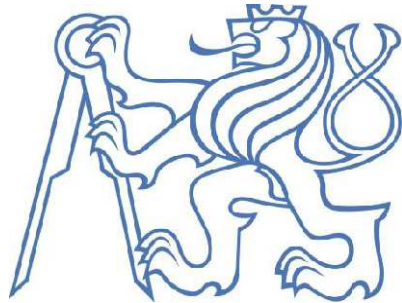


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ



Bc. Šárka Marešová

Nástroj ke snížení rizik při výrobě specifických dílů pro  
motor letadla

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
Fakulta dopravní  
děkan  
Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K623 .....Ústav bezpečnostních technologií a inženýrství**

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Šárka Marešová**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – BD – Bezpečnost dopravních prostředků a cest**

Název tématu (česky): **Nástroj ke snížení rizik při výrobě specifických dílů  
pro motor letadla**

Název tématu (anglicky): Tool for Reduction of Risks at Production of Specific  
Part for Aircraft Engine

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Souhrn poznatků o bezpečnosti leteckého motoru a kultuře bezpečnosti
- Sběr dat a sestavení požadavků na bezpečnost specifických dílů leteckého motoru
- Metody rizikového inženýrství pro zpracování dat
- Vyhodnocení závažných rizik
- Kontrolní seznam pro bezpečnostní audit
- Seznam literatury



ČVUT V PRAZE



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucí práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: D. Procházková: Analýza a řízení rizik. ČVUT, Praha 2011; Metody, nástroje a techniky pro rizikové inženýrství. ČVUT, Praha 2011; Strategické řízení bezpečnosti území a organizace. ČVUT, Praha 2011; Ochrana osob a majetku. ČVUT, Praha 2011; Bezpečnost kritické infrastruktury. ČVUT, Praha 2012 .

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Danuše Procházková, DrSc.**  
**RNDr. Jan Procházka, Ph.D.**


Datum zadání diplomové práce: **30. června 2015**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. května 2017**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia




  
doc. Ing. Václav Jirovský, CSc.  
vedoucí

Ústavu bezpečnostních technologií a inženýrství

  
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

  
Bc. Šárka Marešová  
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....8. prosince 2016

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala své vedoucí diplomové práce paní doc. RNDr. Danuši Procházkové, DrSc. a RNDr. Janu Procházkovi Ph.D. za pomoc s výběrem, konzultace a cenné rady k tématu diplomové práce a všem konzultantům z GE Aviation Czech.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

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

V Praze dne .....

.....  
podpis

## **Abstrakt**

Marešová Šárka, Bc.: *Nástroj ke snížení rizik při výrobě specifických dílů pro motor letadla.* České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, 12. dubna 2017, klíčová slova: *letectví, bezpečnost, snížení rizik, ochranný kryt, technologický postup, kontrolní seznam, svařování.*

Diplomová práce sestavuje nástroj ke snížení rizik, která vznikají při výrobě leteckých dílů, které jsou důležité pro bezpečnost letadla. Cílem diplomové práce je identifikace a vypořádání možných rizik souvisejících s výrobou vybraného dílu, tj. ochranného krytu volné turbíny turbovrtulového motoru. Nástroje ke snížení rizik jsou sestaveny aplikací metod rizikového inženýrství, procesní mapa a kontrolní seznam. Sestavený kontrolní seznam byl použit při auditu bezpečnosti a osvědčil se. Na jeho základě byla navržena konkrétní opatření ke zvýšení bezpečnosti při svařování.

## **Abstract**

Marešová Šárka, Bc.: *Tool for Reduction of Risks at Production of Specific Part for Aircraft Engine*. Czech Technical University in Prague, Faculty of Transportation Sciences, April 12<sup>th</sup>, 2014, keywords: *Aviation, Safety, Containment Ring, Technological Process, Check List, Welding*.

Diploma' Thesis is dedicated to the tool that reduction of risks, which can originate during the manufacturing of aircraft components and that are necessary due for aircraft safety. The aim of the Thesis is identification and the trade-off with possible risks connected with production of selected part, i.e. the containment ring of turboprop's power turbine. To eliminate the risks there are used methods of risks engineering such as the control list and the process map. Compiled control list is used for audit of safety and it worked. On the audit's results basis the corrective measures leading to improvement of safety at welding are proposed.

## Obsah

1. Úvod.....	8
2. Souhrn poznatků o kultuře bezpečnosti a bezpečnosti leteckého motoru .....	9
2.1. Důležité pojmy o bezpečnosti .....	9
2.2. Kultura bezpečnosti.....	10
2.3. Bezpečnost leteckého motoru .....	13
2.4. Motor letadla .....	13
2.5. Funkce turbovrtulového motoru letadla.....	15
2.6. Materiály používané pro výrobu leteckých motorů.....	17
2.7. Svařování .....	27
3. Data o výrobě komponent pro letecký motor .....	32
3.1. Princip a funkce ochranného krytu .....	32
3.2. Materiál ochranného krytu .....	34
3.3. Postup výroby ochranného krytu.....	35
4. Metody rizikového inženýrství použité pro zpracování dat .....	39
5. Návrh nástroje pro ocenění rizik spojených s výrobou ochranného krytu .....	42
5.1. Procesní mapy .....	42
5.2. Kontrolní seznam.....	48
6. Výsledek bezpečnostního auditu.....	52
7. Návrh opatření pro zlepšení procesu svařování.....	58
8. Závěr.....	60
Seznam použité literatury .....	62
Seznam tabulek a obrázků .....	64
Přílohy .....	65



### Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Význam
G	kg	Tíha
FR	N	Aerodynamická síla
Y	N	Vztlak
X	N	Odpor
R	N	Tah motoru
$\vartheta$	°	Úhel mezi zemí a osou letadla
$\rho$	g.cm <sup>-3</sup>	Hustota
T	°C; °F	Teplota
m	kg; t	Hmotnost
n	min <sup>-1</sup>	Otáčky za minutu
m	g	Hmotnost jedné lopatky
R	mm	Vzdálenost těžiště lopatky od středu disku
n	min <sup>-1</sup>	Kritické otáčky
g	m.s <sup>-2</sup>	Gravitační zrychlení
Q	W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	Tepelná vodivost
R	$\mu\Omega$ .cm	Elektrický odpor
HV	-	Stupnice tvrdosti podle Vickers
E	GPa	Modul pružnosti
R <sub>m</sub>	MPa	Mez pevnosti v tahu
$\emptyset$	mm	Průměr

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
CNC	COMPUTER NUMERICAL CONTROL – Číslicové řízení
TG	Technologie (oddělení)
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis – analýza možného výskytu a vlivu vad
TOO	Teplem ovlivněná oblast materiálu
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer – kompozity s polymerní maticí vyztužené uhlíkovými vlákny
GE	General Electric
fcc	Face-centered cubic – kubická plošně centrovaná mřížka
$\gamma$	Austenit
DS	Directionally Solidified Crystal – usměrněné tuhnutí
SX	Single Crystal – monokrystal
TIG	Tungsten Inert Gas – svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu

## 1. Úvod

Orientace na bezpečnost je v současné době základním kritériem při řízení lidské společnosti. Platí jak pro veřejný sektor, tak pro technologie.

V leteckém průmyslu je na prvním místě bezpečnost. Proto je brán při výrobě leteckých komponent velký zřetel na preciznost a dokonalost provedení všech výrobních operací, aby se předešlo katastrofám způsobených chybami při výrobě dílů nebo montáží a údržbě leteckých motorů. Z toho důvodu je potřeba dbát na dodržování technologických postupů, eliminovat lidský činitel ovlivňující proces výroby.

Cílem diplomové práce je snížení rizika při výrobě dílů leteckých motorů. Byl vybrán ochranný kryt leteckého turbovrtulového motoru, jehož funkce je zabránit proniknutí lopatek z pláště motoru do okolního prostředí, např. trupu letadla.

Pro práci s riziky budou použity metody rizikového inženýrství, a to jsou, procesní mapy a kontrolní seznam.

Předložená práce je zpracována metodikou zaměřenou na řešení problémů, tj. obsahuje souhrn poznatků důležitých pro bezpečnost leteckého motoru, data o leteckém motoru, metody použité k řešení úkolu, výsledky a návrhy na zvýšení bezpečnosti.

## 2. Souhrn poznatků o kultuře bezpečnosti a bezpečnosti leteckého motoru

Kapitola pojednává o definicích základních pojmů týkajících se kultury bezpečnosti i samotného pojmu bezpečnosti. Z hlediska bezpečnosti leteckého motoru je popsán princip letadla, funkce motoru a dále jsou popsány materiály používané pro výrobu leteckých motorů, jejich užitkové vlastnosti a správný výběr z hlediska funkčnosti motoru.

### 2.1. Důležité pojmy o bezpečnosti

#### **Bezpečnost**

Je soubor opatření a činností k zajištění bezpečí a udržitelného rozvoje lidského systému, tj. k zajištění bezpečí a udržitelného rozvoje chráněných zájmů [1].

Je jedním ze základních požadavků na výrobek. Cílem je zajistit bezpečnost při všech režimech provozu. S bezpečností souvisí spolehlivost.

#### **Spolehlivost**

Schopnost systému bezchybně dodržovat stanovené požadavky po stanovenou dobu životnosti [1].

Jak bezpečnost, tak i spolehlivost jsou dány úrovní pokroku v následujících oblastech [1]:

1. Zkušenost – zkušenosti přicházejí s časem a dobou používání výrobku právě ve všech myslitelných druzích a režimech provozu. Co nedokázal inženýr navrhnout nebo vymyslet předem – projeví se zde.
2. Znalost – znalosti zajistíme vhodným výběrem dostupné literatury a zkušených poradců. V případě vlastní firmy – zaměstnanců.
3. Technický pokrok – souvisí s úrovní znalostí v obou předchozích oblastech.

#### **Bezpečí**

Je stav lidského systému, při kterém vznik újmy na chráněných zájmech má přijatelnou pravděpodobnost (tj. je téměř jisté, že újma nevznikne [1]).

### ***Ohrožení***

Je soubor maximálních dopadů pohromy, které lze očekávat v daném místě za specifikovaný daný časový interval s pravděpodobností rovnou stanovené hodnotě [1].

### ***Analýza systému pomocí kontrolního seznamu***

Analýza stavu systému a shody bezpečnostní dokumentace s požadavky legislativy pomocí předem připravených seznamů jednotlivých položek nebo kroků. Výsledkem je doplnění odpovědí "ano" nebo "ne" [1].

### ***Funkčnost***

Schopnost systému plnit dané úkoly přesně dle zadání [1].

### ***Řízení rizika***

Je plánování, organizování, přidělování pracovních úkolů a kontrola zdrojů organizace tak, aby byly minimalizovány ztráty, škody, zranění nebo úmrtí vyvolané různými pohromami, jejichž výskyt je pravděpodobný [1].

### ***Riziko***

Riziko je míra nepřijatelných dopadů způsobených pohromou o velikosti rovné hodnotě ohrožení. Riziko je pravděpodobná velikost škod, ztrát a újmy na chráněných zájmech, která odpovídá ohrožení od pohromy, které je normativně stanovené [1].

### ***Analýza rizika***

Metodický nástroj pro zjištění a ocenění rizik [1].

### ***Kritičnost***

Mezní, krajní stav nebo vlastnost systému [2].

## **2.2. Kultura bezpečnosti**

Definice kultury bezpečnosti je soubor charakteristik a osobních postojů v organizaci a myšlení lidí, který zajišťuje, že problémům bezpečnosti je věnována nejvyšší priorita, odpovídající jejich významnosti [3].

Principy kultury bezpečnosti dle [3]:

- přímý, otevřený přístup k slabým místům, jednání zaměřené na nalezení řešení,
- odklon od kultury připisování viny,
- pracovníci i vedení jednají odpovědně, samostatně s orientací na tým. „Kultura odpovědnosti“ je součástí jejich života,
- standardy bezpečnosti jsou akceptovány a integrovány do každodenní činnosti firmy,
- bezpečnost a ochrana zdraví tvoří významnou hodnotu jak pro pracovníky firmy, tak i pro celou organizaci.

Úroveň kultury bezpečnosti je veličina, kterou není možno přímo a exaktně změřit, přesto má zásadní vliv na chování pracovníků, styl řízení i úroveň technologie. Definování slabých a silných stránek v jednotlivých oblastech bezpečnosti je důležité pro úroveň kultury bezpečnosti. Porovnání časové řady průzkumů umožní vyhodnotit účinnost korektivních opatření.

Kultura bezpečnosti pro společnost vyrábějící motor letadla znamená, že se společnost zavazuje provozovat výrobu s nejvyššími standardy bezpečnosti. Pro dosažení tohoto cíle je rozhodující mít zavedené účinné a bez zábran prováděné ohlašování (oznamování) všech nehod, incidentů, nahodilých událostí a případů, zkušeností, pochybností a dalších informací a údajů, které by mohly mít nepříznivý vliv na bezpečně vyrobený díl leteckého motoru. A nakonec každý jednotlivý zaměstnanec je nejen laskavě vybízen, ale i povinen ohlásit jakoukoli informaci, týkající se bezpečnosti. Ohlašování není předmětem jakéhokoli obviňování a následného odvetného opatření. Hlavním účelem ohlašování je řízení a ovládnutí rizika a předcházení incidentům a nehodám, nikoli přisuzování viny. Nebudou podnikány žádné kroky vůči zaměstnanci, který oznámí jakékoli údaje, týkající se bezpečnosti pomocí systému hlášení, pokud takové oznámení bez nejmenších pochybností neodhalí, že byl spáchán nezákonný čin, hrubá nedbalost nebo úmyslné a vědomé porušení předpisů nebo technologických postupů. Metoda sběru, zaznamenávání a šíření bezpečnostních informací zaručuje ochranu v celé šíři a objemu dle zákona, včetně ochrany totožnosti toho, kdo informaci, týkající se bezpečnosti ohlásil [3, 4].

Jednotlivé pilíře kultury bezpečnosti jsou znázorněny na obrázku 1.



Obrázek 1: Pilíře kultury bezpečnosti [5].

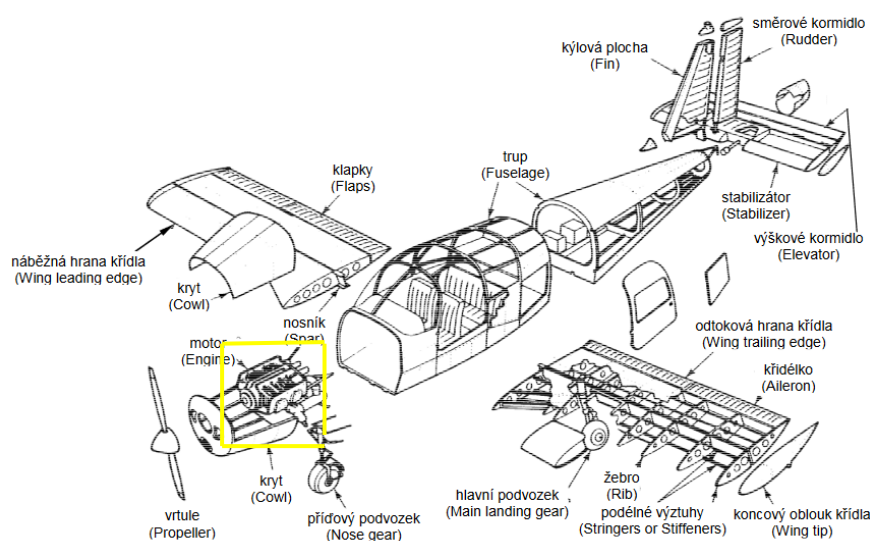
Z obrázku 1 vyplývá, že mezi důležité faktory, které ovlivňují kulturu bezpečnosti, patří nejen komunikace, celkový důraz na prevenci a podpora bezpečného myšlení, ale také analýza událostí.

Proto v kapitole 5 jsou analyzovány postupy výroby, zpracované do procesních map, jednotlivých dílů – nárazník, pouzdro, vzpěra a prstenec, které tvoří sestavu ochranného krytu a následně pokračuje výroba samostatného ochranného krytu. Dodržení technologického postupu výroby komponentů leteckého motoru, je jeden z nejdůležitějších bodů pro dosažení kvalitního a přesného výrobku. Dodržením technologického postupu se zabráňuje vzniku chyb, které by mohl operátor výrobní buňky při obrábění provést. Do technologického postupu je nutné zařadit průběžné kontroly mezi operacemi, v kterých lze odhalit chybné provedení hrubovacích operací dříve, než je s chybou díl dokončen. Velkým vlivem na správný a přesný díl má přesnost stroje, řezné podmínky, použitý nástroj a jeho materiál, správně zvolený vstupní materiál dílu, mezioperační praní, které odstraní nečistoty vzniklé předešlou hrubovací operací a pro zvolený díl ochranného krytu jsou to i správně zvolené metody svařování. Proto aspekty jsou dále v kapitole 5 sledovány, rozebrány a v kapitole 7 navrhnutá vylepšení, která by mohla snížit rizika při výrobě ochranného krytu.

### 2.3. Bezpečnost leteckého motoru

Letadlo je dopravní prostředek těžší než vzduch s pevným křídlem. Jeho základní části tvoří drak (křídlo, trup, ocasní plochy, řízení, podvozek), výstroj (záchranné systémy, odmrazovací, klimatizace a přetlakování, vybavení kabiny, přístroje) a pohonná jednotka[6].

Schematické znázornění struktury letadla je na obr. 2, na kterém jsou vyznačeny polohy motoru, na který se předmětná práce zaměřuje.



Obrázek 2: Schematické znázornění hlavních částí motorového letadla s vyznačením polohy motoru [6]

### 2.4. Motor letadla

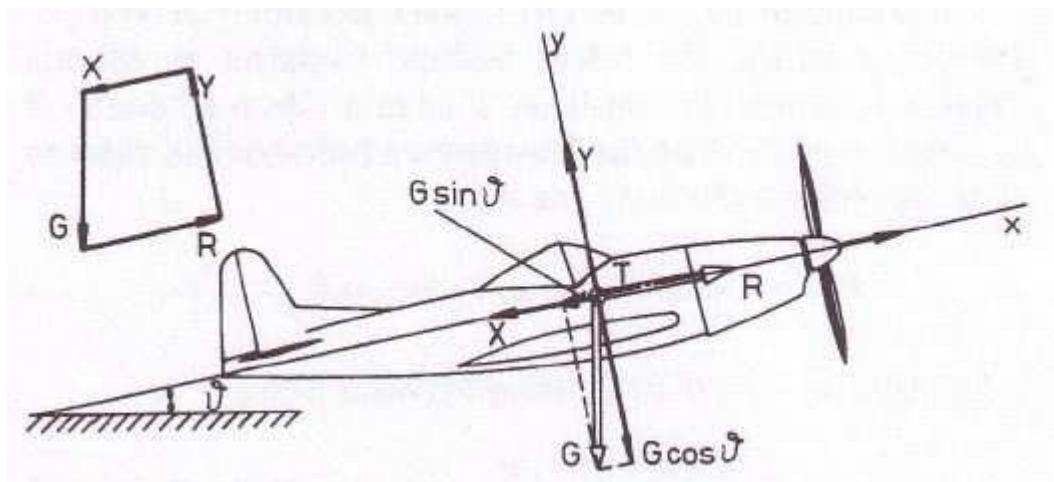
Aby letadlo mohlo letět, potřebuje určitou rychlost letu a úhel náběhu, jinak by mohlo dojít ke ztrátě potřebného vztlaku pro let. Potřebnou rychlost letu zabezpečuje tažná jednotka neboli motor letadla [7]. Situace je znázorněná na obrázku 3.

Vysvětlení účelu letadlové pohonné jednotky udávají následující vnější síly působící za letu [7]:

- tíha letadla  $G$ ,
- aerodynamická síla  $F_R$ 
  - a) vztlak  $Y$
  - b) odpor  $X$



- tah motoru R.



Obrázek 3: Síly působící na motorové letadlo [7]

Z obrázku 3 vyplývá, že pro překonání tíhy letadla a odporu vzduchu, jako složky aerodynamické síly je možné dosáhnout dostatečným tahem motoru.

Předpokládáme ideální rovnoměrný přímočarý pohyb ve svislé rovině, která je rovinou souměrnosti letadla. Pohyb je určen pohybem těžiště a je popsán rovnicemi, které vystihují podmínku rovnováhy působících vnějších sil ve směru rychlosti (osy x) a ve směru kolmém k rychlosti (osy y) [7].

$$R - X = G \sin \vartheta, Y = G \cos \vartheta \quad (1)$$

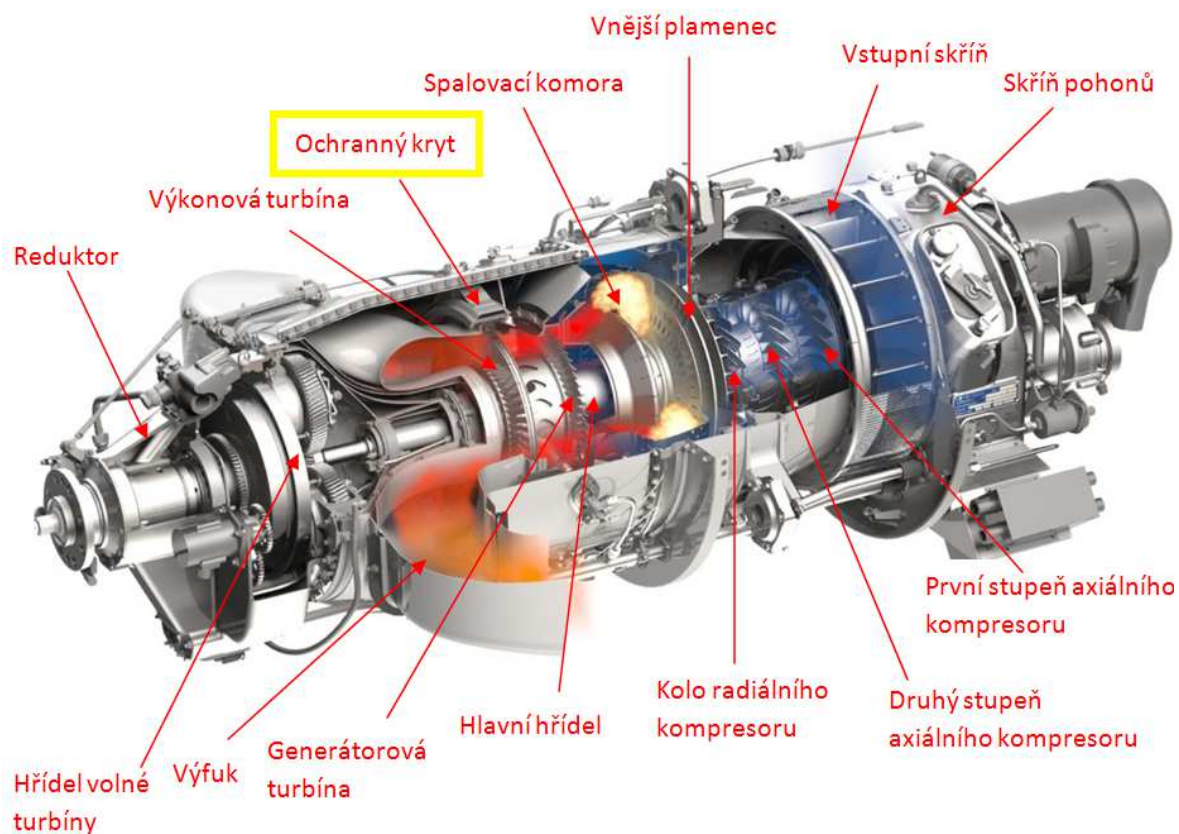
Při tahu  $R > X$  z rovnice (1) vyplývá že,  $\sin \vartheta > 0$ . Z toho plyne  $\vartheta > 0$  a letadlo stoupá. Platí to i v opačném případě, kdy  $R < X$ , a tak z toho vyplývá, že  $\vartheta < 0$  a letadlo klesá. Pokud se rovná tah odporu, letadlo nemění výšku letu. Situaci, kdy je  $R=0$  nazýváme klouzavý let. Letadlo se pohybuje na úkor potenciální energie [7].

Z uvedených údajů vyplývá, že pokud chceme dosáhnout ustáleného letu, tak potřebujeme pohonnou jednotku. Propulzní jednotka mění chemickou energii paliva na tah. Tahem pohonné jednotky se dostaneme i s letounem od povrchu země a zvýšíme svoji potenciální energii [7].

## 2.5. Funkce turbovrtulového motoru letadla

Motor letadla se skládá z generátoru neboli srdce motoru, který je složen z kompresoru, spalovací komory a generátorové turbíny. Kompresor z okolní atmosféry nasává vzduch, který stlačí a přesune dále do spalovací komory. Ve spalovací komoře dochází ke vstřikování paliva, které hoří, a vzniklé horké plyny pohánějí turbínu generátoru. Přes společnou hřídel turbína pohání kompresor, a tím získává stlačený vzduch, který je potřebný k hoření paliva [8].

Pro pohon volné turbíny, která je připojena k vrtuli přes reduktor (převodovka o stálém poměru, jejímž účelem je snižování vysokých otáček volné turbíny na úroveň použitelnou pro vrtuli), se využívá zbylá energie v horkých plynech za generátorovou turbínou [8]. Obrázek 4 ukazuje detailní strukturu turbovrtulového motoru. Předmětem šetření v práci je ochranný kryt vyznačený orámováním.



Obrázek 4: Popis turbovrtulového motoru [9]

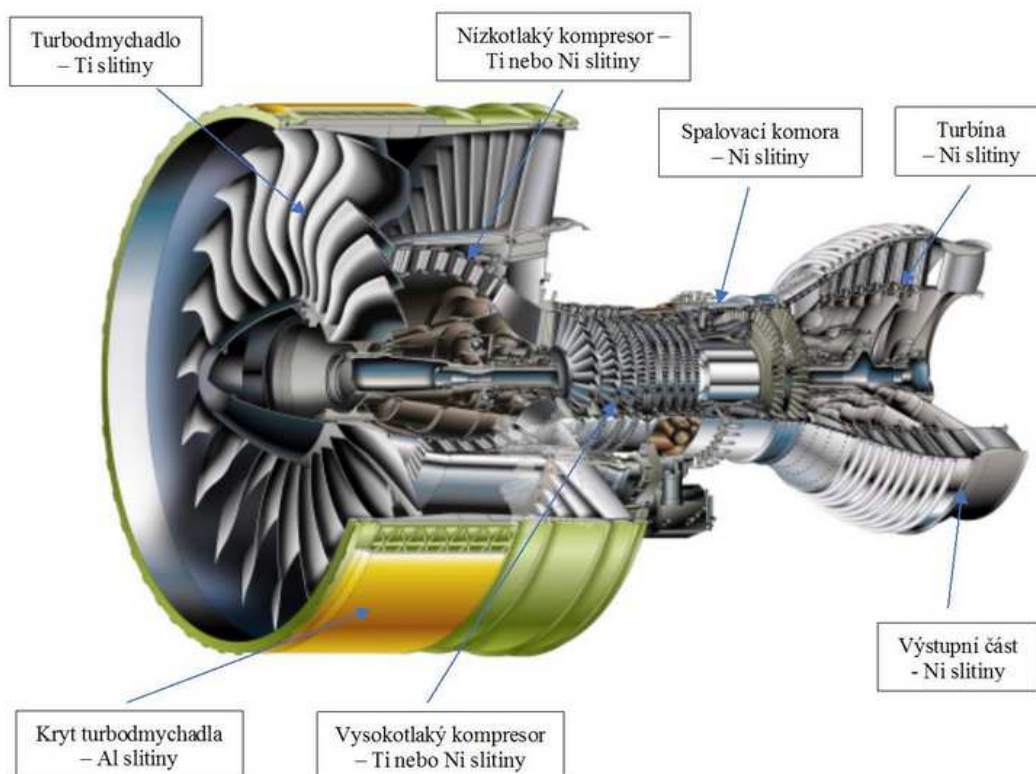
Jak vyplývá z obrázku 4, letecký motor se rozděluje na studenou část a horkou část. Rozhraní mezi oběma částmi tvoří spalovací komora.

## 2.6. Materiály používané pro výrobu leteckých motorů

Hlavní části leteckého motoru a požadavky na ně kladené jsou dle [10]:

1. Turbodmychadlo – na komponenty turbodmychadla jsou kladeny vysoké požadavky na pevnost a nízkou hmotnost, a proto jsou lopatky vyrobeny z kompozitních materiálů, nebo z titanových slitin.
2. Kompresor – komponenty kompresorů musí mít vysokou pevnost, odolnost vůči tečení, a zvláště odolnost proti napětí vznikající vlivem odstředivých sil. Komponenty při letu mohou být vystaveny i teplotám do 650 °C. Proto jsou lopatky a disky kompresoru v závislosti na pracovní teplotě navrhovány z titanových nebo niklových slitin.
3. Spalovací komora – teploty ve spalovací komoře mohou dosahovat až 1500 °C, a proto jsou vyrobeny z niklových, nebo kobaltových slitin. Kromě vysokých teplot musí materiály odolávat i napětí, vzniklém teplotním gradientem a odolávat oxidaci a korozi za vysokých teplot.
4. Turbína – turbínové disky a lopatky patří k nejvíce namáhaným částím proudového motoru. Kromě vysokých teplot, které dosahují hodnot až 1100 °C, jsou na lopatky kladeny nároky na odolnost vůči oxidaci, vůči tečení za vysokých teplot (tzv. creep) a požaduje se vysoká pevnost při zvýšených teplotách. Disky jsou vyrobeny z niklových slitin, lopatky z niklových slitin se strukturou z usměrněných zrn, nebo monokrystalu. Na povrchu lopatek je nanesený ochranný nástřík, který slouží jako tepelná bariéra.
5. Výfuková část – z niklových nebo titánových slitin a kompozitu.

Jednotlivé části motoru s popisem hlavních částí jsou znázorněny na obrázku 5. Z obrázku je zřejmé, že jednotlivé části proudového motoru jsou vyrobeny z různých vysoko odolných slitin.



Obrázek 5: Hlavní části proudového motoru [11]

Na obrázku 5 je vidět, že nejpoužívanějším materiálem pro výrobu leteckých motorů mají niklové slitiny. Používají se pro díly horké sekce, tj. díly vystavené teplotám vyšším jak 500 °C. Pro díly vystavené minusovým teplotám okolní atmosféry, resp. teplotám až do 500 °C se používají hliníkové a titanové slitiny.

### 2.6.1. Hliník

Hliník je možné najít ve všech částech letadel – trup, motory, příslušenství, palivové nádrže. Je široce používán kvůli vysokému poměru pevnosti k hmotnosti a korozní odolnosti.

Hliník je lehká slitina s hustotou 2,7 g.cm<sup>-3</sup> a teplotu tavení 655 °C. V důsledku vznikajícího oxidu hlinitého Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na povrchu velká většina hliníkových slitin má dobrou korozní odolnost v atmosférickém i chemickém prostředí.

Hliník se rozděluje na tvárněný a odlévaný. Některé tvárněné slitiny se dají zpevňovat tvářením za studena, zatím co jiné je možné zpevňovat precipitačním vytvrzením. Zpevňování nevytvrditelných slitin je kombinací zpevnění tuhého roztoku, precipitátů a tvářením za studena.

Slitiny zpevněné tvářením za studena zahrnují komerčně čistý hliník, hliník-manganové, některý hliník-křemíkové a hliník-hořčíkové slitiny. Slitiny mohou být zpevněné k různým hodnotám pevnosti, se snížením houževnatosti.

Vyšší pevnost lze ale dosáhnout u některých slitin tepelným zpracováním (precipitačním vytvrzením), které zahrnuje hliník-měď, hliník-hořčík-křemíkové a hliník-zinkové slitiny hliník-lithiové slitiny [12].

Dle [12] se v leteckém průmyslu uplatnili nejvíce dva typy hliníkových slitin, Al-Cu a Al-Li slitiny. Slitiny Al-Cu jsou vytvrditelné slitiny, které obsahují 4 až 5 hm. % zahrnují dostupné slitiny s nejvyšší pevností používané pro vysoko kvalitní díly určené pro letectví. Tyto slitiny mají dobrou houževnatost v případě, že obsahují méně jak 0,15 hm. % Fe.

Dalším ze skupiny hliníkových slitin používaných v leteckém průmyslu jsou hliník-lithiové slitiny. Lithium je mnohem lehčí než hliník, a každé hmotnostní procento přísady lithia snižuje hmotnost slitiny o 3 %. Navíc přísada lithia zvyšuje modul pružnosti, kde 1 % přísady zvyšuje o 6 %. Lithium je ale velmi aktivní prvek, značně zvyšující cenu tavby i odlévání. Tyto slitiny stojí přibližně tři krát tolik v porovnání s konvenčními vysoko pevnými hliníkovými slitinami [12]. Díl leteckého motoru vyrobený z hliníkové slitiny je zobrazený na obrázku 6. Jedná se o kryt turbodmychadla, který se nenachází v horké části motoru, a proto může být vyroben z materiálu, na který nejsou vysoké požadavky s ohledem na teplotu.



**Obrázek 6: Kryt dmychadla proudového motoru vyrobeného z hliníkové slitiny s lopatkami z titanu [13]**



### 2.6.2. Titan

Dle [14] mezi hlavní výhody titanových slitin patří relativně nízká hustota, vysoká pevnost a výborná korozní odolnost. S hustotou  $4,5 \text{ g.cm}^{-3}$  se zařazuje mezi lehké kovy a je tedy o polovinu lehčí než ocel a niklové superslitiny. Mez pevnosti niklových slitin se pohybuje od 480 MPa pro některé komerční slitiny, až po 1100 MPa pro konstrukční slitiny. Navíc, v porovnání s hliníkem a hořčíkem má výrazně vyšší únavovou pevnost. Z toho důvodu patří titanové slitiny k široce používaným konstrukčním materiálům v leteckém průmyslu pro drak letadla i komponenty motoru. Ku příkladu, 42 % hmotnosti draku stíhačky F-22 se skládá z titanových slitin. U komerčních proudových motorů se používají titanové slitiny hlavně pro lopatky turbodmychadla (obrázek 7), nízkotlakový kompresor a přibližně 2/3 vysokotlakého kompresoru. Jelikož lopatky jsou rozhodující pro dlouhodobý výkon stroje, musí být zhotoven z vysoce odolné slitiny.



Obrázek 7: Titanové lopatky turbodmychadla proudového motoru Rolls Royce Trent 7000 [15]

Největší nevýhodou titanových slitin je jejich relativně vysoká cena. Titan je reaktivní kov s vysokou teplotou tavení ( $1720 \text{ }^\circ\text{C}$ ), lití ingotů, a primární postupy výroby titanu jsou složité a finančně nákladné. Sekundární výrobní procesy, jako je tváření a obrábění, jsou také obvykle dražší než ty, pro ostatní kovy [14].

Nejpoužívanější slitinou titanu v leteckém průmyslu je slitina Ti-6Al-4V, jejíž spotřeba je až 60 % z celkové produkce titanových slitin používaných v leteckém průmyslu. Pro kritické díly se používá slitina Ti-6Al-4V ELI, která na rozdíl od komerční slitiny Ti-6Al-4V obsahuje 0,16 až 0,18 % kyslíku. V slitině ELI je množství kyslíku omezeno na 0,10 až 0,13 %. Je tím mírně snižena pevnost, ale zvýšená tažnost a lomová houževnatost [14].

### 2.6.3. Kompozitní materiály

Mezi nejpoužívanější kompozity používané v leteckých konstrukcích patří především kompozity s polymerní maticí a uhlíkovými vlákny, tzv. CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Uhlíková vlákna vynikají oproti ostatním druhům vláken především nízkou hustotou, která se pohybuje v rozmezí 1800 až 2200 kg.m<sup>-3</sup> a vynikajícími mechanickými vlastnostmi. Nevýhodou uhlíkových vláken je jejich křehkost [16].

První komerčně vyráběné kompozitní lopatky turbodmychadla (obrázek 8) uvedla společnost GE v motoru GE90. Délka každého listu dosahuje víc jak 1,2 m a hmotnost nepřesáhne 23 kg. Tyto lopatky jsou vyrobeny z epoxidové matrice zpevněné uhlíkovými vlákny, které dosahují dvounásobní pevnost při třetinové hmotnosti v porovnání s titanovými lopatkami [11].



Obrázek 8: Kompozitní lopatka turbodmychadla motoru GE90 [11].



Předmětné řešení používají někteří výrobci pro dopravní letadla.

#### 2.6.4. Superslitiny

Superslitiny jsou niklové a nikl-železné a kobaltové slitiny používané při teplotách vyšších jak 540 °C. Vyznačují se kombinací velmi dobrých mechanických vlastností a odolností proti degradaci povrchu. Bez vývoje těchto materiálů, který začal před 50 lety, by moderní proudové motory vůbec nemohly existovat. Např. niklové superslitiny se používají i do těch nejnáročnějších vysokoteplotních aplikací, u kterých teplota překračuje 80 % počáteční teploty tavení, tedy procenta, které je vyšší jako pro ostatní druhy slitin. V současných leteckých motorech představují víc jak polovinu hmotnosti motoru. Jejich uplatnění je široké, od nízkotlakových a vysokotlakových částí proudových motorů, přes spalovací komoru, turbíny až po výstupní části motoru [14].

Příklad dílu vyrobeného z niklové slitiny, krytu turbíny proudového motoru je na obrázku 9. Vzhledem k vysokým požadavkům na korozní odolnost za vysokých teplot a žárupevnost, nelze tyto díly vyrábět z jiných materiálů, pouze s niklových slitin.



Obrázek 9: Kryt turbíny z niklové slitiny [17].

Hustota niklových slitin se pohybuje v rozmezí 7,8 až 9,4 g.cm<sup>-3</sup>, závisí to od přísadových prvků, přičemž prvky jako hliník, titan a chrom hustotu snižují, zatímco prvky wolfram,

rhenium a tantal hustotu zvyšují. Také korozní odolnost závisí primárně od přísadových prvků [18]. Chemické složení některých superslitin je uvedeno v *Tab. 1*:

**Tabulka 1: Chemické složení vybraných Ni, Ni-Fe a Co superslitin [18]:**

<i>Označení</i>	<i>Chemické složení v hm. %</i>										
<i>slitiny</i>	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	C	Další
Haynes 230	22	55	≤ 5	2	14	-	-	0,35	≤ 3,0		
Inconel 600	15,5	76	-	-	-	-	-	-	8,0	0,08	0,25 Cu
Inconel 617	22,0	55	12	9	-	-	-	1,0	-	0,07	
Inconel 625	21,5	61	-	9	-	3,6	0,2	0,2	2,5	0,05	
Hasteloy S	15,5	67	-	15,5	-	-	-	0,2	1,0	≤ 0,02	0,02 La
Hasteloy W	5,0	61	≤ 2,5	24,5	-	-	-	-	5,5	≤ 0,12	0,6 V
Hasteloy X	22,0	49	≤ 1,5	9	0,6	-	-	2,0	15,8	0,15	
Hayness 25	20,0	10	50	-	15	-	-	-	3,0	0,1	1,5 Mn
Hayness 188	22,0	22	37	-	14,5	-	-	-	≤ 3,0	0,10	0,90 La
Inconel 718	19,0	52	-	3	-	5,1	0,9	0,5	18,5	≤ 0,08	
Nimonic 80A	19,5	73	1	-	-	-	2,25	1,4	1,5	0,05	≤ 0,1 Cu
Nimonic 90	19,5	55	18	-	-	-	2,4	1,4	1,5	0,06	

Teplota tavení čistých prvků je dle [17] následující: niklu 1453 °C, kobaltu 1495 °C a železa 1537 °C. Teplota tavení a interval tavení superslitin je funkcí chemického složení a prvotního zpracování. Obecně mají kobaltové slitiny vyšší teplotu tavení jako niklové nebo nikl-železné slitiny. Niklové slitiny mají teplotu tavení kolem 1204 °C, ale moderní monokrystalické niklové slitiny mají teplotu tavení stejnou, nebo větší jako kobaltové slitiny [18].

Všechny tři typy superslitin mají austenitickou, plošně centrovanou mřížku (fcc – angl. face-centered cubic) s tím, že železo má kubickou, prostorově uspořádanou mřížku a kobalt hexagonální těsně uspořádanou mřížku při pokojové teplotě. Vlivem dostatečného množství přísadových prvků mají slitiny v celém teplotním rozsahu (pokojové teploty, až po teplotu tavení) stabilní fcc krystalovou strukturu. Proto není horní hranice použití superslitiny dána teplotou alotropické proměny (změny krystalové struktury), ale teplotou tavení a teplotou rozpouštění zpevňujících fází [18].

Vlivem právě plošně centrované mřížky je možné většinu superslitin tvářit. Avšak některé superslitiny jsou tak vysoko legované, že je nelze zpracovat procesem tváření a jejich výroba musí probíhat buď odléváním, nebo práškovou metalurgií.

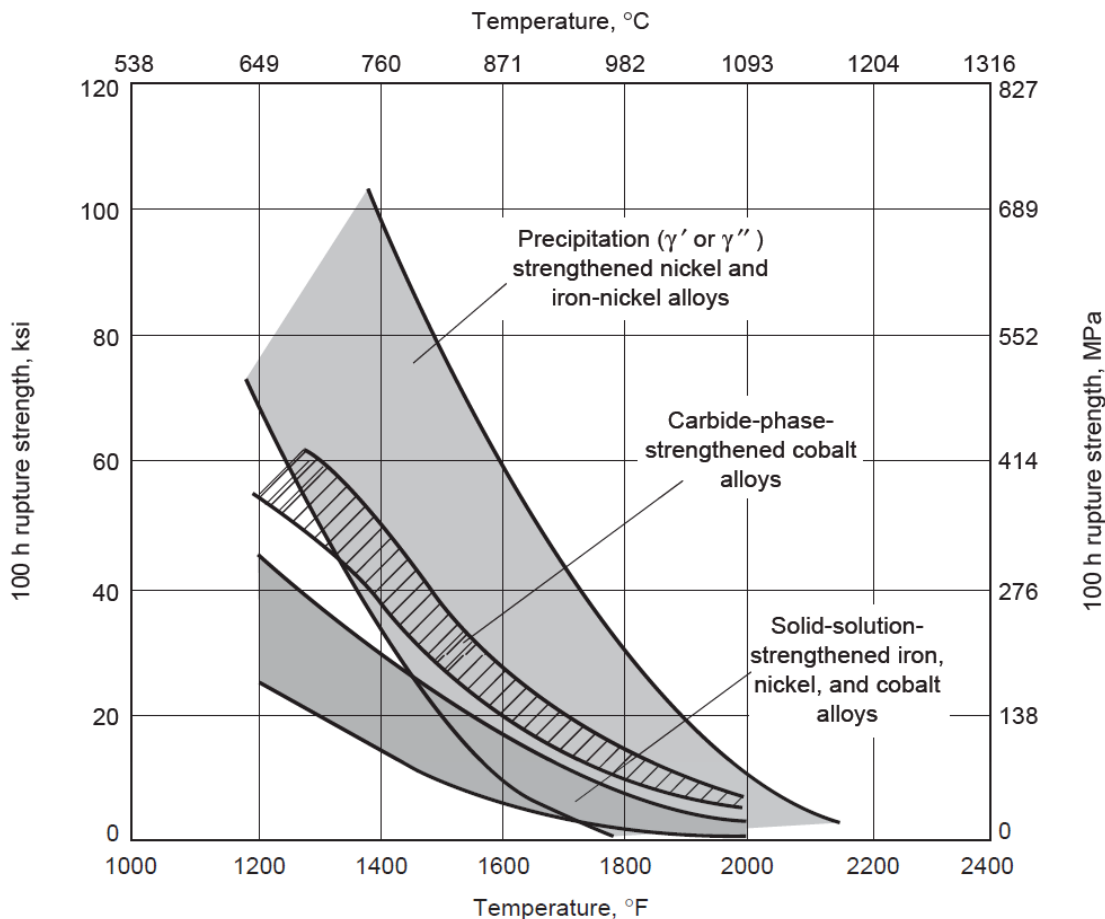
Hlavním zpevňujícím mechanismem niklových a nikl-železných slitin je zpevněním tuhého roztoku, nebo precipitačním vytvrzením. Navíc, karbidy po hranicích zrn jsou taky důležité pro vysokoteplotní stabilitu [14].

Austenitická mřížka  $\gamma$  je schopna rozpouštět velké procento prvků zpevňujících tuhý roztok jako je kobalt, železo, chrom, molybden a wolfram. Přísada hliníku a titanu kromě zpevnění tuhého roztoku tvoří základ pro precipitační vytvrzení. Zpomalením difúze prvků jako jsou wolfram a molybden pomáhá snižovat creep při vysokých teplotách [14].

Nejdůležitějším precipitátem v niklových a nikl-železných slitinách je intermetalická fáze  $\gamma'$   $\text{Ni}_3\text{Al}$  a  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ . Tyto precipitáty jsou stabilní i za vysokých teplot, přičemž dochází se vzrůstající teplotou pouze k pomalému hrubnutí (stárnutí) dokonce i při teplotách  $0,7.T_m$  (teploty tavení) [14]. Mezi niklové slitiny zpevněné přísadami Al a Ti patří např. Waspalloy, Inconel X-750 a Nimonic 80 A.

Dalším prvkem umožňujícím precipitační zpevnění je niob ve formě precipitátů  $\text{Ni}_3\text{Nb}$ . Výskyt precipitátů  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  v niklových slitinách způsobuje, že mají tyto materiály vysoké pevnosti za nízkých, až středných teplot. Nad  $650\text{ }^\circ\text{C}$  se stávají precipitáty nestabilními [14].

Porovnání pevnosti niklových precipitačně zpevněných slitin, kobaltových slitin a niklových slitin zpevněných pouze legováním vhodnými přísadami se vzrůstající teplotou je znázorněno na obrázku 10. Všechny tři typy slitin je možné použít pro jejich dobrou odolnost proti korozi za vysokých teplot (žáruvzdornost) až do  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ . Jak je ale možné vyčíst z grafu na obrázku 10 se zvyšující teplotou dochází k rapidnímu poklesu pevnosti se vzrůstající teplotou. Pouze precipitačně vytvrditelné niklové slitiny je možné použít pro teploty do  $982\text{ }^\circ\text{C}$ . Proto tyto slitiny nazýváme taky žárupevné a používáme je v místech, ve kterých jsou v motoru vysoké teploty.



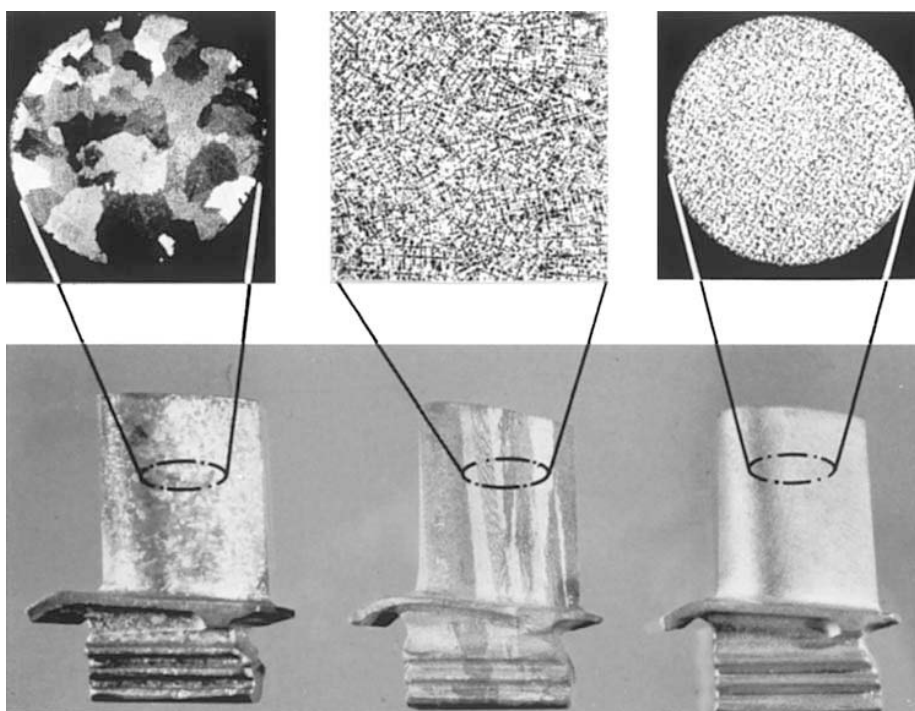
Obrázek 10: Porovnání pevnosti jednotlivých typů niklových slitin v závislosti od teploty [18].

Superslitiny jsou vyráběné procesem tváření, odlévání, nebo metodou práškové metalurgie. Obecně mají tvářené materiály homogenní strukturu s jemnými zrny, s čehož vyplývají velmi dobré tahové vlastnosti i únavové pevnost, proto se z výkovků vyrábějí např. disky turbín. Naproti tomu mají odlitky strukturu tvořenou větším zrny, s výraznější segregací. Proto se z odlitků navrhují díly přednostně namáhané tečením a praskáním pod napětím, např. lopatky turbín. A některé superslitiny mají tak výrazný podíl přísad, že je možné, je vyrábět pouze odléváním, nebo metodou práškové metalurgie [18].

Výroba výkovků se skládá z několikanásobného odlévání, homogenizací struktury a válcování pro odstranění licí struktury. Následuje finální kování pro dosažení požadovaného tvaru a konečného zjemnění struktury. Několika násobné odlévání se skládá z vakuového indukčního ohřevu pro dosažení požadovaného chemického složení a snížení obsahu nežádoucí příměsí. Pro kritické díly, pro zvýšení únavové pevnosti, houževnatosti a nárazové pevnosti se používá

dvojnásobné vakuové protavování. Následuje elektrostruskové rafinace a obloukové vakuové protavování pro odstranění kovových a nekovových nečistot, plynů a vměstků [18].

Velmi důležitým způsobem výroby lopatek turbín leteckých motorů ze superslitin je odlévání formou vytavitelného modelu. Kromě konvenčního (rovnoosého) způsobu tuhnutí slitin s polykrystalickou strukturou byly vyvinuta i metoda usměrněného tuhnutí (Directionally Solidified – DS) a výroba monokrystalů (Single Crystal – SX). Oba způsoby mají na rozdíl od klasických polykrystalů mnohem lepší vlastnosti se vzrůstající teplotou. Uspořádání (nebo v případě monokrystalů úplné odstranění) hranic zrn ve směru kolmém na směr namáhání jako místa iniciace poškození při vysokých teplotách [16]. Rozdíl v struktuře (rovnoosé zrno, zrna s usměrněným tuhnutím a monokrystal) těchto slitin je znázorněn na obr. 11.



**Obrázek 11: Porovnání makro a mikrostruktury lopatek turbín s mikrostrukturou zleva: rovnoosých zrn, zrn s usměrněnou strukturou a monokrystalu [18].**

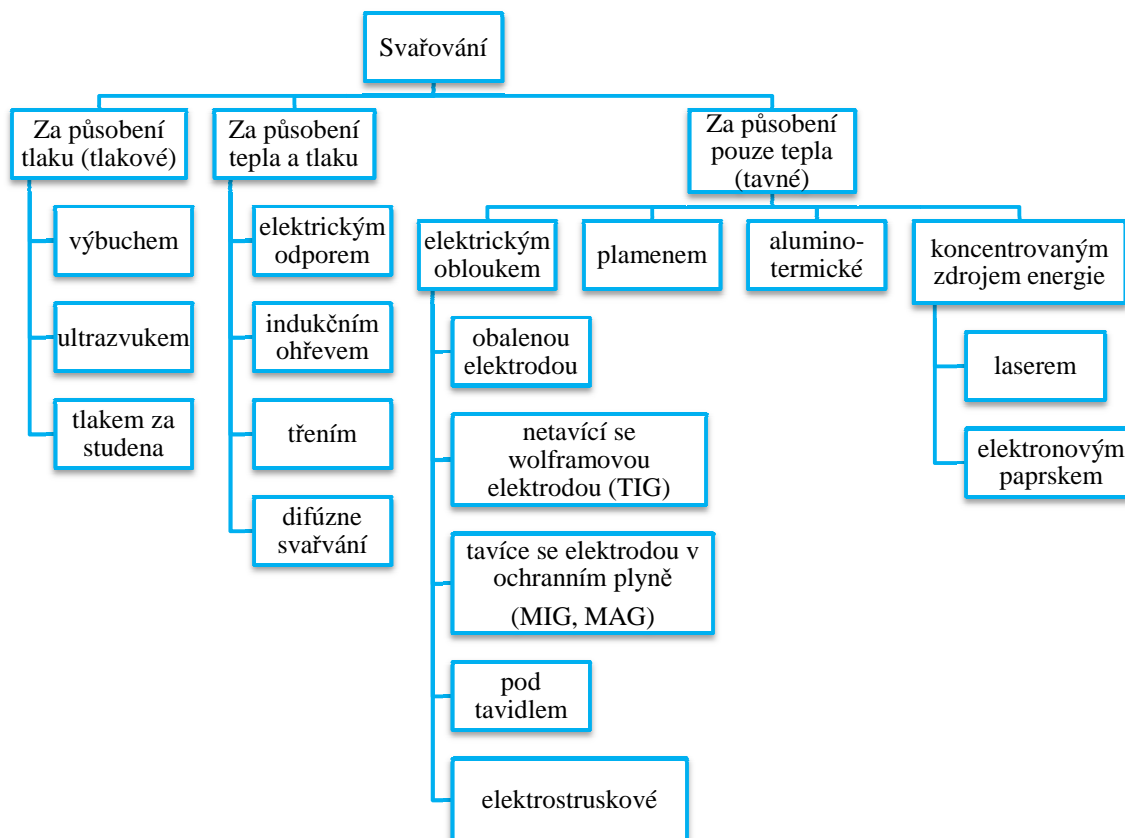
## 2.7. Svařování

Protože úkolem práce je postup zacílený na výrobu bezpečných dílů, byl ve spolupráci s experty předurčeného podniku vybrán jako kritický proces, proces svařování. V této kapitole je stručně popsána technologie svařování a detailněji metoda svařování použitá pro výrobu ochranného krytu, tj. metoda obloukového svařování netavicí se wolframovou elektrodou v inertním plynu (TIG, z anglického Tungsten Inert Gas) [19].

Svařování je způsob vyhotovení nerozebíratelného spojení dvou rovnorodých, nebo různorodých materiálů. Svarový spoj se vyhotoví pomocí přídavného materiálu, který se v roztaveném stavu smísí s natavenými hranami svařovaných částí. U některých způsobů svařování, např. svařování elektrickým odporem, nebo svařování elektronovým paprskem, ale použití přídavného materiálu pro vytvoření svarového spoje není nevyhnutné, spoje se vytvoří roztavením pouze základního materiálu.

Účelem svařování je vyhotovení pevného spoje požadovaných vlastností, tj. pevnosti, houževnatosti a odolnosti vůči degradačním procesům, které mohou probíhat během celé plánované životnosti spoje [19].

Metody svařování je možné rozdělit dle různých hledisek, a to způsobu mechanizace, druhu svařovaného materiálu, v prostředí, ve kterém probíhá svařování apod. Nejběžnějším je rozdělení podle zdroje energie potřebné po vytvoření svarového spoje. Dle zdroje energie rozdělujeme svařování na: za působení tlaku; za působení tepla a tlaku a za působení pouze tepla. Každá skupina má další dělení, jak ukazuje obr. 12. Ve společnosti GE používáme svařování tavné, které se provádí wolframovou elektrodou neboli metodou TIG.

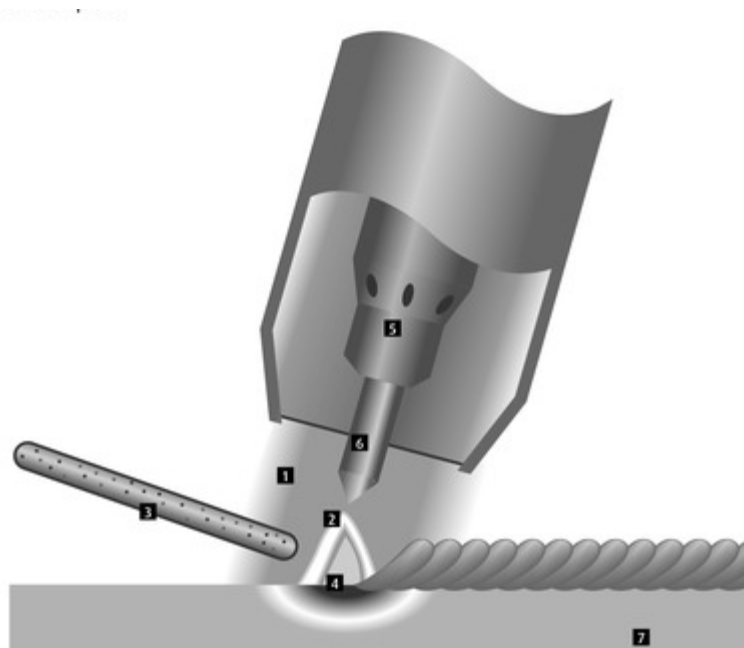


Obrázek 12: Základní rozdělení metod svařování [19].

### 2.7.1. Svařování TIG

Svařování TIG patří mezi obloukové metody svařování. Elektrický oblouk hoří mezi netavící se wolframovou elektrodou a roztaveným svarovým kovem (svarovou lázní) v inertní atmosféře ochranného plynu. Pro účely svařování se jako ochranný plyn používá argon, helium, nebo jejich směsi [19].

Na obrázku 13 je schéma procesu předmětného svařování. Důležitá je dovednost správného uchopení elektrody a přídatného materiálu ve formě drátu při procesu svařování.



**Obrázek 13: Schematické znázornění svařování v ochranné atmosféře inertního plynu TIG, kde: 1. ochranný plyn, 2. elektrický oblouk, 3. přídavný materiál, 4. svarová lázeň, 5. svařovací hořák, 6. netavící se wolframová elektroda, 7. základný (svařovaný materiál)[20]**

Svařování metodou TIG (Tungsten Inerts Gas) bylo vyvinuto na konci 30. let 20 století, pro potřeby svařování hořčíkových slitin. Tato metoda svařování z části nahradila nýtování, jako v té době nejpoužívanější metody spájení komponent z hliníku a hořčíku v leteckém průmyslu.

Předmětná metoda svařování má nezastupitelnou pozici při svařování komponent z nerezové oceli, hliníku, hořčíku, mědi a reaktivních materiálů (např. titanu a tantalu). Tloušťka svařovaných materiálů se pohybuje od několika desítek milimetrů až po tloušťku několika milimetrů [21].

Výhody metody TIG oproti jiným způsobům svařování jsou dle [21]:

1. Produkce svarů vysoké kvality, tj. nízká deformace svařovaných dílů, svary s minimálním množstvím nečistot, plynů, respektive pórů a trhlin, výskytem, kterých se snižuje únosnost materiálu (odolnost vůči vysoké teplotě a tlaku).
2. Při svařování nevznikají výprsky, nevzniká tedy ani potřeba jejich dodatečného odstraňování.
3. Svařování je možné provádět s, nebo bez přídavného materiálu.
4. Svařování téměř všech druhů materiálů a také svařování různorodých materiálů.



5. Přesná kontrola svářecích parametrů.

Metoda svařování TIG se používá v případech, kdy jsou požadavky na vysokou kvalitu svarů. Pomocí metody je možné svařit téměř všechny druhy kovových materiálů. Svářeč během svařování je schopen velmi přesné kontroly tepla vneseného do svaru, protože okolí svaru není během svařování obklopeno výpary a plyny z procesu [21].

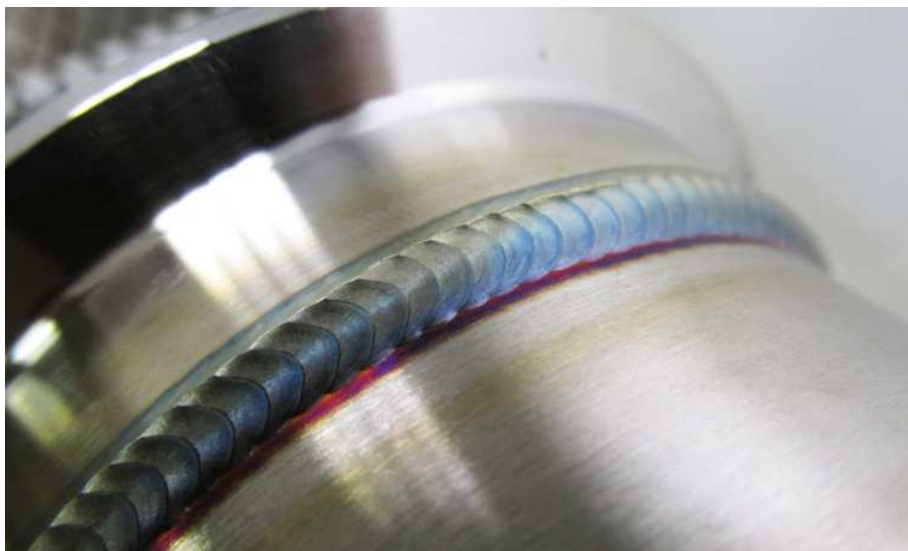
Kromě výhod má ale svařování metodou TIG v porovnání s ostatními metodami svařování také nevýhody [21], a to:

1. Nižší výkon svařování v porovnání s jinými obloukovými metodami svařování.
2. Vyšší nároky na zručnost svářečů.
3. Vyšší ekonomická náročnost výroby v porovnání s metodou svařování obalenou elektrodou.

Dle předpisu AWS D17.1 [22] se svary dle vzájemné polohy svařovaných dílů rozdělují na:

1. Tupé svary – spoj dvou materiálů (plechů, nebo trubek), vzájemně spojenými čelnými plochami.
2. Koutové svary – spojení dvou materiálů, které jsou vzájemně pod úhlem, a svarový spoj je umístěný v okrajích těchto svařovaných dílů.

Obrázky 14 - 16 ukazují používaná provedení svarů metodou TIG.



Obrázek 14: Tupý svar na trubce metodou TIG [23]



Obrázek 15: Koutový svar na trubce metodou TIG [24]



Obrázek 16: Koutový svar na plechu metodou TIG [25]

Na obrázku 14 je tupý svar na trubce, který se používá pro spojení čelních ploch.

Na obrázku 15 je koutový svar na trubce, který se používá pro spojení komponent svírajících určitý (přesně daný) úhel.

Na obrázku 16 je koutový svar na plechu, který má stejné požadavky jako koutový svar na obrátku 15.

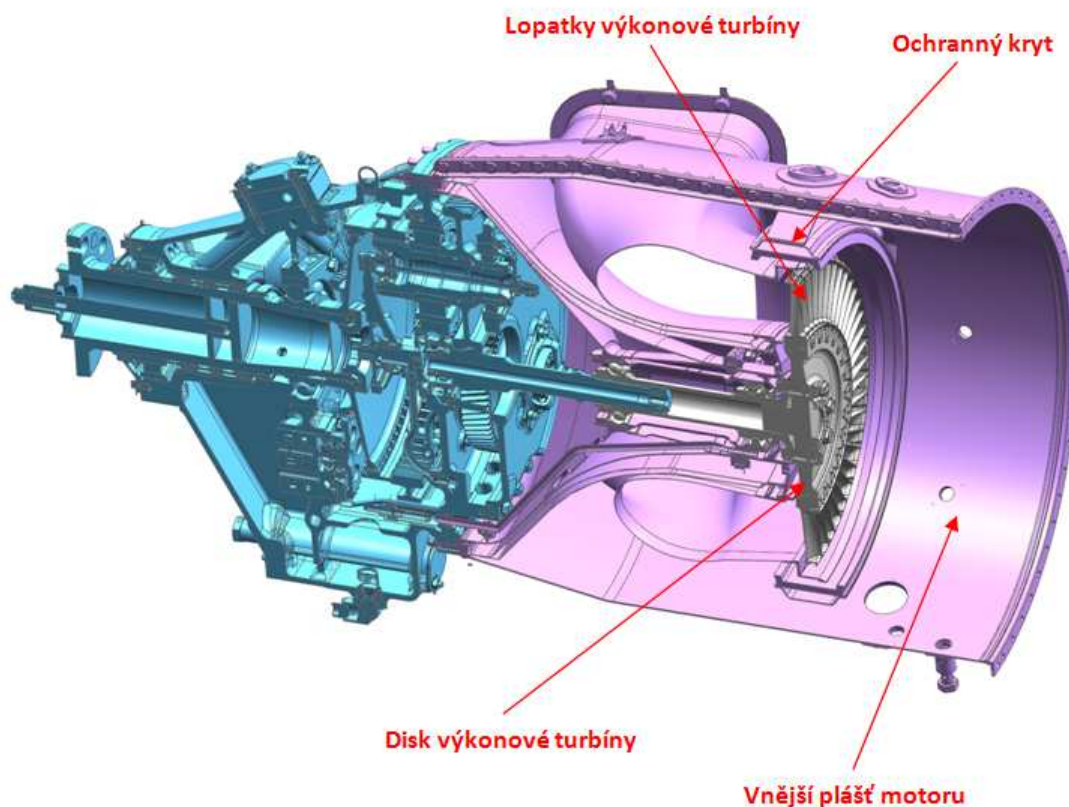
V práci je sledováno především svařování pomocí tupého svaru metodou TIG.

### 3. Data o výrobě komponent pro letecký motor

Firma GEAC sídlí v Praze 9 a zabývá se výrobou turbovrtulového motoru. Kapitola je věnovaná popisu funkce ochranného krytu, způsobu navrhování, výběru materiálu používaného pro výrobu ochranného krytu a popisu způsobu výroby.

#### 3.1. Princip a funkce ochranného krytu

Ochranný kryt je statický, tj. nerotační díl, jehož funkcí je zachytit případné úlomky lopatek nebo disku, případně jiných dílů. Nachází se uvnitř leteckého motoru, je uchycený k jeho vnějšímu plášti a obklopuje výkonovou turbínu (obrázek 17). Z obrázku je zřejmé, že ochranný kryt navazuje na spalovací komoru, ze které jsou horké plyny usměřňovány na lopatky výkonové turbíny. Proto je navrhován tak, aby kromě pohlcování nárazové práce, vyvolané při přetočení motoru, které může způsobit rozlet úlomků z poškozených lopatek, odolával vysoké teplotě a tlaku.



Obrázek 17: Zobrazení umístění ochranného krytu [8]

Jak již bylo zmíněno výše, ochranný kryt musí být dimenzován na zachycení velké kinetické energie. I když lopatka turbíny má relativně malou hmotnost, jak ukazuje výpočet níže, odstředivá síla při otáčkách, kterými lopatka v leteckém motoru rotuje, dosahuje hodnoty téměř 16 000 N.

Výpočet pro 100% přetížení (při otáčkách 36 660 min<sup>-1</sup>) zvažuje odstředivou sílu:

$$F_o = m \cdot R \cdot \omega^2 = m \cdot R \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30}\right)^2 = 0,01925 \cdot 0,0561 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 36660}{30}\right)^2 = 15\,916 \text{ [N]} \quad (3)$$

kde:

m = 19,25 g (hmotnost jedné lopatky)

R = 56,1 mm (vzdálenost těžiště lopatky od středu disku)

n = 36 660 min<sup>-1</sup>(kritické otáčky)

Hmotnost jedné lopatky při 100% zatížení je vyjádřena vztahem:

$$m = \frac{F_o}{g} = \frac{15\,916}{9,81} = 1\,622,43 \text{ [kg]} \quad (4)$$

kde:

g = 9,81 m.s<sup>-2</sup> (gravitační zrychlení)

Při návrhu konstrukce ochranného kruhu jde vždy o kompromis. Na jedné straně je požadavek na konstrukci dostatečně robustnou, aby byla bezpečnost dostatečně zajištěna. Na druhé straně je požadavek na co nejmenší hmotnost.

Na základě údajů v práci[26] ze všech závad rotoru, které jsou zodpovědné za selhání motoru, jde v 60 % o rozlet úlomků z dílů motoru (56 % úlomků z lopatek, 4 % úlomků z disků, skříně, těsnění apod.). Z praxe vyplývá, že z celkového počtu úlomků lopatek jich 15% nebylo

zachyceno ochranným krytem. To znamená, že v 85 % ochranný kryt zajistí bezpečí pro motor.

### 3.2. Materiál ochranného krytu

Díly horké sekce leteckého proudového motoru musí odolávat působení vysokých teplot a vysokých tlaků. Jediným druhem materiálů, které můžeme použít, jsou niklové a kobaltové superslitiny. Mezi ně patří i vytvrditelná niklová superslitina Nimonic 80A, použitá po výrobu ochranného krytu motoru GE M601 a GE H80 ve firmě GE.

Nimonic 80A je vytvrditelná nikl-chromová slitina, zpevněná přísadami uhlíku, titanu a hliníku používaná hlavně ve formě tvářených polotovarů. Vyvinuta byla pro práci při teplotách až do 815 °C. Vyrábí se vysokofrekvenčním tavením a odléváním na vzduchu do forem pro následné protlačování. Elektrostruskové přetavování se používá převážně pro výkovky. Nebo se používá pro zvýšení čistoty materiálu přetavování ve vakuu. Nimonic 80A se v současnosti používá zejména pro výrobu komponent proudových motorů, šroubů, potrubní systémy v jaderné energetice, nebo pro výrobu ventilů v automobilovém průmyslu.

Limitní hodnoty chemického složení materiálu jsou uvedeny v tabulce 2.

**Tabulka 2: Chemické složení slitiny Nimonic 80A v hm. % [27]**

C	Cr	Si	Cu	Fe	Mn	Ti
max. 0,10	18,0 - 21,0	max. 1,0	max. 0,2	max. 3,0	max. 1,0	1,8 - 2,7
Al	Co	B	Zr	Pb	S	Ni
1,0 - 1,8	max. 2,0	max. 0,008	max. 0,15	max. 0,0025	max. 0,015	zbytek

Základní fyzikální vlastnosti slitiny Nimonic 80A jsou uvedeny v tabulce 3:

**Tabulka 3: Fyzikální vlastnosti slitiny Nimonic 80A [27]**

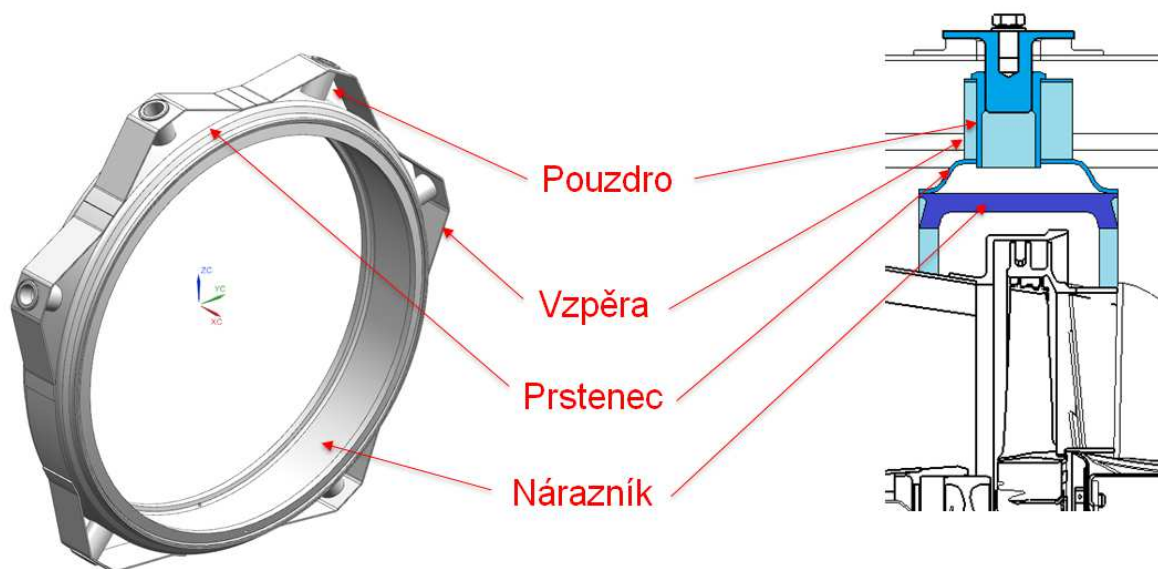
Hustota [g.cm <sup>-3</sup> ]	Interval tuhnutí [°C]	Tepelná vodivost [W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> ]	Elektrický odpor [μΩ.cm]
8,19	1320-1365	11,2 (20°C)	124 (20°C)

Volba vhodného režimu tepelného zpracování závisí na druhu zpracovaného materiálu. Např. pro protlačované materiály se používá výdrž na teplotě 1080 °C po dobu 8 hodin, po kterém následuje ochlazování na vzduchu, opětovný ohřev, tentokrát na teplotu 700 °C a výdrž na

této teplotě po dobu 16 hodin s následným ochlazováním na vzduchu. Tváření za tepla se provádí v teplotním intervalu 1050-1200 °C. Mezioperační žíhání se provádí při teplotě 1040 °C, po kterém následuje kalení do vody, nebo ochlazování na vzduchu. Slitina Nimonic 80A se může obrábět ve vytvrzeném stavu pro všechny metody obrábění. Maximální hodnota tvrdosti se pohybuje od 250-350 HV. Nimonic je možné bez obtížností svařovat všemi metodami odporového svařování. Tavnými metodami svařování je možné vyhotovit vyhovující svary do tloušťky 5 mm. Při svařování větších tloušťek je riziko vzniku mikrotrhlin ve svarech a teplem ovlivněné oblasti. Svařování elektronovým paprskem jsou bez vad svařované materiály tloušťky nad 5 mm. Při svařování by měli být dodrženy standardní opatření používané i pro ostatní niklové slitiny a svařovat by se měli materiály v rozpuštěném stavu. Pro dosažení požadovaných optimálních vlastností je nevyhnutelné po svařování provádět tepelné zpracování. Vysokoteplotní pájení je možné provádět ve vakuu, v atmosféře suchého vodíku, nebo v inertní atmosféře [27].

### 3.3. Postup výroby ochranného krytu

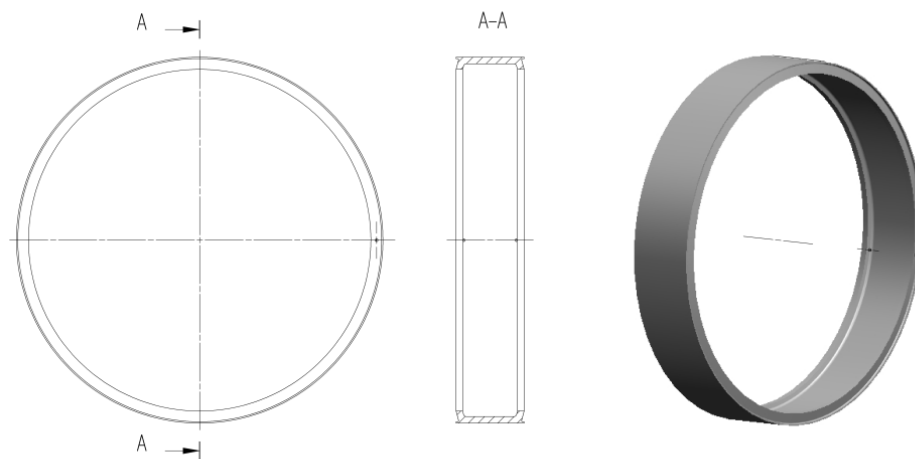
Vyhotovení celého ochranného krytu je zdlouhavý a náročný proces. Sestava ochranného kruhu se skládá ze čtyř dílů (obr. 18), které jsou vzájemně spojeny svařováním.



Obrázek 18: Zobrazení sestavy ochranného krytu a jeho komponent (vlevo) a zobrazení umístění ochranného krytu v turbovrtulovém motoru (vpravo) [28]

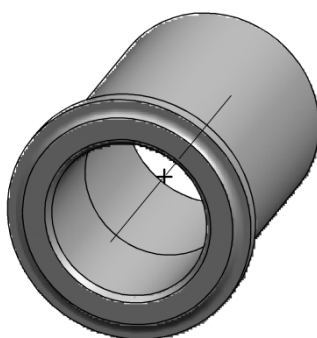
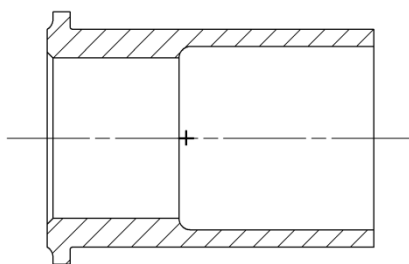
Ochranný kryt se skládá:

1. Nárazník – je nejdůležitější část ochranného krytu, která přijde jako první do kontaktu s lopatkami. Slouží k samotnému zachycení případných uvolněných dílů vysokotlaké turbíny (lopatek). Obrázek 19 ukazuje půdorys, pohled zleva a izotermický pohled nárazníku.



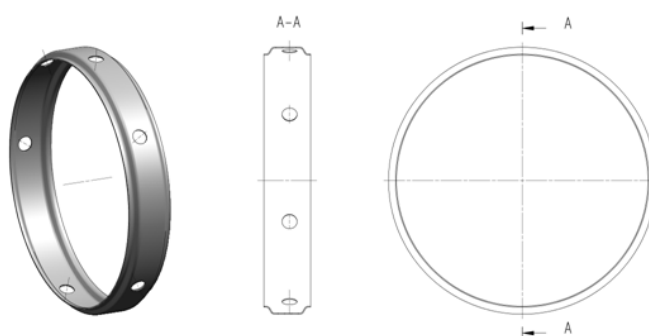
**Obrázek 19: Nárazník [28]**

2. Pouzdro – slouží k umístění čepu (čep již není součástí sestavy ochranného krytu). Čep slouží k ustavení celé sestavy ochranného krytu s pláštěm motoru. Obrázek 20 ukazuje řez pouzdrům a izotermický pohled.



**Obrázek 20: Pouzdro [28]**

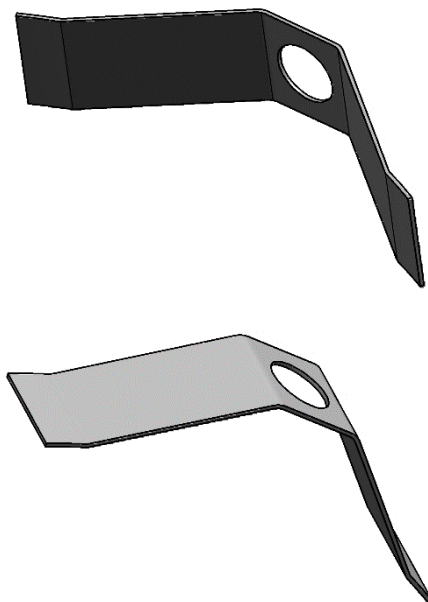
3. Prstenec – slouží k ustavení pouzdra pro uchycení k plášti motoru. Obrázek 21 ukazuje izotermický pohled, pohled zprava a půdorys.



**Obrázek 21: Prstenec [28]**



4. Vzpěra-slouží k upevnění pouzdra na správné pozici vzhledem k nárazníku. Obrázek 22 ukazuje izotermické pohledy.



Obrázek 22: Vzpěra [28]

#### **4. Metody rizikového inženýrství použité pro zpracování dat**

##### **Analýza**

Analýza je myšlenkový (logický) postup poznávání okolního světa a v něm vymezených objektů, jevů, procesů a problémů (reálných i abstraktních). Je to postup od složitého k jednoduchému, od nahodilého k nutnému, od rozmanitosti k totožnosti a jednotě. Podstata spočívá v myšlenkovém nebo praktickém rozložení celku na jeho jednotlivé části. Toto rozčlenění umožňuje poznat jeho strukturu, tj. prvky, vazby a toky mezi prvky, a přejít od obtížného na jednodušší poznání, které spočívá v aplikaci myšlenkově zvládnutelných postupů. Metoda vede k poznání podstaty zkoumaného systému a také k poznání jeho zákonitostí. Analýza musí být všestranná. Její logický doplněk je syntéza, která je procesem sjednocení částí, vlastností a vztahů vydělených analýzou v jeden celek. Platí jednota analýzy a syntézy [29].

##### **Syntéza**

Syntéza je logický postup od jednotlivých částí jevu nebo problému celku jevu nebo problému. Jedná se o proces sjednocení částí, vlastností a vztahů vydělených analýzou v jeden celek. Vychází od totožného a podstatného k rozdílu a rozmanitosti a sjednocuje obecné a jednotlivé do jednoho celku. Například v technologii jde pak o vytvoření návrhu zařízení s určitými parametry a podobně [29].

##### **Procesní mapa**

Procesní mapa je schematické znázornění průběhu procesu jako sledu určitých činností. Základním prvkem procesní mapy je proces [26, 28]. Výhodou schematického znázornění procesu výroby je vyznačení cest největšího objemového toku materiálu pracovištěm. Ukazuje místa, kde může vznikat konflikt ve výrobě z důvodu nedostatečných kapacit pracoviště nebo špatného plánování výroby. Správné plánování časových norem je úkolem logistického oddělení, je třeba zabránit vzniku úzkých míst pracovišť, ve kterých se hromadí velké množství materiálu. Plánování je potřebné volit tak, aby pracoviště mělo maximální kapacitu, ale optimální předání výrobních dávek z operace na operaci. Je žádoucí zajistit úměrně dodržování technologického postupu, v kterém technologie výroby komponentů volí, který stroj je pro obrábění dílu použitelný. Sloučení těchto požadavků může způsobit problém výroby [29].

### **Kontrolní seznam**

Jedná se o postup založený na systematické kontrole plnění předem stanovených podmínek a opatření. Nejedná se o náhodný soubor otázek, ale odpovídá procesnímu modelu systému, ve kterém probíhají sledované činnosti. Kontrolním seznamem se identifikují dopady bez toho, aby se jakýkoliv dopad přehlédl, ale neurčují vztahy mezi dopady. Tím je aplikace kontrolních seznamů omezena v případě nepřímých a kumulativních dopadů a interakce mezi dopady. Kontrolním seznam slouží k ověření např. plnění požadavků. Rozpoznává se jím stav informovanosti o daném objektu, procesu a podobně. Kontrolní seznam, který byl vyplněn, musí být často schválen různými členy personálu a manažerů před tím, než se projekt může posunout z jedné etapy do následující. Tato metoda působí jako komunikační prostředek i jako forma řízení. Technika může sloužit jak pro jednoduchá vyhodnocení, tak pro nákladnější a podrobnější výsledky. Je to úsporný způsob, jak identifikovat tradičně rozpoznatelné zdroje rizika. Vyhotovují se formou tabulek, ve kterých v prvním sloupci jsou otázky, a v dalším sloupci je zvolená forma odpovědi. U složitějších jsou místa pro odpovědi na otázky. Podstatné je způsob hodnocení, který musí být vždy odborně opodstatněný a přizpůsobený dané situaci. Volba hodnotového systému je často podstatně složitější než sestavení kontrolního seznamu, a proto ho vytváří vždy tým expertů se zkušenostmi ve sledované oblasti [29].

### **Bezpečnostní audit**

Jedná se o postup, při kterém se hledají rizikové situace na základě souborů stanovených rizikových situací a navrhují opatření na zvýšení bezpečnosti. Tímto postupem se hledají potenciálně možné události nebo provozní problémy, které se nemusí i můžou objevit v posuzovaném systému. Pro bezpečnostní audit se používá připravený seznam otázek a matice pro skórování rizik. Tato metoda spadá do skupiny metod pro předběžné posouzení ohrožení. Je používán pro různé průmyslové problémy a technologie. Typická bezpečnostní prohlídka zahrnuje rozhovory s mnoha zaměstnanci podniku: s operátory, údržbáři, inženýry, manažery, bezpečnostními pracovníky a podobně. Jedná se o nástroj pro zlepšení všeobecné bezpečnosti v podniku [29].

### **Hodnocení**

Hodnocení je metoda stanovení hodnoty sledované entity v dané hodnotové stupnici. Spočívá ve srovnání s kritériem nebo souborem kritérií, která představují měřítka, určující, poznávací

a rozlišovací znaky pro srovnávání. Jedná se o proces, který je podstatnou složkou řízení a regulace a podstatnou složkou rozhodování [29].

### **Dedukce**

Je logický postup od obecného ke konkrétnímu na základě zákonů logiky. Jedná se o jeden ze základních způsobů úsudku a metod zkoumání, tj. myšlenkový (logický) proces, který vytváří závěr na základě dvou nebo více skutečností nebo tvrzení. Při posuzování variant řešení určitého problému umožňuje aplikovat logická pravidla (normy) na jednotlivé varianty řešení určitého problému a tím vyvodit jejich specifické přínosy a dopady [29].

### **Posouzení shody**

Je to proces pro uvedení výrobku na trh. Lze jej označit obecně jako sekvenci úkonů pro určenou skupinu výrobků i postup. Na tento postup nelze nahlížet paušálně z hlediska univerzálnosti. Často lze vymezené skupiny výrobků posoudit jen tzv. notifikovanou osobou. Hlavní řídicí zásady pro používání postupů posuzování shody je možné. Lze je shrnout jako, vnitřní kontrolu výroby, ES přezkoušení typu, shodu s typem, zabezpečení jakosti výroby, zabezpečení jakosti výrobku, ověřování výrobků. Není-li stanoveno v rámci příslušného nařízení vlády jinak, je povinen výrobce či dovozce, pro účely poskytnutí orgánům dozoru, uchovávat veškeré doklady, svědčící o procesu prokázání shody po dobu 10 let, a to od uvedení na trh, ukončení výroby nebo dovozu. Proces posouzení shody nemusí provádět dovozce u výrobků označených značkou CE, a u nichž bylo dříve provedeno prokazatelné posouzení shody dle příslušné technické legislativy členského státu EU u výrobce (byly již uvedeny legálně na trh v některém členském státě EU) a za podmínky, že míra ochrany dle užitého legislativního rozhraní v daném státě je vyhovující i pro ochranu zájmů v podmínkách České republiky, není-li však stanoveno v nařízení vlády [30].

## 5. Návrh nástroje pro ocenění rizik spojených s výrobou ochranného krytu

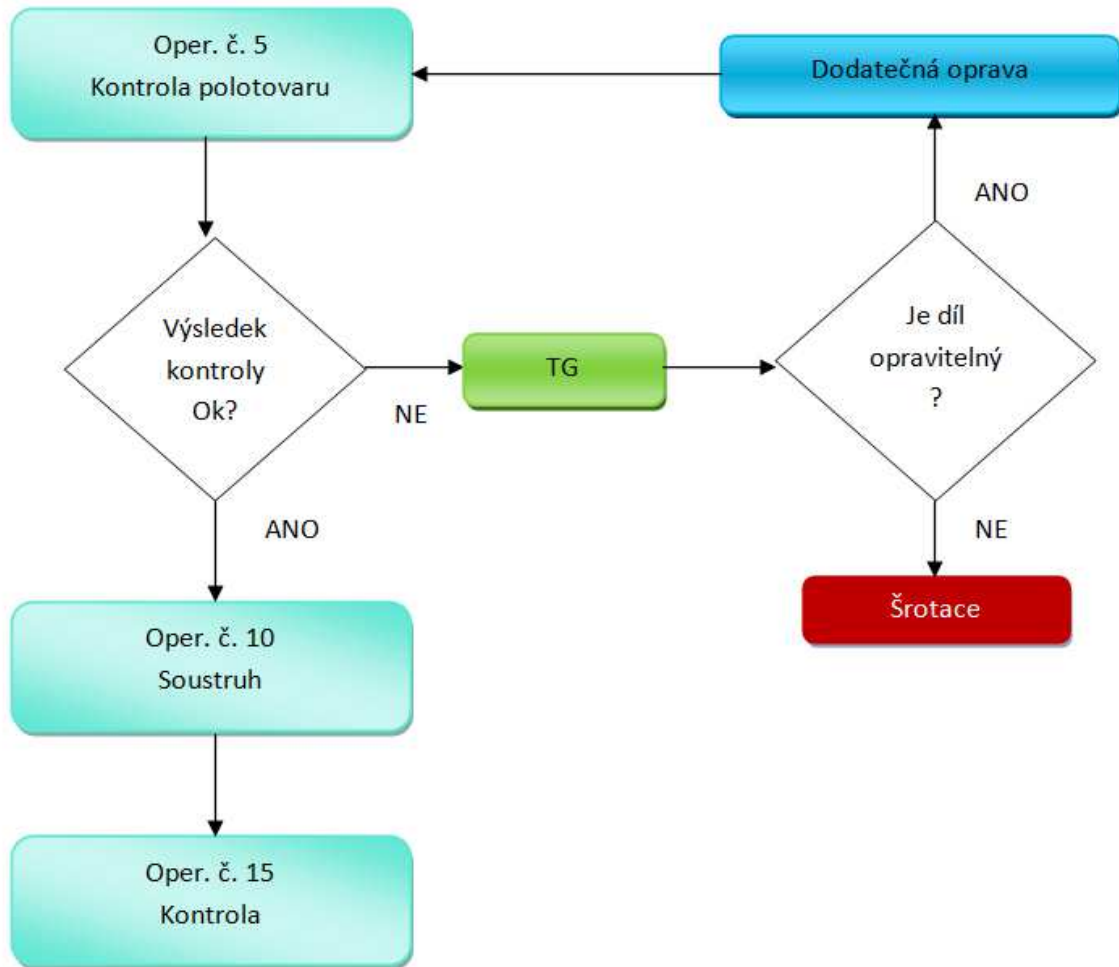
Výrobní proces ochranného krytu a jeho komponent zahrnuje velké spektrum výrobních technologií. Lze mezi nimi najít zpracování na klasických soustruzích nebo pomocí zámečnických prací, CNC obrábění jako je použití CNC soustruhů a CNC frézek a ohýbání. Mezi dalšími použitými metodami jsou metody speciálních procesů, jako je žíhání na odstranění vnitřního pnutí a precipitační vytvrzení nebo svařování metodou bodového svařování a TIG svařování. Důležitou operací mezi zpracováním materiálu jsou mezioperační kontroly pro překontrolování rozměrů a správného opracování. Jednou z takových specifických kontrol je defektoskopie barevně luminiscenční pro indikaci trhlin a povrchových vad materiálu.

### 5.1. Procesní mapy

Na následujících obrázcích jsou znázorněny jednotlivé výrobní postupy [28] pro nárazník (obr. 23), pouzdro (obr. 24) a vzpěra (obr. 25) a pro přehlednost výrobního postupu jsou vytvořeny procesní mapy jednotlivých postupů.

Při znázornění procesu výroby dílů byly zaznamenány vratné procesy, které se mohou, ale nemusí v průběhu výroby vyskytnout. Zvolený proces je závislý na průběžné kvalitě výroby neboli rozměrových nepřesnostech.

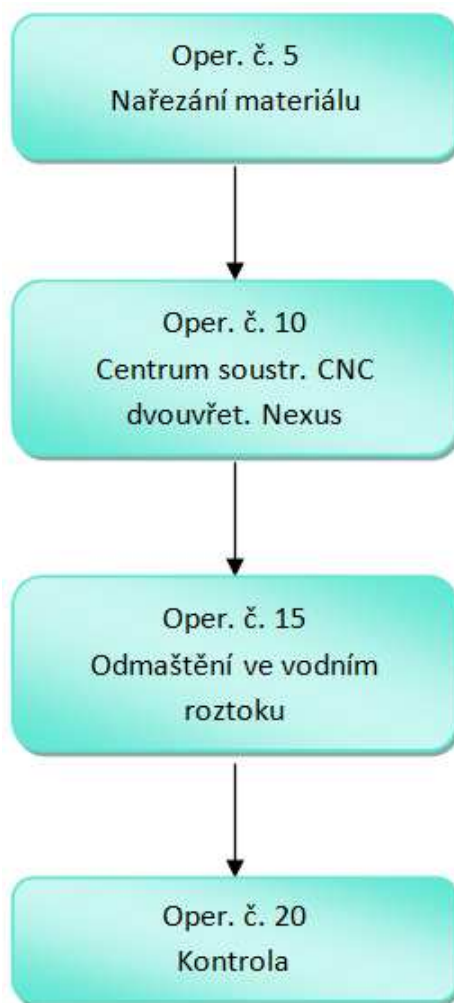
Obrázek 23 ukazuje postup výroby nárazníku od výkovku až po kontrolu hotového dílu.



Obrázek 23: Procesní mapa výroby nárazníku

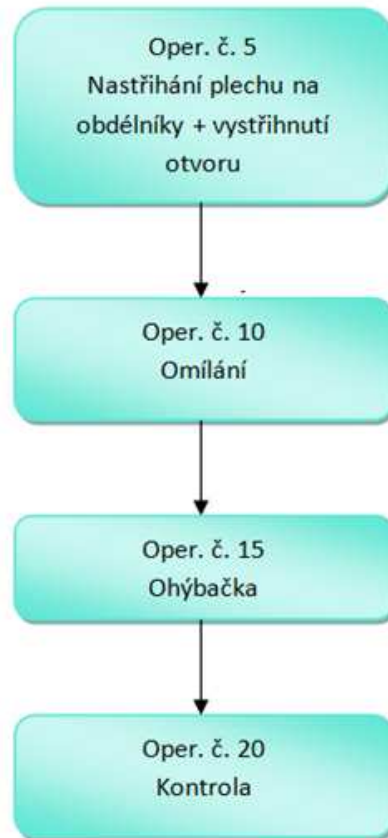
Polotovar pro výrobu nárazníku je z výkovku. Z důvodu vysokých nároků na bezpečnost je důležité, aby materiál nárazníku splňoval požadavky kvality. Kontrola zahrnuje splnění limitu chemického složení (tavba materiálu), rozměry předepsané na technickém výkrese a požadované tepelné zpracování. Každý jeden výkovek je dodáván s materiálovým osvědčením (tzv. rodný list materiálu).

Obrázek 24 ukazuje výrobu pouzdra od nařezání materiálu až po kontrolu konečného dílu.



Obrázek 24: Procesní mapa výroby pouzdra

Protože čep slouží k ustavení celé sestavy ochranného krytu s pláštěm motoru, je nevyhnutelné dodržet všechny rozměry s předepsanou tolerancí dané technickou dokumentací. Pro dosažení těchto požadavků je nevyhnutelné mít dostatečně zaškolenou obsluhu obráběcích strojů, dostatečně přesné obráběcí stroje a v neposlední řadě kvalitní nástroje. Obrázek 25 ukazuje výrobu vzpěry od nastříhání plechu až po kontrolu konečného dílu.



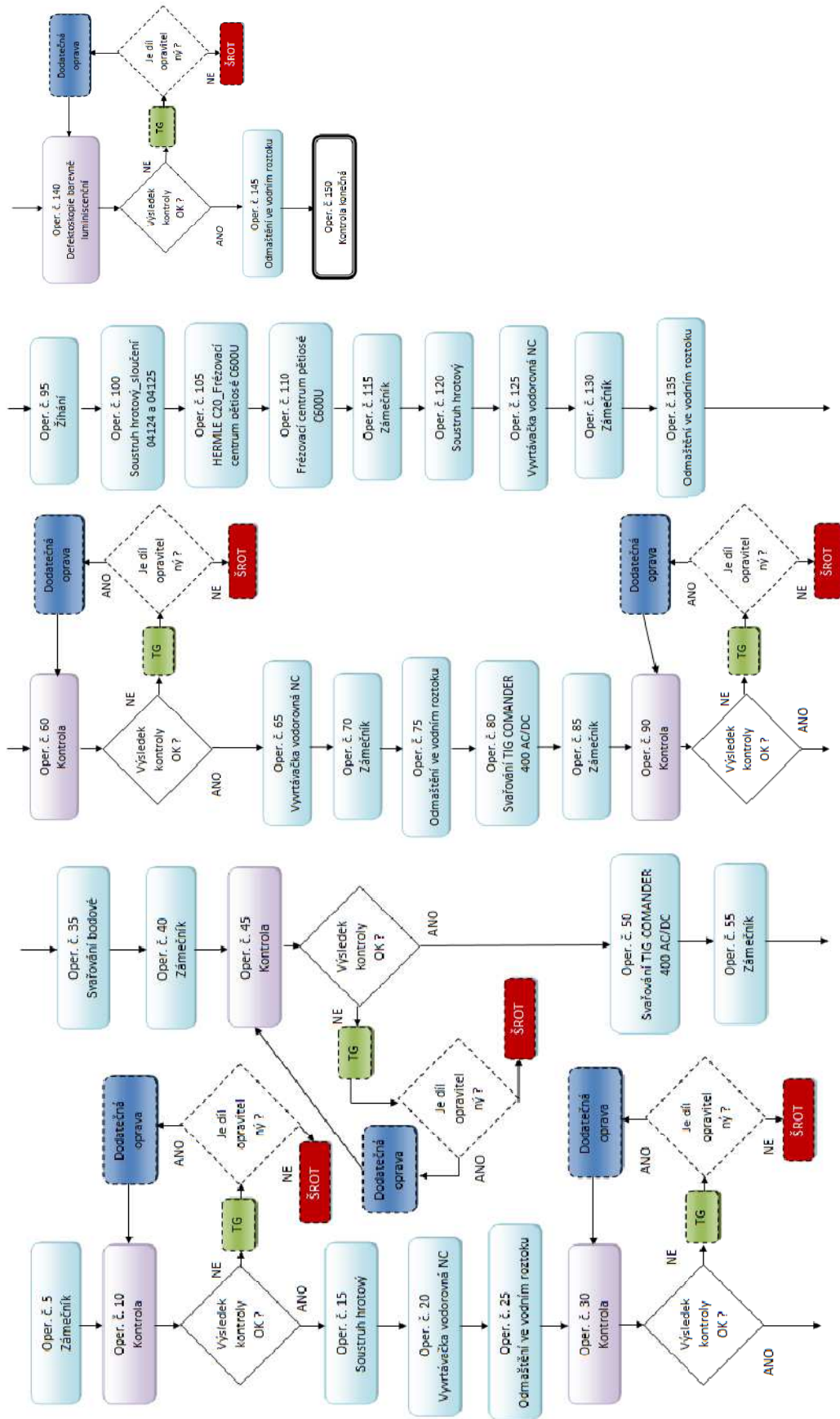
Obrázek 25: Procesní mapa výroby vzpěry

Vzpěra a pouzdro slouží k upevnění ochranného krytu k vnějšímu plášti motoru. Proto jsou na vzpěru stejné požadavky na přesnost jako u pouzdra. Požadované rozměry jsou dosaženy procesem ohýbání, případné odchylky od požadovaných rozměrů by mohly vést ke špatné poloze ochranného krytu vůči rotoru volné turbíny a tím snížení účinnosti zachycení úlomků lopatek. Při návrhu parametrů ohýbání se musí počítat například i s odpružením materiálu, tj. změnou tvaru po uvolnění dílu z ohýbacího nástroje.

Díl prstenec se je nakupovaná položka, vyrábí se v kooperaci, proto se postupem výroby prstence diplomová práce hlouběji nezaobírá.

Po vyhotovení jednotlivých komponent následuje sestavení těchto dílů do sestavy ochranného krytu. Procesní mapa, zhotovená na základě technické dokumentace společnosti [28] je na obr. 26.





Obrázek 26: Schéma procesní mapy výroby ochranného krytu; podrobná procesní mapa je v příloze 1

Mezi nejkritičtější operace obrábění dle technické dokumentace [28] patří frézování vnitřního průměru ochranného krytu na přesný rozměr. Tento průměr má vliv na požadovanou vůli mezi koncem lopatky výkonové turbíny a výstelkou nosného kužele, v které turbína obíhá. Nevyhovující rozměr ochranného krytu by měl za následek nevyhovující vůli a tím pádem zhoršení výkonových vlastností proudového motoru.

Svařování zařazujeme mezi speciální procesy, které podléhají samostatné kontrole, protože kvalitu dílů nelze určit pouze finální kontrolou. Svařováním dochází ke změně struktury a tím pádem i vlastností materiálu ve svaru a jeho okolí, které nejde odhalit kontrolou po svařování. Proto je nevyhnutelné, aby byl kontrolován i samotný průběh svařování. Proces svařování je nejkritičtější proces výroby komponent v leteckém průmyslu z hlediska dosažení požadované kvality a míry bezpečnosti.

Neoddělitelnou součástí výroby svařovaných dílů je jejich kontrola barevnou defektoskopií. Cílem barevné defektoskopie je odhalit povrchové vady ve svaru a v teplem ovlivněné oblasti, které jsou volným okem nepozorovatelné. Kritéria hodnocení jsou přísná, protože i malá vada (trhlina) se může v průběhu provozu zvětšit a snížit funkčnost dané komponenty, resp. ohrozit funkčnost motoru. V případě odhalení vad ve svaru nebo jeho teplem ovlivněné oblasti je možné tyto místa opravovat procesem svařování v případě, že je to dovoleno technologickým předpisem. Vady v místech mimo oblast svaru je opravovat svařováním v leteckém průmyslu zakázáno z důvodu, že svařováním dochází k degradaci materiálu.

## 5.2. Kontrolní seznam

Na základě dat o výrobě komponent pro letecký motor a na základě požadavků pro tavné obloukové svařování v leteckém průmyslu dle předpisu AWS D 17.1 „SPECIFICATION FOR FUSION WELDING OF AEROSPACE APPLICATIONS“ [21] a zásad rizikového inženýrství je navržen kontrolní seznam pro bezpečnostní audit, aby se zajistila požadovaná úroveň bezpečnosti letadla.

Tabulka 4: Kritéria hodnocení procesu svařování ochranného kryt

Kritéria hodnocení	ANO	NE	Poznámka
Mají na pracovišti možnost vstupu pouze pověřené osoby?		NE	
Je pracoviště určeno pouze pro svařování?	ANO		
Má svářeč platnou zákonem danou lékařskou prohlídku?	ANO		

Kontrolní seznam byl sestaven podle výrobního postupu svařování metodou TIG [28], při kterém byla určena kritická místa na základě deníku provozních událostí firmy.

Tabulka 5: Kontrolní seznam použitý pro vyhodnocení rizik procesu svařování

<b>Kontrolní seznam</b>				
<b>Datum</b>				
<b>Pracoviště</b>				
<b>Svářeč</b>				
<b>Auditor</b>				
<b>Technolog</b>				
<b>Komponent</b>				
Poř. číslo	Otázka	ANO	NE	Poznámka
<b>Příprava před svařováním</b>				
<b>1</b>	Jsou spojované plochy svařovaných dílů kovově čisté, zbaveny okují a hrubých vrstev oxidu?			
<b>2</b>	Jsou spojované plochy svařovaných dílů zbaveny mastnoty?			
<b>3</b>	Jsou spojované plochy svařovaných dílů zbaveny jiných nečistot ovlivňujících kvalitu prováděných svarů?			
<b>4</b>	Je slícování svařovaných dílů, tj. velikost svařovací mezery v souladu s požadavky předpisu?			

Poř. číslo	Otázka	ANO	NE	Poznámka
5	Je slícování svařovaných dílů, tj. velikost přesazení svařovaných ploch v souladu s požadavky předpisu?			
6	Jsou hrany spojovaných materiálů v místě budoucího svaru zbaveny otřepů?			
7	Jsou hrany spojovaných materiálů v místě budoucího svaru bez výraznějšího sražení?			
8	Jsou svařované díly pokládány na čistý odmaštěný povrch pracovního stolu?			
9	Je s díly manipulováno v čistých bavlněných rukavicích nepouštějících vlákna?			
<b>Stroje a zařízení</b>				
10	Používají se pro účely svařování pouze certifikované stroje a zařízení?			
11	Používají se pro účely svařování pouze kalibrované stroje a zařízení?			
12	Používají se pro účely svařování stroje a zařízení stanovené v technologickém postupu [27]?			
13	Je zdroj svařování schopný plynulé regulace v celém rozsahu hodnot parametru svařování, uvedených v technologickém postupu [25]?			
14	Je zdroj ochranného plynu schopný plynulé regulace v celém rozsahu hodnot parametru svařování, uvedených v technologickém postupu [27]?			
15	Je zdroj svařovacího proudu bez známek poškození?			
16	Je příslušenství pro svařování bez známek poškození?			
17	Jsou kabely bez známek poškození?			
18	Je podložka, na které je umístěn svařovaný dílec, rovná, bez výrazných nerovností a důlků?			
19	Je podložka pro svařování z elektricky vodivého materiálu?			
20	Jsou svorky svařovacího zařízení umístěny v těsné blízkosti svařovaného dílu?			
21	Je mezi svorkou a podložkou zabezpečena dostatečná elektrická vodivost?			
22	Splňuje kvalita ochranného plynu minimální požadavky na čistotu dle platných norem a předpisu dle [27]?			
23	Je používán ochranný plyn dle technologického postupu [27] s platnou atestací?			
24	Je svařovací hořák dimenzovaný pro dané proudové zatížení?			
25	Jsou kabely dimenzovány pro dané proudové zatížení?			

Poř. číslo	Otázka	ANO	NE	Poznámka
26	Je hubice hořáku bez viditelného poškození?			
27	Je průměr hubice v rozsahu stanoveném v technologickém postupu [27], umožňující přívod dostatečného množství ochranného plynu pro efektivní ochranu svařovaného kovu před účinky okolní atmosféry?			
28	Shoduje se typ wolframové elektrody s požadavky uvedenými v technologickém postupu [27]?			
29	Shoduje se průměr wolframové elektrody s požadavky uvedenými v technologickém postupu [27]?			
30	Je wolframová elektroda dimenzovaná i pro maximální proudové zatížení?			
<b>Svářečský personál</b>				
31	Provádí svařování pouze kvalifikovaný personál?			
32	Je svářečský personál řádně proškolen?			
33	Má svářečský personál platný svářečský průkaz?			
34	Má svářečský personál platnou lékařskou prohlídku?			
<b>Proces svařování</b>				
35	Jsou v případě požadavků na stehování stehy rozmístěny rovnoměrně?			
36	Jsou stehy bez trhlin a kráterů?			
37	Je použit jako přídatný materiál pouze certifikovaný svařovací drát?			
38	Je přídatný materiál odmaštěn?			
39	Je přídatný materiál zbavený prachu a nečistot?			
40	Je přídatný materiál řádně označen?			
41	Je přídatný materiál skladovaný v originálním obalu?			
42	Používá se pouze řádně označený přídatný materiál?			
43	Je zakázáno používat neoznačený přídatný materiál?			
44	Je použit pro účely svařování svařovací drát požadovaného chemického složení?			
45	Je použit pro účely svařování svařovací drát uvedený v technologickém postupu?			
46	Je použit pro účely svařování svařovací drát uvedený v technologickém postupu?			
47	Je použit pro účely svařování svařovací drát požadovaného rozsahu průměrů?			

Poř. číslo	Otázka	ANO	NE	Poznámka
48	Je svařovací proud nastaven dle technologického postupu nebo certifikátu svaru [27]?			
49	Je rychlost svařování nastavena dle technologického postupu nebo certifikátu svaru [27]?			
50	Je povrch svarové housenky po svařování očištěn nerezovým kartáčem?			
51	Je teplem ovlivněná oblast po svařování očištěna nerezovým kartáčem?			
<b>Kontrola po svařování</b>				
52	Je vizuální kontrola svaru prováděna na pracovišti pro tuto kontrolu určeném?			
53	Jsou k dispozici záznamy o kontrole minimální požadované hodnoty intenzity osvětlení (350 lx)?			
54	Je vizuální kontrola prováděna volným okem dle předpisu pro vizuální kontrolu svaru?			
55	Je vizuální kontrola prováděna lupou požadovaného zvětšení dle předpisu pro vizuální kontrolu svaru [27]?			
56	Je personál provádějící vizuální kontrolu svaru kvalifikovaný?			
57	Je personál provádějící vizuální kontrolu svaru proškolený?			
58	Jsou záznamy pro účely kontroly k dispozici?			
59	Jsou v případě odhalení chyb svaru, tyto chyby svaru odstraněny?			
60	Jsou chyby svaru odstraněny pouze v rozsahu povolující daný předpis?			

## 6. Výsledek bezpečnostního auditu

Kontrola procesu svařování byla provedena na pracovišti Svařovna pod dohledem technologa a auditora. Kontrolní seznam je psán ve formě otázek a odpovídající stupnicí ve formě ano - ne. V případě negativních odpovědí bylo potřebné uvést, proč byla odpověď záporná. Vyhodnocování bylo prováděno auditorem. Audit byl přítomen po celou dobu svařování, i během přípravy a po kontrolu vyhotovení konečného svaru. Kromě vyhodnocení kontrolního seznamu byla zhotovena i fotodokumentace. Ukázka sestaveného ochranného krytu před svařováním je zobrazena na obr. 27. Na obr. 28 je znázorněn samotný proces svařování metodou TIG a svařený ochranný kryt po provedené vizuální kontrole je na obr. 29.



Obrázek 27: Sestavený ochranný kryt připravený pro svařování, poloha dílů byla zajištěna stehmi





**Obrázek 28: Průběh svařování metodou TIG**



**Obrázek 29: Svařený ochranný kryt**

Výsledky auditu jsou uvedeny v tabulce 6.



Tabulka 6: Kontrolní seznam výsledků bezpečnostního auditu

<b>Kontrolní seznam</b>				
<b>Datum</b>	<b>26. 04. 2017</b>			
<b>Pracoviště</b>	<b>Svařovna</b>			
<b>Svářeč</b>	<b>Miloš J. Bohouš</b>			
<b>Auditor</b>	<b>Marek Petrovský</b>			
<b>Technolog</b>	<b>Šárka Marešová</b>			
<b>Komponent</b>	<b>Ochranný kryt</b>			
Poř. číslo	Otázka	ANO	NE	Poznámka
<b>Příprava před svařováním</b>				
<b>1</b>	Jsou spojované plochy svařovaných dílů kovově čisté, zbaveny okují a hrubých vrstev oxidu?		NE	<i>I když jsou svařované díly obráběny, při delším skladování vzniklé oxidy na povrchu dílu nejsou mechanicky, ani chemicky odstraněny.</i>
<b>2</b>	Jsou spojované plochy svařovaných dílů zbaveny mastnoty?		NE	<i>Před svařováním jsou svařované díly umyty v čisticí lázni. Na povrchu těchto dílů jsou patrné zbytky čisticí emulze.</i>
<b>3</b>	Jsou spojované plochy svařovaných dílů zbaveny jiných nečistot ovlivňujících kvalitu prováděných svarů?		NE	<i>Před svařováním nedochází ani k dodatečnému očištění a odmaštění svařovaných ploch.</i>
<b>4</b>	Je slícování svařovaných dílů, tj. velikost svařovací mezery v souladu s požadavky předpisu?		NE	<i>Svařované díly je nutné před svařováním dopasovávat z důvodu často nevyhovující velikosti svarové mezery.</i>
<b>5</b>	Je slícování svařovaných dílů, tj. velikost přesazení svařovaných ploch v souladu s požadavky předpisu?		NE	<i>Svařované díly je nutné před svařováním dopasovávat z důvodu často nevyhovující velikosti svarové mezery.</i>
<b>6</b>	Jsou hrany spojovaných materiálů v místě budoucího svaru zbaveny otřepů?	ANO		
<b>7</b>	Jsou hrany spojovaných materiálů v místě budoucího svaru bez výraznějšího sražení?		NE	<i>U některých dílů se nachází netolerované sražení <math>0,2 \pm 0,1x</math> 45° dle ISO 2768mK.</i>
<b>8</b>	Jsou svařované díly pokládány na čistý odmaštěný povrch pracovního stolu?	ANO		
<b>9</b>	Je s díly manipulováno v čistých bavlněných rukavicích nepouštějících vlákna?	ANO		

Poř. číslo	Otázka	ANO	NE	Poznámka
<b>Stroje a zařízení</b>				
10	Používají se pro účely svařování pouze certifikované stroje a zařízení?	ANO		
11	Používají se pro účely svařování pouze kalibrované stroje a zařízení?	ANO		
12	Používají se pro účely svařování stroje a zařízení stanovené v technologickém postupu [27]?	ANO		
13	Je zdroj svařování schopný plynulé regulace v celém rozsahu hodnot parametru svařování, uvedených v technologickém postupu [27]?	ANO		
14	Je zdroj ochranného plynu schopný plynulé regulace v celém rozsahu hodnot parametru svařování, uvedených v technologickém postupu [27]?	ANO		
15	Je zdroj svařovacího proudu bez známek poškození?	ANO		
16	Je příslušenství pro svařování bez známek poškození?	ANO		
17	Jsou kabely bez známek poškození?	ANO		
18	Je podložka, na které je umístěný svařovaný dílec, rovná, bez výrazných nerovností a důlků.	ANO		
19	Je podložka pro svařování z elektricky vodivého materiálu?	ANO		
20	Jsou svorky svařovacího zařízení umístěny v těsné blízkosti svařovaného dílu?	ANO		
21	Je mezi svorkou a podložkou zabezpečena dostatečná elektrická vodivost?	ANO		
22	Splňuje kvalita ochranného plynu minimální požadavky na čistotu dle platných norem a předpisu?	ANO		
23	Je používaný ochranný plyn s platnou atestací?	ANO		
24	Je svařovací hořák dimenzovaný pro dané proudové zatížení?	ANO		
25	Jsou kabely dimenzovány pro dané proudové zatížení?	ANO		
26	Je hubice hořáku bez viditelného poškození?	ANO		
27	Je průměr hubice v rozsahu stanoveném v technologickém postupu [27], umožňující přívod dostatečného množství ochranného plynu pro efektivní ochranu svařovaného kovu před účinky okolní atmosféry?	ANO		
28	Shoduje se typ wolframové elektrody s požadavky uvedenými v technologickém postupu [27]?	ANO		

Poř. číslo	Otázka	ANO	NE	Poznámka
29	Shoduje se průměr wolframové elektrody s požadavky uvedenými v technologickém postupu [27]?	ANO		
30	Je wolframová elektroda dimenzovaná i pro maximální proudové zatížení?	ANO		
<b>Svářečský personál</b>				
31	Provádí svařování kvalifikovaný personál?	ANO		
32	Provádí svařování vyškolený svářečský personál?	ANO		
33	Má svářečský personál platný svářečský průkaz?	ANO		
34	Má svářečský personál platnou lékařskou prohlídku?	ANO		
<b>Proces svařování</b>				
35	Jsou v případě požadavků na stehování stehy rozmístěny rovnoměrně?	ANO		
36	Jsou stehy bez trhlin a kráterů?	ANO		
37	Je použit jako přídatný materiál pouze certifikovaný svařovací drát?	ANO		
38	Je přídatný materiál odmaštěn?	ANO		
39	Je přídatný materiál zbavený prachu nečistot?	ANO		
40	Je přídatný materiál řádně označen?	ANO		
41	Je přídatný materiál skladovaný v originálním obalu?	ANO		
42	Používá se pouze řádně označený přídatný materiál?	ANO		
43	Je zakázáno používat neoznačený přídatný materiál?	ANO		
44	Je použit pro účely svařování svařovací drát požadovaného chemického složení?	ANO		
45	Je použit pro účely svařování svařovací drát uvedený v technologickém postupu?	ANO		
46	Je použit pro účely svařování svařovací drát uvedený v technologickém postupu?	ANO		
47	Je použit pro účely svařování svařovací drát požadovaného rozsahu průměrů?	ANO		
48	Je svařovací proud nastaven dle technologického postupu nebo certifikátu svaru[25]?	ANO		
49	Je rychlost svařování nastavena dle technologického postupu nebo certifikátu svaru[25]?	ANO		
50	Je povrch svarové housenky po svařování očištěn nerezovým kartáčem?	ANO		
51	Je teplem ovlivněná oblast po svařování očištěna nerezovým kartáčem?	ANO		

Poř. číslo	Otázka	ANO	NE	Poznámka
<b>Kontrola po svařování</b>				
52	Je vizuální kontrola svaru prováděna na pracovišti pro tuto kontrolu určeném?	ANO		
53	Jsou k dispozici záznamy o kontrole minimální požadované hodnoty intenzity osvětlení (350 lx)?	ANO		
54	Je vizuální kontrola prováděna volným okem dle předpisu pro vizuální kontrolu svaru?	ANO		
55	Je vizuální kontrola prováděna lupou požadovaného zvětšení dle předpisu pro vizuální kontrolu svaru[27]?	ANO		
56	Je personál provádějící vizuální kontrolu svaru kvalifikovaný?	ANO		
57	Je personál provádějící vizuální kontrolu svaru proškolený?	ANO		
58	Jsou záznamy pro účely kontroly k dispozici?	ANO		
59	Jsou v případě odhalení chyb svaru, tyto chyby svaru odstraněny?	ANO		
60	Jsou chyby svaru odstraněny pouze v rozsahu povolující daný předpis?	ANO		

Posouzení kritičnosti sledované výrobní operace svařování, je provedeno dle stupnice ČSN OHSAS 18001, viz tabulka 7.

**Tabulka 7: Posuzování kritičnosti podle ČSN OHSAS 18001**

Míra kritičnosti	Hodnoty „NE“ v %
Extrémně vysoká	Více než 95 %
Velmi vysoká	70–95 %
Vysoká	45–70 %
Střední	25–45 %
Nízká	5–25 %
Zanedbatelná	Méně než 5 %

Z tabulky 6 vyplývá, že z celkového počtu 61 otázek bylo zodpovězeno 6 otázek jako "NE", tj. 10% záporných odpovědí. Z hlediska posuzování kritičnosti se jedná o nízkou míru kritičnosti.

## 7. Návrh opatření pro zlepšení procesu svařování

Při auditu operace svařování bylo zjištěno kontrolním seznamem 6 ovlivňujících problémů, shrnutých do následujících 4 bodů, které ovlivňují kvalitu svaru. Proto jsou navržena opatření na jejich odstranění.

1. Spojované plochy svařovaných dílů nejsou před samotným svařováním zbaveny okují, hrubých vrstev oxidu, mastnoty a jiných nečistot negativně ovlivňujících kvalitu prováděných svarů. Před svařováním jsou svařované díly pouze umyty v čistící lázni. Na povrchu těchto dílů jsou patrné zbytky čistící emulze.

### ***Návrh na zlepšení:***

Pro dosažení vysoké kvality svarových spojů je nutné z povrchu dílů v místě budoucího svaru odstranit všechny nečistoty. Povrchové oxidy, případné okuje je vhodné odstranit mechanicky za pomoci nerezového kartáče nebo SiC brusiva (smirkové plátno). Odmaštění dílů je vhodné provádět chemicky, tj. acetonem nebo technickým lihem.

Mastnota, zejména síra se ve svarové lázni slučuje s niklem a způsobuje trhliny ve svarech.

2. Svařované díly je nutné před svařováním dopasovávat z důvodu často nevyhovující velikosti svarové mezery.

### ***Návrh na zlepšení:***

Pro dosažení vysoké kvality svarových spojů je potřebné, aby svarová mezera u lemových svarů byla minimální, ideálně nulová. Při tuhnutí svarového kovu dochází k jeho smršťování a tím vzniku tahových napětí. Čím větší svarová mezera, tím větší tahová napětí vznikají. Když velikost vzniklých tahových napětí překročí mez pevnosti materiálu, dochází ke vzniku trhlin. Proto má na kvalitu provedených svarů vliv nejen samotné svařování, ale příprava – sestavení dílů. Dosáhnout požadovaného sestavení je možno dosáhnout dodržěním technologického postupu, tj. dodržení předepsaných tolerancí, které mají za následek zvýšení přesností rozměrů vyráběných dílů.

3. Přídavný materiál pro svařování se používá ve formě tyček o průměru  $\varnothing$  2,0 mm. Ačkoli je daný svar certifikován s přídavným drátem  $\varnothing$  2,0 mm jako vyhovující, pro svařování tloušťek materiálů, z jakých je vyroben ochranný kryt, by bylo vhodnější volbou použití přídavného drátu menšího průměru, ideálně  $\varnothing$  1,6 mm. Důvodem je nižší teplo potřebné pro odtavení svařovacího drátu, a tedy i nižší množství tepla vneseného do svaru. Tím se dosáhne užší teplem ovlivněné oblasti svaru (TOO). V našem případě se jedná o svařování vytvrzeného materiálu, v kterém vznikají trhliny právě v TOO, tj. čím užší TOO, tím menší pravděpodobnost vzniku vad.

***Návrh na zlepšení:***

Momentálně není na území České republiky dodavatel dodávající přídavný materiál požadované tloušťky 1,6 mm. Zahraniční dodavatelé potřebný materiál nabízejí, ale v balení v množství, které svařovna není schopna dlouhodobě spotřebovat a nákupem od těchto dodavatelů by došlo k velkému plýtvání.

4. Pro účely svařování není k dispozici polohovací zařízení. Navržením vhodného polohovadla s nastavitelnou rychlostí otáčení by se dosáhlo usnadnění práce, zvýšení pohodlí a neposlední řadě zvýšení kvality práce, a tedy i svaru. Polohovadlo by se dalo využít i pro jiné svařované díly do motoru.

***Návrh na zlepšení:***

Nákup nového polohovacího zařízení bude projednán, vliv na zvýšení kvality svaru a ergonomii práce posouzen.

## 8. Závěr

Diplomová práce je zaměřena na snížení rizika při výrobě dílů leteckého motoru. Pro posouzení a eliminaci rizik spojených s výrobou byl vybrán ochranný kryt motoru, kterého funkčnost, dána také dodržáním postupů výroby, bezprostředně ovlivňuje bezpečnost pasažérů a posádky při poškození lopatek, nebo disků výkonové turbíny.

Ochranný kryt turbovrtulového motoru se skládá ze čtyř druhů dílů, celkově z dvanácti komponent, tj. nárazníku, prstence, vzpěry a pouzdra. Jednotlivé díly jsou vyráběny různými metodami obrábění a tváření a vzájemně jsou spojovány svařováním.

Protože se postup výroby ochranného krytu skládá z velkého počtu různorodých operací, bylo potřebné na začátku identifikovat jednotlivé kroky výroby, vytvořit přehlednou mapu toku operací. Pro tento účel byly vytvořeny procesní mapy pro výrobu jednotlivých komponent a procesní mapy výroby samotného ochranného krytu. Z každé procesní mapy byly vybrány kritické operace ovlivňující funkčnost, a tedy i bezpečnost dílu v motoru.

Kritické operace byly identifikovány některé postupy obrábění a tváření, které bezprostředně ovlivňují rozměry vyrobených dílů, kde v případě nedodržení technologických postupů a konstrukčních výkresů má za následek nedodržení polohy dílů při sestavení v motoru a tím snížení účinnosti ochrany pasažérů, posádky i samotného letadla před poškozením v důsledku uvolnění části lopatky, nebo disku výkonové turbíny. Nedodržení požadavků konstrukčních výkresů při výrobě ochranného krytu má za následek i snížení výkonnosti leteckého motoru. Jako kritická operace byla ale identifikována také vstupní kontrola materiálu polotovaru výkovku určeného k výrobě nárazníku pro ochranný kryt. Na tento díl jsou kladena přísná kritéria na metalurgickou čistotu materiálu, splnění požadavků na mechanické vlastnosti, dodržení požadavků na přesnost rozměrů a tepelné zpracování výchozího materiálu.

Jako jeden z nejvíce ovlivňujících procesů výroby z hlediska funkčnosti dílu byl určen proces svařování. Určen byl hlavně z toho důvodu, že výslednou kvalitu svaru nelze určit pouze kontrolou svaru, ale je nevyhnutné kontrolovat samotný proces svařování.

Proces svařování byl podrobně prozkoumán a podroben bezpečnostnímu auditu. Audit byl proveden na pracovišti svařovny, při svařování dílů ochranného krytu, za přítomnosti technologa svařování a auditora. Vyhodnocování auditu bylo na základě kontrolního

seznamu, který byl vytvořen jako část diplomové práce a vycházel z požadavků pro tavné obloukové svařování metodou TIG v leteckém průmyslu.

Na základě kontrolního seznamu byly zjištěny nedostatky týkající se přípravy dílů před svařováním. Díly jsou pouze omývané v čistící lázni, přičemž jsou stopy čistící emulze patrné na povrchu svařovaných dílů. Svařované díly nejsou také před svařováním zbaveny povrchových oxidů. Tyto nedostatky mohou mít vliv na zhoršení kvality svarů, hlavně se podílí na vzniku trhlin a pórů ve svarech, což vede ke snížení únosnosti a životnosti během provozu leteckého motoru.

Dalšími z nedostatků odhalených auditem byla absence polohovacího zařízení sloužícího ke správnému polohování svařovaného dílu. Z hlediska svařování byl také zjištěn nevhodnější průměr svařovacího drátu.

Z hlediska zvýšení čistoty před svařováním bylo navrženo z povrchu dílů v místě budoucího svaru odstranit všechny nečistoty. Povrchové oxidy, případné okuje bylo doporučeno odstranit mechanicky za pomoci nerezového kartáče nebo SiC brusiva (smirkové plátno). Bylo navrženo odmaštění dílů provádět chemicky, tj. acetonem nebo technickým lihem.

Během auditu bylo patrné, že spojované díly nejsou vyrobeny správně, a tudíž nemůžou být ani sestaveny správně. Bylo nevyhnutelné během přípravy dodatečně díly dopasovávat. Dosáhnout požadovaného sestavení je možno dosáhnout dodržáním technologického postupu, tj. dodržení předepsaných tolerancí, které mají za následek zvýšení přesností rozměrů vyráběných dílů.

Pro zlepšení průběhu svařování bylo doporučeno zakoupení polohovacího zařízení, kterým se dosáhne zlepšení práce svářeče, zvýšení pohodlí, ergonomie, a tedy i zkvalitnění vyhotovení svarů.

Co se týče změny tloušťky průměru tloušťky svařovacího drátu, auditem bylo navrženo svařování přídatným materiálem menšího průměru. Z důvodu, že není na trhu k dispozici přídatný materiál požadovaného průměru, v požadovaném množství, tento návrh na zlepšení není prozatím možné realizovat.



## Seznam použité literatury

- [1] PROCHÁZKOVÁ, DANA. *Strategické řízení bezpečnosti území a organizace*. 1. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04844-3
- [2] PROCHÁZKOVÁ, Dana. *Analýza a řízení rizik*. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04841-2.
- [3] ČEZ. *Kultura bezpečnosti* [online]. [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z:  
<https://www.cez.cz/cs/odpovedna-firma/bezpecnost/kultura-bezpecnosti.html>
- [4] ČTP. *Kultura bezpečnosti* [online]. [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: <http://www.cztpis.cz/safety-culture-award/kultura-bezpecnosti/>
- [5] DP. *Kultura bezpečnosti – Stock obrázek* [online]. [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z:  
<http://cz.depositphotos.com/65417987/stock-photo-culture-of-safety.html>
- [6] ULT. *Letadla* [online]. [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: <http://www.aerospace.fsik.cvut.cz>
- [7] KOCÁB, JINDŘICH. *Letadlové motory*. Praha: KANT, 2000. ISBN 80-902914-0-6.
- [8] GE AVIATION. *Výroba turbovrtulového motoru* [online]. Praha, 2015 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z:  
[https://www.geaviation.cz/clanky/detail/35\\_95-vyroba-turbovrtuloveho-motoru-v-6-krocich](https://www.geaviation.cz/clanky/detail/35_95-vyroba-turbovrtuloveho-motoru-v-6-krocich)
- [9] PRAGA GLOBAL. *GE H80 Turboprop Engine by GE Aviation Czech* [online]. Hradec Králové, 2016 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z:  
<https://www.pragaglobal.com/ge-h80-turboprop-engine-by-ge-aviation-czech/>
- [10] IITG. *Jet propulsion* [online]. [cit. 2017-04-09].  
Dostupné z:  
[http://www.iitg.ernet.in/scifac/qip/public\\_html/cd\\_cell/chapters/uk\\_saha\\_jet\\_propulsion/qip-jp-11-Engine%20Materials.pdf](http://www.iitg.ernet.in/scifac/qip/public_html/cd_cell/chapters/uk_saha_jet_propulsion/qip-jp-11-Engine%20Materials.pdf)
- [11] GE AVIATION. *GE 90 Engine* [online]. [cit. 2017-04-09].  
Dostupné z: <https://www.geaviation.com/commercial/engines/ge90-engine>
- [12] ASM INTERNATIONAL. *Aluminum and aluminum alloys*. Materials Park, c1993. ISBN 978-0-87170-496-2.
- [13] FANS. *Fan Frame Outlet Guide Vane. Senior aerospace Ketema* [online]. [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: <http://saketema.com/fan-frame-outlet-guide-vane/>
- [14] CAMPBELL, F. C. *Elements of metallurgy and engineering alloys*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2008. ISBN 0871708671 9780871708670
- [15] EPSRC. *Rolls-Royce and EPSRC - Strategic Partnership case study* [online]. 2015 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z:  
<https://www.epsrc.ac.uk/newsevents/casestudies/rollsroyceepsrccpartnership/>

- [16] NAYAK, NIKHIL. *Composite Materials in Aerospace Applications*. International Journal of Scientific and Research Publication. 2014, 4(9), 10. ISSN 2250 - 3 153
- [17] SAKETEMA. *Senior aerospace Ketema* [online]. [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: <http://saketema.com/power-turbine-case/>
- [18] DAVIS, J. R. *Nickel, cobalt, and their alloys*. Materials Park, OH: ASM International, c2000. ISBN 0871706857
- [19] HRIVŇÁK, IVAN. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-802-2731-676
- [20] LINDE-GAS. *Tungsten Inert Gas (TIG) Welding*. [online]. [cit. 2017-05-09].  
Dostupné z:  
[http://www.linde-gas.com/en/processes/cutting\\_joining\\_and\\_heating/welding/tungsten\\_inert\\_gas\\_welding/index.html](http://www.linde-gas.com/en/processes/cutting_joining_and_heating/welding/tungsten_inert_gas_welding/index.html)
- [21] OLSON, DAVID L. *ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering*. 10. vydání. Spojené státy americké: ASM International, 1993. ISBN 978-0-87170-382-8.
- [22] AWS D17.1/D17.1M:2010-AMD1: *Specification for Fusion welding of aerospace e applications*. 2013. Miami, FL: American Welding Society, 2013.
- [23] PHOTO BUCKED. *Welding and Fabrication Portfolio*. [online]. [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z:  
[http://s1123.photobucket.com/user/customdesign/media/Welding%20and%20Fabrication%20Portfolio/IMG330\\_zps8b14be42.jpg.html](http://s1123.photobucket.com/user/customdesign/media/Welding%20and%20Fabrication%20Portfolio/IMG330_zps8b14be42.jpg.html)
- [24] NEGRISNC. *Saldature certificate ferropiacenza*. [online]. [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: <http://www.negrisnc.it/files/Saldature-certificate-ferro-piacenza.jpg>
- [25] FLICKR. *4310481794*. [online]. [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/browndogwelding/4310481794>
- [26] ASME. *The Impact Load on Containment Rings During a Multiple Blade Shed In Aircraft Gas Turbine Engines* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://asme.org>
- [27] PUBLICATION NUMBER SMC-099. *Nimonic alloy 80A* [online]. [cit. 2017-05-07].  
Dostupné z: [http://www.haraldpihl.se/globalassets/pdf/057\\_nimonic-alloy-80a.pdf](http://www.haraldpihl.se/globalassets/pdf/057_nimonic-alloy-80a.pdf)
- [28] GE AVIATION CZECH. *Technologický postup výroby ochranného krytu*. Praha, 2016.
- [29] PROCHÁZKOVÁ, DANA. *Metody, nástroje a techniky pro rizikové inženýrství*. 1. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04842-9
- [30] CONVERSIO. *Posouzení shody* [online]. [cit. 2017-05-17].  
Dostupné z:  
<http://uvadeni-vyrobku-na-trh.conversio.cz/uzitecne-informace/posouzeni-shody>

## Seznam tabulek a obrázků

### Tabulky

Tabulka 1: Chemické složení vybraných Ni, Ni-Fe a Co superslitin:.....	23
Tabulka 2: Chemické složení slitiny Nimonic 80A v hm. % .....	34
Tabulka 3: Fyzikální vlastnosti slitiny Nimonic 80A.....	34
Tabulka 4: Kritéria hodnocení procesu svařování ochranného kryt .....	48
Tabulka 5: Kontrolní seznam použitý pro vyhodnocení rizik procesu svařování.....	48
Tabulka 6: Kontrolní seznam výsledků bezpečnostního auditu .....	54
Tabulka 7: Posuzování kritičnosti podle ČSN OHSAS 18001.....	57

### Obrázky

Obrázek 1: Pilíře kultury bezpečnosti.....	12
Obrázek 2: Schematické znázornění hlavních částí motorového letadla .....	13
Obrázek 3: Síly působící na motorové letadlo .....	14
Obrázek 4: Popis turbovrtulového motoru.....	15
Obrázek 5: Hlavní části proudového motoru .....	18
Obrázek 6: Kryt dmyhadla proudového motoru vyrobeného z hliníkové slitiny .....	19
Obrázek 7: Titanové lopatky turbodmyhadla proudového motoru .....	20
Obrázek 8: Kompozitní lopatka turbodmyhadla motoru GE90.....	21
Obrázek 9: Kryt turbíny z niklové slitiny.....	22
Obrázek 10: Porovnání pevnosti jednotlivých typů niklových slitin. ....	25
Obrázek 11: Porovnání makro a mikrostruktury lopatek turbín .....	26
Obrázek 12: Základní rozdělení metod svařování. ....	28
Obrázek 13: Schematické znázornění svařování v ochranné atmosféře inertního plynu TIG .	29
Obrázek 14: Tupý svar na trubce metodou TIG .....	31
Obrázek 15: Koutový svar na trubce metodou TIG.....	31
Obrázek 16: Koutový svar na plechu metodou TIG.....	31
Obrázek 17: Zobrazení umístění ochranného krytu .....	32
Obrázek 18: Zobrazení sestavy ochranného krytu a jeho komponent.....	35
Obrázek 19: Nárazník .....	36
Obrázek 20: Pouzdro.....	37
Obrázek 21: Prstenec .....	37
Obrázek 22: Vzpěra.....	38

Obrázek 23: Procesní mapa výroby nárazníku .....	43
Obrázek 24: Procesní mapa výroby pouzdra .....	44
Obrázek 25: Procesní mapa výroby vzpěry .....	45
Obrázek 26: Schéma procesní mapy výroby ochranného krytu .....	46
Obrázek 27: Sestavený ochranný kryt připravený pro svařování.....	52
Obrázek 28: Průběh svařování metodou TIG.....	53
Obrázek 29: Svařený ochranný kryt .....	53

## **Přílohy**

Příloha 1: Procesní mapa výroby ochranného krytu.