporu tzv. Next Generation (NG), která zaujímá verze 737-600/700/800/900. Letoun byl vybaven nejnovější avionikou, vylepšenou aerodynamikou a také modernizovanými motory. Letouny této generace byly a stále jsou využívány po celém světě v civilní, soukromé i vojenské sféře.

Tou nejnovější generací celé Boeing 737 rodiny je nově od prvního vzletu v roce 2016 verze 737 MAX, která vylepšila letouny Boeing 737 NG o výkonnější motory typu Leap-1B a také proběhly změny aerodynamických prvků na trupu a křídlech. Dále pak došlo i ke změnám v interiéru, kdy se navýšila kapacita sedadel a proběhla rozsáhlá modernizace pilotní kabiny, kde došlo k osazení velkých obrazovek, jinak řečeno full glass cockpit, který přenáší veškeré informace z analogových budíků na obrazovky monitorů a dochází tak k velkému úbytku váhy (Musil, 2016).

## 1.1 Konstrukce a využití letounu Boeing 737

Jak již bylo zmíněno letoun Boeing 737 je konstrukčně řešen jako úzkotrupý dopravní letoun pro krátký až středně-dlouhý dolet a řadí se do kategorie nejúspěšnějších a nejoblíbenějších letadel v komerčním letectví. Svědčí o tom také fakt, že od první generace Original až po poslední MAX, bylo dohromady vyrobeno již přes 11 000 kusů a mnoho dalších je ve výrobě (Boeing, 2024).

Úzkotrupá letadla můžeme charakterizovat tak, že mají pouze jednu středovou uličku a po pravé i levé straně se poté nacházejí sedadla, která jsou většinou v konfiguraci 2x (1-3). Mají využití na krátkých a středních tratích a bývají velmi ekonomická (Kunzler & Memon, 2024).

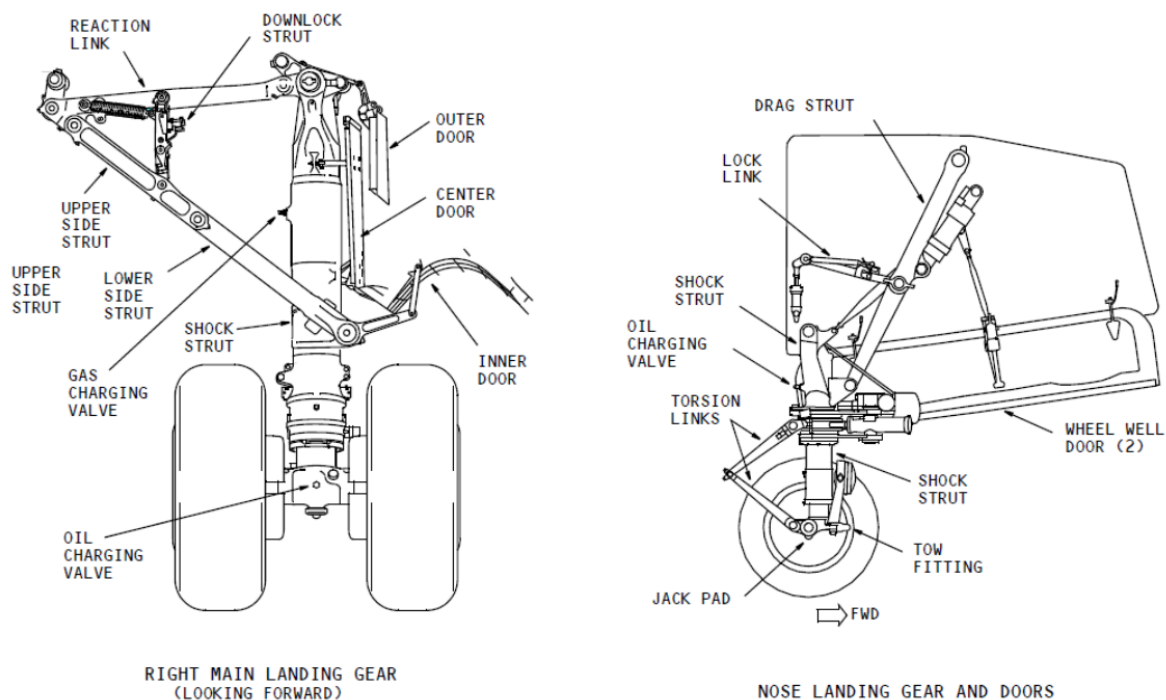
Trup letadla je tvořen poloskořepinovou konstrukcí. Tento typ si lze představit jako silný nosný potah, který je vyztužen podélnými výtuhami. U letadel se této konstrukce využívá velmi často. Je lehká a na přenosu zatížení se podílí trup spolu s příčnými a podélnými výtuhami. Zároveň tato koncepce zaujímá velmi málo prostoru, tudíž jsme schopni plně využít maximální kapacitu vnitřního prostoru, ať už pro cestující nebo náklad (Tůma, 1981).

## 1.2 Přistávací zařízení – podvozek

Přistávací zařízení neboli podvozek, umožňuje letadlu pohybovat se po zemi při pojíždění, vzletu, či přistání. Jeho hlavním úkolem je zajistit pohyb letounu po provozních plochách, tlumit nárazy při dosednutí letadla na dráhu a při přejíždění nerovností na zemi. Jedná se o velmi složitý konstrukční prvek, který musí být stabilní, dostatečně ovladatelný a s minimálním odporem. Dále musí splňovat požadavky na pevnost, tuhost a pokud možno jednoduchost celé konstrukce.

Podvozky můžeme dělit na několik typů. Prvním základním dělením je na pozemní, vodní a obojživelné. Dále pak dělení pevné a zatahovací a jako poslední rozdělení dle uspořádání kol. Pokud se hlavní kola nacházejí za těžištěm letounu, pak se tomuto uspořádání říká s předovým podvozkem a v dopravním letectví je využíván nejvíce. Letadla s tímto podvozkem jsou např. Boeing 737, Airbus 320, Cessna 172. Máme-li kola hlavního podvozku před těžištěm, nazýváme tento typ s ostruhovým podvozkem a lze takové uspořádání nalézt např. u letoun Zlín Z-37 nebo Douglas DC-3. Setkat se můžeme i s podvozky tandemovými, kdy jsou kola v podélné ose letadla za sebou jako je u letounů Boeing B-52, McDonnell Douglas AV-8 Harrier, tato koncepce využívá většinou pomocných kol na koncích křídel z důvodu stability (Tůma, 1981).

Letadlový podvozek je velmi komplexní a složitý celek a z toho důvodu je zapotřebí při generální opravě zaměstnávat dvě skupiny mechaniků, přičemž jedna skupina pracuje na předovém podvozkem a druhá skupina pracuje na hlavním podvozkem. Mezi hlavní díly podvozku patří vnitřní a vnější válec (inner and outer cylinder), vzpěry (struts), zámek (lock), osa (axle), nůžky (torsion links), shimmy tlumič (shimmy damper), hydraulická a elektrická soustava (hydraulics and electrical system), kola a brzdy (wheels and brakes) a dveře (doors), (Czech Airlines Technics, 2023). Popis podvozku letounu Boeing 737 je na následujícím obrázku č. 1.



Obrázek 1 Popis podvozku letounu Boeing 737 (Learning, 1999)

Překlad pojmů z obrázku č. 1 je uveden v tabulce č. 1.

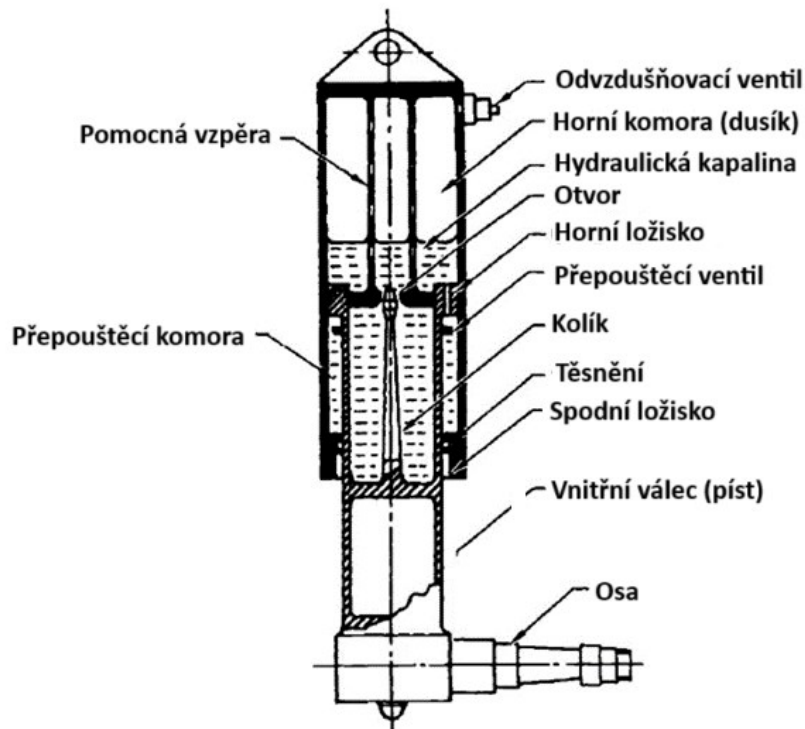
Anglicky	Česky	Anglicky	Česky
Reaction Link	Reakční článek	Drag Strut	Odporová vzpěra
Downlock Strut	Spodní aretační vzpěra	Lock Link	Zámek
Outer Door	Vnější dveře	Shock Strut	Tlumič
Center Door	Střední dveře	Oil Charging Valve	Ventil pro plnění hydraulické kap.
Inner Door	Vnitřní dveře	Torsion Links	Nůžky
Shock Strut	Tlumič	Wheel Well Door	Dveře
Lower Side Strut	Dolní boční vzpěra	Tow Fitting	Tažné oko
Upper Side Strut	Horní boční vzpěra	Jack Pad	Zvedací místo
Gas Charging Valve	Ventil pro plnění plynu	FWD (Forward)	Dopředu
Oil Charging Valve	Ventil pro plnění hydraulické kap.	Looking Forward	Pohled z předu
Right Main Landing Gear	Pravý hlavní podvozek	Nose Landing Gear	Příďový podvozek

**Tabulka 1** Překlad pojmů z obrázku č. 1. (Autor)

Hlavním komponentem podvozku, který má za cíl tlumit rázy je tlumič. Ten se stává ze dvou válců, vnitřního a vnějšího. Vnější válec slouží jako pouzdro pro vnitřní, který se chová jako píst. Uvnitř tlumiče nalezneme v komorách, které jsou společně propojeny, dvě média. Při stlačení, se ve spodní části změní tlak a hydraulická kapalina, která se zde nachází, ventilem vstupuje do horního prostoru, který je vyplněn dusíkem. Kapalina tento plyn stlačí, čímž mění



při průtoku mezi komorami svou kinetickou energii v teplo. Po dokončení celého zdvihu vrací plyn podvozek zpět do své původní polohy. K plynulému zpětnému pohybu jsou instalována tlumící zařízení v podobě ventilů. Síla tlumení závisí na velikosti otvoru, přes který je kapalina tlačena (Tůma, 1981), viz schéma funkce tlumiče podvozku na obrázku č. 2.



Obrázek 2 Schéma tlumiče podvozku (upraveno; CURREY, 2019)

### 1.3 Členění dle ATA 100

Air Transport Association Specification 100 neboli zkráceně ATA 100 je standard, který vytvořila asociace leteckých dopravců 1.6.1956. Systém číslování rozděluje letadlo na systémy, subsystemy a komponenty, z nichž každý systém má své vlastní číslo. Toto řazení systémů zjednodušuje přehlednost, orientaci a stejnost ve všech manuálech, díky čemuž se stávají pochopitelnými pro všechny techniky, ale i piloty. Od roku 2015 je systém číslování ATA 100 využíván kvůli digitalizaci dokumentů v komerčním letectví, hlavně v malém všeobecném letectví. V komerční dopravní sféře je momentálně využíván systém ATA iSpec 2200, který užívá digitální technologii a umožňuje tak ještě rychlejší přenosy dat a vyhledávání v dokumentech. Další výhodou tohoto systému je skladnost. Stačí pouze jeden počítač, na kterém lze mít všechny potřebné manuály, oproti papírovým verzím, které byly skladovány v šanonech a ve velkokapacitních knihovnách společností. I přesto, že došlo ke změně

specifikace ATA, původní odkaz číslování kapitol dle ATA 100 byl zachován. To svědčí o stálé relevanci a dobré strategii při návrhu původního číslování (Smith, 2024). V následující tabulce č. 2 je vyobrazen systém členění ATA 100.

ATA 00	Introduction	Úvod
ATA 01-19	Aircraft General	Obecné informace o letounu
	<b>Airframe systems/ Letadlové systémy</b>	
ATA 20	Standard Practices-Airframe	Standartní postupy-drak
ATA 21	Air Conditioning	Klimatizace
ATA 22	Auto Flight	Autopilot
ATA 23	Communications	Komunikace
ATA 24	Electrical Power	Elektrická soustava
ATA 25	Equipment / Furnishings	Vybavení
ATA 26	Fire Protection	Požární ochrana
ATA 27	Flight Controls	Řízení
ATA 28	Fuel	Palivo
ATA 29	Hydraulic Power	Hydraulická soustava
ATA 30	Ice & Rain Protection	Ochrana proti ledu a dešti
ATA 31	Indicating / Recording Systems	Signalizační a nahrávací systémy
ATA 32	Landing Gear	Přistávací zařízení
ATA 33	Lights	Světla
ATA 34	Navigation	Navigace
ATA 35	Oxygen	Kyslíková soustava
ATA 36	Pneumatic	Pneumatická soustava
ATA 37	Vacuum	Vakuum
ATA 38	Water / Waste	Voda a odpady
ATA 39	Electrical Electronic Panels & Multipurpose Compts	Elektrické, elektronické panely a víceúčelové zařízení
ATA 41	Water Ballast	Vodní zátež
ATA 42	Integrated Modular Avionics	Integrovaná modulární avionika
ATA 44	Cabin Systems	Kabinové systémy
ATA 45	Central Maintenance System (CMS)	Hlavní systém údržby
ATA 46	Information Systems	Informační systémy
ATA 47	Inert Gas System	Systém inertních plynů
ATA 49	Airborne Auxiliary Power	Pomocný zdroj-APU
ATA 50-57	<b>Structure / Konstrukce</b>	
ATA 60-67	<b>Propeller, Rotor / Vrtule, Rotor</b>	
ATA 70-84	<b>Power Plant / Pohonná jednotka</b>	
ATA 91-300	<b>Others / Ostatní</b>	

**Tabulka 2** Rozdělení dle členění ATA 100 (Aviation Maintenance Jobs, 2024)

Jak je uvedeno, podvozek, přistávací zařízení je uveden v kapitole ATA 32, která se dále dělí na podskupiny (jako ostatní systémy), a to následovně:

- 00 General
- 10 Main Gear and Doors
- 20 Nose Gear and Doors
- 30 Extension and Retraction
- 40 Wheels and brakes
- 50 Steering
- 60 Position and Warning
- 70 Supplementary warning

Další podskupina ATA kódu odkazuje na příslušnou část sestavy systému. Výsledný zápis, oddělený pomlčkami, je v uvedeném znění, jako příklad 32-11-12 (Aviation Maintenance Jobs, 2024).

- 32 – ATA Chapter, hlavní kapitola
- 11 – ATA Subchapter, podsystem
- 12 – ATA Subchapter, definice objektu

## 2 CZECH AIRLINES TECHNICS, MRO

Zkratka MRO označuje v letectví termín „Maintenance, Repair and Overhaul“ (Údržba, Opravy a Generální opravy). Je to označení pro vysoce kvalitní, plně certifikovanou společnost, jakou je i Czech Airlines Technics (CSAT), jenž byla založena v roce 2010 v rámci restrukturalizace národního dopravce České aerolinie a.s. (ČSA), kdy firma vyčlenila do dceřiných společností podpůrné úseky, a to Technický (nastávající CSAT) a Handling. V roce 2012 společnost převzal Český Aeroholding, a.s. a poslední změna nastala v roce 2018, kdy v důsledku akvizice se stala jediným akcionářem společnost Letiště Praha, a.s. CSAT má téměř stoleté know-how jak v údržbě, opravách, a servise letadel, tak i letadlových celků a v současné době zaměstnává více než 600 zkušených pracovníků. Mezi nabízené služby CSAT patří zejména těžká údržba (Heavy Maintenance), traťová údržba (Line Maintenance), údržba a generální opravy letadlových podvozků (Landing Gear Maintenance), údržba komponentů, podpora provozovatelů letadel, tzv CAMO a prodej spotřebního materiálu (Czech Airlines Technics, 2024).

Jak již bylo zmíněno CSAT vzniklo jako dceřiná společnost ČSA. Údržba letadel u ČSA se datuje od roku 1923, kdy se prováděly opravy na prvních strojích typu Aero A14 Brandenburg, Aero A10, De Havilland DH.50 a Farman F-60 Goliath. V 30. letech se pak při největším náletu opravovala hlavně letadla jako Savoia-Marchetti S.73 a Avia F.VIIb/3m (Folprecht, 2023).

Po druhé světové válce se v továrně AVIA prováděla údržba a přestavby vojenského letounu typu DC-3 na cestovní dopravní verzi, dále byly ve velkém opravovány a servisovány v ČSA letouny JU-52, SI-204, IL-12 a AE-45 (Žeravík, 2009).

V 50. letech přichází do ČSA éra proudových letadel typu Ilyushin a Tupolev a v roce 1957 začíná probíhat také údržba těchto letadel. Flotila letadel ČSA se v té době velmi rychle rozrůstá a prostory hangárů v areálu jih na letišti Ruzyně přestávají být kapacitně dostatečné a zastaralé. Proto při stavbě nové odbavovací haly v areálu letiště sever vyrůstá nejen nový moderní terminál, ale také Hangár F s unikátní konstrukcí. Byl postaven tak, aby v prostoru stání letadel nebyly žádné nosné sloupy. To se povedlo zavěšením střechy zvenku. Hangár byl otevřen po pěti letech stavby v roce 1969 (Letiště Praha, 2024).

Po roku 1989, kdy proběhla Sametová revoluce nastalo v ČSA velmi mnoho hospodářských a politických změn. Rozhodlo se opustit od východní techniky a roku 1992 se dostalo moderních a ekonomických západních strojů jako ATR, Boeing a Airbus. Tyto stroje byly náročnější na údržbu a také na ně bylo kladeno více požadavků. To vše nebyl problém

díky zkušeným mechanikům a velkému hangáru F. V roce 2000 byl spuštěn provoz údržby letadlových podvozků v jižním areálu letiště, bývalé motorárně ČSA, kde se provedlo již přes 600 generálních oprav podvozků. V roce 2018 se otevřel pro CSAT nový Hangár S, kde probíhá lehká údržba a nyní je naplánována přestavba na lakovnu letounů. Od stejného roku je CSAT hlavním poskytovatelem traťové údržby na letišti Václava Havla (Letiště Praha, 2024).

## **2.1 Současný průběh generálních oprav letadlových podvozků**

Proces generální opravy (GO) je velmi komplexní záležitost a z tohoto důvodu je GO rozdělena do jednotlivých technologických kroků. Při generální opravě je nutné dodržování všech postupů a manuálů daných jak výrobcem, tak společností samotnou.

Vše začíná příjmem leteckého podvozku buďto od letecké společnosti, kdy je možné dovézt kompletní podvozek z kterékoliv části Evropy nebo přímo z provozu CSAT na Hangáru F, kde došlo k sejmutí podvozku z letadla, které právě podléhá těžké údržbě. Během příjmu se zkontroluje, zdali podvozek dorazil se všemi jeho přibalenými díly a veškerou dokumentací. Po úspěšném přijetí se podvozek ustaví do speciálních statických přípravků, díky kterým je možno provádět demontáž.

Demontáž samotného podvozku začíná hrubým očištěním. Poté následuje odstrojení veškerého tlakového potrubí, plechů a všech ostatních dílů, které neprocházejí nedestruktivním testováním (NDT). Součástky jako šroubky nebo gumové podložky se likvidují a při opětovné montáži se nahrazují novými. Je to z toho důvodu, že NDT, je u těchto drobných součástek velice nákladné a pro společnost je finančně výhodnější použít nové, certifikované díly.

Po rozložení celého podvozku následuje identifikace a označení všech dílů, ke kterým se vyhotoví technologické postupy, dle kterých se následně postupuje. Všechny součástky a díly ke kterým již byly přiděleny postupy, putují na pečlivé mytí a čištění, které probíhá abrazivně nebo chemicky (Czech Airlines Technics, 2024).

Poté co je díl čistý, putuje do pece na dobu delší než 4 hodiny, kde při teplotě zhruba 190 °C dojde k odstranění vnitřního pnutí v materiálu.

U dílů, které mají na jako povrchovou ochranu chromovou vrstvu, se provádí nejprve vizuální kontrola chromu. Pokud se na povrchu chromu objeví nedostatek, mechanik po konzultaci s technologickým oddělením povrch zaleští nebo zapíše nález do příslušného technologického listu a chrom je nutno odstranit. Rozhodnutí o zaleštění, či odstranění povrchové úpravy záleží na přípustných limitech dle manuálů. V případě rozhodnutí o odstranění chromového povrchu, putuje díl do galvanovny, kde dojde k odstranění jak chromové vrstvy, tak i k odstranění kadmia, které se nachází právě pod chromem. U dílů

z hliníkových slitin dochází k odstranění eloxové vrstvy, která chrání hliníkovou slitinu před korozi, a to pomocí moření a smáčení.

Po odstranění povrchových úprav nám zůstává díl v základním materiálu. Ten se odesílá na NDT, kde podle druhu materiálu vhodně zvolí metodu testování. Například pro feromagnetické materiály, kde je podezření pouze na povrchové nebo blízkopovrchové vady se využívá magnetická kontrola, která je relativně jednoduchá, finančně nenáročná a velmi přesná.

Další krok je vizuální kontrola a přeměření dílů. Důležité u tohoto kroku je přesnost a velká citlivost. Na díle se hledají jakékoliv známky poškození jako např. koroze, mechanické poškození, špatné rozměry aj. Vše je nutné porovnat s manuálem a zapsat poškození a rozměry do technologického listu dané součástky. Dle typu nálezu, se volí některá z následujících oprav: nanesení kadmia, mechanická oprava (broušení, tryskání, leštění) nebo oprava chromem.

Jakmile dojde k odstranění nálezů, v případě např. lehké koroze pouhým leštěním, přichází na řadu kontrola leptáním o přehřátí materiálu v místech obrábění součásti. V případě lokálního přehřátí součásti, by mohlo dojít v daném místě k tvorbě martenzitické struktury, která by zapříčinila vysokou křehkost (Czech Airlines Technics, 2024).

V dalším kroku se stejně jako na počátku odstraňuje vnitřní pnutí a dochází u feromagnetických materiálu k magnetické kontrole.

Následně pro zlepšení mechanických vlastností a odolnosti proti korozi, únavě a praskání následuje proces kuličkování. Touto technologií se vytvrzuje povrch materiálu a také se zlepšuje přilnavost pro následující proces chromování.

Vlivem galvanických procesů jako je právě chromování, mají vysokopevnostní oceli velké riziko k vodíkové křehkosti a z toho důvodu putuje díl k tepelnému zpracování, tzv. odvodňování, které trvá až 24 hodin. Po vytažení z pece se provádí kontrola povrchu chromu a případně jeho zaleštění ostrých hran. Opět následuje NDT kontrola dle materiálu dílu.

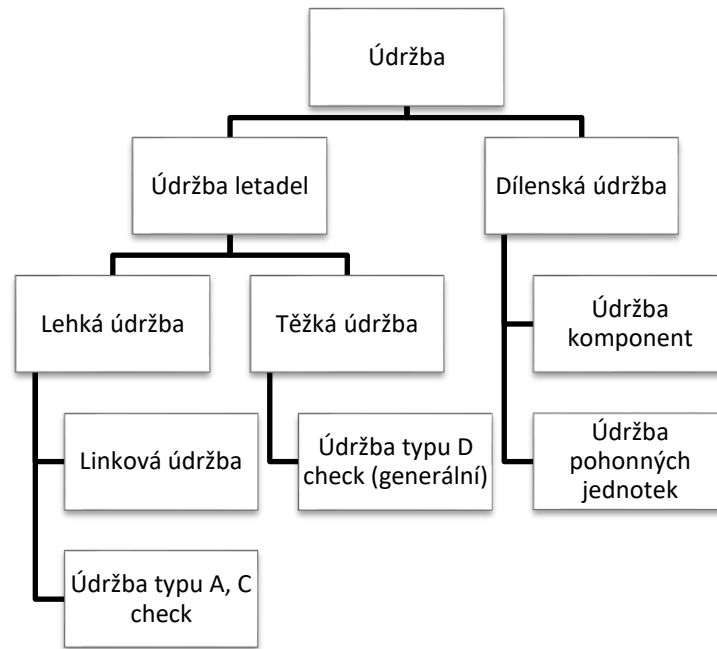
Dále přichází na řadu opět galvanické procesy, a to kadmiování do požadované tloušťky, kdy opět následuje proces odvodňování a poté předposlední povrchová úprava, kterou je chromátování. U hliníkových slitin se naopak zpět nanáší elox.

V tomto bodě je generální oprava daného komponentu téměř hotova a následuje předběžná montáž, kdy je díl osazen ložisky nebo jejich pouzdry či maznicemi a putuje do lakovny. Ještě předtím je ale nutno díl oblepit maskovací páskou, která zabrání nalakování částí, které nevyžadují lakování. Lakování probíhá v speciálních lakýrnických boxech pomocí přesné nanášecí pistole. Nakonec u vybraných dílů je posledním krokem nanesení ochranné vrstvy vosku.

Finální bod je potvrzení o provozuschopnosti, které vydává certifikovaný mechanik a stvrzuje tak, že byly provedeny a dodrženy všechny kroky v technologickém postupu a díl je tak ve stavu jako nový (Czech Airlines Technics, 2024).

## 2.2 Jednotlivé činnosti MRO

MRO jak již z názvu vypovídá se zabývá údržbou, opravami a generálními opravami (Pita, 2019). Základní rozdělení údržby je graficky znázorněno na následujícím obrázku č. 3.



Obrázek 3 Rozdělení údržby (PITA, 2019)

Údržba letadel zahrnuje údržbu draku a systémů letadla prováděnou přímo na letadle. Můžeme ji rozdělit na dva základní druhy. Prvním, je údržby linková nebo také tzv. Line Maintenance. Mechanik, který má na starosti tento typ údržby, koná základní údržbu zpravidla po každém přistání letounu. Kontroluje, zdali není drak letounu porušen, jaký je stav maziv, olejů nebo jaká je hloubka dezénu pneumatik. Tato prohlídka je primárně vizuální s minimem potřebného vybavení a ve většině případů je potřeba pouze jeden kvalifikovaný mechanik.

Dalším typem údržby je základní údržba (Base Maintenance), neboli údržba prováděná na hangáru, která vyžaduje odstavení letadla, větší množství technických pomůcek a také více kvalifikovaných mechaniků. Délka trvání závisí na typu prováděné údržby. Může trvat od jednotek dní až po osm týdnů. Lehká základní údržba se značí písmeny A, C. Kontrola typu A spočívá v prohlídce celistvosti draku, kontrole provozních hydraulických kapalin, olejů a plynů. Dále dochází k odkrytí panelů a vizuální prohlídce prostoru pod nimi. Při kontrole typu

C se základní část nemění od předešlé kontroly, ale je kladen větší důraz na prohlídku konstrukce nosných částí letounu, také je provedeno hloubkové mazání lan, kabelů a armatur. Součástí této prohlídky je i program prevence proti korozi (CPCP) (Petrauskaite, 2021).

Těžká údržba typu D, je nejrozsáhlejší a zahrnuje komplexní prohlídku jednotlivých dílů. Během této kontroly, která trvá osm týdnů, dochází k rozebrání celého letounu, kontrole veškerých leteckých dílů a ve výjimečných situacích také k odstranění nátěru. Demontuje se interiér včetně prostoru pro cestující, piloty a zavazadlový prostor (cargo), avionické přístroje v pilotní kabině, kuchyňky, toalety, panely a kryty podvozku, křídel, motorů (Žežula, 2019).

Dílenská údržba, jak již z názvu vyplývá, je prováděna v prostoru specializovaných dílen, ve kterých se provádí údržba letadlových celků dle příruček Component maintenance manual (CMM) nebo pak generální opravy, které se řídí příručkou Overhaul manual (OHM). Dílny jsou zaměřeny vždy jen pro daný letadlový celek, např. podvozek, motor, avionika atd. (Pita, 2019).



### 3 DRUHY MATERIÁLŮ POUŽITÉ V KONSTRUKCI PODVOZKU

Historie výroby a materiálů letadel je plná inovací a pokroků. Materiály a výrobní technologie se stále vyvíjejí a každý úspěch, ale i chyba v tomto odvětví dopravy, výrazně zlepšují její bezpečnost. V počátcích letectví byla letadla považována za staticky namáhané konstrukce a hlavním materiálem použitým při výrobě bylo dřevo. Postupným vývojem, který byl také ovlivněn světovými válkami, došlo k výraznému zlepšení spolehlivosti a bezpečnosti leteckých konstrukcí. Zkvalitnila se výrobní technologie a jakost materiálů, ve velké míře se začali využívat duralové rámy namísto dřevěných a také došlo k zavedení kvalifikací leteckého personálu.

S rostoucím počtem nalétaných hodin se začínají projevovat únavové degrační procesy. Letadla jsou od té doby považována za dynamicky a únavově namáhané konstrukce. Postupně se vyvíjely čisté slitiny, prováděly se únavové a dynamické zkoušky částí konstrukce i celých letadel, což vedlo k postupnému zvýšení životnosti letadel, a to až na dvojnásobek. Tento vývoj byl klíčový pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti leteckých strojů.

V moderním letectví došlo i díky stále inovativním technologiím k rozmachu lehkých kompozitních materiálů, slitin titanu, žárupevných ocelí a vylepšení slitin hliníku (Writer, 2023).

Vlastnosti materiálů jsou velmi důležitým předpokladem pro správný výběr a použití vybraného materiálu. Vlastnosti můžeme rozdělit do několika základních skupin.

Fyzikální vlastnosti, které jsou charakterizovány hustotou, bodem tání a tuhnutí, délkovou a objemovou roztažností, tepelnou a elektrickou vodivostí a permeabilitou. Instruuji nás o základních, fyzikálně daných informacích o konkrétním materiálu.

Chemické vlastnosti slouží pro získání chemického složení a struktury materiálu. Udávají charakteristiky pro žárupevnost, žáruvzdornost a korozní odolnost.

Kvalitu materiálů vůči působení vnějších sil a reakcí, popisují mechanické vlastnosti, kterými lze charakterizovat pevnost a pružnost, tvrdost, křehkost a houževnatost.

Technologické vlastnosti materiálu souvisí s kvalitou výroby a následným zpracováním materiálu. Mezi hlavní charakteristiky se řadí tvárnost, obrobiteľnosť, slévateľnosť a svařitelnost (Beňo, 2004).

### 3.1 Vysokopevnostní oceli

Vysokopevnostní oceli se nejvíce využívají pro části, které přenášejí velká zatížení a z toho důvodu je lze nalézt u podvozku letounu B737 nejvíce zastoupené. Nejčastěji se používá nízkolegovaná ve vakuu tavená ocel s označením AISI 4340M, případně její modifikace 300M. Pevnost se udává min. 200 KSI, což lze přirovnat k 1516 MPa. Materiál je v konstrukci podvozku hojně využíván vzhledem k své vysoké pevnosti a poměru dobré houževnatosti. Také se vyznačuje menší hmotností ve srovnání s klasickými konstrukčními oceli (Titanium Industries, 2022).

Podobný materiál lze nalézt i v normě ČSN s označením 16 341, 16 342, 16 343, 16 444. Mimo tento konkrétní materiál se používají další podobné typy, které se odlišují počtem přidaných legur (Institut). Rozdíly ve složení vysokopevnostních ocelí jsou uvedeny v následující tabulce č. 3.

Materiál	% Fe	% C	% Mn	% S	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% P	% V	% Cu
AISI 4130	97.0	0.30	0.50	0.05	0.25	1.0	–	0.20	0.05	–	–
AISI 4340	96.0	0.40	0.70	0.04	0.25	0.80	1.9	0.25	0.04	–	–
AISI 300M	94.452–92.952	0.38–0.43	0.65–0.90	0.008	1.45–1.80	0.70–0.95	1.65–2.00	0.30–0.50	0.010	0.05–0.10	0.35

**Tabulka 3** Složení vysokopevnostních ocelí (Titanium Industries, 2022)

Největším rizikem tohoto materiálu, je spolu s korozi také vodíková křehkost. Ta vzniká při chemických či galvanických procesech, kdy vodík proniká do struktury oceli a způsobuje snížení celkové únosnosti. K odstranění vodíku z materiálu slouží proces odvodňování. Jedná se o tepelné zpracování (žihání), při kterém se díl vloží do pece předehřáté na teplotu okolo 200 °C po dobu několika hodin. Přesná doba trvání vychází z norem pro chemické pokovování. Pokud nedojde k procesu odvodňování nebo se nedodrží předepsaný čas, dochází při provozním zatížení k silovému napětí, které má za následek trhliny, případně porušení součásti (Kreibich).

### 3.2 Nerezové oceli

Nerezové, jinak řečeno korozivzdorné oceli jsou vysoce legované slitiny železa, které při běžných teplotách vykazují zvýšenou odolnost vůči korozi a v letectví je můžeme najít pod zkratkou CRES neboli Corrosion Resistant Steel. Jedná se o materiál s podílem  $\leq 1,2$  % uhlíku a velkým zastoupením chromu  $\geq 10,5$  % a niklu  $\geq 3,5$  % (MATEZEX). Složení nerezových ocelí je uvedeno v následující tabulce č. 4.

Materiál	% Fe	% C	% Mn	% S	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% P	% Cu	% Al	% Cb + Ta
15-5PH CRES	zbylé	0.07	1.0	0.15	1,00	14–15.5	3.5–4.5	0.5	0.03	2.5–4.5	–	0.45 Cb
17-4PH CRES	zbylé	0.07	1.0	0.03	1,00	15–17	3–5	–	0.04	3–5	–	5xC/0.45
17-7PH CRES	zbylé	0.09	1.0	0.03	1,00	16–18	6.5–7.75	–	0.04	–	0.75–1.5	–
304 CRES	zbylé	0.08	2.0	0.03	1,00	18–20	8–10	0.75	0.04	0.75	–	–
347 CRES	zbylé	0.08	2.0	0.03	1,00	17–19	9–12	0.75	0.04	0.75	–	10xC

**Tabulka 4** Složení nerezových ocelí (Materials, 2013)

Hlavním využitím materiálu CRES jsou díly vyžadující pevnost a houževnatost, mezi které patří ložisková pouzdra, podložky, čepy, pružiny. Pevnost řad 15 a 17 se pohybuje od 150–200 KSI. Slitiny řady 300 mají menší pevnost, zhruba okolo 150 KSI a využití lze nalézt u spotřebního materiálu jako matice, šroubky, závlačky a jiné podobné.

Stejně jako vysokopevnostní ocele mají i CRES tendenci k vodíkové křehkosti. Postup odvodňování je stejný jako v předchozí kapitole a vychází z hodnoty pevnosti KSI (MATEZEX).

### 3.3 Slitiny hliníku

Hliník je nejvíce zastoupený prvek v zemské kůře a řadí se do kategorie neželezných kovů. Má dobrou korozní odolnost, je elektricky i tepelně vodivý, svařitelný, dobře tvárný, ale zároveň pevný. Nejčastěji se využívá slitina hliníku, konkrétně s příměsí hořčíku a mědi, známý též jako dural (ehlinik). Složení vybraných hliníkových slitin je zobrazeno v tabulce č. 5.

Materiál	% Al	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	% Zn	% Ti	% Zr	% Ni
Al 2017A	zbylé	0.20 - 0.8	0.7	3.5–4.5	0.40–1.0	0.40–0.8	0.10	0.25	0.15	0.05	–
Al 2024	zbylé	0.50	0.50	3.8–4.9	0.3–0.9	1.2–1.8	0.10	0.25	0.15	0.05	–
Al 7050	zbylé	0.0–0.12	0.0–0.15	2.0–2.6	0.0–0.1	1.9–2.6	0.0–0.04	5.7–6.7	0.0–0.06	0.08–0.15	–
Al 7075	zbylé	0.0–0.40	0.0–0.50	1.2–2.0	0.0–0.30	2.1–2.9	0.18–0.28	5.1–6.1	0.0–0.20	0.05	–
Al 2618A	zbylé	0.15–0.25	0.9–1.4	1.8–2.7	0.25	1.2–1.8	–	0.15	0.20	0.05	0.8–1.4

**Tabulka 5** Složení hliníkových slitin (Materials, 2013)

### 3.4 Titanové slitiny

Titanové slitiny se poprvé objevili v šedesátých letech dvacátého století ve vojenském průmyslu, konkrétně při stavbě letounu Lockheed SR-71 Blackbird. Mezi klíčové vlastnosti titanu se řadí 3x větší pevnost v porovnání s hliníkovými slitinami, nízká hustota, tvrdost, dobrá vodivost, nízká tepelná roztažnost a vysoká teplotní odolnost. V civilní dopravě se titan využil při stavbě letounů Concorde a Tu-144. V moderní letecké výrobě obliba titanových slitin opět

narůstá a mají využití např. pro motorová lože, části pohonné jednotky, závěsná kování, silové přepážky, komponenty podvozku a mnoho dalších (Lkalloy, 2018). Titan se dělí do základních tříd 1 až 5, 7 a 11 podle čistoty a přidaných legur. Třída 1 až 4 zahrnuje komerčně čistý titan, třída 5 je nejvíce používaná a lze ji zušlechtit na pevnost okolo 1200 MPa. Pro vysoce korozně namáhané díly se využívá titan třídy 7 a 11, který obsahuje 0,2 % palladia. Pevnostní charakteristiky jednotlivých tříd titanu jsou zobrazeny v tabulce č. 6.

Slitiny Ti	Hustota (kg. m <sup>-3</sup> )	Mez pevnosti (min. MPa)	Mez kluzu (min. MPa)	Tvrdoost (HV)	Modul pružnosti v tahu (GPa)
Třída 1	4510	240	170	120	105
Třída 2		340	280	145	
Třída 3		440	380	195	
Třída 4		550	480	280	
Třída 5	4450	900	830	350	114
Třída 7	4510	340	280	145	105
Třída 11		240	170	120	

**Tabulka 6** Pevnostní charakteristiky tříd titanu (Cetima, 2021)

### 3.5 Slitiny mědi

Při výrobě letadlových dílů se hojně využívají také slitin mědi, které mají vysokou pevnost řádově 250 MPa a také velmi dobrou ořezuvzdornost. Pro lepší korozní, ale i pevnostní vlastnosti, lze slitiny ušlechťovat pomocí jiných prvků. Nejčastějšími legurami jsou nikl (Ni), hliník (Al) a ve výjimečných použitích také beryllium (Be). Měď v letecké technice nalezne využití zejména v elektroinstalacích nebo v pohyblivých kloubových spojích. Využití měděných slitin v leteckém podvozku je určeno právě pro výrobu pouzder těchto spojů a samotných ložisek (Bendall, 1995). Složení běžně používaných slitin mědi v leteckém podvozku je znázorněn v tabulce č. 7.

Slitina	Cu %	Sn %	Zn %	Fe %	Ni %	Al %	Mn %	Si %	Pb %
AMS 4634	zbylé	0.2	0.5	0.3	0.25	6.3–7.6	0.1	1.5–2.2	–
AMS 4640	zbylé	0.2	0.3	2–4	4–5.5	9–11	1.5	0.25	0.05
AMS 4880	min. 78	0.2	0.3	2–3.5	4.5–5.5	9.7–10.9	1.5	–	–

**Tabulka 7** Složení měděných slitin (STANDARD PRODUCTS, 2024)

## 4 DRUHY POŠKOZENÍ MATERIÁLU

Kovové materiály, případně jejich slitiny jsou základním typem materiálu využívaným v konstrukci letadlových podvozků. Jedná se o všechny materiály zmíněné v kapitole č. 3. V souvislosti s provozem letounu na tratích je však nutné brát v úvahu jeho provozní opotřebení, které může postupovat až do fáze poškození materiálu a tím celého dílu. Tyto na trati diagnostikované defekty je dle závažnosti potřeba co nejdříve opravit dle Maintenance Planning Document (MPD) (Sause, 2021). Tento dokument vydává výrobce letadla a znázorňuje jak často, má být prováděn konkrétní typ údržby a kontroly. Spolu s tímto dokumentem je důležité zaznamenávat i další data o údržbě. Jedná se například o splnění Service Bulletins (SB), Service Letters (SL), Airworthiness Directives (AD) a jiných. O shromažďování těchto dat, se u evropských provozovatelů stará oddělení CAMO (Continuing Airworthiness Management Organisation) neboli organizace oprávněná k řízení zachování letové způsobilosti dle požadavku EASA part M (EASA, 2024).

Základní poškození materiálu letadlových podvozků lze rozdělit na následující:

- provozní opotřebení
- mechanické opotřebení
- korozi

### 4.1 Provozní opotřebení

Provozní opotřebení materiálu a letadlových dílů je běžný stav, ke kterému dochází při operování letounů na tratích. Ve většině případů má toto opotřebení za následek vznik vůlí v kloubových spojích nebo netěsnosti tlumičů podvozku.

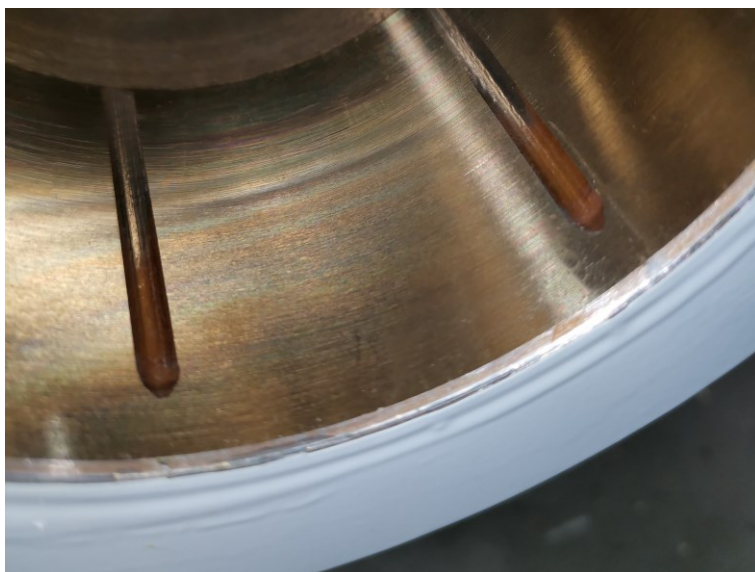
Tlumiče jsou velmi namáhaná součást leteckého podvozku, tlumí každou nerovnost při pohybu letadla po provozní ploše či dráze. Vlivem tlumení může docházet k úběru materiálu na pístnici vnitřního válce. Plocha, po které se pístnice pohybuje je opatřena chromovou vrstvou. Tato vrstva se při neustálém pohybu tlumiče postupně opotřebovává a při kritické hodnotě úběru chromu, začne tlumič postupně ztrácet hydraulickou kapalinu a tím pádem své tlumící vlastnosti. Jako jediným schůdným řešením v této situaci je rozebrání celého podvozku a nanesení nového povrchového pokovení.

Zvýšené vůle v ložiskách vedou k rychlejšímu opotřebení a vzniku vibrací, což negativně ovlivňuje ovladatelnost a stabilitu letadla během pohybu po zemi. Pokud vůle v konkrétním spoji dosahuje maximální přípustné hodnoty, je nezbytné letadlo odstavit a vyměnit komponenty, které způsobují tento problém. Pro maximální snížení nákladů má

možnost provozovatel letounu využít vlastní nebo vypůjčenou náhradní podvozkovou sadu, se kterou může operovat letoun během údržby svého poškozeného podvozku. Proces takového postupu je nazýván inspekční kontrola (Bayer, 2018). Naopak při generální opravě podvozku, která probíhá u hlavního podvozku každých 10 let nebo po 21 000 cyklech (u Boeing business jet je to 21 000 cyklů nebo 12 let) a u předového podvozku po 18 000 cyklech nebo 10 letech (u Boeing business jet je to 18 000 cyklů nebo 12 let), dochází k výměně veškerých ložisek a jejich pouzder (Company, 2010). Provozní opotřebení pouzdra ložiska lze detailně vidět na obrázku č. 4 (nahore) a nové pouzdro na obr. č. 5 (dole).



Obrázek 4 Provozně opotřebené pouzdro ložiska (Archiv CSAT, 2024)



Obrázek 5 Nové pouzdro ložiska (Archiv CSAT, 2024)

## 4.2 Mechanické opotřebení

Mechanické opotřebení leteckých dílů, potažmo celého letadla je dáno vlivem podmínek kolem letounu. Jedná se zejména o poškození nátěru a snížení korozní odolnosti vlivem odlétávajících hrubých nečistot z povrchu plochy (šterk, drobné kamínky), případně střet s tzv. Foreign Object Debris (FOD), což ve volném překladu znamená nežádoucí cizí předmět na ploše letiště. V případě FOD se může jednat o část letounu např. šroub, matice ale i jiné cizí předměty jako technické vybavení, nářadí, stavební materiál, zavazadla, úlomky ploch a jiné. Při střetu letounu s některým z těchto předmětů může dojít až k letecké nehodě, jako v případě letu Air France 4590, během kterého letoun typu Concorde přejel při vzletu titanový úlomek z předním vzlétajícím letounu, který způsobil výbuch pneumatiky, což mělo za následek rozlétnutí gumy směrem do pláště nádrže na křídle. Vlivem poškození potahu došlo k požáru a následné rozsáhlé poškození vyústilo v pád letounu Concorde, kde zahynulo 109 osob (Federal Aviation Administration, 2022).

Dalším typem mechanického poškození především podvozku, může být poškození od letištní techniky. Příkladem toho může být vytlačování letadla ze stojánky, tzv. pushback, při kterém je letadlo vytlačeno za pomoci speciálního vozidla s ojí nebo speciálním zdvihacím mechanismem ze stojánky na pojezdovou dráhu. Během tohoto pohybu, může vlivem špatného natočení dojít ke smeknutí oje, či zvedacího mechanismu což způsobí vyvrácení a následně dojde k poškození podvozkové nohy, případně potahu v spodní části trupu. Poškození předového podvozku způsobeno během vytlačování je na obrázku č. 6.



Obrázek 6 Kolize pushbacku s letounem (Le Bureau d'enquêtes et d'analyses pour la sécurité de l'aviation civile, 2016)

### 4.3 Koroze

Bayer (2018) uvádí: „Korozi rozumíme postupnou degradaci materiálu součástí vlivem chemických, galvanických a mechanických vlivů, případně jejich spolupůsobení mající za následek úbytek nosného průřezu součástí.“ U podvozku se koroze týká spíše kovových materiálů, ale na celém letounu lze nalézt také řadu dílů z jiných materiálů u kterých se koroze též vyskytuje. V provozu se setkáme s velkou řadou korozních prostředí a mezi ty nejvýznamnější patří vodné roztoky solí (dešťová voda), kyseliny a zásady.

Korozi lze rozdělit na několik druhů: (Bayer, 2018)

- **Crevice – Koroze v konstrukčních stycích**

Koroze vznikající na styčných plochách konstrukčních prvků vlivem poškození povrchové ochrany. Toto poškození má za následek proniknutí vlhkosti a další šíření koroze.

- **Galvanic – Galvanická koroze**

Galvanická koroze na styku dvou a více odlišných součástí. Riziko se vyskytuje všude, kde jsou ve vzájemném vodivém kontaktu dva nebo více prvků s různým galvanickým potenciálem. Nejčastěji se jedná o spojovací prvky odlišných materiálů (ocelový šroub do hliníkové slitiny apod.)

- **Integranular – Mezikrystalická koroze**

Mezikrystalická koroze šířící se po hranicích zrn. Zejména u slitin, kde došlo ke změně struktury (svařování, tváření, stárnutí). Může spustit a urychlit celkovou korozi, která postupuje až do spodních vrstev zrn. Často je tato koroze způsobena pouhým vrypem a bývá označována za jednu z nejnebezpečnějších.

- **Exfoliation – Lístková koroze**

Lístková koroze je forma výše uvedené Mezikrystalické koroze, která hrozí u válcovaných polotovarů, při nichž došlo k vyválnování zrn do plochých a na sebe navazujících útvarů. Při obrábění takového materiálu, dojde k seříznutí zrna a tím vzniká přístup vlhka mezi jednotlivé ploché útvary (lístky), kde už se pak tvoří samotná koroze.

- **Transgranular – Transkrystalická koroze**

Transkrystalická koroze se šíří skrz zrna materiálu. Nejčastěji lze tento typ poškození nalézt u hořčíkových slitin. Koroze vytvoří kapiláru, ve které se pak udržuje vlhkost a trhlinka prostupuje skrze materiál skrytě.



- **Pitting – Bodová koroze**

Bodová koroze se velmi často vyskytuje u plátovaného hliníku. Vyvíjí se od velmi malých povrchových poškození jako vryp či škrábanec. Poté následně postupuje do materiálu, kde tvoří větší vlhkost a začíná proces drolení vnitřních zrn. Poškození je viditelné až v konečné fázi, kdy se na materiálu začnou objevovat nafouklá místa, která indikují rozsah koroze.

- **Filiform – Povrchová plošná koroze**

Povrchová plošná koroze (nitková koroze) nese název díky svému nitkovému původu, který pak přechází spojením nitek do větších a souvislých ploch. Iniciační a následné šíření se odehrává pod nátěrem, při kontaminaci dostatečně velké plochy dojde k poškození nátěru a trhlině, ze které se vysype korozní produkt. Rozptýlením této látky do okolí hrozí další šíření koroze (Bayer, 2018). Tento typ koroze je znázorněn na obrázku č.7.



Obrázek 7 Povrchová koroze duralového plechu (Archiv CSAT, 2024)

- **Fretting – Koroze třením**

Koroze třením je druhem mechanické koroze, kdy dochází při pružení materiálu a třením o sebe, k uvolnění velmi malých částic kovových pilin a tím k otěru – obrusu. Čím déle tento jev trvá, tím větší vzniká opotřebení. U dílů, kde není možné využít povrchovou ochranu z důvodu elektrické vodivosti (kontrolní kryty palivových nádrží), je funkční řešení použití maziv, či speciálních třecích vložek.

- **Microbiological – Mikrobiologická koroze**

Mikrobiologickou korozi lze na letounu nalézt v palivových nádržích, kdy za určitých okolností vlivem kondenzátu vody z chladných stěn mohou vznikat kolonie mikroorganismů, které ulpívají na vnitřním nátěru nádrží. Odstranění se řeší přidáním speciálních aditiv, majících za cíl hubit tyto mikroorganismy a zabraňovat jejich dalšímu množení. Tento problém koroze se nejčastěji vyskytuje v tropických oblastech, kde je vysoká vlhkost a teplota.

Pro předcházení vzniku koroze se využívá technologie povrchových úprav daného materiálu (Bayer, 2018). Toto téma je rozebráno v následující kapitole č.5.

## 5 STANDARTNÍ POVRCHOVÉ ÚPRAVY

V této kapitole nalezneme představení standartně využívaných povrchových úprav materiálu. Pojmeme standartní, rozumíme již zavedené, léty odzkoušené a běžně využívané technologie při údržbě nebo opravách letecké techniky. Povrchová ochrana materiálu má za cíl chránit materiál před vnějšími vlivy, jako například mechanické poškození, vlivy vnějšího prostředí, koroze, či jen zlepšení vlastností samotného materiálu.

### 5.1 Mechanické povrchové úpravy

Mechanické úpravy mají za cíl opracovat součást na finální rozměr o předem stanovené drsnosti a jakosti povrchu. Dále je možné za pomoci této metody odstranit vady samotného materiálu. Po mechanických úpravách zpravidla nastává další ochrana materiálu (Řasa, 2000).

#### 5.1.1 Obrábění

Pojem obrábění znamená technologický proces, při kterém postupným odebíráním částic materiálu z obráběného dílu dochází k jeho tvarování, docílení rozměru a jakosti povrchu. Obrábění můžeme rozdělit na ruční a strojní, dále pak dle charakteristických znaků:

- Obrábění nástroji s definovanou geometrií (soustružení, frézování, vrtání...)
- Obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií (broušení, honování, lapování, či jiné dokončovací práce)
- Obrábění nekonvenčními metodami (elektroerozivní, laser, chemické, ultrazvuk...)
- Úpravy již obrobených ploch (leštění, válečkování)

K ručnímu obrábění, jak již z názvu vyplývá, se využívá ručního náradí. Může se jednat jak o jednouché náradí typu pilník, pilka, závitník. Mimo toho lze používat také elektricky, častěji ale pneumaticky poháněné nástroje jako bruska nebo vrtačka.

- Soustruh – otáčí se obrobek, nástroj (nůž) obrábí, stroj stojí
- Frézka – otáčí se nástroj (fréza), který obrábí. Obrobek stojí, stroj posouvá nástroj

Strojní obrábění pak probíhá na specializovaných pracovištích se stroji k tomu určenými. Při generálních opravách podvozku se jedná zejména o soustružení, frézování a broušení. V letectví, kde je bezpečnost na prvním místě, se u těchto metod i přes to, že jsou hojně využívané, se klade velký důraz na kontrolu průběhu. Hlavním důvodem nedůvěry v tuto technologii je riziko přehřátí obráběné součásti vlivem špatného chlazení, či nevhodně zvolených rychlostí otáček stroje nebo materiálu. Toto lokální přehřátí materiálu má za následek špatné obrobení, oslabení a změnu mechanických vlastností materiálu a také větší

opotřebení samotného nástroje. Chlazení a mazání během obrábění je zajištěno za pomoci speciálních vodních roztoků, olejů nebo emulzí (Řasa, 2000).

Každá součást, která prošla procesem obrábění je kontrolována leptáním za pomoci roztoku Nitalu. Touto směsí kyseliny dusičné a alkoholu se daný díl polévá a při kontaktu s lokálně přehřátým místem dojde k ztmavení dané části. Celý proces leptání Nitalu spočívá v chemické reakci alkoholu, který se na opálené ploše rychleji vypařuje a tím vznikne tmavá skvrna (Indiana Precision Grinding, 2020).

### **5.1.2 Tryskání**

Další variantou mechanické úpravy povrchu je tryskání. Tato technologie funguje na principu urychlování velmi malých částic. Tryskání lze rozdělit na mechanické a tlakové.

K tlakovému tryskání je zapotřebí speciální zařízení, často pneumaticky poháněno. V tomto zařízení se nachází zásoba malých částic (kov, písek), které jsou unášeny vzduchovou pistolí velkou rychlostí na povrch tryskaného materiálu. Výsledkem tohoto procesu je odstranění nečistot, nátěru, koroze, zdrsnění a vytvrzení povrchu nebo také zbavení se ostrých hran na tenkých plechách.

Pro tryskání se používá široká řada materiálů. Mezi ty hlavní se řadí litiny, korund, oceli, různé křemičité písky či struska. Použití těchto materiálů docílíme výsledku požadovaného zdrsnění povrchu nebo odstranění starého nátěru (Red, 2016).

## **5.2 Chemické povrchové úpravy**

Chemické úpravy povrchu materiálu slouží především k očištění a přípravě povrchu základního materiálu před dalšími pracemi. Nečistoty můžeme rozdělit na ulpělé, tedy ty, které jsou na povrchu udržovány vlastní silou (prach, kovové špony, zemina atd.) nebo na nečistoty chemicky vázané, které vznikají na bázi přeměn samotného kovu. V tomto případě se nejčastěji jedná o povrchovou korozi.

V následující kapitole bude podrobně rozebrána galvanická úprava povrchu. Pro tuto technologii je velmi důležité dokonale očistit povrch základního materiálu. Pokud by tak nebylo učiněno, galvanické povlaky nepřilnou na základní materiál dokonale přesně, budou vytvářet pórovitý a zvlňný povrch, případně bránit vytvoření povlaku.

Odmašťování je dalším druhem chemických úprav. Jde o proces, při němž se v alkalických roztocích a rozpouštědlech odstraňují mastnoty nebo jiné nečistoty. K odstraňování mastnot z povrchu, se dnes také velmi často využívají ultrazvukové čističky (Trojánek, 1963).

### 5.3 Elektrochemické pokovování

Galvanické nebo také elektrochemické pokovování je proces na základě elektrolýzy. Funguje na principu působením elektrické energie v elektrolytu a upravuje povrch materiálu. Procesy tohoto druhu pokovování můžeme rozdělit na dvě skupiny:

- Vytváření kovových či nekovových povlaků, díky nimž získává povrch materiálu lepší odolnost vůči korozi, mechanickému poškození a také lepší vzhled.
- Elektrolytický úběr materiálu (leštění, či moření)

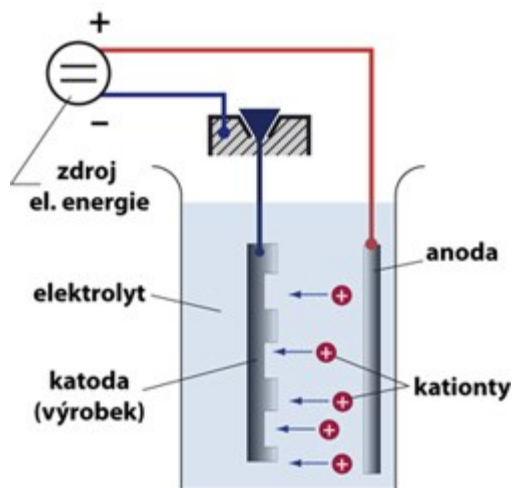
Galvanické procesy jsou založeny na principu vylučování kovů během elektrolýzy vodivých vodních roztoků solí, při působení stejnosměrného napětí na dvě elektrody ponořené do těchto roztoků. Jedna z elektrod (anoda), bývá rozpustná a jedná se o pokovovací materiál. Druhá z elektrod (katoda) a jedná se o materiál, který je připraven k pokovení. Ionty kovu, které se rozpustily z anody, se vylučují na katodě. Koncentrace elektrolytu se nemění, protože množství vyloučeného kovu je okamžitě nahrazeno odpovídajícím množstvím kovu, který se rozpustil z anody. Tento kov není jediným, který se z vylučuje, další látkou, která se při galvanických procesech vylučuje a přenáší se do pokoveného materiálu je vodík, který jak již bylo zmíněno zapříčiňuje u vysokopevnostních ocelí vodíkovou křehkost. Proto je nutné, jakoukoliv vysokopevnostní ocel po procesu galvanizace odvodíkovat. Vzorec (1) slouží k výpočtu hmotnosti látky, která se vyloučí na elektrodě během elektrolýzy a je dán jako:

$$m = \frac{I \cdot t \cdot A_r}{z \cdot F} \quad (1)$$

Kde:

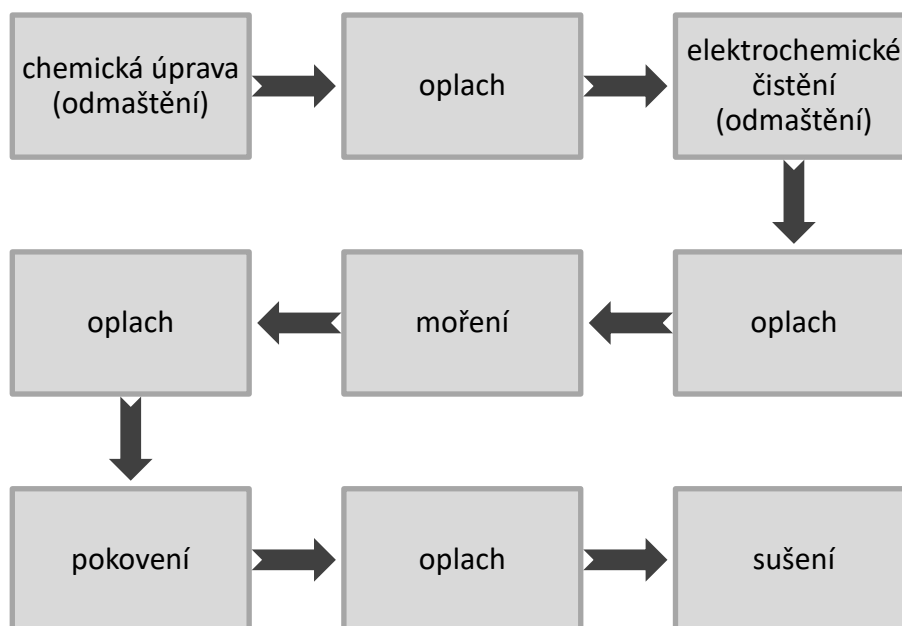
- (m) je hmotnost látky vyloučené na elektrodě (gramy).
- (I) je elektrický proud (Amper).
- (t) je čas elektrolýzy (sekunda).
- ( $A_r$ ) je atomová hmotnost látky (gram/ mol).
- (z) je valenční faktor (počet elektronů přenesených během elektrolýzy).
- (F) je Faradayova konstanta ( $96485,332 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

Příprava lázní pro elektrochemické pokovování je velice náročná, roztok musí být stabilní, mít přesné chemické složení, teplotu a hodnotu pH. Galvanické lázně dělíme dle pH na kyselé a alkalické, dále se tyto lázně dělí na dle druhu sloučeniny vylučovaného kovu na: síranové, chloridové, kyanidové aj. (Trojánek, 1963). Princip elektrolýzy je znázorněn na obrázku č. 8.



Obrázek 8 Proces elektrolýzy (Galvanovna Omega, c2005-2007)

Celý proces od přijetí materiálu, až po finální úpravu je časově i finančně velmi náročný a vyžaduje zkušený personál. Kvalita výsledného povrchu materiálu závisí na dodržení všech technologických postupů a podmínek (Galvanovna Omega, c2005-2007). Vyobrazení postupu při galvanování je na následujícím obrázku č. 9.



Obrázek 9 Schéma procesních postupů při galvanických pracích (Galvanovna Omega, c2005-2007)

### 5.3.1 Chemické niklování

Takzvané niklování materiálu je jeden ze způsobů úpravy povrchu materiálu. Nikl (Ni) je šedo-bílý, kujný a tažný kov. Je jedním z nejčastěji se vyskytujícím prvkem v zemské půdě. Teplota tání Ni je 1453 °C a pevnost při běžných podmínkách se pohybuje okolo 640–700 MPa (Přírodovědci.cz, 2015).

Mezi jeho klíčové vlastnosti patří odolnost vůči atmosférickým vlivům a přítomnosti vody, dále pak také při dostatečné vrstvě pokovení odolává velmi dobře korozi. Vysoká pevnost souvisí také s velmi dobrou otěruvzdorností, proto se nikl používá zejména pro vnitřní válce podvozkových nohou, které slouží jako tlumič a dochází zde k neustálým otěrům při pohybu letounu po zemi. Další velmi ceněnou vlastností je jeho vzhled, který může být lesklý, až pololesklý, a to z důvodu téměř bezporézního povrchu. Díky tomu lze provádět niklování po vrstvách. Velikost jedné vrstvy se pohybuje od 5 do 25  $\mu\text{m}$  (BÁRTA A CIHLÁŘ, c2009).

Po procesu niklování, přichází na řadu obrobení broušením čímž vznikne dokonale hladký a rovný povrch. Pokud by zůstal povrch po broušení pórovitý, mohlo by při následném procesu chromování dojít ke kopírování nerovností a v chromové vrstvě by tak docházelo k tvorbě dutin a prasklin (Trojánec, 1963).

Jako každý technologický proces má i niklování svá úskalí. Jedná se zejména o velkou citlivost na znečištění povrchu materiálu nebo znečištění samotné elektrolytické lázně. Proto se před každým čištěním provádí oplach a v prostoru galvanovny se dbá zvýšené čistoty. Za další riziko lze považovat hrozbu vodíku u vysokopevnostních ocelí. Proces odvodíkování je striktně hlídán. Odvodíkování probíhá v peci při teplotě okolo 200 °C po dobu 23h (Czech Airlines Technics, 2022).

### 5.3.2 Chromování

Technologie chromování se využívá jako vrchní a z velké části také jako finální vrstva ochrany základního materiálu. Chrom (Cr) lze charakterizovat jako bílý, lesklý a křehký elementární kov, který zaujímá největší tvrdost ze všech známých kovů. Dle Mohsovy stupnice dosahuje jeho tvrdost hodnoty 8,5, což lze přirovnat tvrdosti okolo 8500–10000 MPa. Teplota tavení se pohybuje při 1890 °C a tím pádem také odolává vysokým teplotám, které se mohou pohybovat až k 500 °C. Chrom je vysoce odolný vůči korozi, a to i ve vlhkém prostředí. Díky oxidaci chromu dochází k pasivaci, při které se na povrchu vytváří ochranná vrstva oxidu  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Chrom je materiálem velmi dobře smáčivým a tím pádem odpuzuje ze svého povrchu jak vodu, tak i nečistoty a mastnoty. Odstranění chromové vrstvy je technologicky náročné. Pokud je chrom částečně znečištěn, lze jej rozpustit v kyselině sírové. Pokud je na povrchu pouze chemicky čistý chrom, jeho odstranění je možné provést pouze v kyselině chlorovodíkové. Při tomto odstraňování se vlivem reakce, stává výsledným produktem chlorid chromnatý a vodík, viz vzorec č. 2.



Existuje více druhů (mocností) sloučenin Cr. Nejvíce se vyskytuje  $\text{Cr}^{3+}$  (trojmocný), který je zároveň nezbytnou živinou pro člověka i rostliny. Mezi nestálé mocnosti se řadí  $\text{Cr}^{2+}$  (dvoumocný) a  $\text{Cr}^{6+}$  (šestimocný) (Tabulka chrom, c2009-2017).

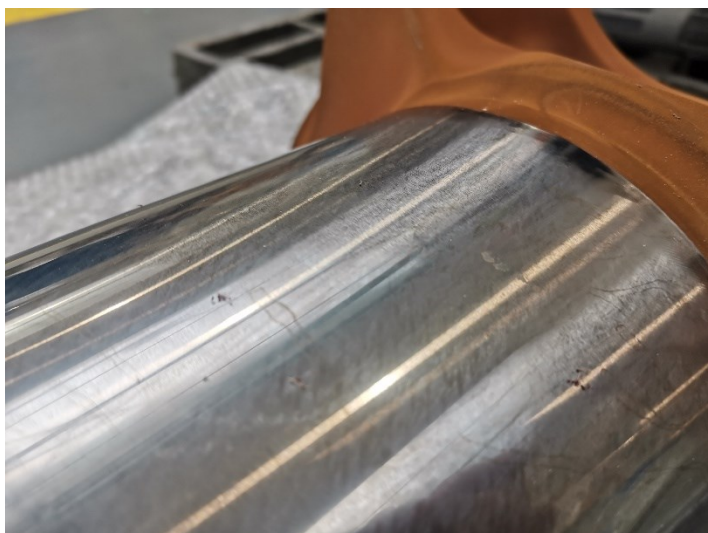
Šestimocný chrom ( $\text{Cr}^{6+}$ ) na rozdíl od trojmocného je toxický a řadí se na seznam karcinogenů. Jeho výskyt v přírodě je velmi vzácný, a proto se vytváří uměle. K vystavení lidského těla dochází nejčastěji v pracovním prostředí, vdechováním prachu, či koncentrovaného vzduchu, kontaktu roztoky a nečistotami obsahující  $\text{Cr}^{6+}$  s pokožkou. Zdraví člověka při kontaktu s touto látkou závisí na času expozice, koncentraci a odolnosti daného člověka.

Pro minimalizaci kontaktu s  $\text{Cr}^{6+}$  je důležité dbát všech bezpečnostních předpisů a požadavků, zejména na odvětrávání prostor, nošení bezpečnostního oděvu a respirátoru, dodržování hygienických norem a minimalizace času, kterou zaměstnanec stráví v nebezpečném prostředí (HBM4EU, 2019).

Tvrdé chromování je využito v místech, které vyžadují tvrdost, pevnost a otěruvzdornost. U leteckého podvozku se jedná o pokovení ocelových čepů, pístnic, matic a jiných vysoce mechanicky namáhaných součástí. Jak již bylo zmíněno v kapitole Niklování, důležitá je správná příprava povrchu. To znamená, že povrch musí být před procesem chromování dokonale hladký, což se zajišťuje jemným broušením nebo lapováním. Při nanesení chromového povlaku je možné docílit finálního rozměru pouze u velmi tenkých povlaků. U leteckých podvozků, kde vrstvy dosahovat až 400  $\mu\text{m}$ , se nanáší silnější vrstva, než je požadovaná, která se pak pomocí jemného broušení obrobí na finální hladký povrch. Touto technologií, lze zvýšit životnost součásti až 10x (Trojáněk, 1963).

I tato technologie vykazuje své negativní stránky. Jedná se primárně o toxicitu a nebezpečí při práci s chromem. Dále pak stejně jako u všech elektrochemických procesů musí dojít k odvodňování a odstranění pnutí u vysokopevnostních ocelí. To probíhá při teplotě 190 °C po dobu alespoň 12h (Czech Airlines Technics, 2019). Na obrázku č. 10. je vidět povrch vnitřního válce podvozkové hlavní nohy pokovením tvrdochromem.





Obrázek 10 Chromový povlak vnitřního válce (Archiv CSAT, 2024)

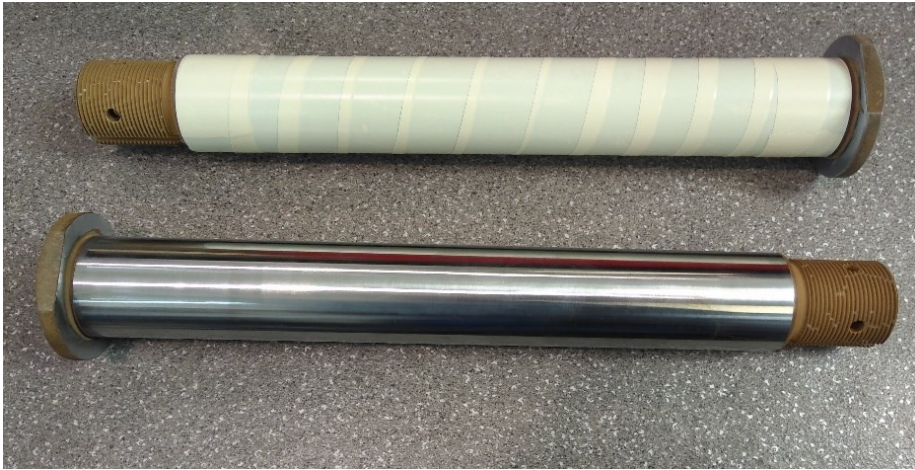
### 5.3.3 Kadmiování

Kadmium (Cd) je vzácně se vyskytující houževnatý těžký kov, mající vynikající antikoroziční vlastnosti. Tento kov je stejně jako  $\text{Cr}^{6+}$  uveden na seznamu karcinogenních látek. Pro člověka je riziko styku s kadmiiem vdechnutí jeho prachu či pozření. Následky jsou pomalé dlouhodobé, Cd napadá zejména ledviny, kostní tkáň, imunitní a kardiovaskulární systém. Sloučeniny kadmia, stejně tak jako např. rtuť nebo olovo vytvářejí organické sloučeniny. Z důvodu vysoké toxicity byl tento prvek zařazen pod směrnici REACH. Tato směrnice, její vznik, důvody a aplikovatelnost bude více popsána v kapitole č. 6. Specifický emisní limit pro Cd je Zákonem o ochraně ovzduší (201/2012 Sb.) stanoven na  $0,05 \text{ mg/m}^3$ . Cd patří mezi látky zjišťované primárně jednorázovým měřením (Petrlík & Válek, 2022).

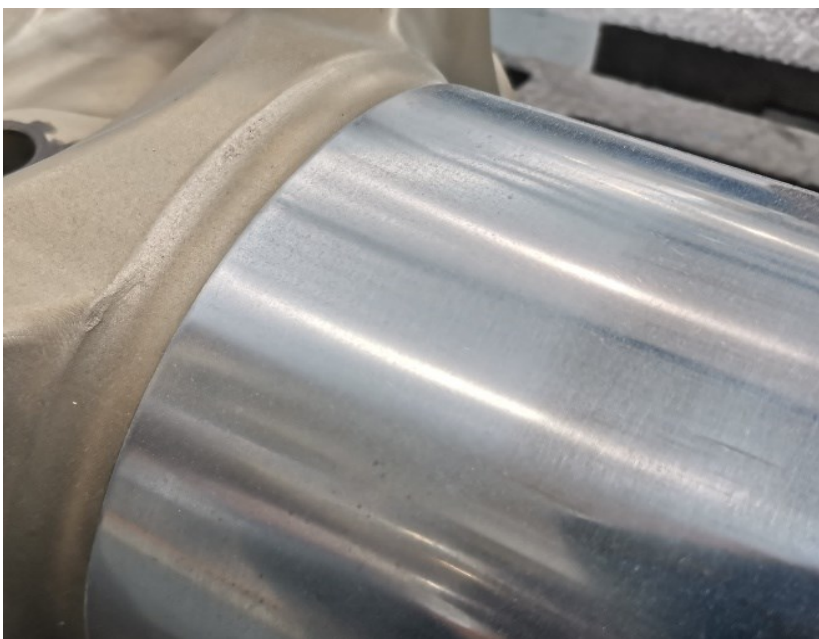
Proces kadmiování je velmi podobný jako předchozí dva způsoby povrchových uprav. Díl se očistí a v případě potřeby se část, která není určena ke kadmiování zalepí maskovací páskou (předmontáž dílu do kadmia). V lázni se rozpouští kyanid sodný, hydroxid sodný a kademnatá sůl. Dále se přidávají leskutvorné přísady, které byly předpřipraveny smícháním v teplé vodě. Velký pozor se také musí dát na čistotu kadmiové lázně. Pokud není lázeň dokonale čistá dojde ke špatnému přilnutí, či vytvoření barevných stop a proces se musí opakovat. V případě znečištěné lázně se lázeň musí elektrolyzovat 6V do doby, než se dojde k úplnému vyčištění (Trojánek, 1963).

Pro zlepšení kvality kadmia se využívá ještě procesu chromátování. Jedná se dodatečný proces oxidace, čímž vznikne pasivní ochranná vrstva. Kadmium se využívá zejména pro vysokopevnostní oceli AISI 4340M (viz. kap. 3.2), které jsou na letadlovém podvozku zastoupeny ve velké míře, ale jsou velmi náchylné na korozi. V současné době zatím nebylo

zjištěno lepších výsledků ochrany před korozi, než je využitím kadmia (Fredericks, 2023). Na obrázku č. 11 je zobrazen čep před a po tzv. maskování. Na obrázku č.12 je pak vnitřní válec podvozkové hlavní nohy s povlakem kadmia (část vlevo-žlutá) a chromu (část vpravo-stříbrná).



Obrázek 11 Čep před a po nanesení maskovací pásky před kadmiováním (Archiv CSAT, 2024)



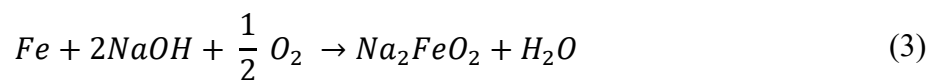
Obrázek 12 Vnitřní válec s povlakem Cd (část vlevo) a povlakem Cr (část vpravo) (Archiv CSAT, 2024)

#### 5.4 Anorganické povlaky

Využití nekovových anorganických povlaků, spočívá stejně jako předchozí způsoby povrchových ochranných primárně k ochraně proti korozi a dále pak pro lepší přilnutí např. nátěrových hmot. Pro využití při opravách leteckých podvozků se využívá konverzních vrstev. Hlavní využití těchto povlaků je:

- Zvýšit otěruvzdornost
- Zlepšit korozní odolnost
- Zajistit elektroizolační vlastnost materiálu
- K vylepšení estetického dojmu (barvení kovů) – omezené použití v letectví

Tyto vrstvy vznikají buďto chemicky nebo elektrochemicky při reakci kovu s prostředím. Barvení, např. ocelí probíhá v lázních. Pro tzv. modření oceli se používá solná lázeň dusičnanová, kdy dochází k ohřátí na 280 °C. Brynýrování neboli černění nízkolegovaných ocelí je proces kdy reakcí železa, hydroxidu sodného a železnaté soli dochází při 130 °C k oxidaci, díky které získá ocel černou až tmavě hnědou barvu. Tento jev popisuje vzorec č. 3.



Anodická oxidace je dalším druhem anorganických povlaků. Jedná se o úpravu povrchu hliníkových materiálů – eloxování, které probíhá v kyselině sírové za působení stejnosměrného proudu. Proces probíhá v lázni, s koncentrací od 15 do 27 %, při napětí okolo 15V, proudové hustotě 1 až 2 A\*dm<sup>2</sup> a běžné pokojové teplotě. Pro dosažení průměrné tloušťky vrstvy (0,025 mm) se čas procesu pohybuje od 20 do 30 minut.

- Chromátování je nejvíce rozšířeným druhem pasivace ocelí, ale i neželezných kovů a slouží jako mezivrstva pro lepší přilnutí organických povlaků (barev), ale také jako konečná vrstva pro korozní prostředí. Lázně pro chromátování mohou být alkalické i kyselé, přičemž se více využívají právě kyselé. Hodnota pH lázní se pohybuje od 1 do 2,5 a hlavní složku tvoří kyselina chromová a komplexotvorné látky. Zde se též využívá dříve zmíněný šestimocný chrom, který je toxický. Tloušťka chromátové vrstvy se pohybuje v rozmezí 0.1–0.5 μm (Kudláček, 2023).

## 5.5 Organické povlaky

Organické povlaky, známé též jako nátěrové hmoty, jsou nejvíce rozšířeným a neekonomičtějším druhem protikorozní ochrany materiálu. U leteckých podvozků se jedná až o 70 % povrchu chráněno touto technologií. To je způsobeno právě kvalitou ochrany, cenou a relativní snadností vytváření povlaků.

Nátěr je definován, jako souvislý povlak požadovaných vlastností vzniklý nanesením a zaschnutím jedné nebo několika nátěrových vrstev na upravovaném povrchu (Kudláček, 2023).

Organické povlaky chrání materiál:

- Bariérovým efektem
- Inhibičním efektem
- Specifickými vlastnostmi (estetický, antivibrační, olejuvzdorný, vodivý aj.)

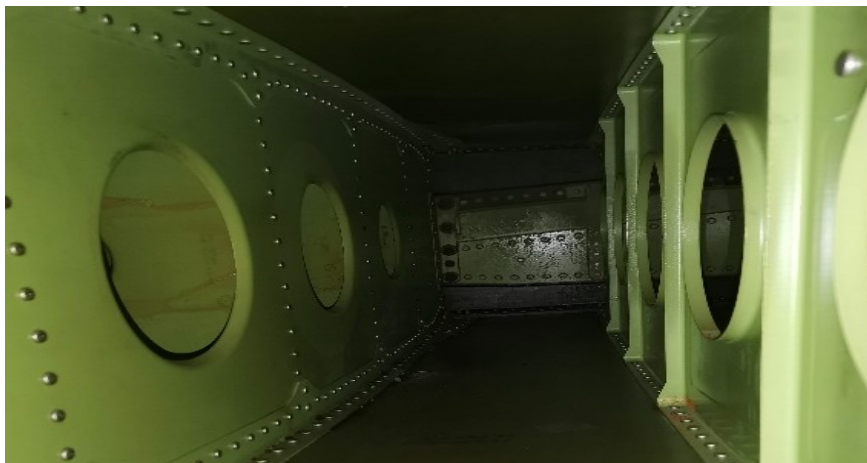
Jako základní prvky nátěrových hmot označujeme: barvy (base), tužidla (hardener) a ředidla (thinner). Důležité je zajistit také správné ředění. (Kudláček, 2023).

Před aplikací nátěrové hmoty platí v případě ocelí mít dostatečně očištěn povrch materiálu. Pro hliníkové slitiny se mimo samotné očištění používá povrchových ochran jako elox, alodin nebo plátování čistým hliníkem. Nátěrový systém se skládá ze tří vrstev:

- Wash primer
- Základová vrstva (primer)
- Svrchní nátěr (top coat)

Wash primer je první ze tří vrstev, která má hlavní cíl zaplnění pórů povrchu materiál, je transparentní a lze tuto vrstvu vynechat v případě, že materiál má povrchovou úpravu jako např. elox či kadmium (Bayer, 2018).

Další, vrstvou je základová vrstva neboli primer. Ten je nanášen ve velmi tenké vrstvě. V případě nanesení tlusté vrstvy by mohlo dojít k popraskání. Také je důležité správně ředění pomocí kalibrovacího kelímku. Výrobce častokrát doporučuje provést test, kdy skrz kalibrovaný otvor v kelímku změříme čas výtoku, pokud je čas delší, než je stanoveno v manuálu je třeba barvu doředit. Hlavní cíl primeru je ochranu proti působení vlhkosti a tím pádem i korozi. Ve vnitřní konstrukci letadel je tato vrstva poslední a top coat se již nevyužívá (Bayer, 2018). Na obrázku č. 13 je vyobrazen vnitřní prostor horizontálního stabilizátoru s nanesenou základovou vrstvou.



Obrázek 13 Základová vrstva uvnitř horizontálního stabilizátoru Boeingu 737 (Archiv CSAT, 2024)

Třetí a poslední vrstvou se označuje jako vrchní barevný nátěr, v letectví častěji jako top coat nebo finish, který se nanáší vždy na primer. Je to také nejvíce silná vrstva celého nátěru, a proto velmi dobře chrání před vlhkostí, UV zářením, proti mechanickým vlivům jako jsou otěry a dále nese samotný pigment. Barevný odstín je definován dle číselníku Boeing Aerospace Company (BAC) (Bayer, 2018).

Nátěrové hmoty lze dělit na:

- Polyuretanové, které jsou pružné, měkké a mají dobrou chemickou odolnost
- Epoxidové, které jsou naopak tvrdší, křehčí, ale mají mnohonásobně lepší chemickou odolnost

Oba tyto druhy nátěrových hmot jsou dvousložkové (base a hardener).

Nanášení nátěrových hmot lze provádět několika způsoby. Tím nejlevnějším je za pomoci štětce. Touto metodou nelze zajistit přesnou tloušťku nanášené barvy a v letectví se používá jen pro lehké opravy svrchního nátěru.

Stříkání je proces nanášení nátěrového systému pomocí tryskání ze speciální pistole.

- Vysokotlaká vzduchová pistol
- Tlaková bez-vzduchová pistol (airless)
- Elektrostatická tlaková bez-vzduchová pistol (elektrostatický airless)

Poslední fází je schnutí, které se děje ve speciálně oddělené místnosti s odvětráváním, stabilní teplotou a vlhkostí. V první fázi začíná schnout povrch (tack-free čas), dále vytvrzuje celý nátěr a je možné nanášet v případě potřeby další vsrtvy. Po uplynutí této doby se na povrch nátěru začne vylučovat tuhý voskový film, sloužící k ochraně nátěru, na který již nelze aplikovat další barvy, či maskovací pásy (Bayer, 2018).

## 6 ENVIROMENTÁLNÍ ASPEKTY S OHLEDEM NA ZMĚNU TECHNOLOGIÍ V PRŮMYSLU

Technologie skrz všemi průmysly se stále vyvíjí a má tak za následek významný vliv změn na životní prostředí. Změny mohou být jak pozitivní, jako například snižování emisí skleníkových plynů, ale i negativní, související především s větším počtem chemického odpadu při technologických procesech nebo následným znečištěním půdy při transportu, či skladováním různých látek. Z toho důvodu byla představena Mezinárodní organizací pro normalizaci (ISO), norma ISO 14001, která pojednává a stanovuje požadavky na systém enviromentálního managmetu (EMS). Cílem této normy je poskytnutí organizacím systematický plán pro ochranu životního prostředí a informovat o nových, stále se vyvíjejících trendech v oblasti enviromentální politiky.

Základem EMS je koncepce modelu Plánuj-Dělej-Kontroluj-Jednej (PDCA), jenž představuje proces pro neustále zlepšování kvalit v segmentu ochrany životního prostředí. Celý model PDCA lze popsat jako:

- Plánuj – stanovení cílů a procesů, potřebných pro dosažení výsledků v souladu enviromentální politikou organizace či společnosti.
- Dělej – implementace procesů stylem, kterým byli plánovány
- Kontroluj – monitoring a měření procesů, závazků, cílů a kritérií a podávání informačních zpráv o průběžných výsledcích
- Jednej – Nutnost přijímat opatření pro neustálé zlepšování

Požadavky obsažené v normě ISO 14001 jsou rozebrány na vysoké úrovni a zajišťují velmi dobré porozumění pro uživatele, kteří implementují normy ISO do systému managmetu (Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016).

V souvislosti různých druhů pojmů, užívaných při enviromentálních vlivech je zmiňován jeden velmi důležitý a tím je Enviromentální aspekt, který dle ISO 14001 říká, že je to „*prvek činností organizace nebo výrobků či služeb, který působí nebo může působit na životní prostředí*“.

V rámci EMS musí organizace určit, které enviromentální aspekty může řídit, a naopak které může ovládat. Při určování aspektů je důležité brát v potaz změny a potenciaální vývoj postupů a činností a dále pak nestandardní a potenciaálně předvídatelné havarijní situace. Díky tomu lze stanovit kritéria, určit významná rizika a v návaznosti plánovat své enviromentální cíle, které musejí být měřitelné, monitorované, aktualizované a sdělovány, a to vše v souladu

s enviromentální politikou celé organizace. Jako nejčastější příklady enviromentálních aspektů se uvádějí:

- Emise do ovzduší
- Vypouštění do vody
- Kontaminace půdy
- Spotřeba surovin a přírodních zdrojů
- Spotřeba a uvolňování energie
- Produkce odpadů
- Spotřeba půdy

Do enviromentálních aspektů organizace se mimo výše uvedených počítají také služby třetích stran, které mají vliv na činnost organizace (Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016).

System hodnocení enviromentálních aspektů záleží na mnoho faktorech a mezi ty nejvíce kritické se řadí:

- Právní požadavky
- Společenské požadavky
- Nepříznivý vliv na životní prostředí (běžný stav / událost)
- Náklady na životní prostředí
- Předcházející a navazující procesy
- Spotřeba zdrojů

Jako hodnocení se pak používá stupnice A, B, C, přičemž A je velmi problematická, B značí střední problematická a C znamená bezproblémovost (Kaiser, 2023).

## 6.1 REACH

Evropská unie s ohledem na zlepšení ochrany životního prostředí a lidského zdraví vydala v roce 2006 nařízení o registraci, hodnocení, povolování a omezování chemických látek (REACH), o zřízení Evropské agentury pro chemické látky, o změně směrnice 1999/45/ES a o zrušení nařízení Rady (EHS) č. 793/93. Toto nařízení si klade za cíl zlepšení ochrany zdraví a životního prostředí při využívání všech chemických látek v průmyslu, ale i domácnostech, a dále pak v předmětech denního používání jako jsou oděvy, spotřebiče, nábytek aj. Vznikla také mimo jiné Evropská agentura pro chemické látky (ECHA), které mají povinnost organizace prokázat, jakým způsobem lze látku bezpečně používat a jak informovat uživatele o rizicích dané látky (ECHA).

Zkratku REACH lze vysvětlit následovně:

- Registrace

Společnosti, které vyrábějí nebo dovážejí více než tunu látky za rok, musejí shromažďovat informace o použití a vlastnostech dané látky, dále pak musí posuzovat rizika která souvisí s danou látkou. Vše je nutné hlásit Evropské agentuře pro chemické látky za pomoci registračního formuláře, u kterého platí pravidlo kdy jedna látka = jedna registrace.

- Evaluace (hodnocení)

Po registraci látky společnostmi agentura ECHA a členské státy přezkoumá, otestuje a vyhodnotí rizika související s používáním a zdali představuje případná rizika pro zdraví či životní prostředí. Hodnocení se zaměřuje na různé oblasti jako přezkoumání zkoušek předloženými žadateli, kontrola shody s dokumentací a výsledné hodnocení látek.

- Autorizace (povolování)

Cílem procesu povolování je zajistit postupné nahrazování látek vyvolávajících značné obavy (SVHC) za méně nebezpečné látky nebo technologie. Jako SVHC lze identifikovat látky s těmito nebezpečnými vlastnostmi:

- Látky splňující kritéria pro klasifikaci jako karcinogenní, mutagenní nebo toxické pro kategorie 1A nebo 1B podle nařízení CLP
- Látky označené jako perzistentní, bioakumulativní a toxické nebo vysoce perzistentní a vysoce bioakumulativní podle přílohy XIII nařízení REACH
- Individuálně posuzované látky, které vyvolávají stejné obavy jako látky mutagenní nebo toxické pro reprodukci nebo vysoce perzistentní a vysoce bioakumulativní (ECHA).

Seznam látek vzbuzujících mimořádné obavy, čítá k dnešnímu dni (8.5.2024) celkem 240 položek (ECHA, 2024)

- Omezení chemických látek

Společnost ECHA může se členskými státy omezit, či úplně zakázat prodej, distribuci a používání dané látky v případě nedostatečného prokázání bezpečnostních certifikátů, špatného značení nebo nedostatečného opatření. Omezení lze uvalit na jakoukoliv látku, včetně té, která nevyžaduje registraci například u látek vyrobených či dovezených v množství méně než tunu za rok (ECHA).



Na seznamu látek podléhajícím povolení, se ke květnu 2024 nachází celkem 59 položek. Mezi hlavní kritéria, za která je látka uvedena do tohoto seznamu jsou: karcinogennost, toxicita pro reprodukci, vlastnosti vyvolávající narušení činnosti endokrinního systému, látka je mutagenní, vysoce bioakumulativní nebo vysoce perzistentní (ECHA, 2023).

V příloze 14 (ANNEX XIV) k nařízení REACH nalezneme pro procesy generálních oprav podvozků důležité informace o omezení látek, které se využívají při galvanickém pokovování. Jedná se především o tyto látky dichroman sodný (karcinogenní, mutagenní, antireprodukční), chroman chromitý (karcinogenní), oxid chromitý (karcinogenní, mutagenní), Chroman strontnatý (karcinogenní) a Oktahydroxid pentazinčnatý chromanu (karcinogenní). Vzhledem k zařazení na seznam látek vyžadující povolení je pro společnosti vyrábějící či používající některou z těchto látek závazné zažádat o povolení před nejzazším možným datem. Jinak dané společnosti hrozí zákaz využívání dané látky (ECHA, 2023).

Pro výrobní, ale i údržbářské organizace v letectví je důležité zachování, či dokonce stále zvyšování kvality a z toho důvodu se jediným ekonomickým i provozním řešením náhrady za chrom, kadmium a jiné látky jeví použití metod HVOF – kterou lze nahradit procesem pokovení chromem a dále pak využití metody zinek-nikl, která je vhodná na záměnu pokovení kadmiiem. Mezi největší průkopníky těchto alternativních povrchových úprav se v leteckém průmyslu řadí Boeing, Rolls Royce, Lufthansa a Delta Airlines. Právě Lufthansa v uplynulých letech začala místo běžného pokovení chromem používat metodu HVOF, která je v současné době v průběhu ostrého testování na jejich letadlech. Do budoucna se uvažuje také o úplné náhradě využití chromu, právě za HVOF (Zahálka & Enžl, 2005).

## 7 ALTERNATIVNÍ A SPECIÁLNÍ POVRCHOVÉ OCHRANY MATERIÁLU

Tato část bakalářské práce se zabývá tématem možnosti nahrazení nyní běžně používaných povrchových úprav materiálů, jako jsou chromování, chromátování a kadmiování. Zaměřuje se především na využití technologie žárových nástřiků (HVOF) a alkalického slitinového zinkování s přídavkem niklu, známého jako zinek-nikl. Tyto metody jsou zvláště účinné pro oceli a titanové slitiny. Další část se věnuje moderním technologiím, jako je nástřik plazmou či Cold Spray. Obě tyto moderní metody se využívají pro opravy dílů z hliníkových slitin.

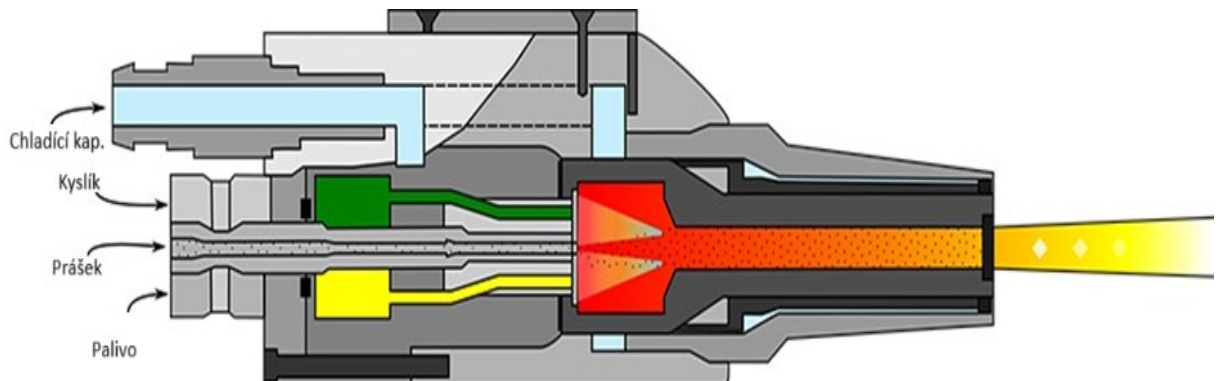
### 7.1 HVOF

Dr. Ing. Max Ulrich Schoop (\* 10. dubna 1870, Frauenfeld; † 29. února 1956, Curych) je považován za zakladatele technologie žárových nástřiků. V roce 1909, během svého pobytu ve francouzském městě Bois-Colombes, pozoroval Dr. Schoop skupinu chlapců, kteří stříleli olověné broky ze vzduchové pistole na zeď přilehlé budovy. Zjistil, že brok se při nárazu do zdi nejen zploští, ale také na jejím povrchu přilne. Na konci téhož roku podal návrh patentu na první žárový nástřik. Tato technologie zahrnovala taveninu dávkovanou z lící pánve, která byla rozprášena proudem stlačeného vzduchu generovaného tryskou. Patent nakonec získal až o čtyři roky později (Čelko et al., 2017).

Další významnou osobou v oblasti vývoje žárových nástřiků byla Frieda Neningerová, druhá manželka Dr. Schoopa. Přinesla patent na žárový nástřik pomocí elektrického oblouku. Tento proces využíval zdroj elektrické energie k vytvoření taveniny, jejíž proud byl následně urychlován směrem k materiálu (Čelko et al., 2017).

Samotný nástřik pomocí prášku, paliva a rychle proudícího vzduchu, v angličtině známý jako High-Velocity Oxygen Fuel (HVOF) byl vyvinut v roce 1980 a patří do skupiny termálních nástřiků. HVOF funguje na principu smícháním tekutého paliva (kerosin) a kyslíku, které jsou následně přiváděny do spalovací komory a zapáleny. Výtokový plyn má extrémně vysokou teplotu a tlak, který je tryskou vyfukován nadzvukovou rychlostí. Do tohoto proudu plynu se vstříkuje prášek, který se částečně roztaví. Tato směs vychází z trysky a ulpívá na povrch, který má být upraven. Výsledný povlak má pak nízkou pórovitost a vysokou pevnost, také je velmi odolný vůči korozi (Kuroda et al., 2008). Co se týče teploty plamen, tak ten dosahuje teplot okolo 2800 °C a rychlost částic prášku, který je unášen z pistole dosahuje až

800 m/s což je zhruba rychlost 2,5 Machu (Group, 2024). Schéma trysky pro metodu HVOF na obrázku č. 14.



Obrázek 14 Schéma žárového nástřiku HVOF-Top gun (upraveno; TWI global, c2024)

Technologie HVOF má budoucnost především jako náhrada elektrolytického chromování a niklování. Mezi další důvody aplikace této metody patří také ochrana proti korozi, opotřebení či abrazi, tvorba termální bariéry, vytváření dokonale kluzných povrchů a také doplnění materiálu v případě silného opotřebení (Group, 2024).

### 7.1.1 Technologický postup procesu HVOF

1. Před aplikací technologií HVOF je potřeba povrch materiálu důkladně očistit. Cílem čištění je zlepšit přilnavost povlaku na povrch. K čištění se používají metody tryskání, kuličkování nebo chemické mytí.
2. Jako další musí proběhnout kontrola nanášeného materiálu. Prášek musí projít kontrolou hrubosti. Velikost prášku je omezena na rozsah od 5 do 60  $\mu\text{m}$ .
3. Po mytí a kontrole, je potřeba připravit stroj. Důležité parametry nastavení zahrnují: tlak stříkání, vzdálenost od materiálu a rychlost stříkání podle požadavků na povlak.
4. Hlavní proces nástřiku už probíhá plně automaticky. Trysku vzhledem k rychlosti trykané směsi, která může dosahovat až 7 Machů, řídí robot, stejně tak jako drží nastavený tlak, vzdálenost od povrchu tak i plynulost nástřiku. Díky tomu má výsledný povrch rovnoměrný povlak.
5. Dokončovací práce, které po technologii HVOF probíhají jsou finančně i časově méně náročné než například po technologii chromování. Materiál, který prošel HVOF procesem je možné CNC obrobit nebo tepelně zpracovat.

Obě tyto metody zlepšují vlastnosti daného materiálu pro odolnost proti opotřebení, korozi a další vlastnost.

6. Na závěr jako u každé metody je nutné stanovit vyhodnocení kvality dané součásti. Kontrolují se parametry jako například tvrdost, adheze, pórovitost a tloušťka (Junying Metal Manufacturing Co., Limited, 2023)

### 7.1.2 Hlavní komponenty zařízení pro HVOF technologii

- Stříkáčká pistole, která má za cíl správné nanesení směsi prášku a plynu. Mezi klíčové vlastnosti patří: vytvoření vysokorychlostního plynného proudu, správné dávkování a rozprašování práškového materiálu, vytvoření tenkého, tvrdého a odolného povlaku a zajištění dobré adheze povlaku
- Řídicí systém, který monitoruje a upravuje všechny parametry celého procesu HVOF, jako je tlak, rychlost a vzdálenost od povrchu
- Chladicí systém je potřebný, aby nedošlo k přehřátí prášku. Většinou je toto chlazení pomocí vodního potrubí ve stříkáčká pistoli.
- Plynový systém má za cíl správné míchaní poměru kyslíku a paliva pro celý proces spalování, generuje také vysokorychlostní plamen.
- Robotika má na starosti kontrolu a automatizaci procesu technologie HVOF.

Cena strojů, které jsou využívány pro metodu HVOF se pohybuje od desítek tisíců po stovky tisíců amerických dolarů v závislosti na hlavních parametrech stroje. Mezi parametry, které mají zásadní vliv na cenu stroje jsou: schopnosti stroje, velikost a použitá technologie. Cena stroje ale není cenou konečnou a k ceně samotného stroje, je potřeba připočítat náklady na instalaci, zaškolení pracovníků, údržbu a náklady na spotřební materiál (Junying Metal Manufacturing Co., Limited, 2023).

### 7.1.3 Druhy prášků

Existuje mnoho druhů prášků, které se používají při procesu HVOF. Rozhodnutí použití o materiálu prášku závisí vždy na konkrétním díle a prostředí, kde se tento díl nachází. Mezi nejběžněji používané materiály prášků se řadí:

- Karbidové prášky – Jedná se zejména o karbidy wolframu, které mají vysokou hustotu a využívají se u součástí, které jsou vystavovány silnému opotřebení. Dále jako náhrada nyní běžně využívaných standartních povrchových úprav tvrdochromování, lze využít karbidové prášky na bázi kobaltu a chromu, které mají výrazně lepší vlastnosti odolnosti proti korozi a otěruvzdornosti.

- Kovové prášky – Jedná se o prášky tvořené čistým kovem. Nejčastěji se však jedná o nikl nebo kobalt. V letectví tyto prášky čistých kovů používají jako podkladní vrstvy pod karbidové prášky. Kovové prášky mají také zastoupení v potravinářském, farmaceutickém a papírenském průmyslu, kde je nutné zaručit čistotu a korozivzdornost proti silně chemickým látkám (Höganäs AB, c2018-2024).
- Keramické prášky – Tyto prášky nalézají využití u silně abrazivně namáhaných částí jako jsou válce nebo ložiska. Mezi další důležitou vlastnost těchto prášků patří také velmi vysoká tepelná odolnost. V leteckém průmyslu můžeme nalézt tyto povlaky na lopatkách turbín u moderních proudových motorů.
- Speciální druhy prášků – Jedná se v letectví o méně využívané prášky typu Ni-grafit, nylon, polyester a jiné.

Správná volba prášku, je důležitým parametrem pro kvalitní proces HVOF (Group, 2024).

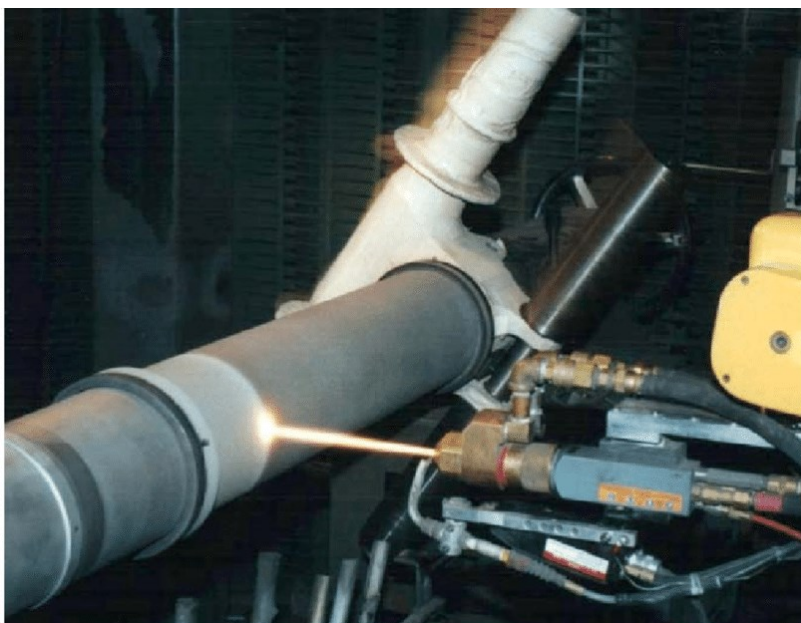
Při jedné z generálních oprav podvozku v rámci CSAT, bylo nalezeno rozsáhlejší poškození vnitřního válce hlavní podvozkové nohy. Z toho důvodu, byl zaslán technický dotaz přímo do The Boeing Company, k zjištění, zdali i přes tak vážné poškození je možné nalézt opravu tohoto dílu nebo zdali se musí díl znehodnotit a odepsat, tzv. scrapovat.

Ze společnosti The Boeing Company přišla technická zpráva, která přikládala opravu tohoto dílu právě pomocí procesu HVOF, s přesnými detaily celého procesu. CSAT se tak díky spolupráci s Výzkumným a zkušebním ústavem v Plzni (VZÚ), které zastává funkci předního lídra ve službách právě inovativních technologiích žárového pokovování, pustili do společné opravy vnitřního válce, která byla nakonec velmi úspěšná. Mimo jiné se VZÚ zabývá také kalibracemi, testováním vzorků, tepelným zpracováním a spoustu dalších technologií (VZÚ Plzeň, 2024). Finální povrch po žárovém nástřiku Niklu je na obrázku č. 15.



Obrázek 15 Povrch vnitřního válce po žárovém nástřiku niklem (Archiv CSAT, 2024)

Technologie použita při opravě dílu vnitřního válce byla následující. Podkladní vrstva byla nanesena plazmatickým nástřikem, a to za pomoci prášku Metco 450NS, skládající se 5 % Al a zbylá procenta zastává nikl (VZÚ Plzeň, 2024). Tento prášek má velmi vysokou odolnost vůči oxidaci, a to až do teplot zhruba 800 °C v závislosti na prostředí (Metco, 2023). Finální vrstva byla nanesena technologií HVOF za pomoci nanášecí pistole JP-5000 a byl zde použit prášek s označením BMS10-67 type 17 (WC – 10Co4Cr). Pro obě tyto vrstvy byla požadovaná tloušťka 0,3 mm + 0,15 mm přídatku pro proces broušení. Broušení dílu probíhalo poté na specializovaném pracovišti v prostoru hangáru údržby letadlových podvozků (ULPO) v rámci CSAT (VZÚ Plzeň, 2024). Na obrázku č. 16 je proces žárového pokovení metodou HVOF, které bylo provedeno v MRO pro leteckou techniku námořnictva Spojených států.



Obrázek 16 Proces HVOF (NADEP, 2007)

## 7.2 Technologie pokovení zinek-nikl

Metoda pokovení zinkem – niklem (Zi-Ni), je alternativní metoda ke konvenční metodě kadmiování. Ochrana kadmíem byla rozebrána v kapitole 5.3.3. Obecně ale platí, že tato technologie je schopna chránit materiál před korozí. Avšak vlivem nařízení REACH, ekologickým a zdravotním rizikům, je snaha omezit toxické kadmium a hledat nové alternativní metody, které by stejně nebo lépe zastoupili jeho využití. A právě z tohoto důvodu, se do popředí dostala relativně nová technologie pokovení Zi-Ni, které nabízí shodné ochranné vlastnosti materiálů při menší ekologické zátěži.

Jedná se o elektrolytickou úpravu povrchu (galvanické pokovení), které má za cíl kombinovat odolnost vůči korozi (zinek) a pevnost a ořezodolnost (nikl). Lázeň může obsahovat 85–92 % zinku a zbývajících 8–15 % niklu (Gatto Jr., 2017).

Proces pokovování zinkem-niklem začíná stejně jako u všech galvanických procesů přípravou povrchu, která zahrnuje odmaštění, čištění, případně moření. Po přípravných pracích následuje samotné elektrolytické pokovování. Používají se speciální elektrolytické lázně, které obsahují ionty zinku a niklu. Povrch součástky funguje jako katoda, na kterou se působením elektrického proudu usazují ionty zinku a niklu z elektrolytu. Tvrdost výsledného povlaku, která je udávána na stupnici dle Vickerse se pohybuje dle jeho poměru v lázni od 400 do 500 HV (Murphy, 2020).

Jak již bylo předesláno v kapitole o galvanických procesech, lázně mohou být alkalické nebo kyselé. Při procesu Zi-Ni mají hojnější zastoupení právě lázně alkalické. Mezi hlavní

výhody této lázně, patří především rovnoměrnost rozložení (ulpění) a tažnost. Díky tomu lze pokovovat i díly s velmi složitou geometrií a zamezovat tak praskání povrchu. Oproti tomu kyselá lázně naopak vynikají snížením doby průběhu pokovování, a to především díky své účinnosti. Dále se pak kyselá lázně dokáží mnohem lépe přizpůsobit různým proudovým hustotám při pokovování (Murphy, 2020).

### 7.2.1 Průběh procesu Zi-Ni

1. Nejprve je nutné zajistit hrubé chemické očištění dílu, a to z důvodu následného kvalitního zamaskování částí, které nebudou určeny pro pokovení.
2. Poté přichází na řadu abrazivní tryskání pomocí oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), díky kterému je materiál zbaven veškerých zbytků nečistot a mastnot. Pokud by se na součástce nacházel, byť jen malá mastná stopa. Pokovení by nedokázalo přilnout a proces by se musel opakovat znovu.
3. Třetím krokem se dostáváme k procesu samotného pokovení zinkem – niklem. Proces funguje stejně jako veškeré galvanické procesy, a to na principu elektrolyzy. Délky průběhu pokovení závisí na požadované tloušťce, složení lázně, teplotě a proudu. Obecně se ale délka může pohybovat od desítek minut až po jednotky hodin. V leteckém průmyslu, konkrétně dle manuálu výrobce Boeing BAC5748 nalezneme informaci o době trvání pokovení 30 minut, při proudové hustotě 3.3–6.5  $\text{A}/\text{dm}^2$  až do požadované tloušťky 13  $\mu\text{m}$ . Pokovení lze provádět v závěsu či speciálním bubnu.
4. Oplachem, který probíhá ve studené vodě po dobu 15 minut odstraníme po pokovení zbývající, pomalu odkapávající zbytky lázně. Následně necháme daný díl oschnout.
5. Na řadu přichází odmaskování dílu pro kompletní kontrolu správného provedení pokovení a následuje také finální oplach a sušení dané součásti.
6. I přesto, že proces pokovení zinkem–niklem by neměl vytvářet u vysokopevnostních ocelí vodíkovou křehkost, je nutné provést odvodňování. Nelze totiž u galvanických procesů zaručit, že nedošlo k navodňování ocele, která může časem více křehnout, případně samovolně prasknout.
7. Jako finální krok celého procesu následuje fosfátování, které má za cíl vytvořit nerozpustnou fosfátovou vrstvu, která zlepšuje soudržnost, chrání před korozi a zajišťuje kvalitnější přilnutí svrchního nátěru (Company, 2021).



Metoda pokovení zinkem – niklem je čím dál více rozšířená, a to zejména v automobilovém průmyslu, kde slouží jako hlavní ochrana karoserie před korozi, stejně tak je tomu také v lodním průmyslu, kde slaná voda vysoce zatěžuje plášť lodí plující po mořích, či oceánech. Praktické využití této metody nalézt téměř všude, kde je riziko působení vnějších vlivů, které mají za následek vznik koroze. Proto se předpokládá široké rozšíření také do domácích motorových strojů nebo také jako ochrana nosníků solárních elektráren (Gatto Jr., 2017).

### **7.3 Technologie Cold Spray**

Technologie Cold Spray, též známá jako studený nástřik, je relativně nová metoda povrchových uprav materiálu, která se stává stále více populární v různých odvětvích.

Metoda Cold Spray funguje na principu urychlení práškového materiálu pomocí stlačeného plynu na vysokou rychlost. Tento proces je charakterizován nízkými teplotami, které se pohybují výrazně pod teplotami tavení materiálů, čímž se minimalizuje tepelný stres a potenciální poškození povrchu.

První patent na technologii, která se podobala dnešnímu studenému nástřiku získal v roce 1902 pan Samuelu H. Thurston, který ve své práci popsal kovové částice, jež byly hnány pneumatickým tlakem na povrch materiálu, který měl být těmito částicemi opracován. Využití Thurstonovy metody bylo však velmi omezené, a to z důvodu použití vzduchu o nízké teplotě, čímž vznikala použitelnost pouze pro měkké a tvárné materiály.

Od té doby následovalo mnoho patentů, které těžily a zlepšovali, znalostí pana Samuela H. Thurstona. Nakonec až v osmdesátých letech minulého století, kdy se při experimentech, které probíhaly v Sovětském svazu, konkrétně v Institutu teoretické a aplikované mechaniky v Novosibirsku, podařilo vědcům zkoumajícím vliv vysokorychlostního nárazu částic na pevné povrchy dokázat, že by tyto práškové částice mohly být využity k tryskání na povrch materiálu ke zlepšení jeho vlastností. V 90. letech se technologie začala šířit do západních zemí, kde byly zahájeny další výzkumy a vývoj. Významné pokroky byly dosaženy hlavně v oblasti optimalizace procesů a vývoje specializovaného vybavení, což umožnilo širší průmyslové uplatnění této technologie (Kuroda et al., 2008).

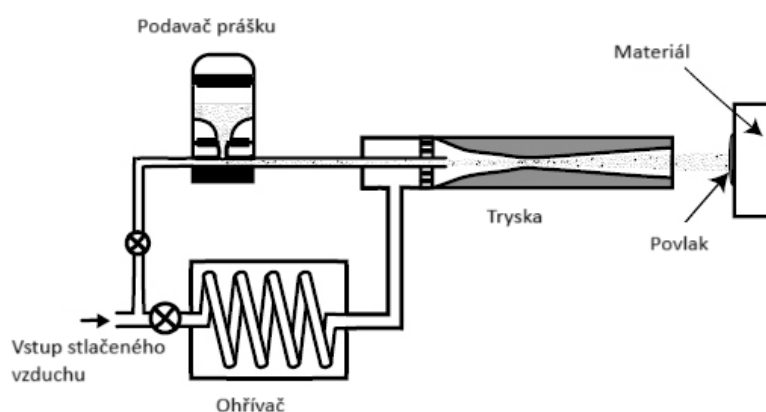
#### **7.3.1 Hlavní komponenty pro technologii Cold Spray**

- Zdroj stlačeného plynu – Ten má za cíl zajistit konstantní průtok a tlak vzduchu unášející prášek. Nejčastěji je jako médium používán dusík.
- Ohřívač – Hlavním požadavkem je stabilizace teploty plynu pro správnou optimalizaci celého procesu.

- Práškový podavač – Jehož hlavní funkcí je konstantní a kontrolovaný přísun práškového materiálu do proudění plynu.
- Tryska – Také označována jako pistol, která slouží pro kontrolované mixování prášku a vzduchu.

Specifické procesní parametry jako tlak plynu, teplota plynu, velikost částic prášku a vzdálenost trysky od substrátu ovlivňují kvalitu výsledku. Je důležité dosáhnout optimální specifikaci každého parametru pro splnění potřebných parametrů povrchu, včetně pevnosti spoje, hustoty a rovnoměrné vrstvy (Kuroda et al., 2008).

Vlivem nízkých teplot a silné adheze k povrchu je ideální k využití pro opravy a údržbu citlivých součástek, ale také k vytváření nových materiálů se speciálními vlastnostmi. I když má tato technologie některá omezení, její význam je neustále významnější a podle budoucího vývoje lze očekávat další inovace a rozšíření použití této technologie. Jedním z důvodů rozšíření této metody je také minimální vliv na environmentální zatížení, a to především díky nulovým toxickým výparům a také možnosti recyklace neulpěných částic (Osthus, 2021). Znázornění schéma Cold Spray je na obrázku č. 17.



Obrázek 17 Schéma Technologie Cold Spray (upraveno; Kuroda, c2024)

## 7.4 Plasma Spray

Technologie Plasma Spray, která je též známá jako plazmový nástřik, je vysoce inovativní metoda povrchových úprav, která umožňuje vytváření povlaků s mimořádnými vlastnostmi. Jedná se zejména o odolnost proti vysokým teplotám, opotřebení a korozi. Plazmový oblouk, který slouží jako tepelný zdroj k tavení a urychlování prášku, je tímto způsobem nanášen na povrch materiálu (dílu). Využití technologie pokovení plazmovým nástřikem má využití v mnoha průmyslech jako jsou lékařská odvětví, letectví, energetika, automobilový průmysl a spousta dalších. Jeho důležitou výhodou je univerzálnost, která

zajišťuje schopnost nanášet prášky všech materiálů, včetně kovů, keramiky a pryskyřic (Bodycoat, c2024).

První vývoj plazmových nástřiků se datuje v 50. letech 20. století, kdy probíhaly první experimenty s plazmovým obloukem pro potřeby tavení prášků. V následujícím desetiletí se vývoj této technologie rapidně urychlil, a to především díky společnosti NASA, která pokovení plazmatickým nástřikem využívala k ochraně komponent vesmírných lodí a raket před extrémními teplotami a opotřebením. Od 70. let 20. století se pak metoda Plasma Spray postupně začala používat i v běžných průmyslech jako jsou automobilový, zdravotnický a energetický. Důležitými milníky byl pak vývoj plazmových trysek s vyšší účinností, zdokonalení práškových materiálů a procesních parametrů potřebných k dosažení lepší kvality povlaku (Miller, 1997).

V letectví se technologie nástřiku plazmou provádí zejména při výrobě turbínových lopatek proudových motorů, které jsou namáhány enormními silami a velmi vysokými teplotami (Bodycoat, c2024). Dále se tato technologie využívá také v opravárenských a údržbářských procesech generálních oprav podvozků, a to pro díly z hliníkových slitin v případě poškození těchto dílů vlivem korze (Corporation). Rozhodnutí o opravě metodou Plasma Spray a výměnou celého dílu je však velmi problematické z důvodu podobné finální ceny a také bezpečnosti. Z důvodu zachování bezpečnosti tak zasílají údržbářské organizace technický dotaz na výrobce daného podvozku, který následně rozhodne o opravě či výměně poškozeného dílu (Czech Airlines Technics, 2012).

#### **7.4.1 Druhy prášků používané pro Plasma Spray**

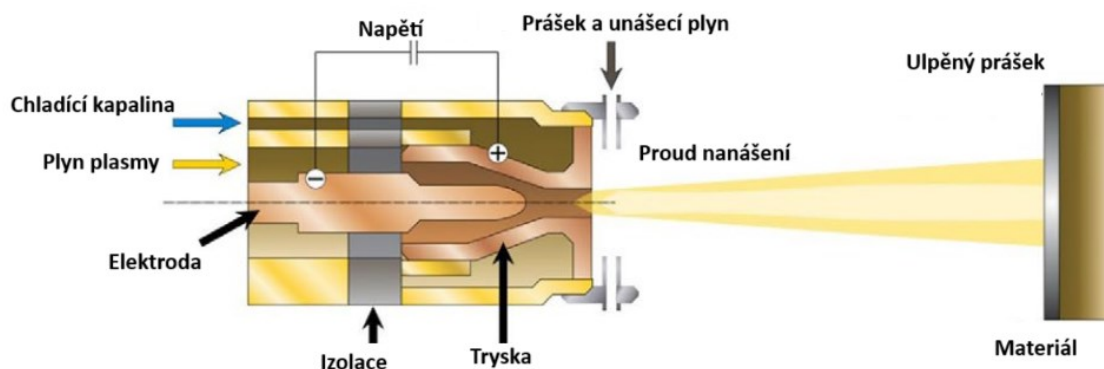
Výběr materiálu prášku záleží stejně jako u jiných žárových metod na požadovaných vlastnostech. Prášky pro technologii Plasma Spray lze rozdělit do tří základních skupin, mezi které patří:

- Keramické prášky – Ty jsou známé pro svou vysokou odolnost vůči extrémním teplotám a také vynikající odolnosti vůči opotřebením. Jedná se o materiály jako oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), oxid chromový ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) a zirkoniové sloučeniny.
- Kovové prášky – Vynikají svou vysokou odolností vůči korozi a běžnému mechanickému namáhání. Využívají se materiály čistých kovů, či jejich slitin jako například nerezové oceli, niklové a kobaltové slitiny, případně jiné, vysoce kvalitní materiály.
- Kompozitní prášky – Kompozit neboli materiál, který je složen ze dvou či více rozdílných materiálů. Pro technologii Plasma Spray se za kompozitní prášky považují

směsi keramických a kovových prášků. Využití těchto směsí nalezneme u extrémně zatížených součástek (Group, 2024).

#### 7.4.2 Proces metody Plasma Spray

Princip fungování technologie Plasma Spray je založen na plazmovém oblouku generovaném mezi anodou a katodou v plazmové trysce. Plyn, obvykle argon, vodík nebo dusík, je ionizován a přeměněn na plazmu s velmi vysokou teplotou okolo 16 000 °C. Práškový materiál je vstříkáván do plazmového proudu, kde se taví a urychluje se směrem k povrchu materiálu. Přitom může rychlost částic dosáhnout až 450 m/s. Okolní prostředí, které se využívá při plasmatickém nástřiku může být běžně atmosférické, ale například v případě výroby lékařských pomůcek se využívá nástřiku plazmy ve vakuu (Group, 2024). Schéma procesu Plasma Spray je vyobrazen na obrázku č. 18.



Obrázek 18 Schéma procesu Plasma Spray (upraveno; Group, 2024)

#### 7.4.3 Hlavní komponenty Plasma Spray

Mezi hlavní části stroje nebo centra pro technologii Plasma Spray patří:

- Plazmový hořák – Vytváří plazmový oblouk a udržuje vodivý plazmový proud.
- Zdroj plynu – Zajišťuje dodávku pracovního plynu a ochranného plynu.
- Podavač prášku – Zajišťuje a reguluje přísun práškového materiálu do plazmového pole.
- Chladicí systém – Zajišťuje chlazení hořáku a dalších komponent systému.
- Kontrolní zařízení – Monitoruje procesní parametry, jako je teplota, průtok plynu a rychlost.

Správná činnost a souhra všech komponent Plasma Spray stroje nebo centra, zajistí kvalitní a optimální zajištění pokovení. Správnou konfigurací stroje a jeho optimalizací, lze následně dosáhnout přesně požadovaných vlastností a zajistit tak potřebnou kvalitu výsledného povrchu (Bodycoat, c2024).

## **8 VYUŽITÍ SPECIÁLNÍCH A ALTERNATIVNÍCH POVRCHOVÝCH ÚPRAV A OCHRAN MATERIÁLŮ V ÚDRŽBĚ LETADLOVÝCH PODVOZKŮ**

Jak již bylo zmíněno, veškeré standardní technologie povrchových úprav, které jsou v současné době používány při údržbě letadlových podvozků, mají menší či vážnější vliv na lidské zdraví, bezpečnost nebo environmentální zatížení. Tyto konvenční metody ochrany materiálu mají navíc velmi zdoluhavé technologické procesy, což je činí finančně náročnějšími.

Nejdůležitějším faktorem v letectví je bezpečnost, která se postupným vývojem neustále zlepšuje. Od dob první a druhé světové války, kdy letecké motory často fungovaly pouze několik hodin a výroba konstrukce letadel nezahrnovala žádné kontrolní parametry, se letectví stalo jedním z nejbezpečnějších odvětví na světě. To je zásluhou použití inovativních metod, neustálé modernizace technologií, využívání nových a vylepšených druhů materiálů, kvalitněji proškoleného personálu a obrovského technologického pokroku.

Pro zachování konkurenceschopnosti, redukci nákladů, neustálé zlepšování bezpečnosti, snížení environmentální zátěže a rizika nebezpečných procesů na lidské zdraví bude pro MRO důležité se v následujících letech zaměřit na přechod k moderním a inovativním technologiím.

V následujících kapitolách proto bude z výše zmíněných důvodů provedeno porovnání standardních a alternativních povrchových úprav a ochrany materiálů. Porovnání klade důraz na výhody, případně nevýhody jednotlivých technologií, možnost záměny za dosavadní technologie, které jsou již využívány v rámci MRO, potřebu vytvoření zcela nových prostor, vliv environmentálních a bezpečnostních vlivů, a nakonec celkovou výhodnost včetně přibližné konečné ceny.

### **8.1 Náhrada pokovení chromem a niklem technologií HVOF**

Obě technologie ať už galvanické procesy nebo HVOF slouží ke zlepšení vlastností povrchu, případně k jeho opravě. Obě tyto metody mají své klady i zápory. HVOF je výhodný zejména díky vynikajícím mechanickým vlastnostem, a to i v extrémních podmínkách, dlouhé životnosti a nižší zátěži pro životní prostředí (Kuroda et al., 2008).

Oproti tomu je pokovení chromem a niklem ekonomičtější a dostupnější technologií. Tato metoda pak poskytuje dostatečnou ochranu pro běžné aplikace, je však ekologicky vysoce náročná a má i kratší životnost povlaků (Trojánek, 1963).

### 8.1.1 Hlavní parametry technologie HVOF oproti galvanickým procesům

Technologie HVOF má základní výhody oproti galvanickým procesům. Patří mezi ně:

- Kvalita výsledného povrchu – Finální povrch je velmi hustý, silný a má vysokou odolnost proti opotřebení.
- Životnost – Materiál má po aplikaci HVOF větší odolnost vůči korozi a tím pádem delší životnost.
- Flexibilita – Možnost použití široké škály druhů prášků.
- Ekologie a bezpečnost – Proces HVOF je výrazně méně toxický a plyne z něj méně emisí a odpadů.
- Produktivita – Technologie HVOF umožňuje rychlejší a efektivnější nanášení povlaků na velké plochy, což zvyšuje produktivitu. Také při procesu žárového nástřiku dochází k urychlení celého postupu, a to především z důvodu odstranění několika technologických kroků. Při inovativních procesech není potřeba díl několikrát oplachovat jako je tomu u klasického chromování, či niklování. Hlavní výhoda ovšem nastává při odstranění tepelného zpracování, a to z důvodu že při technologii HVOF nehrozí riziko vodíkové křehkosti u vysokopevnostních ocelí (Technology, c2015-2024).

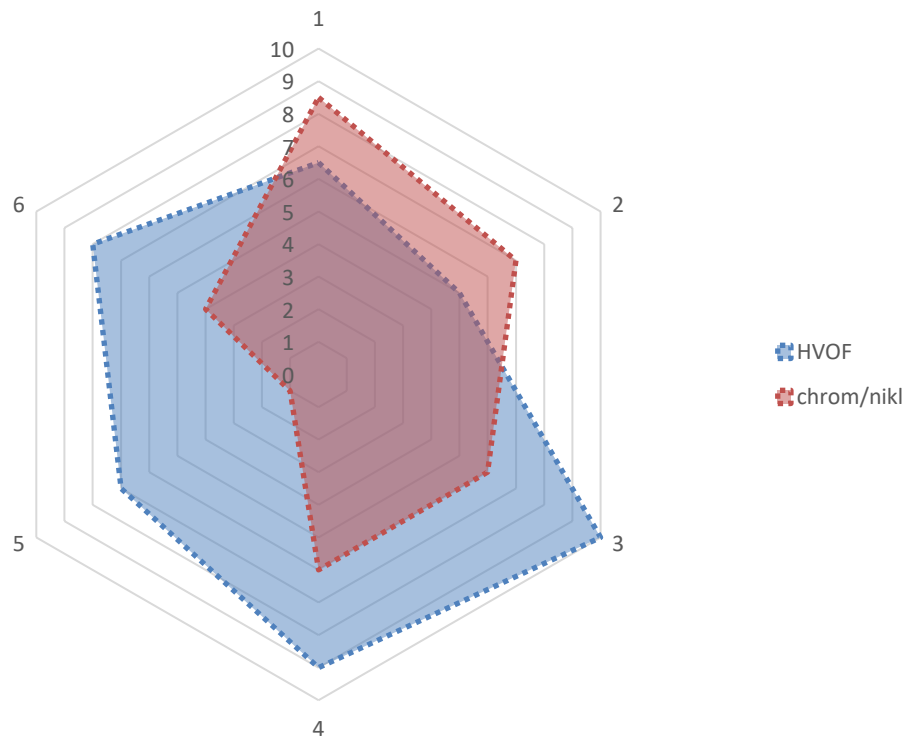
Samozřejmě má technologie HVOF také své nevýhody, úskalí a omezení jako jsou:

- Vyšší počáteční náklady – Pořízení nové technologie je vždy vyšší pořizovací náklad, než zakoupení dlouhodobě využívaných a zavedených procesů.
- Složitost – Oproti standartním metodám je nastavení a kontrola kvality procesů HVOF dozajista složitější. S tím se váže nutnost kvalitního zaškolení obsluhy center obsluhy. To může být také spojeno s vyššími požadavky na zaměstnance, u kterých je vyžadováno technicky zaměřené vzdělání na obsluhu strojů a pravidelné školení.
- Aplikovatelnost – I přesto, že se pistole pro termální nástřiky stále zmenšují, je problém s dodržením vzdálenosti od materiálu při pokovování vnitřních průměrů.
- V případě žárových nástřiků je potřeba vybudovat zcela nový prostor, kde by se tato technologie prováděla. Je tomu z důvodu, že galvanická dílna, tzv. galvanovna, je prostor, kde se nachází spousta van s lázněmi, ve kterých je prováděno elektrochemické pokovení (Nástřiky).

Hlavní důvodem, který vede údržbářské organizace a celý průmysl k technologii HVOF je právě menší enviromentální zátěž. U této metody není potřeba speciálně a nákladně odstraňovat použité lázně obsahující chrom a nikl. Právě nevyužitý prášek ze žárových nástřiků

je možný znovu použít (Kuroda et al., 2008). Na obrázku č. 19. je graf porovnávající metodu galvanických procesů a HVOF (stupnice od 1 do 10, kde 1 znamená nejhorší a 10 nejlepší). Body grafu: 1. Počáteční náklady, 2. Provozní náklady, 3. Životnost, 4. Odolnost vůči opotřebení, 5. Enviromentální zátěž, 6. Bezpečnost.

Data pro vytvoření grafu, byla získána analýzou a porovnáním několika odborných zdrojů a článků (Kuroda et al., 2008; Group, 2024; Junying Metal Manufacturing Co., Limited, 2023; Trojánek, 1963; Czech Airlines Technics, 2019; Verstak, 2017; Specialists, 2024; Zahálka & Enžl, 2005; ECHA). Veškeré informace potřebné pro sestavení grafu jsou popsány níže.



Obrázek 19 Graf porovnání metody HVOF a galvanických procesů chrom nebo nikl (Autor)

Počáteční výdaje (bod 1) byly hodnoceny na výše zmíněné stupnici 1–10, kde 1 odpovídá částce 30 000 000 Kč. Tato suma byla vybrána z důvodu, že této ceny dosahují ty nejmodernější systémy pro HVOF kombinované s Plasma Spray. Naopak 10 odpovídá 2 500 000 Kč, což činí minimální náklady pro technologie pokovení chromem či niklem. Pořizovací náklady zahrnují nákupní cenu zařízení, instalaci a zaškolení personálu. Technologie HVOF byla ohodnocena stupněm 6,5, a to především z důvodu vyšších počátečních nákladů, které v průměru u běžných systémů dosahují částky 12 500 000 Kč, což

je výrazně vyšší suma než u pokovení chromem a niklem, u kterých se náklady pohybují okolo 5 200 000 Korun. Proto byla konvenční metoda povrchových oprav hodnocena jako 8,5.

Provozní náklady (bod 2) technologie HVOF byly hodnoceny stupněm 5, protože měsíční provozní náklady činí 35 000 Kč. Hodnota 5 byla stanovena jako mezní, především pro přehlednost. Z důvodu pohybu cen materiálu, údržby a dalších výdajů souvisejícími s provozem není lehké určit pravidelné a přesné výdaje. Pokovení chromem a niklem bylo hodnoceno stupněm 7 z důvodu nižších měsíčních nákladů, které se pohybují okolo 22 000 Kč.

Životnost (bod 3) žárových povlaků se v průměru pohybuje okolo 5 let. Je však nutné podotknout, že životnost závisí vždy na prostředí, kterému je povlak vystaven. HVOF tak bylo ohodnoceno stupněm 10, což znamená, že má nejdelší možnou životnost mezi zkoumanými technologiemi, a vytvořilo to pozici pro porovnání dalších metod. Chrom a nikl byl hodnocen stupněm 6, vlivem nižší životnosti okolo třech let.

Je důležité zmínit, že u leteckých podvozků jsou tyto životnosti delší. To je především z důvodu, že povrchy povlaků bývají opatřeny navíc mazacím tukem nebo jinou podobnou ochranou. Díky těmto dodatečným ochranným opatřením jsou povlaky více chráněny před opotřebením a korozí, což umožňuje provádění generálních oprav podvozků vždy až po 10 letech.

Odolnost vůči opotřebení (otěruvzdornost; bod 4) byla porovnána s jinými materiály. Stupeň 10 značí tvrdé karbidy wolframu (1300 HV) a stupeň 1 zahrnuje vysokopevnostní oceli či titanové slitiny (400 HV). HVOF byl tedy ohodnocen stupněm 9, protože dosahuje tvrdosti 1200 HV, což poskytuje vynikající ochranu proti opotřebení. Chrom/Nikl získal hodnocení 6, protože jeho tvrdost 800 HV je nižší.

Environmentální zátěž (bod 5) byla hodnocena dle směrnic EU (nařízení (ES) č. 1907/2006; Příloha XIV nařízení REACH; Přílohy XVII nařízení REACH; nařízení Komise č. 864/2015). Optimální hodnotu pro emise stanovila ECHA jako 0,6 t CO<sub>2</sub>/rok, což bylo stanoveno střední hodnotě 5. HVOF byla na základě těchto dat označena stupněm 7, protože emise CO<sub>2</sub> jsou pouze 0,4 t/rok. Chrom/Nikl obdržel hodnocení 1 z důvodu, vyšších emisí CO<sub>2</sub> a to okolo 1 t/rok.

Bezpečnost pro pracovníky (bod 6) byla hodnocena také dle směrnice EU a HVOF bylo ohodnoceno stupněm 8, především kvůli nízké expozici toxickým látkám, což zajišťuje vyšší bezpečnost pro pracovníky. Chrom/Nikl byl hodnocen 4, protože expozice toxickým látkám je vysoká a představuje významné zdravotní riziko pro pracovníky. Hodnoty byly sestaveny dle rizik a nutnosti nošení ochranných pomůcek. Stupeň 1 označuje situace, kdy je přítomen kontakt s látkami, které jsou mutagenní, toxické pro reprodukci nebo vysoce perzistentní,



i přesto že pracovníci používají ochranné pomůcky. Stupeň 10 naopak označuje situace, kdy není nutné používat žádné ochranné pomůcky, protože expozice toxickým látkám je minimální.

### **8.1.2 Teoretické zavedení HVOF v organizaci CSAT**

Zavedení takto složité a nákladné technologie je pro každou společnost technicky i finančně náročné. Pravděpodobně ale k implementaci této technologie bude muset dospět časem každé středisko údržby letadel, a to právě z důvodu snahy o ochranu životního prostředí a udržení si své konkurenceschopnosti. V případě, že by se společnost CSAT rozhodovala o nákupu platformy pro technologii HVOF tak by v dnešní době měla zaručeně několik společností, které tyto systémové platformy udávají na trh. Mezi ty nejznámější společnosti patří TAFE Incorporated a Oerlikon Metco.

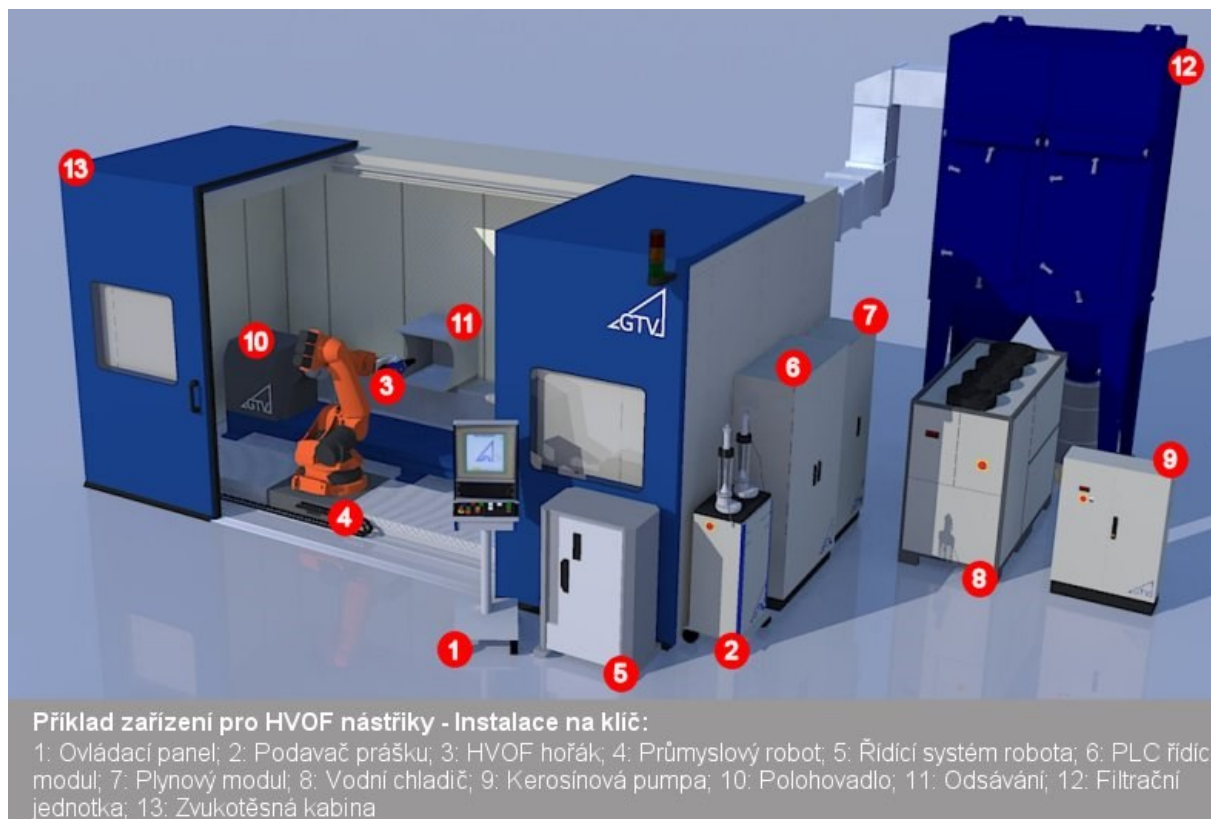
Přesné prodejní ceny nejsou u těchto inovativních technologií veřejné a vždy závisí na konkrétní zakázce a dohodě mezi prodejcem a zákazníkem.

Je důležité si však uvědomit, že kompletní platforma pro technologii HVOF obsahuje několik systémů a komponent, dále je třeba připravit dostatečně velký prostor pro umístění celého systému, který se musí nacházet na logisticky přístupném místě s dosahem stropního jeřábu pro lehčí manipulaci. Dalším důležitým bodem této technologie jsou pracovníci. Vzhledem k tomu, že se jedná o relativně novou technologii, tak je složité zaměstnat operátora, který má již nějakou praxi. Zaškolení pracovníka na takto složitý systém je relativně zdlouhavý a nákladný proces se kterým by se muselo plánovat dlouhodobě dopředu. Posledními výdaji jsou pak náklady na údržbu a ostatní materiál jako je prášek, maskovací pásy, nástroje a veškeré související potřeby.

Celková cena komplexní platformy systému HVOF se může pohybovat od 15 milionů do 30 milionů Kč (Verstak, 2017). Jen pro porovnání, společnost CSAT byla za loňský rok poprvé od roku 2019 kdy utržila čistý zisk 11 milionů korun v kladném profitu. Celkový čistý zisk za rok 2023 činil 41 milionů korun (Czech Airlines Technics, 2024).

Zdali by se takovýto nákup vyplatil zůstává otázkou. Ze současných dat ale víme, že poptávka po údržbě letadlových podvozků u společnosti CSAT roste a již nyní je na hranici své maximální kapacity. V následujících letech se očekává u CSAT, že poptávka po údržbě letadlových podvozků zaručeně poroste, a to především z důvodu nedávného zavedení provozu letounů Boeing 737 MAX, u kterého se v manuálech objevují častější zmínky o inovativní technologii HVOF (Cincinnati Thermal Spray, 2020). Další možností v případě nižší vytíženosti systému HVOF by byla možnost nabídky pro tuto technologii pro externí zákazníky,

vzhledem k širokému využití ve všech průmyslech. Na obrázku č. 20. je moderní komplexní platforma systému HVOF od společnosti GTV.



Obrázek 20 Platforma systému HVOF od firmy GTV (MF-K-G 2000 HVOF Multi-Proces systém, Instalace na klíč (tekuté palivo), c2024)

## 8.2 Náhrada pokovení kadmiem technologií pokovení zinkem-niklem

Pokovení kadmiem i zinkem-niklem spadají do kategorie galvanických procesů. Stejně jako každé jiné porovnání i tyto metody mají své klady a zápory. Co se týká inovativní technologie pokovení zinkem-niklem u té velmi výrazně převažují její výhody. Technologie Zi-Ni má podobné ba i lepší vlastnosti než pokovení kadmiem, při výrazně menším dopadu na životní prostředí a bezpečnost pracovníků (Gatto Jr., 2017).

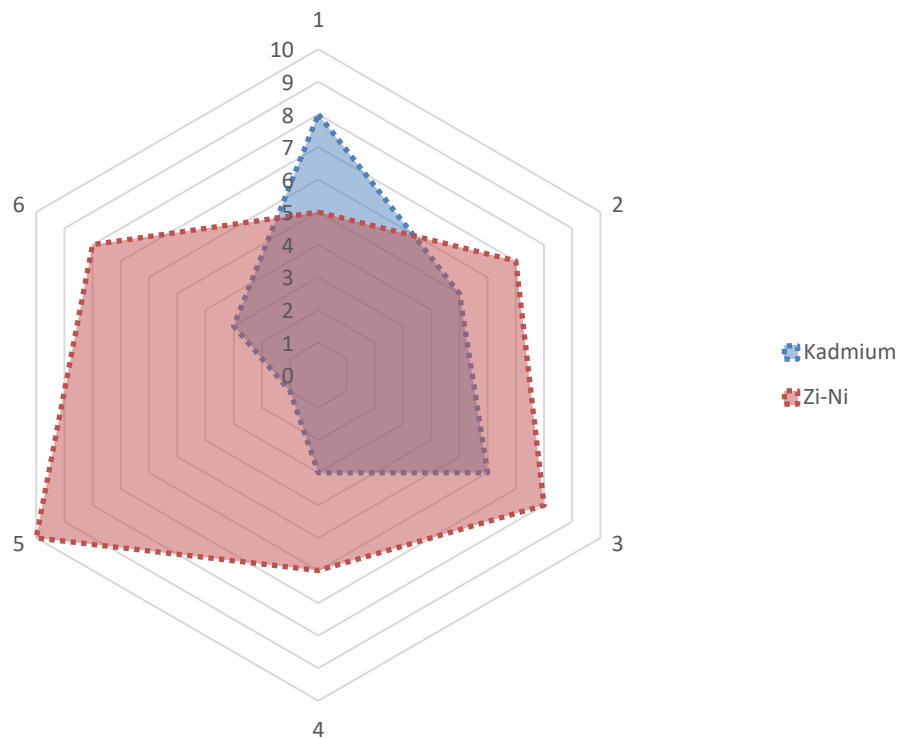
### 8.2.1 Hlavní parametry technologie pokovení zinkem-niklem

Mezi výhody, kvůli kterým je vhodné tuto technologii zařadit do provozu údržbových organizací patří především:

- Proces – Ten je v případě, že MRO disponuje galvanickou dílnou téměř totožný a jediné co se liší, jsou podstatně méně toxičtější lázně.
- Náklady – Provozní i počáteční náklady jsou velmi podobné, a to především z důvodu využití shodných komponentů v rámci galvanické dílny.

- Odolnost – Lehce zvýšená odolnost proti korozi v agresivních prostředích, dobrá mechanická odolnost a delší životnost povlaku.
- Ekologie a bezpečnost – Velmi nízké bezpečnostní riziko jak pro pracovníky, tak velmi nepatrný vliv na životní prostředí (Murphy, 2020).

Hlavní výhodou zavedení technologie pokovení zinkem-niklem jsou relativně nízké pořizovací náklady nebo pak téměř minimální náklady v případě, že organizace již vlastní linku na galvanické procesy, a to konkrétně na pokovení kadmiem. Na obrázku č. 21. je graf porovnávající metodu pokovení kadmiem a zinkem-niklem (stupnice od 1 do 10, kde 1 znamená nejhorší a 10 nejlepší). Body grafu: 1. Počáteční náklady, 2. Provozní náklady, 3. Životnost, 4. Odolnost vůči opotřebení a korozi, 5. Enviromentální zátěž, 6. Bezpečnost.



Obrázek 21 Graf porovnání metody pokovení kadmiem a zinkem-niklem (Autor)

Stejně jako u obrázku č. 19, i data pro obrázek č. 21 byla vytvořena na základě stejného metodologického postupu, zahrnujícího pečlivé porovnání a analýzu dostupných dat z níže uvedených zdrojů a odborných posudků (Gatto Jr., 2017; Murphy, 2020; Petrlík & Válek, 2022; Fredericks, 2023; Trojánek, 1963; Company, 2021).

Počáteční náklady (bod 1) byly hodnoceny na základě nezbytných investic do pořízení vybavení, jeho instalace a zaškolení pracovníků. Na stupnici 1–10, kde hodnota 1 odpovídá částce 10 000 000 Kč, což zahrnuje ty nejdražší, plně automatizované systémy pro galvanické

procesy a poté hodnota 10 částce 2 500 000 Kč, jenž je cena za malé neautomatizované galvanické dílny. Proces pokovení kadmíem byl ohodnocen jako 8, což odpovídá hrubému odhadu počátečních nákladů ve výši 3 600 000 Kč. Naopak proces pokovení zinek-niklem získal hodnocení 5, což reflektuje vyšší celkové počáteční náklady ve výši 6 400 000 Kč.

Provozní náklady (bod 2) zahrnují výdaje na energie, chemikálie a údržbu. Proces pokovení kadmíem je finančně náročnější především z důvodu potřeby většího filtrování, a tak se měsíční náklady pohybují okolo 35 000 Kč. Touto částkou byla zvolena referenční hodnota 5 pro potřeby porovnání. Proces pokovení zinek-niklem byl pak hodnocen známkou 7, jelikož jeho měsíční provozní náklady jsou nižší, a to ve výši zhruba 25 000 Kč.

Životnost povlaků (bod 3) z kadmia se v běžném průmyslu pohybuje okolo 3 let. Oproti tomu pokovení Zi-Ni má v průměru o rok delší životnost. Byla zachována stupnice z obrázku č. 19, a z tohoto důvodu byla hodnota pro kadmium stanovena jako 6 a pro Zi-Ni 8. Podobně jako u metod HVOF nebo pokovení chromem či niklem platí, že nevystavení materiálu přírodním vlivům díky konzervaci hydraulickými kapalinami nebo nanesením další vrstvy povrchové ochrany výrazně prodlužuje jejich životnost, a to až o několik let.

Odolnost vůči opotřebení (bod 4) představuje tvrdost a odolnost proti otěru. Stupnice byla také zachována z obrázku č. 19 a tak hodnota 1 na této stupnici představuje tvrdost 400 HV a 10 pak tvrdost 1300 HV. Pokovení kadmíem tak získalo hodnocení 3, protože dosahuje tvrdosti 600 HV. Pokovení zinek-niklem získalo hodnocení 6, vlivem tvrdosti 900 HV.

Environmentální zátěž (bod 5) byla hodnocena dle nařízení EU (nařízení (ES) č. 1907/2006; Příloha XIV nařízení REACH; Přílohy XVII nařízení REACH; nařízení Komise č. 864/2015) podobně jako u obrázku č. 19. Stupnice hodnocení je v tomto případě posunuta. Hodnota 1 označuje technologie, které mají vysoký negativní dopad na životní prostředí, zahrnující vysoké emise CO<sub>2</sub>, toxické odpady. Hodnota 10 značí zátěž, která je optimální dle ECHA (0,6 t CO<sub>2</sub>/rok). Pokovení kadmíem získalo hodnocení 1, protože jeho emise CO<sub>2</sub> jsou vyšší a dosahují hodnot okolo 1.5 t/rok, což znamená větší environmentální zátěž. Pokovení Zi-Ni bylo umístěno na hodnotu 10, protože jeho emise CO<sub>2</sub> jsou 0.6 t/rok, což je optimální hodnota dle směrnice EU.

Bezpečnost pro pracovníky (bod 6) byla hodnocena dle závažnosti vlivu na lidský organizmus také dle směrnice EU. 1 značí nejnižší a 10 nejvyšší bezpečnost. Pokovení kadmíem můžeme charakterizovat jako vysoce nebezpečné, a to především z důvodu vysoké toxicity kadmia a výparů vzniklých při práci s ním. Vdechování jeho výparů nebo kontakt s kůží může způsobit vážné zdravotní problémy, včetně poškození ledvin, plic a kostí.

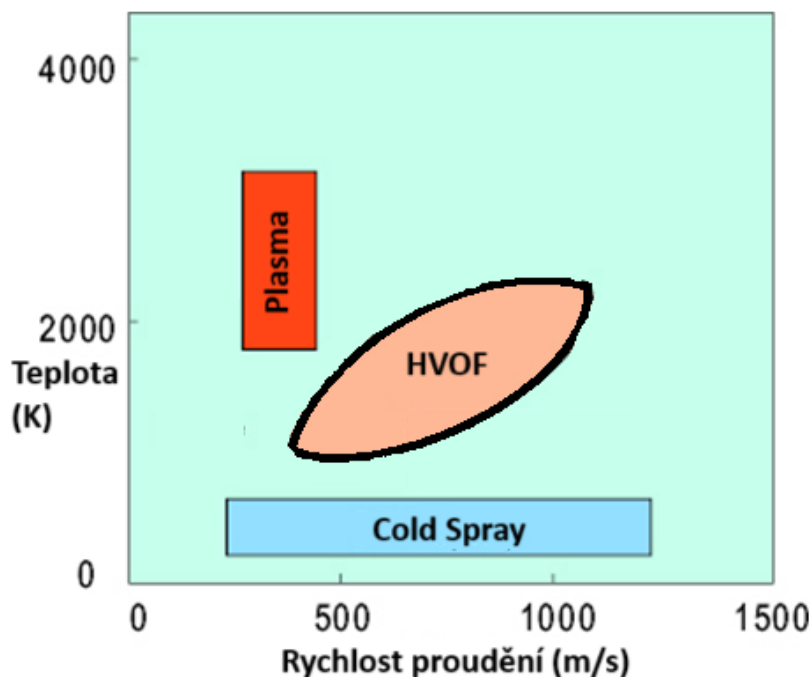
Kadmium je také klasifikováno jako karcinogen, což znamená, že může způsobovat rakovinu. Z těchto důvodů bylo hodnoceno na stupnici 3. Pokovení Zi-Ni pak vzhledem ke své nižší toxicitě bylo hodnoceno stupněm 8 zejména z důvodu, že při práci s jakýmkoli chemickým pokovením je stále nutné dodržovat bezpečnostní opatření, i když riziko není tak vysoké jako u kadmia.

### 8.2.2 Teoretické zavedení metody pokovení zinkem-niklem v organizaci CSAT

Vzhledem k situaci, že současný provoz CSAT disponuje galvanickou dílnou, ve které se provádí mimo jiné také pokovení kadmii, by nebylo finančně ani logisticky náročné provést výměnu lázní. Veškeré komponenty jako elektro vybavení, vany, odvětrávání, či čistička odpadních vod by našly využití i nadále. Pravděpodobně největší zásah by nastal v potřebě přeškolení všech zaměstnanců současné galvanické dílny a znovu vypracování bezpečnostních instrukcí. Celkové náklady by zahrnovali pouze školení a lázně Zi-Ni.

### 8.3 Speciální opravy základního materiálu

Mezi speciální metody oprav základního materiálu patří výše uvedené metody Cold Spray a Plasma Spray. Obě tyto metody slouží především k opravám materiálu, který byl poškozen korozí a běžný postup dle manuálu neumožňuje jejich opravu standartním způsobem. Různé metody žárových inovativních technologií jsou na obrázku č. 22.



Obrázek 22 Porovnání inovativních metod oprav povrchu (upraveno; Kuroda, 2008)

### **8.3.1 Zavedení oprav pomocí technologie Plasma Spray**

Plasma spray je podobný, ale složitější postup při žárových nástřicích. Základní schéma je podobné jako u technologie HVOF, avšak vyšší teploty a rychlosti vyžadují mnohonásobně odolnější komponenty, což zvyšuje cenu. Jak bylo zmíněno v kapitole 8.1.2, cena pro HVOF může dosahovat až 30 milionů korun, což platí i pro metodu atmosférického Plasma Spray. Tato technologie se při údržbě podvozků využívá velmi výjimečně právě kvůli vyšší ceně, protože je často finančně výhodnější vyrobit nový díl. Ačkoli má Plasma Spray v budoucnu potenciál pro opravu podvozků, v současné situaci by jeho zavedení bylo velmi složité a finančně náročné.

### **8.3.2 Zavedení oprav pomocí technologie Cold Spray**

Metoda Cold Spray, která je vhodná pro opravy plechů z hliníkových slitin, má do budoucna vysoký potenciál. Stejně jako u technologie Plasma Spray však narážíme na problém s cenou. Výroba hliníkových slitin není tak nákladná jako výroba vysokopevnostních ocelí či titanových slitin, a proto existuje riziko, že zavedení technologie Cold Spray může být nerentabilní. Pro opravárenská centra by tedy mohlo být výhodnější mít nasmlouvané externí partnery, kteří se specializují na tuto technologii, zejména při vážnějším poškození dílu. V České republice je takovým partnerem například Výzkumný a zkušební ústav v Plzni, se kterým společnost CSAT spolupracuje.

## ZÁVĚR

Letectví je oborem, ve kterém jsou ekonomika a bezpečnost provozu klíčovými faktory. Od prvního letu bratří Wrightů až po současné moderní konstrukce letadel jsme dosáhli významného pokroku v technologii a vývoji. Inovace v nových technologiích a materiálech, spolu s nepřetržitým výzkumem a sledováním, zajišťují, že letectví je stále bezpečnější a dostupnější.

Cílem této práce bylo seznámit čtenáře s letounem Boeing 737 NG, se zvláštním zaměřením na část ATA 32, která se týká podvozku. Dále byla popsána společnost Czech Airlines Technics, a.s., její provoz a postupy při generální opravě podvozku. Technologická část se zabývala různými druhy poškození leteckých přistávacích zařízení a představila materiály používané při konstrukci podvozku letounu Boeing 737 NG. Za klíčovou kapitolu této části lze považovat tu, která se zaměřuje na standardní povrchové úpravy a ochrany materiálů, aplikované během generálních oprav v rámci CSAT.

Velmi důležitou částí této práce byla kapitola zaměřená na environmentální aspekty současných metod povrchových úprav a ochran. Tento aspekt je obzvláště významný v kontextu nařízení REACH, vydaného Evropskou unií, které ukládá údržbářským organizacím povinnost minimalizovat používání toxických a nebezpečných látek. Nařízení REACH má za cíl chránit lidské zdraví a životní prostředí tím, že kontroluje výrobu, dovoz a používání chemických látek.

Hlavní téma bakalářské práce je uvedeno ve dvou závěrečných a rozsáhlých kapitolách. První z těchto kapitol se zaměřuje na inovativní a environmentálně méně zatěžující metody povrchových úprav a ochran. Čtenář zde nalezne úvod do metod, jako jsou žárové nástřiky a moderní galvanické procesy, které se stále více uplatňují nejen v údržbě, ale i ve výrobě. Tyto metody získávají na významu nejen díky vyšší kvalitě, ale především kvůli výrazně nižší environmentální zátěži.

Druhá kapitola věnovaná inovativním metodám porovnává tyto moderní technologie s dnes běžně používanými standardními metodami. Dále poskytuje hrubý odhad nákladů a složitosti při zavádění těchto metod v rámci CSAT. Tento přístup umožňuje lepší pochopení finančních a technických výzev, které přechod na ekologičtější technologie představuje, a zároveň zdůrazňuje dlouhodobé výhody pro životní prostředí a provozní efektivitu.

Cíl bakalářské práce, teoretické využití inovativních metod žárových nástřiků v rámci provozu CSAT, dospělo k závěru, že tyto moderní metody mají svou významnou důležitost a do budoucna je bude nutno aplikovat. Důvodem, proč nejsou tyto technologie rozšířené již v

dnešní době, je především jejich vývoj. Bezpečnost v letectví je klíčovým faktorem a každou novou metodu je nutné pozorovat, zkoumat a neustále zlepšovat, což činí zavedení nové technologie složitým procesem.

Za přínos své bakalářské práce považuji seznámení a uvedení čtenáře do problematiky související s generální opravou podvozků letounu Boeing 737 NG a inovativními technologiemi, které jsou zaručenou budoucností právě pro tyto opravy. Byly vytvořeny grafy, které mají za cíl zjednodušit pochopení rozdílů mezi konvenčními a inovativními metodami povrchových ochran. Dále byla zmíněna teoretická návrhová stránka projektu pro možné budoucí zavedení těchto technologií v rámci CSAT, což poskytuje pevný základ pro další výzkum a praktickou implementaci.



## POUŽITÉ ZDROJE

AVIATION MAINTENANCE JOBS, 2024. Aircraft Ata Chapters list. *Aviation Maintenance Jobs* [online]. [cit. 9. duben 2024]. Dostupné z: <https://www.aviationmaintenancejobs.aero/aircraft-ata-chapters-list>

BÁRTA A CIHLÁŘ, c2009. Lesklé Niklování. *BÁRTA A CIHLÁŘ povrchove-technologie* [online]. [cit. 25. duben 2024]. Dostupné z: <http://www.povrchove-technologie.cz/cz/technologie/leskle-niklovani/>

BAYER, Ondřej. *Technologie 3LM: SOŠCL*. Skripta. 2018.

BENDALL, Keith C., 1995. Copper alloys for critical aircraft and aerospace components. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 67(3), 12-12.

BEŇO, Luděk, Martin BUGAJ, Radko CHALAS a Vladimír NĚMEC, 2004. *Materiály a základní strojní součásti: studijní modul 6.: Učební texty dle předpisu JAR-66*. 1. Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-7204-352-8.

BOEING, 2024. *Commercial* [online]. [cit. 14. únor 2024]. Dostupné z: <https://www.boeing.com/commercial/#commercial-services>

BODYCOAT, c2024. Plasma spray – surface technology – Bodycote plc. *Bodycote* [online]. [cit. 12. červen 2024]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/services/surface-technology/plasma-spray/>

CETIMA, 2021. Přehled vlastností titanových slitin. *Cetima.cz* [online]. [cit. 9. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.cetima.cz/o-titanu/view/prehled-vlastnosti-titanovych-slitin/>

CINCINNATI THERMAL SPRAY, 2020. HVOF coating as an alternative to hard chrome – cincinnati thermal spray: Applied innovation™: CTS, Inc. *Cincinnati Thermal Spray | Applied Innovation™ | CTS, Inc.* [online]. [cit. 12. červen 2024]. Dostupné z: <https://www.cts-inc.net/research-center/hvof-coating-as-an-alternative-to-hard-chrome/>

COMPANY, The Boeing, 2021. *Standard BAC5637: Zinc-Nickel Alloy Plating* [pdf]. Rev. F. 6/25/2021.

CORPORATION, Hayden, nedatováno. Aerospace Thermal Spray Coating. *Hayden Corporation Thermal Spray Coaters* [online]. [cit. 12. červen 2024]. Dostupné z: <https://www.haydencorp.com/industries/aerospace>

CURREY, Norman S., 2019. "Schematic showing some of the main components of an oleo-pneumatic shock absorber." ("How do oleo-pneumatic shock struts work? | GlobalSpec") In: *GlobalSpec* [online]. 7.11.2019 [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: [https://insights.globalspec.com/images/assets/954/12954/oleo\\_pneumatic\\_shock\\_absorber-fullsize.png](https://insights.globalspec.com/images/assets/954/12954/oleo_pneumatic_shock_absorber-fullsize.png)

CZECH AIRLINES TECHNICS, 2019. *JOB CARD / Technologický postup: LG-37-5008* [tištěný]. 11

CZECH AIRLINES TECHNICS, 2021. CSAT – YOUR MRO PARTNER. *Prezentace služeb Czech Airlines Technics | O nás | Czech Airlines Technics* [online]. [cit. 27. únor 2024]. Dostupné z: <https://www.csatechnics.com/media/files/e/f/CSAT-Prezentace-08-2021.pdf>

CZECH AIRLINES TECHNICS, 2022. *JOB CARD / Technologický postup: LG-37-5007* [tištěný]. 8

CZECH AIRLINES TECHNICS, 2012. *JOB CARD / Technologický postup: LG-37-6001* [tištěný]. 10.

CZECH AIRLINES TECHNICS, 2023. *JOB CARD / Technologický postup: LG-37-9004* [tištěný].

CZECH AIRLINES TECHNICS, 2024. *D0100: MLG UPLOCK HOOK* [tištěný].

CZECH AIRLINES TECHNICS, 2024. *Prožili jsme finančně úspěšný rok* [online]. [cit. 2024-06-12]. Dostupné z: <https://x.com/CSATechnics/status/1780552657171607719>

ČELKO, Ladislav, David JECH, Pavel KOMAROV, Michaela REMEŠOVÁ a Ivana ROČŇÁKOVÁ, 2017. Technologie žárových nástříků: Aplikace, Kvalita povlaků a Rizika Při Jejich výrobě. *Časopis KONSTRUKCE* [online]. [cit. 26. květen 2024]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/technologie-zarovych-nastriku-aplikace-kvalita-povlaku-arizika-pri-jejich-vyrobe/>

EASA, 2024. Regulations. *EASA* [online]. [cit. 17. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/en/regulations#regulations-continuing-airworthiness>

ECHA, 2023. Liste des restrictions. *ECHA* [online]. [cit. 8. květen 2024]. Dostupné z: [https://echa.europa.eu/fr/substances-restricted-under-reach?p\\_p\\_id=disslists\\_WAR\\_disslistsportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_orderByCol=prc\\_entry\\_no&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_orderByType=desc&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_deltaParamValue=50&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_resetCur=false&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_delta=10](https://echa.europa.eu/fr/substances-restricted-under-reach?p_p_id=disslists_WAR_disslistsportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&disslists_WAR_disslistsportlet_orderByCol=prc_entry_no&disslists_WAR_disslistsportlet_orderByType=desc&disslists_WAR_disslistsportlet_deltaParamValue=50&disslists_WAR_disslistsportlet_resetCur=false&disslists_WAR_disslistsportlet_delta=10)

ECHA, 2024. Seznam Látek Vzbuzujících Mimořádné Obavy Podléhajících Povolení. *ECHA* [online]. [cit. 8. květen 2024]. Dostupné z: [https://echa.europa.eu/cs/candidate-list-table?p\\_p\\_id=disslists\\_WAR\\_disslistsportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_haz\\_detailed\\_concern=&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_orderByCol=dte\\_inclusion&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_substance\\_identifier\\_field\\_key=&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_delta=200&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_orderByType=desc&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_dte\\_inclusionFrom=&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_dte\\_inclusionTo=&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_doSearch=&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_deltaParamValue=200&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_resetCur=false&disslists\\_WAR\\_disslistsportlet\\_cur=2](https://echa.europa.eu/cs/candidate-list-table?p_p_id=disslists_WAR_disslistsportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&disslists_WAR_disslistsportlet_haz_detailed_concern=&disslists_WAR_disslistsportlet_orderByCol=dte_inclusion&disslists_WAR_disslistsportlet_substance_identifier_field_key=&disslists_WAR_disslistsportlet_delta=200&disslists_WAR_disslistsportlet_orderByType=desc&disslists_WAR_disslistsportlet_dte_inclusionFrom=&disslists_WAR_disslistsportlet_dte_inclusionTo=&disslists_WAR_disslistsportlet_doSearch=&disslists_WAR_disslistsportlet_deltaParamValue=200&disslists_WAR_disslistsportlet_resetCur=false&disslists_WAR_disslistsportlet_cur=2)

ECHA, nedatováno. Porozumět nařízení reach. *ECHA* [online]. [cit. 8. květen 2024]. Dostupné z: <https://echa.europa.eu/cs/regulations/reach/understanding-reach>

EHLINIK, nedatováno. Hliník. *Technické informace | ehlinik* [online]. [cit. 6. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/hlinik>

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2022. Concorde. *Concorde | Federal Aviation Administration* [online]. [cit. 5. duben 2024]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/lessons\\_learned/transport\\_airplane/accidents/F-BTSC](https://www.faa.gov/lessons_learned/transport_airplane/accidents/F-BTSC)

FOLPRECHT, Radek, 2023. Atlas letadel ČSA. Mezi válkami se u nich vystříдалo 89 strojů 18 typů. *iDNES.cz* [online]. [cit. 20. únor 2024]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/technet/technika/atlas-letadel-mezivalecna-letadla-csa.A231030\\_115954\\_tec\\_technika\\_erp](https://www.idnes.cz/technet/technika/atlas-letadel-mezivalecna-letadla-csa.A231030_115954_tec_technika_erp)

FREDERICKS, Paul, 2023. Cadmium plating: What is it and what are its benefits? *Aerospace Metals* [online]. [cit. 30. duben 2024]. Dostupné z: <https://aerospacemetalsllc.com/what-is-it-and-what-are-its-benefits/>

GALVANOVNA OMEGA, c2005-2007. Galvanické Pokovení. *Galvanovna Omega // Pokovení* [online]. [cit. 25. duben 2024]. Dostupné z: <http://www.galvanovnaomega.cz/pokov/pokoveni.html>

GALVANOVNA OMEGA, c2005-2007. ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA PRINCIPU POKOVENÍ. In: *Galvanovna Omega* [online]. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: [http://www.galvanovnaomega.cz/pokov/princip\\_pokoveni.jpg](http://www.galvanovnaomega.cz/pokov/princip_pokoveni.jpg)

GATTO JR., George, 2017. What engineers should know about zinc-nickel coatings. *Machine Design* [online]. [cit. 30. květen 2024]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/materials/article/21835189/what-engineers-should-know-about-zinc-nickel-coatings>

GROUP, Oerlikon, 2024a. Atmospheric Plasma Spray. *Oerlikon Metco* [online]. [cit. 12. červen 2024]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/metco/en/solutions-technologies/technology/thermal-spraying-processes/atmospheric-plasma-spray/>

GROUP, Oerlikon, 2024b. Ceramic powders for Advanced Industrial Applications. *Ceramic Powders for Industrial Applications | Oerlikon Metco* [online]. [cit. 29. květen 2024]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/materials/oxide-ceramics/ceramic-powders/>

GROUP, Oerlikon, 2024c. High velocity oxygen fuel spray (HVOF). *World-class HVOF Solutions | Oerlikon Metco* [online]. [cit. 29. květen 2024]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/metco/en/solutions-technologies/technology/thermal-spraying-processes/high-velocity-oxygen-fuel-spray/>

GROUP, Oerlikon, c2024. Plasma Spray Gun. In: *Oerlikon Metco* [online]. [cit. 2024-06-12]. Dostupné z: [https://www.oerlikon.com/ecoma/files/air-plasma-spray-process.png?max\\_w=1300](https://www.oerlikon.com/ecoma/files/air-plasma-spray-process.png?max_w=1300)

HBM4EU, 2019. ŠESTIMOCNÝ CHROM: CO JE TŘEBA VĚDĚT. *Science and policy for a healthy future* [online]. [cit. 30. duben 2024]. Dostupné z: [https://www.hbm4eu.eu/wp-content/uploads/2019/09/Chromium-VI-factsheet-HBM4EU\\_CS.pdf](https://www.hbm4eu.eu/wp-content/uploads/2019/09/Chromium-VI-factsheet-HBM4EU_CS.pdf)

HÖGANÄS AB, c2018-2024. HVOF: Surface coating. *Höganäs* [online]. [cit. 29. květen 2024]. Dostupné z: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/surface-coating/hvof/>

- INDIANA PRECISION GRINDING, 2020. The Ins and outs of Nital Etching. *Indiana Precision Grinding* [online]. [cit. 16. duben 2024]. Dostupné z: <https://indianaprecisiongrinding.com/the-ins-and-outs-of-nital-etching/>
- INSTITUT, Český normalizační. ČSN 41 6341 Ocel 16 341 Ni-Cr-Mo = Nickel-Chromium-Molybdenum steel 16 341. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/kH5GtGbW>
- JUNYING METAL MANUFACTURING CO., Limited, 2023. What is HVOF Coating – HVOF Thermal Spray Process, Materials, Benefits, Machine, Applications. *cnclathing* [online]. [cit. 26. květen 2024]. Dostupné z: <https://www.cnclathing.com/guide/what-is-hvof-coating-hvof-thermal-spray-process-materials-benefits-machine-applications>
- KAISER, Kai-Uwe, 2023. Environmentální aspekty – Co Norma Vyžaduje? *dqsglobal* [online]. [cit. 7. květen 2024]. Dostupné z: <https://www.dqsglobal.com/cs-cz/vzdelavani/blog/environmentalni-aspekty-co-norma-vyzaduje>
- KREIBICH, Viktor, nedatováno. Povrchové úpravy a VODÍK V oceli. *doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.* [online]. [cit. 1. březen 2024]. Dostupné z: [https://www.kreibichpovrchy.cz/?page\\_id=218](https://www.kreibichpovrchy.cz/?page_id=218)
- KUDLÁČEK, Ivan, 2023. Anorganické povlaky. *EMP* [online]. [cit. 3. květen 2024]. Dostupné z: <https://13ekp.fel.cvut.cz/doku.php?id=npovlak%3Aapovlaky>
- KUDLÁČEK, Ivan, 2023b. Vlastnosti organických povlaků. *EMP* [online]. [cit. 4. květen 2024]. Dostupné z: <https://13ekp.fel.cvut.cz/doku.php?id=opovlak%3Avlastnosti>
- KUNZLER, Joe a Dr. Omar MEMON, 2024. Putting together a Boeing 737: How the process unfolds. *Simple Flying* [online]. [cit. 14. únor 2024]. Dostupné z: <https://simpleflying.com/putting-together-boeing-737-process-guide/>
- KURODA, Seiji, Jin KAWAKITA, Makoto WATANABE a Hiroshi KATANODA, 2008. Warm spraying – A novel coating process based on high-velocity impact of solid particles. *Science and Technology of Advanced Materials*. **9**(3), 1-2. ISSN 1468699.
- KURODA, Seiji, Jin KAWAKITA, Makoto WATANABE a Hiroshi KATANODA, 2008. Comparison of various thermal spray processes in terms of particle temperature and velocity. In: *National Library of Medicine* [online]. [cit. 2024-06-10]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5099653/bin/TSTA11660774F01.jpg>
- KURODA, Seiji, Jin KAWAKITA, Makoto WATANABE a Hiroshi KATANODA, c2024. Figure 2 Schematic of HVOF (a) and cold (b) sprayings. In: *Taylor and Francis Online* [online]. [cit. 2024-06-03]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5099653/bin/TSTA11660774F02.jpg>
- LEARNING, Aviation, 1999. *B737 NG SERIES REFRESHER COURSE* [pdf]

LE BUREAU D'ENQUÊTES ET D'ANALYSES POUR LA SÉCURITÉ DE L'AVIATION CIVILE, 2016. Loss of grip by tractor during pushback, collision with aircraft. In: *Aviation accidents* [online]. [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <https://www.aviation-accidents.net/wp-content/uploads/2016/05/mea-middle-east-airlines-airbus-a330-200-od-mea-airplane-od-mea.jpg>

LETIŠTĚ PRAHA, nedatováno. 100 let z historie české aviatiky. *100 let z historie české aviatiky | Letiště slaví* [online]. [cit. 20. únor 2024]. Dostupné z: <https://letisteslavi.cz/#timeline>

LKALLOY, 2018. Aplikace 6 pro titanové a titanové slitiny. *LKALLOY* [online]. [cit. 9. březen 2024]. Dostupné z: <https://lkalloy.com/cs/6-applications-for-titanium-and-titanium-alloys/#:~:text=Slitiny%20titanu%20%C3%BA%C4%8Dinn%C4%9B%20konkuruj%C3%AD%20slitin%C3%A1m%20hlin%C3%ADku%20a%20niklu,vojensk%C3%BDch%20programech%20a%20nakonec%20p%C5%99e%C5%A1el%20do%20komer%C4%8Dn%C3%ADch%20letadel>

MATERIALS, Aircraft, 2013. Alloy & Stainless Steels. *Aircraft Materials Distributor, Source for Aerospace Stainless and Alloy steels* [online]. [cit. 6. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.aircraftmaterials.com/data/alstst/alstst.html>

MATERIALS, Aircraft, 2013b. Aluminium alloys. *Source for European and American Aerospace Aluminum Alloys* [online]. [cit. 9. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.aircraftmaterials.com/data/aluminium/alalu.html>

MATEZEX, nedatováno. Nerezová ocel. *Nerezový materiál | Matezex.cz* [online]. [cit. 6. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.matezex.cz/prevodni-tabulky.html>

METCO, Oerlikon, 2023. *DSM-0271.4\_Ni-Al: Material Product Data Sheet* [Online, pdf].

MF-K-G 2000 HVOF Multi-Proces systém, Instalace na klíč (tekuté palivo), c2024. In: *Wirpo* [online]. [cit. 2024-06-10]. Dostupné z: [https://www.wirpo.cz/images/GTV/web\\_HVOF-MFP-turnkey.jpg](https://www.wirpo.cz/images/GTV/web_HVOF-MFP-turnkey.jpg)

MILLER, R.A., 1997. Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 1997(6), 35-42 [cit. 2024-06-12]. Dostupné z: doi:10.1007/BF02646310

MURPHY, Chad, 2020. Plating with zinc-nickel: Benefits and challenges. *Products Finishing* [online]. [cit. 30. květen 2024]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/plating-with-zinc-nickel-benefits-and-challenges>

MUSIL, Lukáš, 2016. *Encyklopedie dopravních letadel*. REGIA s.r.o. ISBN 978-80-87866-55-9.

NADEP, Jacksonville, 2007. HVOF spraying of aircraft landing gear inner cylinder. In: *ResearchGate* [online]. [cit. 2024-05-30]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/profile/Keith-Legg/publication/267257082/figure/fig1/AS:545555424464896@1507081957813/HVOF-spraying-of-aircraft-landing-gear-inner-cylinder-NADEP-Jacksonville.png>

NÁSTŘIKY, Žárové, nedatováno. Vysokorychlostní nástřik HVOF. *Žárové nástřiky* [online]. [cit. 12. červen 2024]. Dostupné z: <https://zarovenastriky.cz/technologie/vysokorychlostni-nastrik-hvof/>

OSTHUS, Rob, 2021. The history of Cold Spray Technology: Coldspray Technology News. *Cold Spray Technology News ColdSpraycom* [online]. [cit. 3. červen 2024]. Dostupné z: <https://coldspray.com/the-history-of-cold-spray-technology/#:~:text=Cold%20Spray%20was%20a%20Soviet%20discovery.%20Cold%20spray,the%20Russian%20Academy%20of%20Sciences%20in%20Novosibirsk%2C%20Siberia.>

PETRLÍK, Jindřich a Petr VÁLEK, 2022. Kadmium. *Arnika Chráníme naše životní prostředí* [online]. [cit. 30. duben 2024]. Dostupné z: <https://arnika.org/toxicke-latky/databaze-latek/kadmium>

PETRAUSKAITE, Gabriele, 2021. The Alphabet of Aircraft Maintenance: How Do Airlines ensure jet safety? *AeroTime* [online]. [cit. 23. únor 2024]. Dostupné z: <https://www.aerotime.aero/articles/28347-aircraft-maintenance-abcd-checks>

PITA, Omar, 2019. Introduction to Aircraft Maintenance Programs. *ICAO* [online]. [cit. 8. říjen 2019]. Dostupné z: [https://www.icao.int/APAC/Meetings/2019 COSCAP SEAEASA AIR/M20 Aircraft Maintenance Programs.pdf](https://www.icao.int/APAC/Meetings/2019%20COSCAP%20SEAEASA%20AIR/M20%20Aircraft%20Maintenance%20Programs.pdf)

PŘÍRODOVĚDCI.CZ, 2015. Nikl. *Periodická Video tabulka prvků* [online]. [cit. 25. duben 2024]. Dostupné z: <https://www.chemickeprvky.cz/prvek/ni/>

RED, 2016. Kdy Je Vhodné tryskání kovů? *Časopis KONSTRUKCE* [online]. [cit. 16. duben 2024]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/kdy-je-vhodne-tryskani-kovu/>

ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL, 2000. *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia. ISBN 80-718-3207-3.

SAUSE, Markus G.R. a Elena JASIŪNIENĚ, 2021. *Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace* [online]. 1. Springer International Publishing [cit. 2024-03-17]. ISBN 978-3-030-72192-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-72192-3

SMITH, James, 2024. Understanding ata 100 in commercial aviation. *Medium* [online]. [cit. 1. duben 2024]. Dostupné z: <https://medium.com/@aviationsourcing/understanding-ata-100-in-commercial-aviation-e5ad6e9060f6>

STANDARD PRODUCTS, 2024. *CONCAST METAL PRODUCTS CO.* [online]. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.concast.com/line-card.php>

Tabulka chrom, c2009-2017. *Periodická tabulka* [online]. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/24.html#vlastnosti>

TECHNOLOGY, Praxair S.T., c2015-2024. High-velocity oxy fuel (HVOF). *Linde Advanced Material Technologies* [online]. [cit. 12. červen 2024]. Dostupné z: <https://www.linde-amt.com/en/materials-and-equipment/coating-equipment/thermal-spray-coating-systems/high-velocity-oxygen-fuel-hvof>

TITANIUM INDUSTRIES, 2022. Alloy steel 4340 MOD 300M: UNS# K44220: Titanium industries. *Titanium Industries, Inc.* [online]. [cit. 27. únor 2024]. Dostupné z: <https://titanium.com/alloys/alloy-steels/alloy-steel-aisi-4340-mod-300m/>

Top gun, c2024. In: *TWI global* [online]. [cit. 2024-05-26]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/images/00017/4122358.png>

TROJÁNEK, František, 1963. *Příručka pro povrchové úpravy: Chemické a elektrochemické povrchové úpravy materiálu: Chemické a elektrochemické povrchové úpravy materiálu.* Praha: SNTL. Dostupné také z:

[https://techlib.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwY2AwNtIz0EUrE4DVBlCxSZKhqUVyWrIJkJFklGiYkmwETD4phmagvcq-vkYBoaYuwZZ-0FNzQFtjIOeh6oHOMwUvma5C3oAAqv0smBmYjc1Bh-a7O4E24kBVItURboIMLKB9A0IMTMnFIgxKAUdnHl5bVHqkNztRAVhIKRTklwFTVH7Z4ZUKh3cVFCWWVYoyKLi5hjh76EINi4eOpMTDLTUSY2AB9s5TJRgUklOAVYBJSjKwogR2NU0TLY1AW\\_AszVLTUoBdC\\_NkSQZJnMZI4ZGTZuACZQ5Ib1-GgTUNmBpTZeEelAN7GAAotWUb](https://techlib.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwY2AwNtIz0EUrE4DVBlCxSZKhqUVyWrIJkJFklGiYkmwETD4phmagvcq-vkYBoaYuwZZ-0FNzQFtjIOeh6oHOMwUvma5C3oAAqv0smBmYjc1Bh-a7O4E24kBVItURboIMLKB9A0IMTMnFIgxKAUdnHl5bVHqkNztRAVhIKRTklwFTVH7Z4ZUKh3cVFCWWVYoyKLi5hjh76EINi4eOpMTDLTUSY2AB9s5TJRgUklOAVYBJSjKwogR2NU0TLY1AW_AszVLTUoBdC_NkSQZJnMZI4ZGTZuACZQ5Ib1-GgTUNmBpTZeEelAN7GAAotWUb)

TŮMA, Jiří, 1981. *Letadla, pro učební a studijní obory na SOU.* Státní nakladatelství technické literatury.

ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTŇÍ ZKUŠEBNICTVÍ, 2016. *Systémy environmentálního managementu – Požadavky s návodem pro použití.* Třetí. Praha.

VERSTAK, Andrew, 2017. Kermetico. *Investment cost of high velocity thermal spray shop HVAF or HVOF* [online]. [cit. 12. červen 2024]. Dostupné z: <https://kermetico.com/blog/total-investment-cost-to-build-high-velocity-thermal-spray-coating-shop-hvaf-hvof>

VZŮ PLZEŇ, 2024. *Nabídka* [tištěný].

WRITER, Staff, 2023. A brief history of aircraft materials. *Thomasnet® - Product Sourcing and Supplier Discovery Platform – Find North American Manufacturers, Suppliers and Industrial Companies* [online]. [cit. 10. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/insights/a-brief-history-of-aircraft-materials/>

ZAHÁLKA, František a Radek ENŽL, 2005. Progresivní řešení náhrady tvrdého chromování: Mm Průmyslové Spektrum. *mmspektrum* [online]. [cit. 8. květen 2024]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/progresivni-reseni-nahrady-tvrdeho-chromovani>

ŽERAVÍK, Honza, 2009. ČSA – MINULOST, současnost a snad I Budoucnost. *Aeroweb.cz* [online]. [cit. 20. únor 2024]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/1978-csa-minulost-soucasnost-a-snad-i-budoucnost>

ŽEŽULA, Jiří, 2019. Provoz a údržba Letadel. *Provoz a údržba letadel | Svět letecké dopravy | Série & speciály | Flying Revue* [online]. [cit. 27. únor 2024]. Dostupné z: <https://www.flying-revue.cz/provoz-a-udrzba-letadel>

