**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

FAKULTA DOPRAVNÍ

Lukáš Kučera

# VLIVY NA ŽIVOTNOST LOPATEK TURBOHŘÍDELOVÉHO MOTORU

**Bakalářská práce**

**2018**

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

**K621 ..... Ústav letecké dopravy**

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Lukáš Kučera**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – TUL – Technologie údržby letadel**

Název tématu (česky): **Vlivy na životnost lopatek turbohřídelového motoru**

Název tématu (anglicky): Turboshaft Engines Blades Durability Influences

## Zásady pro vypracování

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

- Popis motoru TV3-117 a jeho životního cyklu
- Popis čerpání životnosti lopatek motoru
- Popis vlivů snižující životnost lopatek
- Analýza jednotlivých vlivů ovlivňujících životnost lopatek
- Doporučení na eliminaci těchto vlivů

Rozsah grafických prací: Dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: ADAMEC, Josef a Jindřich KOCÁB. Letadlové motory. Vyd. 2. Praha: Corona, 2008. ISBN 978-80-86116-54-9.

RŮŽIČKA, Milan. Pevnost a životnost letadel. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02254-4.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Pavlas**

**Ing. David Hůlek**

Datum zadání bakalářské práce: **20. října 2017**
(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 bakalářské práce: **27. srpna 2018**
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

L. S.

Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy

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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Lukáš Kučera
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 20. října 2017

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem lidem, kteří mi poskytli podklady a odborné rady pro vypracování této práce. Zejména bych chtěl poděkovat paní Ing. Marii Rohlové, panu Ing. Miroslavovi Peterkovi, panu Ing. Václavovi Vlkovi a panu Ing. Ondřejovi Anýžovi za cenné připomínky a odborné rady. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Pavlasovi a panu Ing. Davidovi Hůlkovi za vedení a kriticky objektivní přístup k mé práci. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům a blízkým za jejich podporu po celou dobu mého studia.

## Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické 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 26. srpna 2018 .....

podpis

ABSTRAKT

Práce pojednává o negativních vlivech snižujících životnost rotorových lopatek turbíny turbohřídelového motoru TV3-117. V úvodu práce je popsána funkce tohoto motoru a jeho životního cyklu. Následuje popis čerpání životnosti turbínových lopatek z obecného hlediska a dle manuálu. Dále jsou popsány a analyzovány jednotlivé vlivy snižující životnost lopatek, kterými jsou vývoj, výroba, provoz a údržba. V závěru jsou uvedena doporučení na eliminaci těchto vlivů a zhodnocení aplikovatelnosti těchto inovací.

KLÍČOVÁ SLOVA

Turbínové lopatky, Turbohřídelový motor, TV3-117, životnost lopatek

ABSTRACT

The bachelor thesis is about negative influences which are decreased durability of the turbine blades in the turboshaft engine TV3-117. Introduction is described function of engine and engine life cycle. The next part is described the decrease the remaining liftime of turbine blades from general aspect and from handbook. The development, production, operation and maintenance are described and analyzed like influences are reduced durability of the turbine blades. Elimiation of this influence are recommend in the bachelor thesis conclusions with proposals evaluted the inovations.

KEY WORDS

Turbine blades, Turboshaft engine, TV3-117, Durability of blades

# Obsah

Úvod ..... 7
1 Popis motoru TV3-117 a jeho životního cyklu ..... 8
1.1 Popis hlavních částí motoru TV3-117 ..... 9
1.1.1 Vstupní ústrojí ..... 10
1.1.2 Kompresor ..... 12
1.1.3 Spalovací komora ..... 15
1.1.4 Turbína kompresoru a volná turbína ..... 16
1.1.5 Výstupní ústrojí ..... 24
1.1.6 Skříň náhonů ..... 24
1.2 Popis životního cyklu ..... 25
2 Popis čerpání životnosti lopatek motoru ..... 26
2.1 Obecný popis čerpání životnosti dle Palmgren-Minerovy hypotézy ..... 27
2.2 Čerpání životnosti dobově a hodinově dle manuálu ..... 29
3 Popis a analýza vlivů snižující životnost lopatek ..... 31
3.1 Výroba ..... 31
3.2 Provoz ..... 32
3.2.1 Prostředí ..... 32
3.2.2 Letecká kázeň ..... 33
3.2.3 Nestandardní provoz ..... 36
3.3 Údržba ..... 37
3.3.1 Nálezové technologie a NDT ..... 38
3.3.2 Způsoby opravy lopatek (dle technologie) ..... 41
3.3.3 Teplotní pole ..... 42
3.4 Analýza ..... 44

4 Doporučení na eliminaci těchto vlivů ..... 46
4.1 Vývoj ..... 46
4.2 Výroba ..... 47
4.3 Údržba ..... 47
4.4 Provoz ..... 47
Závěr ..... 53
Seznam použité literatury ..... 55
Seznam obrázků ..... 56
Seznam tabulek ..... 58
Seznam příloh ..... 59

# Úvod

Bakalářská práce se zabývá negativními vlivy působícími na životnost lopatek turbohřídelového motoru TV3-117, který slouží jako hlavní pohonná jednotka ve většině vrtulníků řady Kamov a Mil. Jedná se o nejrozšířenější turbohřídelový motor na světě. Dále se tento motor vyrábí v turbovrtulové verzi, který pohání např. letouny Antonov-140.

Práce je zaměřena na životnost nejvíce namáhané části motoru, kterou jsou rotorové lopatky turbíny. Z konstrukčního hlediska se jedná o nejcitlivější a nejpropracovanější součást celého motoru. Jakékoliv zanedbání při výrobě, provozu nebo údržbě může mít vážné, nejen ekonomické následky. Lopatky turbíny jsou vystavovány velkému namáhání vlivem vysokých otáček turbíny za působení vysokých teplot, a proto je velmi důležité znát její stanovenou životnost a aspekty, které ji ovlivňují.

V úvodu je blíže popsána konstrukce a princip funkce jednotlivých hlavních částí motoru TV3-117, kterými jsou: vstupní ústrojí, kompresor, spalovací komora, turbína kompresoru, volná turbína, výstupní ústrojí a skříň náhonů. Dále je zde popsán životní cyklus motoru, tedy proces od prvotního provozu, přes pravidelné prohlídky a opravy až po vyřazení motoru z provozu.

Následuje velmi stručný popis vývoje lopatek, obecné způsoby čerpání životnosti dle Palmgren-Minerovy hypotézy a popis čerpání životnosti lopatek dle manuálu. Poslední část je věnována jednotlivým vlivům ovlivňujících životnost lopatek.

Cílem práce je provést analýzu jednotlivých vlivů. Zjistit jejich závažnost, se kterou ovlivňují životnost lopatek a na základě této analýzy vybrat nejzávažnější vlivy, stanovit doporučení pro eliminaci či snížení závažnosti těchto vlivů a navrhnout řešení pro zvýšení životnosti lopatek.

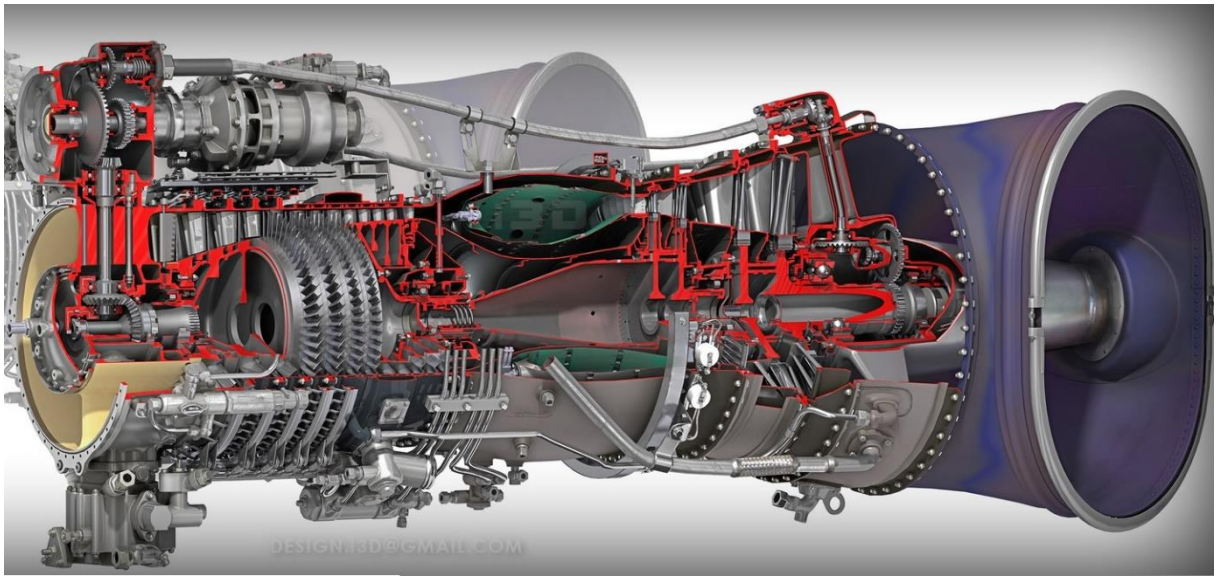
Analýza je provedena v rámci firmy LOM PRAHA s. p., proto i doporoučení na eliminaci je navrhované v rámci možností firmy. Nejedná se tedy o směrodatné výsledky analýzy pro všechny opravárenské firmy motoru TV3-117 a jeho modifikací.

# 1 Popis motoru TV3-117 a jeho životního cyklu

V této kapitole bude podrobněji popsán účel, konstrukce, použité materiály a životní cyklus hlavních částí motoru TV3-117.

Turbohřídelový motor TV3-117, používaný již od roku 1974, je motor ruské výroby používaný jako hlavní pohonná jednotka pro celou škálu vrtulníků řady Kamov a Mil, např.: Mi-8/Mi-17/Mi-171/Mi-24 a další. Postupem času se motor začal vyrábět v mnoha modifikacích. V českém letectvu se můžeme setkat s několika verzemi tohoto motoru např.: MT (modernizovaný transportní), VM (výškový, modernizovaný), VMA (výškový, modernizovaný, verze A). Motor se také vyrábí v turbovrtulové verzi s označením TV3-117 VMA-SBM1, který se montuje na letouny Antonov-140. (1)

Konstrukční zvláštností tohoto motoru je využití volné turbíny, která není kinematicky vázaná s rotorem kompresoru. Výkon vyvíjený rotorem volné turbíny je dále přenášen do hlavního reduktoru a tvoří skutečný výkon motoru, který se pohybuje někde mezi 1 900 až 2 400 koňských sil, v závislosti na konkrétní modifikaci motoru. Schéma motoru je možné vidět na Obr. 1. (1)




*Obr. 1: Schéma motoru TV3-117 (2)*

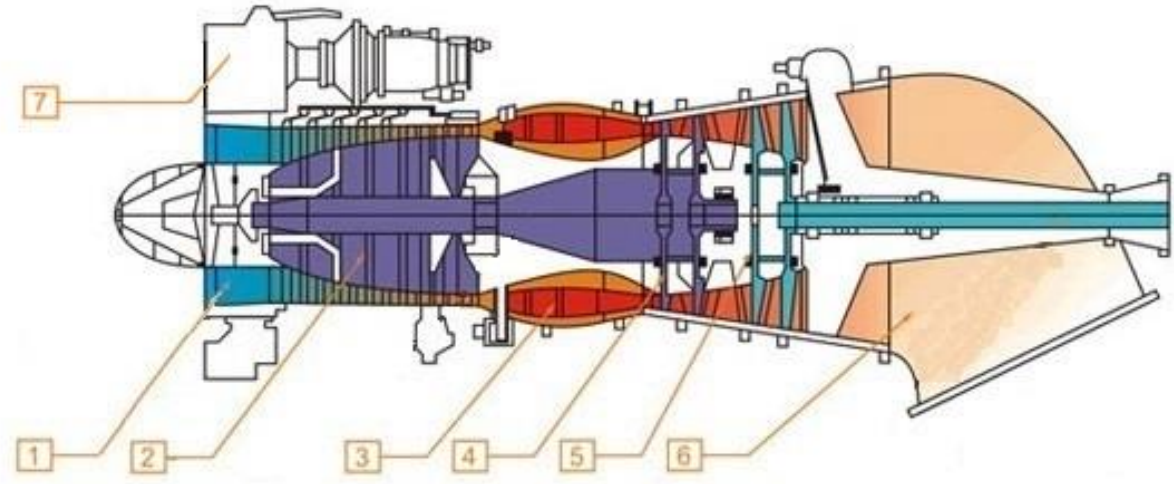
## 1.1 Popis hlavních částí motoru TV3-117

V této podkapitole budou podrobněji popsány jednotlivé hlavní části motoru TV3-117, princip jejich fungování a stručný tepelný oběh.

### Hlavní části turbohřídelového motoru

(Následující body jsou vztaženy k Obr. 2)

- Vstupní ústrojí (1)
- Kompresor (2)
- Spalovací komora (3)
- Turbína kompresoru (4)
- Volná turbína (5)
- Výstupní ústrojí (6)
- Skříň náhonů (7)




*Obr. 2: Schéma a popis hlavních částí motoru TV3-117 (1)*

### 1.1.1 Vstupní ústrojí

Vstupní ústrojí je velice důležitou součástí každého proudového motoru, které přímo ovlivňuje jeho správný chod a účinnost. Úkolem vstupního ústrojí je neustále přivádět potřebné množství vzduchu a nasměrovat tento proud vzduchu na lopatky kompresoru, a to při všech polohách vrtulníku a libovolném letovém režimu motoru. (3)

Z konstrukčního hlediska dělíme vstupní ústrojí na vnější a vnitřní, které pak z funkčního hlediska tvoří jeden celek. (3)

#### Na vstupní ústrojí jsou kladeny tyto požadavky (3)

- Minimální ztráta celkového tlaku přivedeného vzduchu
- Minimální čelní odpor
- Spolehlivá funkce
- Zabránění vstupu cizích těles do motoru

#### Vnější vstupní ústrojí

Vnější vstupní ústrojí je součástí draku. Jeho konstrukce je navrhovaná pro konkrétní vrtulník a provozní podmínky, ve kterých je plánovaný provoz motoru.

Součástí vnějšího vstupního ústrojí, může být protiprachové zařízení (PZU). PZU zajišťuje čistění vzduchu od prachu a dalších nečistot vstupujícího do motoru v době pojíždění, přistávání, vzletu, nebo visení nad prašnými plochami. Stupeň čištění PZU je 70-75 %. (1)

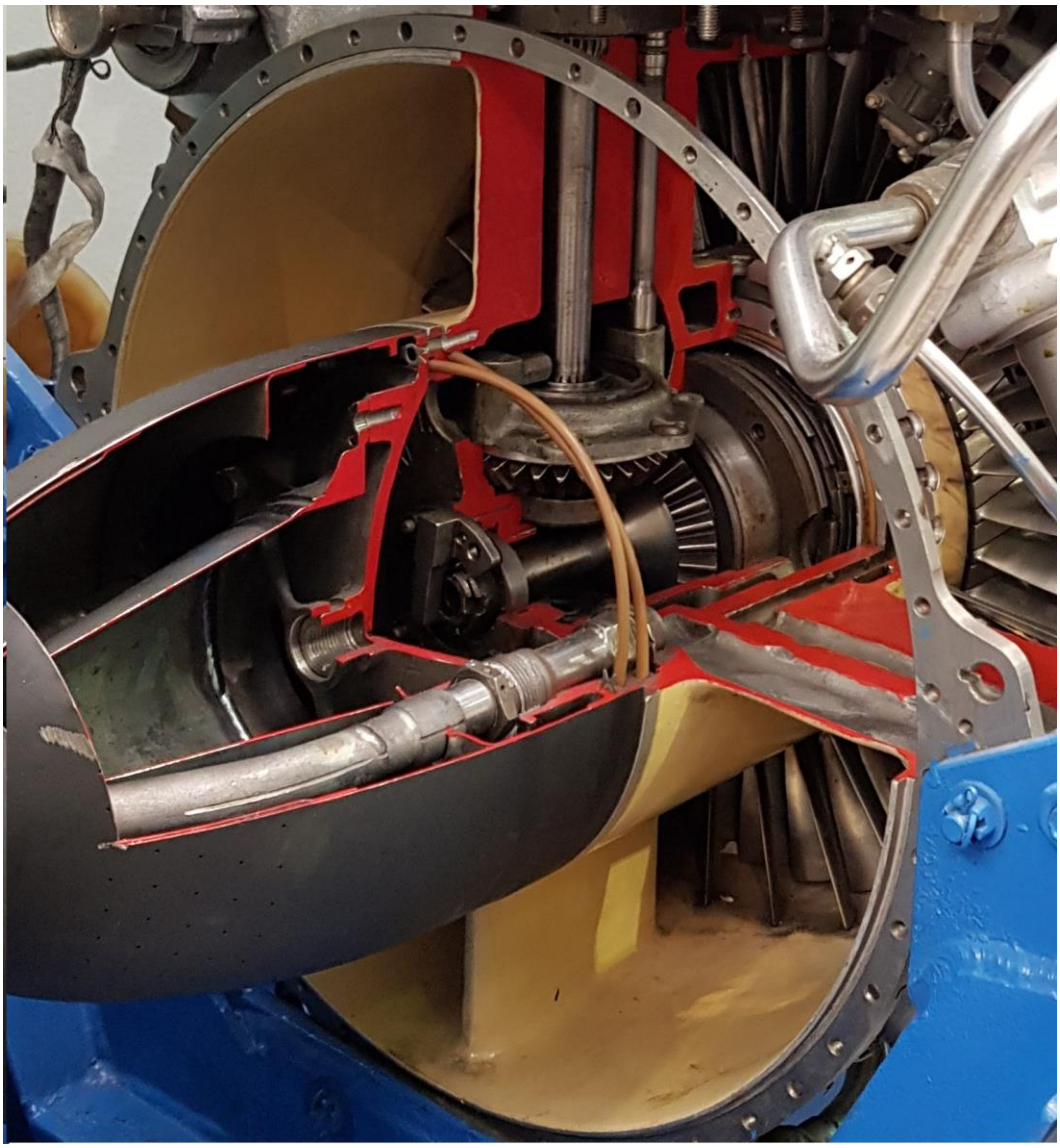
#### Vnitřní vstupní ústrojí

Na rozdíl od vnějšího vstupního ústrojí, které je většinou součástí draku, vnitřní vstupní ústrojí je přímou součástí motoru. Jeho hlavním úkolem je přivádět a nasměrovat správné množství proudu vzduchu na lopatky rotoru kompresoru. (3)

Vstupní ústrojí motoru TV3-117 můžeme vidět na Obr. 3. Ve vnitřním náboji vstupního ústrojí je uložené přední ložisko a centrální náhon pro pohon agregátů. Tato centrální část je spojena s vnější prstencovou skříní pomocí 4 žeber, které zajišťují přenos zatížení z vnitřní části (zatížení od kompresoru a turbíny) na vnější prstencovou skříň. Žebra jsou dutá a vybavená odmrazovacím zařízením. Ve dvou vodorovných

žebrech jsou kanály pro přívod teplého vzduchu do lopatek vstupního rozváděcího věnce a do separátoru PZU / aerodynamického krytu. Svislá žebra mají kanály pro rozvod oleje a vrchním svislým žebrem prochází hřídel, kterým je přenášen točivý moment do skříně náhonů, pro pohon agregátů. (4)

Vstupní ústrojí je vybaveno lopatkami rozváděcího věnce, které zajištují správný směr proudu vzduchu při vstupu do kompresoru. Tyto duté statorové lopatky vyrobené z oceli mají na odtokové hraně štěrbiny pro výstup teplého vzduchu. Lopatky rozváděcího věnce jsou natáčeny spolu se statorovými lopatkami kompresoru, v závislosti na otáčkách kompresoru. Lopatky se mohou natáčet v rozmezí – 3º až 27º. (4)



*Obr. 3: Vstupní ústrojí motoru TV3-117*

## 1.1.2 Kompresor

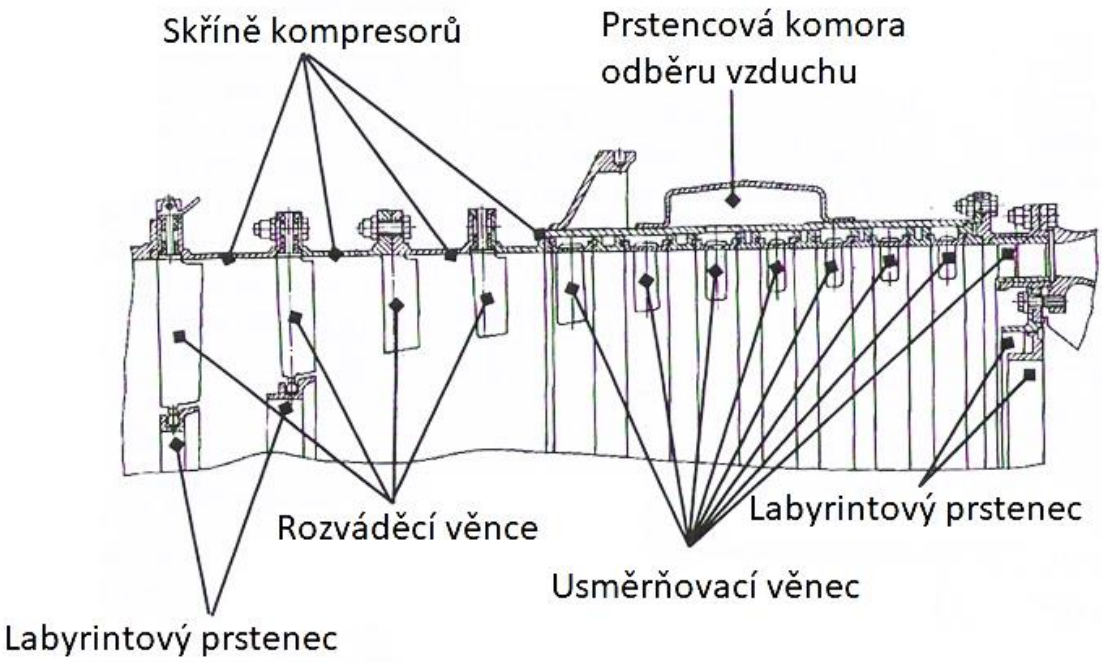
Motor TV3-117 má 12º jednohřídelový axiální kompresor, který stlačuje přivedený vzduch z atmosféry a dodává ho do spalovací komory. Pro zachování stability práce je kompresor vybaven dvěma odpouštěcími ventily a první 4º statorových lopatek spolu s rozváděcím věncem jsou natáčecí v rozsahu – 3º až 27º. (4)

Hlavní části kompresoru:

- Stator
- Rotor
- Těleso 1. ložiska
- Těleso 2. ložiska
- Mechanizmus natáčení statorových lopatek
- Odpouštěcí ventily

### Stator

Stator kompresoru mění kinetickou energii vzduchu na tlakovou a tepelnou energii a zároveň usměrňuje proudění vzduchu tak, aby nabíhal pod správným úhlem na lopatky rotoru. Stator kompresoru motoru TV3-117 můžeme vidět na Obr. 4. (3)




*Obr. 4: Stator kompresoru (4)*

Stator je tvořen:

- Skříní
- Rozváděcími a usměrňovacími věnci
- Prstencovou komorou odběru vzduchu

Skříň se skládá ze 4 oddělitelných částí vyrobených z titanové slitiny a z 1 části vyrobené z oceli. V přírubách jednotlivých částí jsou otvory pro umístnění mechanismu natáčení rozváděcích lopatek. (4)

Statorové lopatky 1º až 4º jsou vyrobeny z titanové slitiny. Lopatky 1º a 2º jsou uloženy na vnějších a vnitřních čepech, zatímco lopatky 3º a 4º jsou uloženy jen na vnějších čepech viz. obr.4. Uložení lopatek na těchto čepech umožňuje jejich natáčení. (4)

Statorové lopatky 5º až 11º jsou ocelové, vyrobené ze 2 částí. Lopatky jsou zasunuty do vnějších věnců, které jsou upevněny v drážkách prstenců oběžného kola kompresoru. (4)

Lopatky 12º jsou také ocelové a jsou zasunuty do dvou řad profilovaných otvorů ve vnějším a vnitřním prstenci, se kterým tvoří nosný celek. (4)

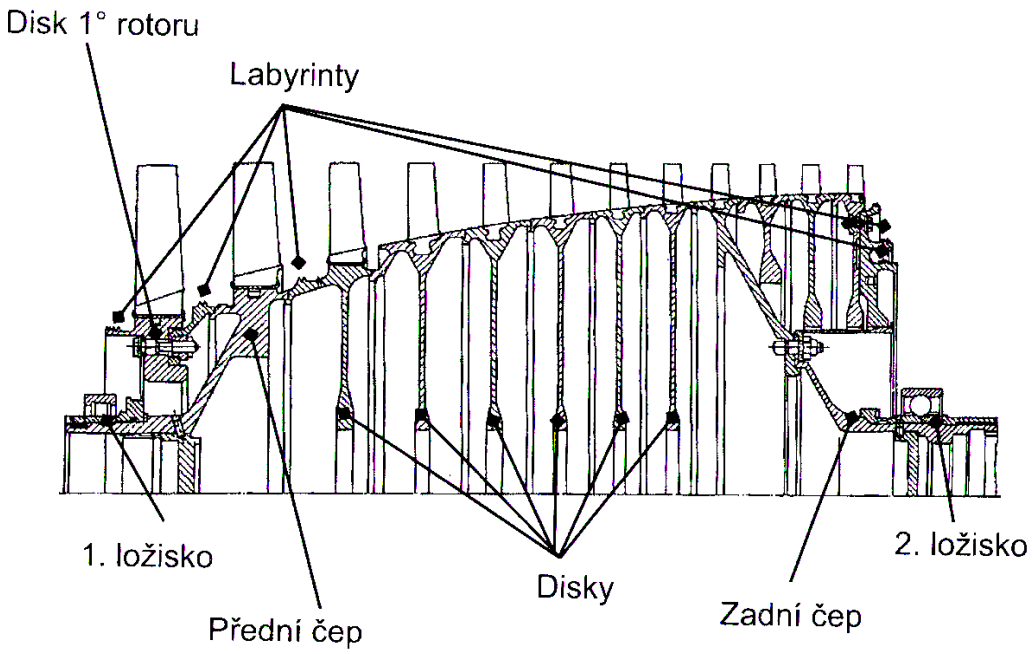
V Tab. 1 je celkový počet statorových lopatek na jednotlivých stupních.

*Tab. 1: Počet lopatek statoru jednotlivých stupňů (4)*

| **Stupeň [°]** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Počet lopatek** | 60 | 60 | 60 | 60 | 80 | 84 | 84 | 88 | 88 | 90 | 90 | 114 |

## Rotor

Rotor kompresoru poháněný od turbíny zvyšuje přivedením mechanické práce tlakovou, tepelnou a kinetickou energii vzduchu. Rotor motoru TV3-117 je disko-bubnový s konstantním vnějším průměrem, jak je patrné z Obr. 5. (3)




*Obr. 5: Rotor kompresoru (4)*

Rotor je tvořen 12 disky vyrobenými z titanové slitiny vzájemně svařenými, kromě 1º, který je přišroubován. (4)

Lopatky všech stupňů jsou vyrobeny z titanové slitiny. Jsou uchyceny k disku rybinovým zámkem. U prvních 3º kompresoru jsou lopatky nasunuté v podélné drážce zajištěny plechovými podložkami. Od 4º až po 12º jsou lopatky nasunuty do příčných drážek a zajištěny roztaženým nýtem. (4)

V Tab. 2. je celkový počet rotorových lopatek na jednotlivých stupních.

*Tab. 2: Počet lopatek rotoru jednotlivých stupňů (4)*

| **Stupeň [º]** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Počet lopatek** | 37 | 43 | 59 | 67 | 73 | 81 | 89 | 89 | 89 | 89 | 89 | 89 |

## Těleso 1. ložiska

Zde je uloženo první ložisko motoru, které je válečkové a zachycuje radiální síly od rotoru kompresoru. (4)

### Těleso 2. ložiska

Zde je uloženo druhé ložisko motoru, které je kuličkové a přenáší jak radiální, tak axiální síly od rotoru kompresoru. (4)

### Mechanismus natáčení statorových lopatek

Jak již bylo zmíněno, lopatky vstupního rozváděcího věnce a první 4º statorových lopatek kompresoru jsou natáčecí. K natáčení dochází automaticky v závislosti na otáčkách rotoru kompresoru. Ovládací mechanismus se nachází na skříni kompresoru. Jednotlivé lopatky jsou spojeny pákami s natáčecími prstenci, které svým natočením zajišťují natáčení statorových lopatek. Natáčení prstenců se provádí 2 pracovními válci. (4)

### Odpouštěcí ventily

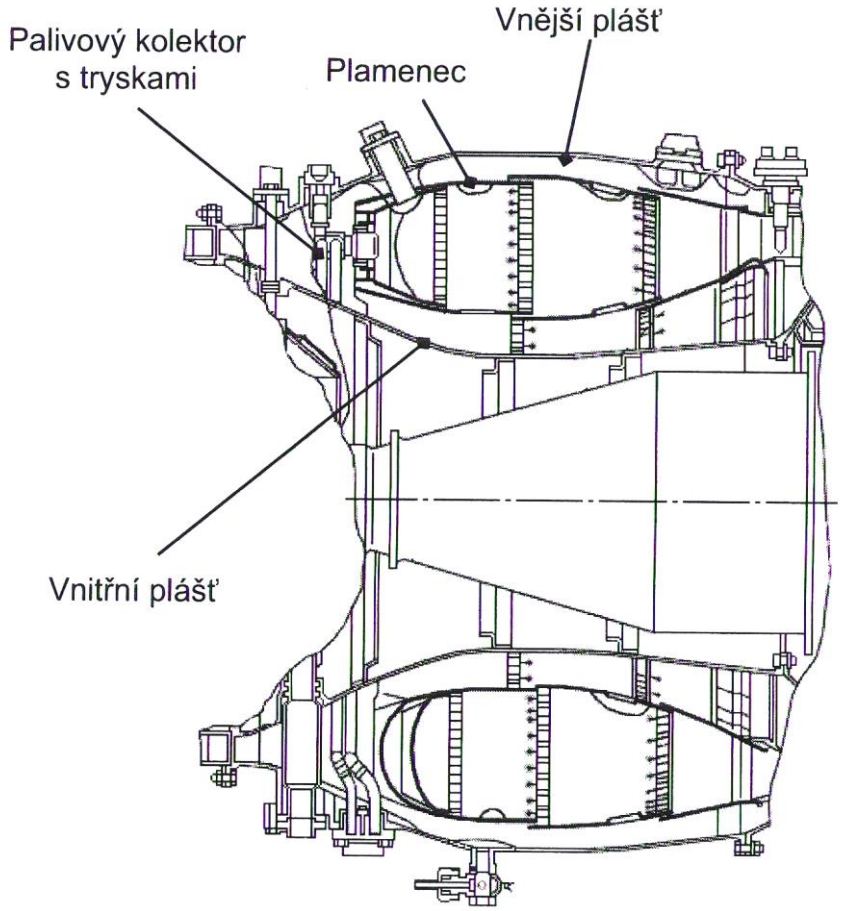
Odpouštěcí ventily tvoří spolu s natáčením statorových lopatek protipumpážní zařízení. Odpouštěcí ventily jsou umístěny na komoře 7º kompresoru a jsou ovládány automaticky pomocí pracovních válců pro natáčení lopatek. (4)

Odpouštěcí ventily jsou otevřené od startu motoru do 84 % až 87 % otáček kompresoru a odpouští část vzduchu do atmosféry. Nad těmito otáčkami se ventily uzavírají. Pří poklesu otáček kompresoru pod 82 % se ventily opět otevírají. (4)

## 1.1.3 Spalovací komora

Za kompresorem turbohřídelového motoru se nachází spalovací komora, která je k vidění na Obr. 6. Ve spalovací komoře dochází ke spalování paliva, a tím k přeměně chemické energie paliva, na tepelnou energii, kterou se ohřívají proudící plyny. (4)

Motor TV3-117 je vybaven prstencovou spalovací komorou. Palivo je do spalovací komory přiváděno 12 dvoukanálovými odstředivými tryskami. Tyto trysky zajišťují rozprášení paliva do prostoru plamence, který můžeme vidět na Obr. 6. Pro start motoru je spalovací komora vybavena dvěma zapalovacími svíčkami, které jsou umístěny na protějších stranách spalovací komory. (4)




*Obr. 6 Prstencová spalovací komora motoru TV3-117 (4)*

Vnější a vnitřní plášť spalovací komory je vyroben z titanových slitin. Plamenec je vyroben z ocelových žáruvzdorných plechů. (4)

## 1.1.4 Turbína kompresoru a volná turbína

Nejdůležitější části proudového motoru je turbína. Turbína je tepelný stroj, který se nachází za spalovací komorou. Dochází zde k transformaci tepelné energie v mechanickou práci. (3)

Motor TV3-117 má dvě dvoustupňové kinematicky nepropojené turbíny. Turbína kompresoru (dále jen TK) a volná turbína (dále jen VT). (4)

### Turbína kompresoru

TK je reakční dvoustupňová axiální turbína, která slouží k pohonu kompresoru a agregátů. (4)

*Obr. 7: Demontovaná turbína kompresoru s drážkovaným hřídelem*

Hlavní části turbíny kompresoru:

- Stator
- Rotor
- Těleso 3. ložiska

## Stator

Stator TK je tvořen skříní z titanových slitin. V přírubách je namontováno 14 termočlánků pro měření teploty plynů v turbíně.

Stator je dále tvořen rozváděcím ústrojím 1º a 2º turbíny. Rozváděcí ústrojí turbíny mění tepelnou a tlakovou energii plynů na kinetickou energii a usměrňuje tento proud horkých plynů tak, aby proudil pod správným úhlem na lopatky oběžného kola (rotoru). Statorové lopatky jsou duté a odlité z kvalitních niklových slitin. Do patek lopatek jsou uložena pouzdra, kterými je přiváděn vzduch na chlazení lopatek, a kterými jsou lopatky upevněny. (4)

## Rotor

V rotoru turbíny dochází k přeměně kinetické energie plynů na mechanickou práci. Protože se jedná o tzv. reakční turbínu, k expanzi plynů dochází nejen ve statoru, ale i v rotoru. To znamená, že jak ve statoru, tak v rotoru dochází k poklesu tlaku a teploty s výsledným nárůstem kinetické energie. (3)

Rotor TK se skládá z hřídele (viz Obr. 7), který přenáší krouticí moment do kompresoru, dvou disků s oběžnými lopatkami a čtyř krycích disků, které chrání povrch pracovních disků, usměrňují chladící vzduch a zajišťují lopatky proti osovému posunutí. (4)

Lopatky rotoru jsou vyrobeny ze žárupevné slitiny. V discích jsou upevněny ve stromečkových zámcích. Na koncích mají lopatky bandáže s břity, které zvyšují pevnost lopatek při kmitání a zároveň utěsňují rotor. Počet statorových a rotorových lopatek KT je uveden v Tab. 3. (4)

*Tab. 3 Počet lopatek rotoru a statoru turbíny kompresoru*

| **Stupeň [º]** / **Počet lopatek** | **1.** | **2.** |
|---|---|---|
| **Statorové** | 63 | 55 |
| **Rotorové** | 133 | 101 |

## Těleso 3. ložiska

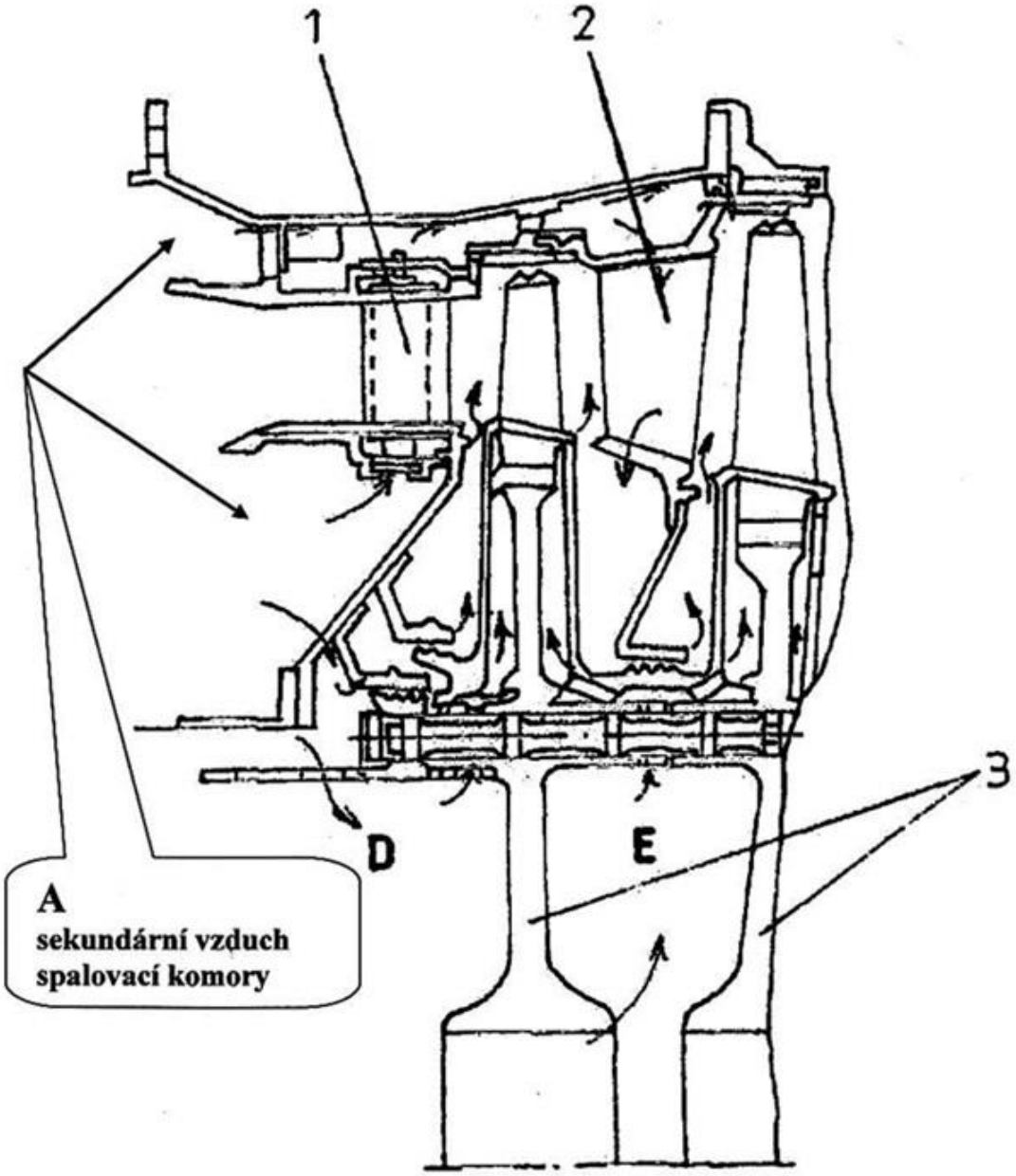
V tomto tělese je uloženo 3. ložisko motoru, které zabezpečuje uložení rotoru turbíny kompresoru v zadní části a přenáší radiální síly od rotoru turbíny. (4)

## Chlazení turbíny kompresoru

TK je chlazena sekundárním proudem vzduchu:

1. Sekundární proud vzduchu odebíraný z prostoru mezi vnějším pláštěm spalovací komory a plamencem. Tento proud vzduchu proudí do prostoru mezi skříň TK a vnějšími věnci rozváděcího ústrojí.
   - Část vzduchu proudí přes duté lopatky 2º rozváděcího ústrojí a postupuje na labyrintové těsnění. Zde tvoří vzduchovou izolaci krycích disků a odchází mezi krycími disky a vnitřním věncem rozváděcího ústrojí do proudu plynů.
   - Zbytek vzduchu odchází přes otvory do proudu plynů za 2º rozváděcího ústrojí.
2. Sekundární proud vzduchu odebíraný z prostoru mezi vnitřním pláštěm spalovací komory a plamencem.
   - Část vzduchu proudí skrz rozváděcí lopatky 1º a směšuje se s horním chladícím proudem vzduchu.
   - Druhá část chladícího proudu vzduchu proudí přes otvory v šikmé přepážce do prostoru mezi vnitřním pláštěm spalovací komory a hřídelí TK. Zde se dělí dvěma směry:
     - Část vzduchu proudí přes labyrintové těsnění do prostoru mezi šikmou přepážkou a 1. krycím diskem 1º rotoru TK. Ochlazuje je a odchází do proudu plynů mezi 1. rozváděcím stupněm a rotorem 1º TK.
     - Další část vzduchu jde přes otvory v hřídeli do dutiny „D“ (viz Obr. 8). Odtud jde část vzduchu skrze otvory v disku do prostoru mezi 1. krycím diskem a rotorem 1º TK, které chladí a přes netěsnosti v zámcích a otvory v krycím disku odchází do proudu plynů.
     - Zbytek chladícího vzduchu z prostoru „D“ proudí do prostoru „E“ (viz Obr. 8), odkud proudí přes čelní drážkování a otvory mezi druhý krycí disk a disk 1º rotoru, mezi 3. krycí disk a disk 2º rotoru a mezi 4. krycí disk

a disk 2º rotoru. Ze všech těchto prostorů chladící vzduch odchází přes otvory v krycích discích do proudu plynů. (4)




*Obr. 8: Schéma chlazení turbíny kompresoru (4)*

*Části: Rozváděcí lopatky I. stupně /1/, Rozváděcí lopatky II. stupně /2/, Disk /3/*

## Volná turbína

VT je reakční dvoustupňová axiální turbína viz Obr. 9, která jednak slouží jako náhon regulátoru otáček volné turbíny, ale především přenáší přes hřídel kroutící moment do reduktoru, ze kterého je pak po zredukování přenášen na hlavní a vyrovnávací rotor vrtulníku. (4)

*Obr. 9: Volná turbína (4)*

Hlavní části volné turbíny:

- Stator
- Rotor
- Těleso 4. a 5. ložiska motoru

## Stator

Stator je tvořen dvěma skříněmi rozváděcího ústrojí. Lopatky statoru mění tepelnou a tlakovou energii plynů na energii kinetickou. Rozváděcí ústrojí skříně 1º VT je tvořeno vnějším a vnitřním prstencem, které jsou spojeny rozváděcími lopatky a 3 stojinami, které slouží pro vedení potrubí k tělesu 3. ložiska. Lopatky rozváděcího ústrojí jsou duté. (4)

Rozváděcí ústrojí 2º VT je tvořeno vnějším a vnitřním prstencem, které jsou spojeny pouze rozváděcími lopatky, které jsou také duté. (4)

## Rotor

Rotor VT mění kinetickou energii na mechanickou práci, která je přenášena pomocí hřídele do reduktoru. Hřídel je součástí 2º VT. Z hřídele jsou pomocí dvoustupňového reduktoru přenášeny otáčky k náhonu regulátoru otáček VT. (4)

Rotor VT se skládá z disků a oběžných lopatek 1º a 2º. Lopatky jsou v discích upevněny pomocí stromečkových zámků. Konstrukce lopatek je stejná jako u TK. Počet statorových a rotorových lopatek VT je uveden v Tab. 4. (4)

*Tab. 4: Počet lopatek rotoru a statoru volné turbíny*

| **Stupeň [°]** / **Počet lopatek** | **1.** | **2.** |
|---|---|---|
| **Statorové** | 35 | 37 |
| **Rotorové** | 64 | 51 |

## Těleso 4. a 5. ložiska

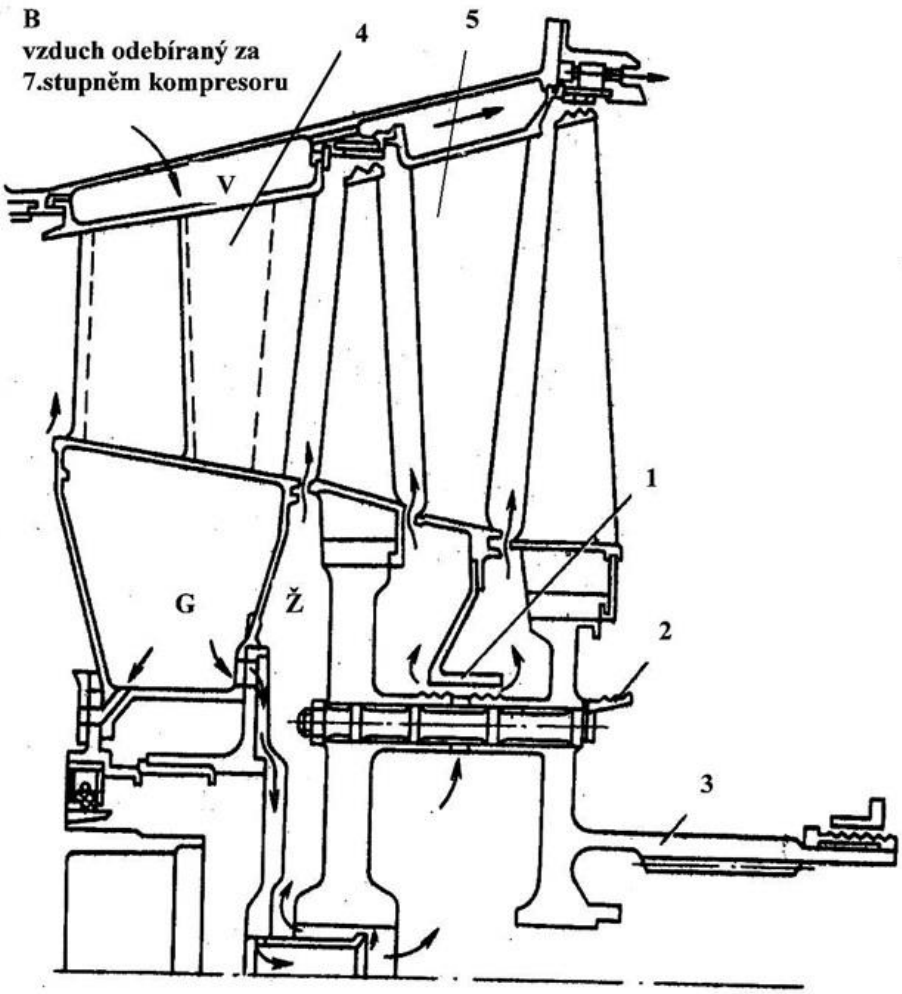
Rotor VT je uložen ve 4. a 5. ložisku motoru, kde 4. ložisko motoru je kuličkové a 5. ložisko je válečkové. Ložiska přenáší axiální a radiální síly od rotoru VT. (4)

## Chlazení volné turbíny

Chladící vzduch pro VT se odebírá ze 7. stupně kompresoru. Vzduch je přiveden do prostoru „V“ (viz Obr. 10), odkud část vzduchu proudí do prostoru mezi skříní VT

a vnějšími věnci rozváděcího ústrojí VT a otvory odchází do proudu plynů za 2º rotoru VT. Druhá část proudí přes duté lopatky 1. rozváděcího stupně VT do prostoru „G“, odkud část vzduchu proudí přes průvrty do prostoru tělesa 3. ložiska, které chladí a přetlakuje a dále proudí do výstupního nátrubku. Druhá část proudí z prostoru G přes otvory a prostor mezi přepážkami a nátrubkem do prostoru pod disky VT. Z tohoto prostoru je vzduch veden dvěma směry:

- Část vzduchu proudí mezi nátrubkem a diskem 1º VT do prostoru „Ž“, který ochladí a odtud odchází do proudu plynů před 1º rotoru VT.
- Druhá část vzduchu proudí otvorem pod labyrintové těsnění, odkud proudí na zadní stranu disku 1º a přední stranu disku 2º rotoru VT, které chladí a odchází do proudu plynů. (4)




*Obr. 10: Schéma chlazení volné turbíny (4)*

*1-labyrint volné turbíny, 2-labyrint volné turbíny,3-hřídel volné turbíny,4-rozváděcí ústrojí I. stupně, 5-rozváděcí ústrojí II. stupně*

### 1.1.5 Výstupní ústrojí

Ve výstupním ústrojí spaliny expandují do okolní atmosféry. Protože je turbohřídelový motor navržen tak, aby VT odebrala téměř veškerou energii ze spalin, výstupní ústrojí již nevyvozuje žádný tah a slouží pouze k odvádění spalin do atmosféry. (3)

Výstupní ústrojí se skládá z difusoru, který snižuje rychlost proudu vzduchu a přes výstupní nátrubek odvádí spaliny do atmosféry na levou nebo pravou stranu vrtulníku. Difuzor se skládá z vnějšího pláště, tělesa transmise a 4 dutých stojin. Tyto stojiny přenáší zatížení od rotoru VT na vnější plášť motoru a dále slouží pro přívod a odvod vzduchu a oleje k ložiskám motoru. Ve výstupním ústrojí se dále nachází vnitřní kužel, ve kterém je snímač otáček VT. Skrze vnitřní kužel dále vede hřídel od VT, který přenáší kroutící moment do reduktoru. (4)

### 1.1.6 Skříň náhonů

Tyto náhony slouží k pohonu pomocných agregátů motoru, mezi které patří vzduchový spouštěč motoru SV-78, snímač otáček rotoru kompresoru, odstředivé dodávací palivové čerpadlo DCN-70, odsávací olejové čerpadlo skříně pomocných náhonů, olejový čistič a čerpadlo regulátor NR-3, který slouží k dávkování paliva do spalovací komory. Točivý moment se odebírá od hřídelek turbokompresoru a od hřídele volné turbíny. (4)

Skříň náhonů je odlita z hořčíkových slitin a je umístěna na horní přírubě vstupního ústrojí. (4)

## 1.2 Popis životního cyklu

V této kapitole je popsán životní cyklus motoru TV3-117, který je také znázorněn a zjednodušeně popsán ve vývojovém diagramu v Příloze 1.

Stanovená životnost motoru je 4 500 letových hodin, meziopravní resurs (stanovená doba mezi opravami) je 1 500 hodin, nebo 10 let (záleží co nastane dříve). Je možné po dovršení 4 500 letových hodin prodloužit životnost na 6 000 letových hodin, případně až na 7 500 letových hodin. V obou případech musí opravce (na základě požadavku provozovatele o prodloužení) požádat o schválení od výrobce, že je možné u konkrétního motoru prodloužit jeho životní cyklus na 6 000 hodin, případně poté na 7 500 hodin. (5)

### Generální oprava

Generální oprava (dále jen GO) se skládá z těchto úkonů:

- Demontáž
- Mytí
- Nález (NDT)
- Oprava / výměna
- Montáž
- Zkouška

Motor jde nejprve na demontáž, kde se celý rozebere. Poté následuje mytí a očištění vybraných dílů. Povinně vyměnitelné díly se odstraní. U zbytku dílů se provede NDT. Z nálezů se vyselektují díly, které jsou v pořádku a lze je opět použít. Zbytek dílů se rozdělí na opravitelné a neopravitelné. Provozovatel rozhodne, zda je pro něj oprava, případně výměna těchto dílů ekonomická. Pokud provozovatel rozhodne, že ne, motor se vyřadí, pokud rozhodne, že ano, provede se oprava/ výměna, montáž a motorová zkouška, kde dochází k ověření parametrů motoru. (5)

# 2 Popis čerpání životnosti lopatek motoru

V této kapitole jsou popsány způsoby čerpání životnosti lopatky motoru, a to jak z pohledu vývojáře, tak z pohledu provozovatele. Při vývoji lopatky se definuje její životnost pomocí následujících kroků:

1) Návrh geometrie a okrajových podmínek-návrh rozměrů, geometrického tvaru a počet stupňů volnosti
2) Návrh materiálu-na základě požadovaných vlastností lopatky se určí materiál
3) Definice zatížení-rychlosti, násobky, prostředí, teplota
4) Pevnostní analýza
    - Metoda konečných prvků/objemů (FEM/CFD)
    - Analytická metoda
    - Reálná měření např.: pomocí tenzometrů.
5) Dekompozice zatížení – rozklad zatížení (např. metodou Rain – flow, nebo metodou Párových rozkmitů blíže popsaných v (6))
6) Definice způsobu čerpání životnosti (např. metodou Palmgren-Miner)
7) Statistická analýza – definice statistických rozptylů provozního a mezního zatížení ($k_n$, $k_N$)
8) Zkouška lopatky – ověření životnosti na zkušebním standu, popř. v reálném provozu
9) Definice únavového života a způsob čerpání – popsáno viz kapitola 2.2.

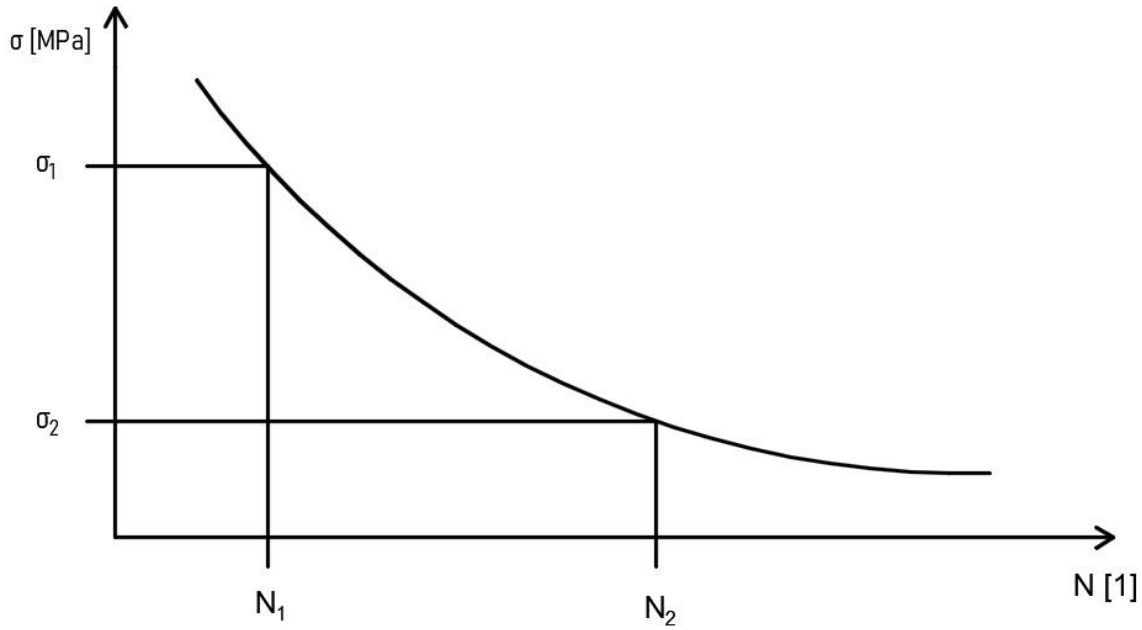
Kapitola 2.1 se zabývá bodem 6) Metoda Palmgren-Minerovy hypotézy a kapitola 2.2 se zabývá bodem 9) Definice únavového života a způsobem čerpání životnosti. Rozdíl mezi těmito body je, že vývojář stanoví např. na základě Palmgren-Minerovy hypotézy čerpání životnosti, a z toho určí pro provozovatele dobově a hodinově životnost. (6)

## 2.1 Obecný popis čerpání životnosti dle Palmgren-Minerovy hypotézy

Palmgren-Minerova hypotéza vychází z Wöhlerovy křivky (viz Obr. 11), která nám definuje, při jakém napětí vydrží součást (např.: lopatka) kolik cyklů. Z diagramu je zřejmé, že při vyšším napětí součást vydrží méně cyklů, a naopak při nižším zatížení vydrží cyklů více. Palmgren – Minerova hypotéza je jednou z metod lineární kumulace poškození. Na základě Palmgren-Minerovy hypotézy a vztahu (1), (6)

$$D_{i,P-M} = \sum_{i=1}^{p} \frac{n_i}{N_i} \tag{1}$$

kde $D_{i,P-M}$ je únavové poškození, $n_i$ je počet cyklů na určitém napětí během provozu, a $N_i$ je celkový počet cyklů, které součást vydrží při stejném napětí, které odečteme z Wöhlerovy křivky na Obr. 11. Nasčítáním všech cyklů na určitém napětí nám dá výsledek, kolik se odčerpá životnosti při běžném provozu. (6)




*Obr. 11: Wöhlerova křivka; upraveno pro vlastní potřeby dle (6)*

Pro lepší pochopení problematiky je zde uveden jednoduchý teoretický příklad:

Vývojář zjistí, že u součásti dojde k lomu při napětí $\sigma_1$ po $N_1$ = 100 000 cyklů a při napětí $\sigma_2$ po $N_2$ = 400 000 cyklů. Zjistí, že při běžném provozu je součást namáhána za hodinu 20 cykly při napětí $\sigma_1$ a 300 cykly při napětí $\sigma_2$, tedy $n_1$ = 20 a $n_2$ = 300. Dosazením do vztahu (1) získáme:

$$D_{i,P-M} = \sum_{i=1}^{p} \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = \frac{20}{100\,000} + \frac{300}{400\,000} = 0{,}00095$$

Výpočtem je zjištěno, že při hodině provozu je součásti odčerpáno 0,095 % životnosti. Jinými slovy jsme vypočítali, že 1 hodina odčerpá 0,095 % životnosti.

Zbytkový život poté dopočítáme ze vztahu (2),

$$Z = 1 - D_{i,P-M} * t \qquad (2)$$

kde $Z$ je zbytkový život, $D_{i,P-M}$ je únavové poškození a $t$ je doba provozu

Zbytkový život při náletu např.: 150 hodin je tedy:

$$\mathrm{Z} = 1 - \mathrm{D_{i,P-M}} * \mathrm{t} = 1 - 0{,}00095 * 150 = 0{,}8575 => 85{,}75\ \%$$

Pro stanovení čerpání životnosti existuje spoustu dalších metod. Obecně se jedná o metody lineární kumulace poškození. Je velmi obtížné určit, jaká metoda nejvíce odpovídá danému případu, a výsledky stanovené těmito metodami se můžou významně lišit od experimentálních výsledků. (6)

## 2.2 Čerpání životnosti dobově a hodinově dle manuálu

V této podkapitole je popsána definice únavového života vztahem (3), obecné způsoby čerpání životnosti a čerpání životnosti dle manuálu.

### Definice únavového života

$$L = \frac{L(50\ \%)}{(k_n * k_N)} \tag{3}$$

$k_n$ = koeficient provozního zatížení

$k_N$ = koeficient mezního zatížení

L (50 %) = medián Wöhlerovy křivky pro danou hladinu zatížení

L = bezpečný život

### Způsob čerpání

- Odečítání životnosti kmit po kmitu
- Odečítání reálně nalétaných hodin od celkového počtu (meziopravního resursu)
- Dobově – dobová životnost je daná vývojářem např. na 30 let. Z důvodu např. koroze. (6)

Čerpání životnosti dobově a hodinově dle manuálu je stanovená vývojářem a je důležitá pro provozovatele. V manuálu je uvedena stanovená životnost, a tedy dopočítání odčerpané životnosti je velmi jednoduché. (6)

Je zde uveden jednoduchý příklad:

Stanovená životnost motorové součásti je 1 000 letových hodin, tedy A = 1 000. Aktuální nálet součásti je 150 letových hodin, tedy B = 150. Zbytkový život součásti je tedy:

$$Z = A - B = 1\,000 - 150 = 850 => 85\ \%$$

Lopatky TK i VT mají stejnou životnost jako motor, tedy 4 500 až 7 500 letových hodin. Disky TK mají životnost 4 500 hodin bez úpravy rádiusů, s úpravou rádiusů až 6 500 hodin. Disky VT mají stanovenou životnost jako motor, tedy 4 500 až 7 500 hodin. Krycí disky na TK, které chrání povrch pracovních disků, usměrňují chladící vzduch a zajišťují lopatky proti osovému posunutí, mají stanovenou životnost:

- 1. a 4. krycí disk má stanovenou životnost jako motor, tedy 4 500 až 7 500 hodin. (5)
- 2. a 3. krycí disk má stanovenou životnost 2 000 hodin.

# 3 Popis a analýza vlivů snižující životnost lopatek

V této kapitole jsou uvedeny tři hlavní oblasti, které mají přímo vliv na životnost lopatek turbíny. Jedná se o výrobu, údržbu a provoz turbínových lopatek. Nemalý vliv má také vývoj lopatek, a to z hlediska materiálového i konstrukčního. Vzhledem k orientaci práce na opravárenský průmysl se však tato kapitola tímto aspektem nebude zabývat.

## 3.1 Výroba

Poté, co je lopatka turbíny navržena, je prvním vlivem ovlivňujícím její životnost výroba. Lopatky TK (1º a 2º) i VT (1º a 2º) se vyrábí přesným vakuovým litím metodou vytavitelného modelu. Lopatky TK jsou vystavovány vyšším teplotám oproti VT, a proto jsou vyrobeny z lepší žáropevné niklové slitiny, která má označení ŽS6K, jejíž chemické složení je v Tab. 5. Lopatky VT jsou vyrobené z niklové slitiny s označením CHN77TJUR, jejíž chemické složení je v Tab. 6. Odlité lopatky jsou dále tepelně zpracovávány (vytvrzením). (7)

*Tab. 5: Chemické složení materiálu lopatek kompresorové turbíny (ŽS6K) (8)*

| **Prvek** | **Ni** | **Co** | **W** | **Mo** | **Ti** | **Al** | **Fe** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **[%]** | Základ | 4,0-5,5 | 4,5- 5,5 | 3,5-4,5 | 2,5-3,2 | 5,0-6,0 | max. 2 |
| **Prvek** | **C** | **Si** | **Mn** | **S** | **P** | **Cr** | |
| **[%]** | 0,13-0,18 | max. 0,4 | max. 0,4 | max. 0,015 | max. 0,015 | 9,5-12,5 | |

*Tab. 6: Chemické složení materiálu volné turbíny (CHN77TJUR) (8)*

| **Prvek** | **Ni** | **C** | **Si** | **Mn** | **S** | **P** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **[%]** | základ | max. 0,07 | max.0,6 | max. 0,4 | max. 0,007 | max. 0,015 |
| **Prvek** | **Cr** | **Ce** | **Ti** | **Al** | **B** | **Pb** |
| **[%]** | 19-22 | max. 0,02 | 2,4-2,8 | 0,6-1 | max. 0,01 | max. 0,01 |

### Nedodržení výkresové dokumentace

Nedodržení výkresové dokumentace hodnotíme z těchto hledisek (9):

- Kvalita povrchu – drsnost
- Tolerance
- Kvalita tepelného zpracování (nedodržení teplot/rychlosti ohřevu a chlazení)

Každá vyrobená lopatka se po výrobě vizuálně kontroluje a proměřuje, zda vyhovuje předepsaným tolerancím. Dále se provádí rentgen a kapilární metoda na odhalení vnitřních a povrchových trhlin. Z nálevky a vtokové soustavy se odeberou vzorky, které se kontrolují na mikrostrukturu materiálu odlitku. Nevyhovující lopatky se vyřazují. (9)

Po druhé se lopatka proměřuje při provádění údržby, kdy technik přesto, že na disk turbíny dává novou lopatku, pro kontrolu proměří, zda vyhovuje předepsaným tolerancím. Těmito průběžnými kontrolami se předchází možnosti vstupu vadných kusů lopatek na turbínu, a proto tento aspekt má zanedbatelný vliv na životnost lopatek. Životnost a kvalita výroby lopatek je hodnocena dle mikrostruktury materiálu, která je ovlivněna jak základní výrobou lopatek, tak tepelným zpracováním. (5)

## 3.2 Provoz

Jestliže výroba i údržba motoru probíhá dle stanovených předpisů výrobce, největší vliv na životnost nejen lopatek, ale celého motoru má provoz a podmínky, ve kterých je motor provozován.

### 3.2.1 Prostředí

Motory vrtulníků jsou vlivem prostředí vystavovány různým nepříznivým podmínkám, které velmi významně ovlivňují životnost lopatek. Díky těmto podmínkám lopatky velmi rychle vyčerpávají svou životnost. Jinými slovy, působením těchto aspektů, může být životnost lopatek značně kratší, než je stanovena výrobcem.

### Sůl

V oblastech moří a oceánů se ve vzduchu vyskytuje sůl. Sůl je korozivní chemická sloučenina, a proto motory provozované v těchto oblastech podléhají častěji a mnohem dříve korozi. Pro turbínu jsou tyto podmínky ještě horší z důvodu kombinace vysokých teplot a soli.

Protože motory TV3-117, na kterých se provádí údržba a oprava ve firmě LOM PRAHA s. p., nejsou z mořských oblastí, tento vliv nebude více rozebírán v této práci.

### Písek

Provoz motorů v pouštních nebo prašných oblastí, má především vliv na lopatky kompresoru. Náběžné hrany lopatek jsou osekávány částicemi obsaženými v nasávaném vzduchu (písek, prach atd.). Přestože vlivem prachu jsou poškozeny především lopatky kompresoru, negativní vliv to má také na lopatky turbíny, u kterých také dochází k abrazi.

Lopatky TK jsou chlazeny sekundárním proudem, který se pak rozděluje do chladících cest (viz obr.10). Lopatky VT jsou chlazené od 7° kompresoru. Písek a prach může ucpávat chladící systém (cesty) turbíny, a vlivem toho dochází k přehřívání. (4)

### Teplota

Motor TV3-117 může pracovat v rozmezí teplot vstupujícího vzduchu ± 60 ºC. Teplota vstupujícího vzduchu nemá přímo vliv na životnost lopatek turbíny, ale z Obr. 12 je patrné, že při vyšší teplotě vstupujícího vzduchu motor pracuje na vyšších otáčkách turbíny, což vede k jejímu většímu zatěžování. Nicméně turbína je na tento stav navržena, tudíž tento vliv je zanedbatelný. (1)

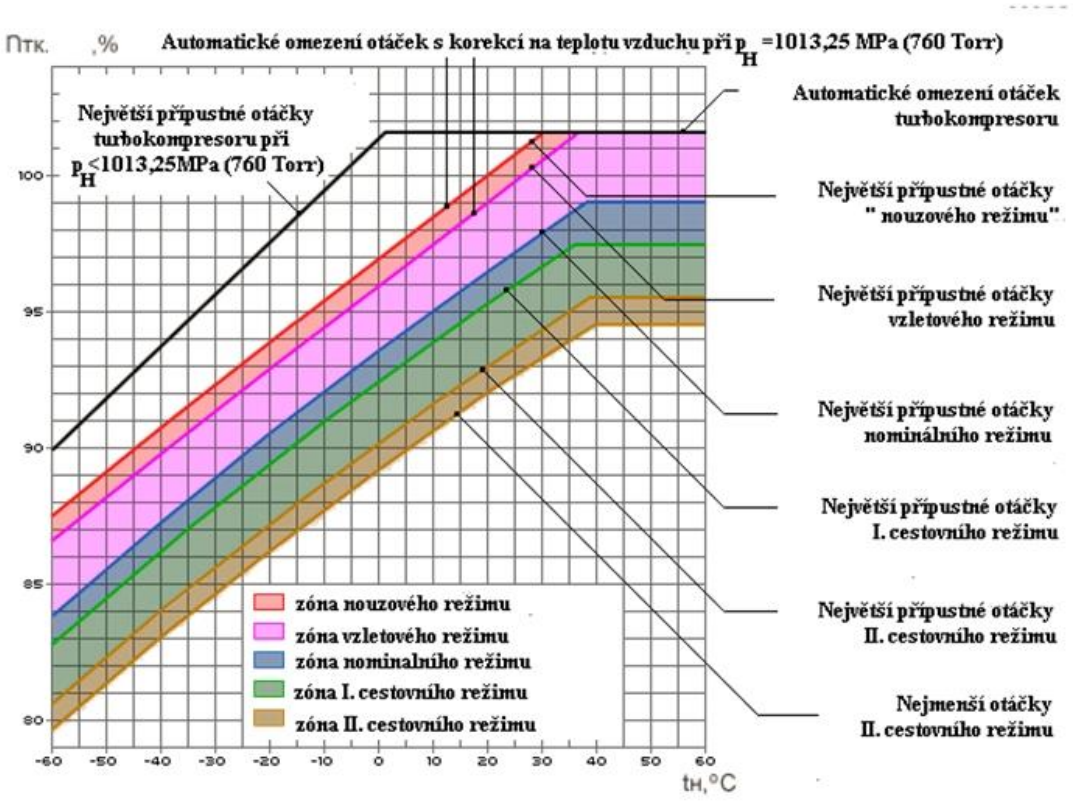
## 3.2.2 Letecká kázeň

Motor je navržen tak, aby pracoval v určitých výrobcem stanovených režimech (viz Obr. 12). K některým z těchto režimů jsou výrobcem stanoveny teplotní a časová omezení, tedy doba, po kterou smí motor pracovat na daném režimu. V případě

letecké nekázně, kdy pilot nedodržuje stanovené omezení, které je popsané dále, motor pracuje na jiných výkonech a teplotách po delší dobu, což vede k rychlejšímu odčerpávání životnosti turbíny vlivem např. vysokých teplot a v kritických případech může dojít až k úplnému spálení lopatek turbíny. Ne vždy se musí jednat o leteckou nekázeň, např.: V bojovém nasazení v případě záchrany posádky vrtulníku mohou být provozní omezení až sekundární rozhodovacím parametrem.

Mezi leteckou nekázeň, kterou pilot může ovlivnit, je provozování motoru na zemi. Po spuštění motoru by se měl motor zahřívat na volnoběžných otáčkách, a až po zahřátí motoru na provozní teplotu přejít do vzletového režimu. V opačném případě vlivem rychlého nerovnoměrného zahřátí motoru vznikne nerovnoměrné napětí v lopatkách a vznik trhlin na odtokové hraně. (5)

Naopak před vypnutím motoru by se měl motor dochlazovat na volnoběžných otáčkách po dobu 3 minut. V případě vypnutí motoru bez chlazení na volnoběžném režimu dochází k tomu, že motor nasaje studený vzduch dotáčejícím se motorem, což vede k prudkému ochlazení turbíny, následně vznikne nerovnoměrné napětí v lopatkách a vznik trhlin na odtokové hraně. (5)




*Obr. 12: Graf pracovních režimů motoru TV3-117 ($n_{TK}$ [%]-Otáčky turbíny kompresoru, $t_H$ [°C]-teplota na vstupu do motoru) (1)*

Volnoběžný režim – odpovídá minimálním otáčkám rotoru turbokompresoru, při kterých je motor schopen samostatné stabilní práce. Doba nepřetržité práce motoru na tomto režimu je omezena kvůli nedostatečnému mazání a nebezpečí přehřátí motoru (viz Tab. 7). (1)

I. cestovní režim – motoru odpovídá ekonomické rychlosti vrtulníku, při které je nejmenší potřebný výkon vrtulníku. Při dané rychlosti je největší záloha výkonu, nejmenší spotřeba motoru a z toho vyplývá nejdelší doba letu vrtulníku. Doba nepřetržité práce motoru se při tomto režimu neomezuje. (1)

II. cestovní režim – motoru odpovídá optimální rychlosti vrtulníku, při které potřebný výkon motoru je vyšší a tím je i větší spotřeba paliva, zároveň je vyšší rychlost letu vrtulníku a vrtulník uletí nejdelší vzdálenost. Doba nepřetržité práce motoru se při tomto režimu neomezuje. (1)

Nominální režim – je definován počtem otáček motoru, které jsou přibližně o 3-4 % nižší, než jsou otáčky maximální. Doba nepřetržité práce motoru na tomto režimu se omezuje (viz Tab. 7). Nominální režim chodu motoru se využívá při letech vysokou rychlostí, při prudkém stoupání atd. (1)

Vzletový (maximální) režim – je definován maximálními otáčkami rotoru motoru (turbokompresoru) a maximálním výkonem motoru. Doba nepřetržité práce motoru na tomto režimu se omezuje (viz Tab. 7). Vzletový režim motoru se využívá při vzletu vrtulníku nebo při letu maximální rychlostí. (1)

### Základní provozní omezení

V

Tab. 7 jsou uvedeny jednotlivé režimy a jejich omezení z různých hledisek.

*Tab. 7: Základní provozní omezení motoru TV3-117 (4)*

| Režimy | Doba práce motoru na režimech za resurs | Doba nepřetržitého chodu motoru v jednotlivých režimech | Max. povolené otáčky turbo-kompresoru | Maximální teplota plynů před turbínou kompresoru |
|---|---|---|---|---|
| **Vzletový** | 5 % | Max. 6 min | 101 % | 990 ºC |
| **Nominální** | 40 % | Max. 60 min | 98 % | 955 ºC |
| **I. Cestovní** | Bez omezení | Bez omezení | 96 % | 910 ºC |
| **II. Cestovní** | Bez omezení | Bez omezení | 94 % | 870 ºC |
| **Volnoběžný** | Bez omezení | Max. 20 min | - | - |

## 3.2.3 Nestandardní provoz

Vrtulník je ideální nástroj pro stavební a montážní práce v nepřístupných, popřípadě hustě zastavěných oblastí. Z toho důvodu se vrtulníky používají např.: pro převoz dřeva, stavby přehrad, zástavbu elektrického vedení, stavbu lanových drah, hašení požárů, nebo také pro bojová nasazení. Při těchto pracích, jsou motory vrtulníků mnohem více namáhány než při běžném provozu, protože pracují většinou častěji a déle na nominálním a vzletovém režimu.

## 3.3 Údržba

Údržba lopatek VT i TK probíhá při každé GO. Případně při náhlé poruše motoru, která by mohla mít něco společného s turbínou, i dříve. Údržba lopatek turbíny začíná demontáží turbíny, a poté následujícími úkony:

1) Měření průměru disku s lopatkami – Pasametrem se změří průměr celého disku s lopatkami. Naměřené hodnoty musí být v tolerancích daných výrobcem.
2) Demontáž lopatek.
3) Mytí – Mytím se z lopatek odstraňuje mastnota a špína pomocí chemických mycích prostředků.
4) Řez lopatky a prověření mikrostruktury a tvrdosti – Z každého rotorového stupně se odebere 1 lopatka, která se rozřízne a u 1º a 2º TK se pod mikroskopem kontroluje její mikrostruktura, která vlivem vysokých teplot a času degraduje. U 1º a 2º rotoru VT se kontroluje její tvrdost dle Brinella (HB). V případě, že lopatka nevyhoví, lopatky z celého rotorového stupně turbíny se vyřadí. Pokud vyhoví, následují další úkony.
5) Nález a oprava – nález a oprava probíhá v několika krocích, které se vzájemně prolínají, proto je zde uvedu jen v bodech, které více popíši v následujících podkapitolách:
   - Vizuální kontrola
   - Proměřování lopatky
   - Odstranění alitační vrstvy
   - Oprava mechanického poškození
   - Luminiscenční defektoskopie
   - Měření frekvence lopatky
   - Alitace
6) Montáž lopatek – Montáž lopatek je náročnější, než se zprvu může zdát. Lopatky se musí na disk rozmístit tak, aby byl rotor turbíny vyvážený. Proto se lopatky musí nejprve zvážit a poté se za pomocí PC softwaru určí umístění lopatky na disku.
7) Po montáži lopatek se celý rotor po obvodu přesoustruží z důvodů zarovnání hřebínků lopatek. (5)

### 3.3.1 Nálezové technologie a NDT

#### Vizuální metoda

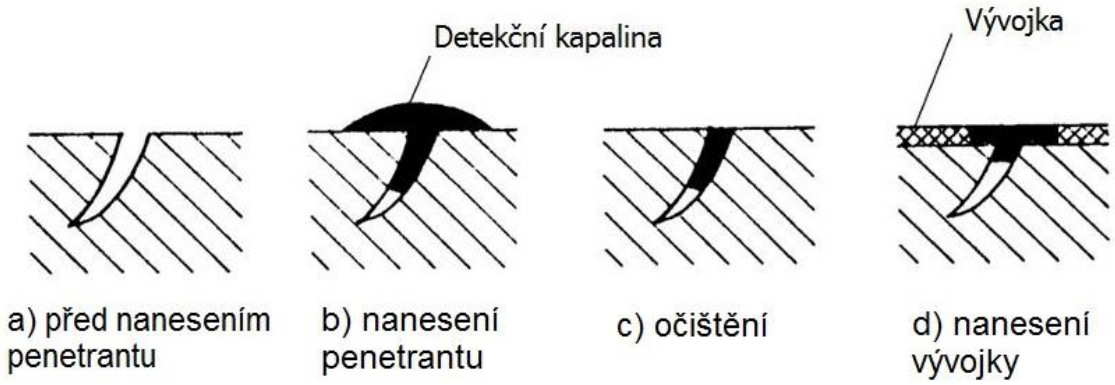
Vizuální metoda je základní a nejjednodušší nálezovou technologií. Vyhodnocování objektů probíhá buď pouze lidským okem nebo za pomocí lup, optických a optoelektronických přístrojů (endoskopy, kamery atd.). Vizuálně se u lopatek kontroluje alitační vrstva (bariérová ochrana proti vysokoteplotní korozi), vychvění stromečkového zámku lopatky, tělo lopatky, koroze a povrchové lunkry (dutiny). (5)

#### Proměřování lopatky

Lopatky se proměřují v několika řezech stanovených výrobcem, měřených od stromečkového zámku lopatky. Měří se tětiva profilu, rádius NH a OH, tloušťka lopatek, zámek lopatky, lunkry (jejich velikost a umístění) atd. (5)

#### Barevná luminiscenční defektoskopie

Tato metoda slouží k nalezení povrchových otevřených trhlin kovových i nekovových materiálů. Princip metody je založen na kapilární elevaci, tzn. kapalina smáčí stěny ve vydutém tvaru. Kapalina vnikne do povrchových trhlin (viz Obr. 13) a pod UV zářením odhalí trhliny. Jedná se o časově poměrně náročnou metodu. (10)




*Obr. 13: Princip kapilární defektoskopie (10)*

Stručný postup:

1) Lopatka se odmastí, umyje a vysuší dle stanovených předpisů.
2) Lopatka se očistí nástřikem a otřením čističe dle postupu stanoveného v návodce kapilární zkoušky
3) Na lopatku se nanese rovnoměrná vrstva penetrantu (kapalina s vysokou vzlínavostí obsahující UV aktivní fluorescenční pigmenty)
4) Po uplynutí penetračního času (čas pro vzlínání penetrantu do povrchových necelistvostí) se lopatka otře pomocí utěrky, pro finální dočištění je možné použít utěrku navlhčenou čističem
5) Na lopatku se nanese tenká rovnoměrná vrstva vývojky, a po zaschnutí a uplynutí vyvíjecího času stanoveného v návodce pro provedení kapilární zkoušky se předá ke kontrole
6) Pod UV světlem se zkontroluje přítomnost indikací
7) Všechny pozorované indikace se zaprotokolují pro další posouzení jejích přípustnosti, či nepřípustnosti (11)

## Měření frekvence

Jedna z NDT je měření rezonančního kmitočtu lopatek. Toto měření se provádí proto, aby lopatka nerezonovala při frekvencích, které jsou blízké pracovním frekvencím (otáčkám) motoru. Každý stupeň TK i VT má výrobcem daný rozsah frekvencí, při kterých lopatka musí kmitat, viz. Tab. č.8. (5)

Stručný postup měření (5):

1) Lopatka se nasadí do pracovního zámku.
2) Zámek s lopatkou se upne do hydraulického zámku na předepsaný hydraulický tlak.
3) Na lopatku se nalije předepsaná kapalina, která se při rezonanci rozčeří.
4) Zapne se vibrátor a dle Tab. 1 se mění frekvence v daném rozmezí.
5) Pokud lopatka rezonuje na frekvenci, která se nachází v předepsaném rozsahu, lopatka vyhovuje. V případě, že nevyhovuje, na základě toho, zda je frekvence rezonance vyšší nebo nižší než předepsaná, se dle manuálu zaleští konkrétní místo na lopatce a měření se opakuje.

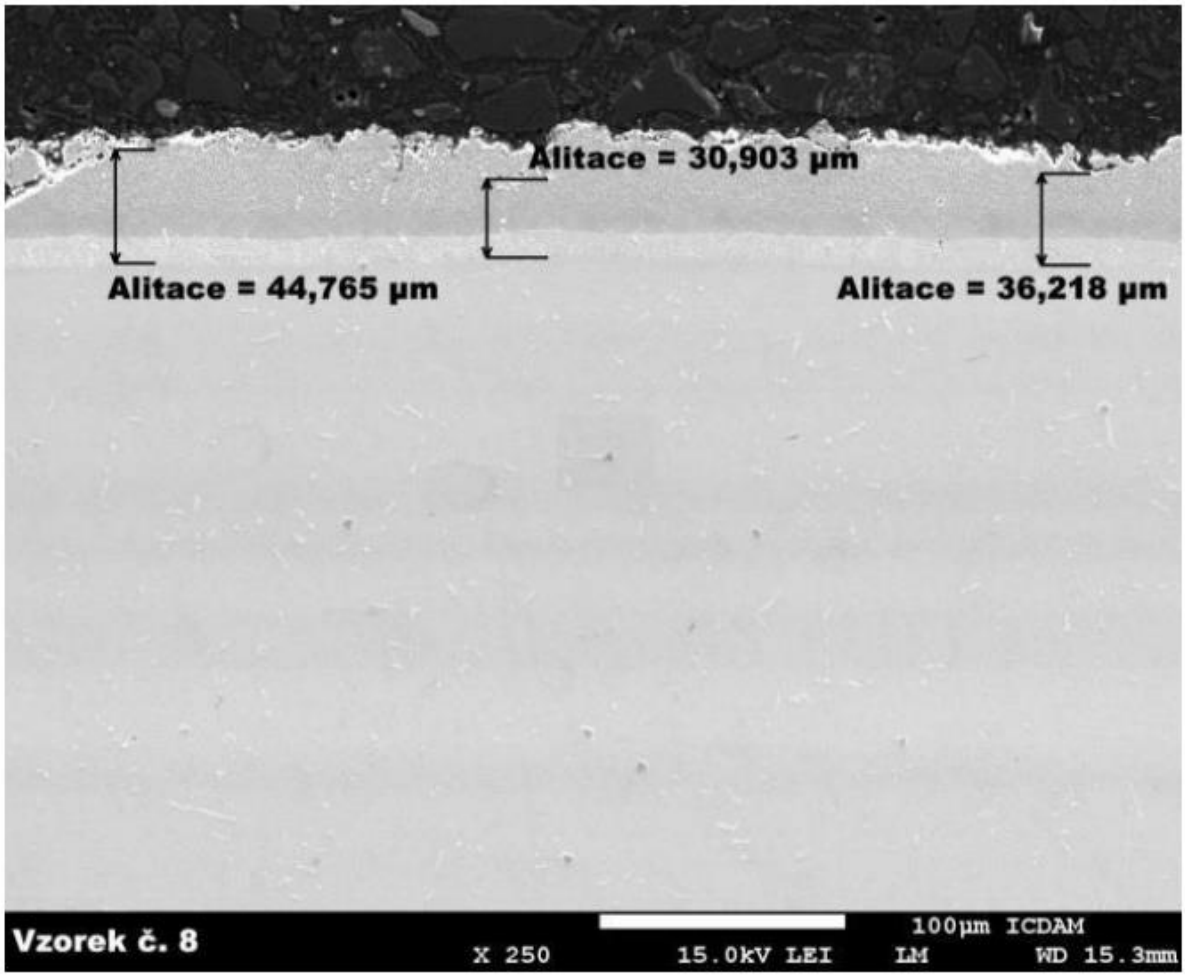
*Tab. 8: Parametry pro měření frekvence rotorových lopatek turbíny (5)*

| | Upínací síla[N] | Rozsah frekvencí [Hz] | Povolený rozkmit [mm] |
|---|---|---|---|
| 1. Stupeň TK | 15 700 ± 1 570 | 1 100 – 1 300 | 0,2 |
| 2. Stupeň TK | 15 700 ± 1 570 | 700 – 830 | 0,4 |
| 1. Stupeň VT | 25 500 ± 2 550 | 400 – 470 | 0,7 |
| 2. Stupeň VT | 25 500 ± 2 550 | 270 – 330 | 1,2 |

## Kontrola alitace

Alitační vrstva je bariérovou ochranou proti vysokoteplotní korozi. Hliníková vrstva je difuzně zažíhávána do povrchu lopatek TK.

Destruktivní kontrola alitace probíhá v LOM PRAHA s. p., vždy na jednom kusu lopatky z obou stupňů turbíny kompresoru. Lopatky jsou rozřezány dle instrukce, následně jsou zalisovány, broušeny a leštěny v metalografické laboratoři. Každý vzorek je naleptán specifickými leptadly pro zvýraznění alitované vrstvy nebo mikrostruktury. Složení leptadel je dáno interním předpisem. Následně probíhá optická kontrola na světelném mikroskopu. Hodnocená alitovaná vrstva musí po demontáži dosahovat tloušťky stanovené certifikačními knihami (viz Obr. 14). Dalším parametrem hodnoceným metalografickou laboratoří je mikrostruktura. Hodnocení mikrostruktury probíhá dle knih oprav a hodnotí se rozpuštění vytvrzující fáze a jiné strukturní vlastnosti. Pokud jsou podmínky splněny, lopatky jsou následně opětovně použity na motoru. Pokud podmínky splněny nejsou, je nutná oprava alitační vrstvy nebo vyřazení celého stupně v případě nesplnění mikrostrukturních vlastností. (7)




*Obr. 14: Měření alitační vrstvy (7)*

### 3.3.2 Způsoby opravy lopatek (dle technologie)

Oprava rotorových lopatek VT se provádí pouze zalešťováním. Oprava rotorových lopatek TK se provádí dvěma způsoby. Prvním způsobem je zalešťování ploch pro dosažení správné drsnosti, vyvážení, případně k zahlazení lunkrů a jiného abrazivního opotřebení. (5)

Druhým a hlavním způsobem opravy lopatek je jejich alitování. Postup alitace je následující (7):

A. Příprava lopatek
   1. Odmaštění
   2. Oplach
   3. Umístění do přípravku
   4. Maskování lopatek (Zamezení proti nástřiku nechtěných ploch)

B. Příprava alitační barvy
   1. Smísení alitačního prášku s pojivem
   2. Odebrání potřebného množství
   3. Nástřik lopatek
C. Příprava pece
   1. Čištění pece
   2. Předehřev pece
D. Teplotní cyklus
   1. Difuzní žíhání
   2. Ochlazování v peci do stanovené teploty
E. Kontrola
   1. Kontrola zápisu teploty
   2. Metalografické hodnocení tloušťky alitace

### 3.3.3 Teplotní pole

Definice teplotního pole:

Teplotní pole je zobrazení rozložení teplot, v tomto případě teplot výstupních plynů ze spalovací komory, v celém průřezu kanálu vzduchoplynového traktu vstupujícího na 1º TK. (5)

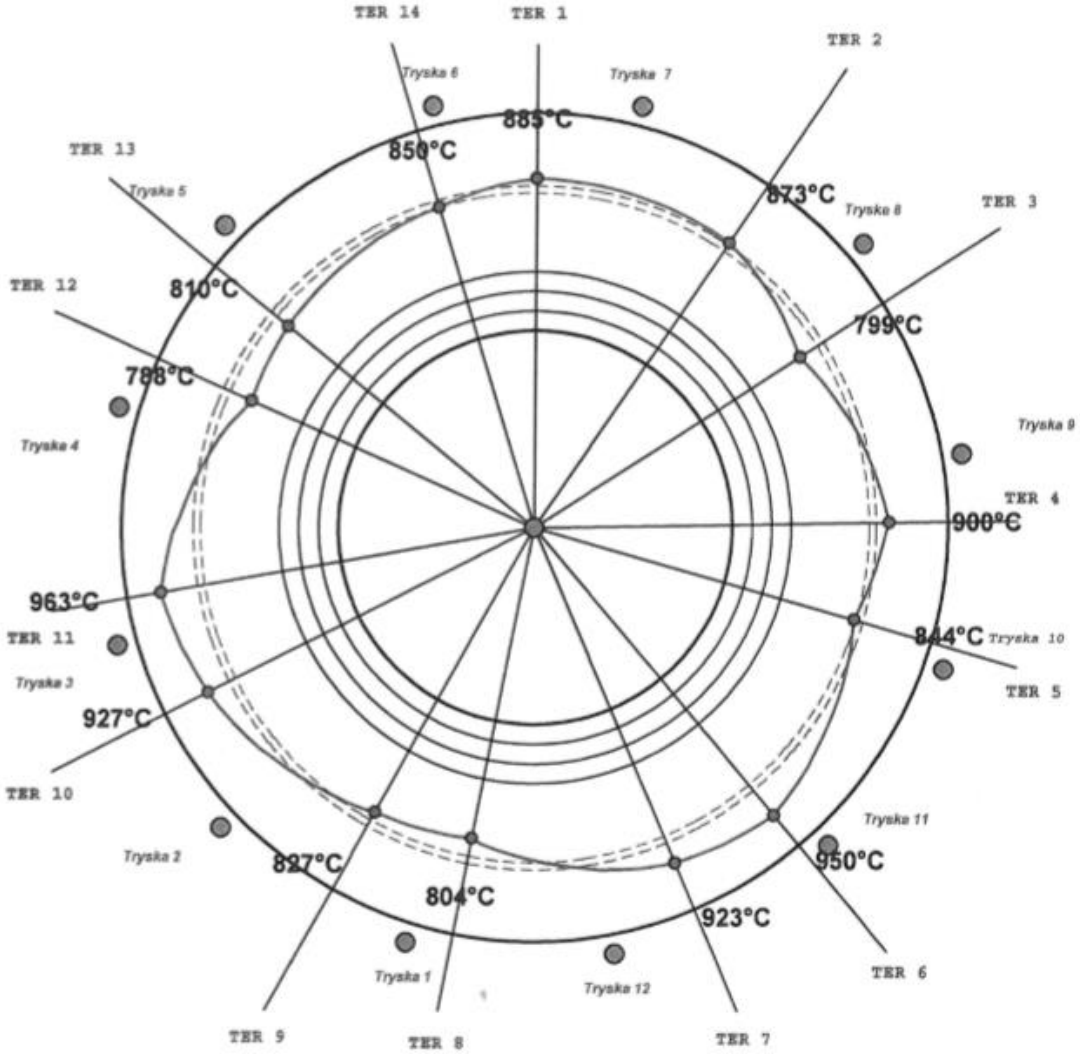
Měření teplotního pole:

Jedná se o měření hodnot teploty jednotlivých termočlánků před turbínou $t_{3C}$ [ºC] na nominálním režimu motoru. Termočlánky jsou propojeny kompenzačním vedením se zobrazovacím přístrojem s možností výstupu jednotlivých hodnot. Naměřené hodnoty $t_{3C}$ dávají obraz o hodnotě teploty výstupních plynů v místech jednotlivých termočlánků, tím i stavu palivového kolektoru s tryskami a také spalovací komory, jejíž stav může teplotní pole také ovlivňovat. (5)

V případě nevyhovujících hodnot teplotního pole před TK je nutné tento problém řešit. Prvním krokem pro dosažení vyhovujících parametrů je kontrola palivového kolektoru. V případě stávajících problémů je nutné se zaměřit na ostatní části ovlivňující teplotu ve spalovací komoře. (5)

Pro ilustraci je na Obr. 15 uveden výstup zkoušky teplotního pole na zkušebně, která se provádí v případě, že teploty výstupních plynů motoru neodpovídají

technickým podmínkám. Na Obr. 15 je vidět rozmístění 14 termočlánků kolem vnějšího prstence spalovací komory a 12 palivových trysek. Termočlánky při průběhu zkoušky snímají teploty. Výsledkem měření je tabulka 14 teplot. Průměrná hodnota spočítaná z těchto teplot nesmí překročit dovolenou maximální teplotu, která se liší u jednotlivých verzí motoru TV3-117. V tomto ilustrativním případě to je teplota 845 ºC, která je znázorněna dvojitě čárkovanou kružnicí. Při nevyhovění teplotního pole lze z grafu určit místo, ve kterém dochází k přehřívání a následně se zaměřit na opravu, nebo kontrolu konkrétní palivové trysky kolektoru. (4)




*Obr. 15:Graf teplotního pole (4)*

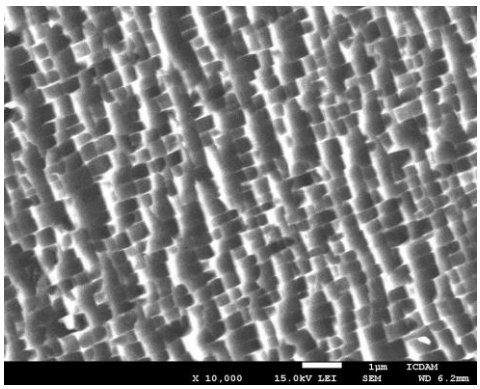
## 3.4 Analýza

Na základě záznamů z firmy LOM PRAHA s. p. z období od 26.6.2017 do 23.6.2018 byla provedena analýza vlivů snižující životnost rotorových lopatek turbíny (viz Příloha 2). Analýza je zaměřená na motory TV3-117, u kterých se prováděla kontrola případně oprava rotorových lopatek TK i VT.

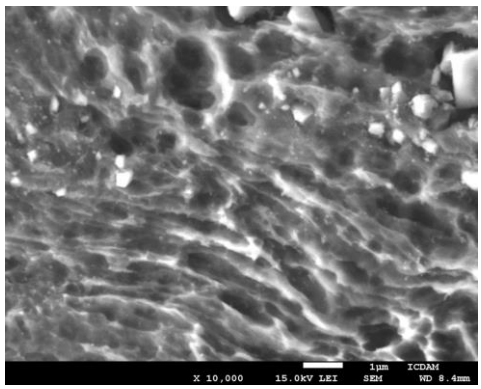
Analýza nemohla být provedena ze starších dat z důvodu změn v postupech údržby, které jsou poměrně nové, a které zpřísňují požadavky na kontrolu rotorových lopatek turbín, zejména pak proměřování tětivy lopatek, hřebínků a další rozměry. Proto v případě provádění analýzy včetně těchto starších dat by mohlo mít irelevantní výsledky, protože lopatky, které by byly vyhovující před touto změnou, by nemusely být vyhovující po změně v postupech údržby lopatek.

Červeně zvýrazněné motory byly provozovány v prašném nebo písčitém prostředí. Z tabulky je zřejmé, že u většiny těchto motorů z geometrického hlediska nevyhovují lopatky 1º i 2º KT, jinými slovy rozměry lopatek nejsou v tolerančním poli, a to přesto, že většina z těchto motorů přišla do opravy dříve, než je stanovený resurs. Lze tedy předpokládat, že důvodem nevyhovění těchto rotorových lopatek je právě prostředí, ve kterém byly motory provozovány.

Modře zvýrazněné pole v tabulce označuje vyřazení celého rotorového stupně z důvodu nevyhovující mikrostruktury na 1º KT, případně nevyhovující tvrdost na 1º VT. Příklad vyhovující a nevyhovující mikrostruktury je uveden na Obr. 16, Obr. 17. Jedná se tedy o lopatky, jejíž životnost byla vyčerpána vlivem vysokých teplot. To může být způsobeno např. nestandardním provozem, kdy motory vrtulníku pracují po delší dobu na nominálním nebo vzletovém režimu.




*Obr. 16: Vyhovující mikrostruktura lopatky*




*Obr. 17: Nevyhovující mikrostruktura lopatky*

Žlutě zvýrazněným polem v tabulce se označuje případ, kdy vlivem překročení maximálních dovolených otáček na VT byl vyřazen celý 1º i 2º rotorových lopatek VT. Jedná se tedy o vliv letecké nekázně nebo nestandardního provozu.

Zeleně zvýrazněné motory byly provozovány ve standardních podmínkách. Z tabulky je patrné, že většina těchto motorů má lopatky KT i VT v pořádku. Jen v jednom případě měl motor vyřazen celý 1º i 2º KT z důvodu opotřebení hřebínků. To je běžné opotřebení lopatek vlivem provozu, které mohlo být předčasně způsobené tím, že při předchozí opravě byly hřebínky blízko minimálnímu rozměru v tolerančním poli. Po montáži lopatek se celý rotor po obvodu přesoustruží, z důvodů zarovnání hřebínků a tím se ještě sníží jejich rozměr.

Světle modře zvýrazněné motory jsou motory, u kterých není známo prostředí, ve kterém byly provozovány. Pravděpodobně se bude jednat o standardní prostředí a vyřazené lopatky těchto motorů budou z důvodu opotřebení vlivem provozu.

Z analýzy je patrné, že rotorové lopatky VT u většiny motorů z Přílohy 2 jsou vyhovující. Oproti lopatkám KT jsou lopatky VT méně namáhány, protože jsou zde nižší teploty, tlaky a rychlosti jak protékajícího média, tak otáček turbíny.

Z přílohy 2 je patrné, že stav alitační vrstvy po demontáži je nevyhovující u všech zkoumaných motorů. Kvalita alitační vrstvy po demontáži motoru je z velké míry u většiny hodnocených lopatek nevyhovující. Příčinou nevyhovujících parametrů jsou vysokoteplotní expozice a prostřední, ve kterém lopatky pracují. Nejedná se však o výjimečný či kritický stav a lopatky se následně znovu renovují alitací pro další provoz.

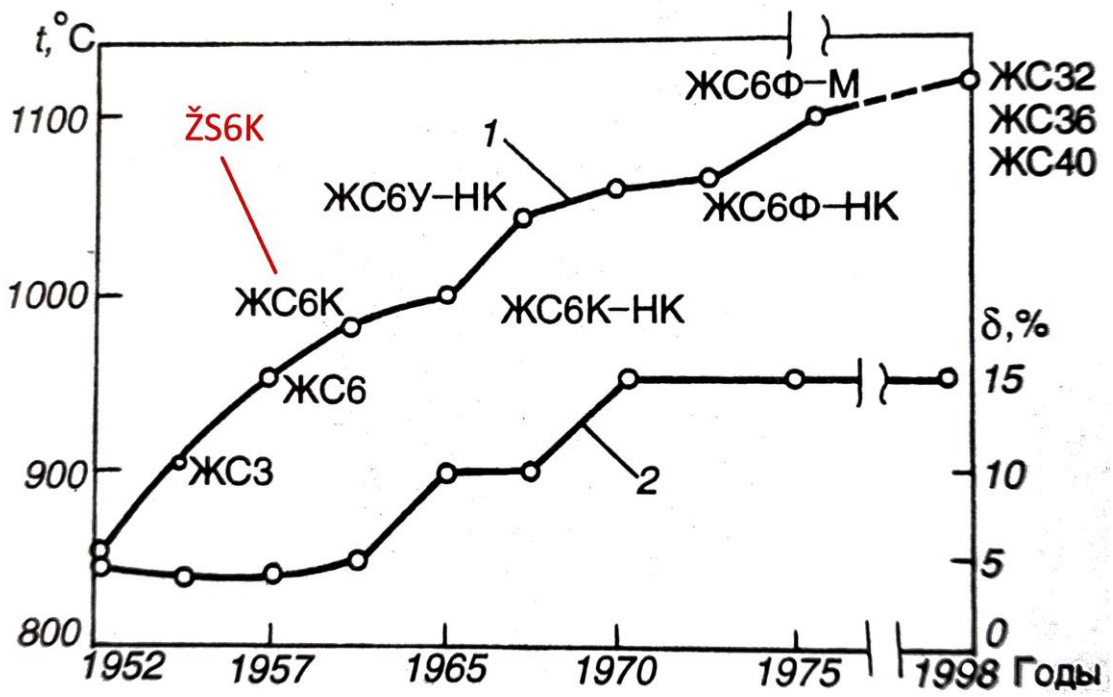
# 4 Doporučení na eliminaci těchto vlivů

V této kapitole jsou uvedeny návrhy pro eliminaci, případně zlepšení životnosti lopatek turbíny z hlediska vývoje, výroby, údržby a provozu Motoru TV3-117.

## 4.1 Vývoj

Vývoj žáruvzdorných a žáropevných materiálů, používaných na plynové turbíny, je dlouhá léta na vrcholu výzkumného žebříčku materiálového inženýrství. Je nedílnou součástí zvyšování životnosti a prodlužování provozní doby těchto turbín. Materiály, které se používají v nejkritičtějších částech turbíny a jsou dlouhodobě vysokoteplotně exponovány, se vyvíjejí téměř exponenciálně. Díky vývoji technologie výroby lze materiály vyrábět z nejrůznějších kombinací legujících prvků (Hf, Yt, Ti, atd. ), čímž se výrazně zlepšují nejen creepové odolnosti, ale i mechanické vlastnosti těchto superslitin.

Z Obr. 18 je patrné, že slitina ŽS6K byla vlastnostmi překonána již v letech 1965 jinými konkurenčními slitinami.




*Obr. 18: Vývoj niklových slitin (8)*

Možností zlepšení odolnosti a zvýšení životnosti turbínových lopatek na motoru TV3-117 z hlediska vývoje je návrh nového (lepšího) materiálu pro tyto lopatky. Tato možnost však vzhledem k omezením příručkami generálních oprav motoru TV3-117 není možná.

## 4.2 Výroba

Pečlivá vstupní kontrola opravárenského závodu

- Kontrola materiálu
- Kontrola opotřebení
- Kontrola geometrie

Výroba turbínových lopatek není prováděna v LOM PRAHA s.p., a proto lze její kvalitu ovlivnit jen velmi málo, a to kontrolou dodaných kusů nových lopatek. U výrobce těchto lopatek je velmi důležitá technologická kázeň, čímž je myšleno dodržování pracovních teplot, čistoty, přesnosti a kontroly, během výroby a následného tepelného zpracování.

## 4.3 Údržba

Při údržbě turbíny existují možnosti, jak prodloužit životnost lopatek, a to úpravou technologie jejich opravy. První možností by byla oprava alitované vrstvy až dvakrát za sebou, která je umožněna příručkou GO motoru TV3-117. Po zjištění překročené hodnoty alitace či nevyhovující kvality by mohly být lopatky otryskány a následně znovu naalitovány. Při zjištění velké drsnosti alitované vrstvy je možnost lopatky vibračně omílat. Druhou možností by bylo zkvalitnění technologického procesu opravy alitace, a to např. nahrazením klasické pece za pec vakuovou s retortou a umístěním až několika termočlánků do komory na přípravek s lopatkami. Tím by se dosáhlo získání přesnějších dat o procesu difuzního žíhání a dalo se zamezit nekvalitnímu naalitování lopatek. Posledním aspektem by bylo snížení možnosti vnesení chyby lidského faktoru. Tím je myšleno nahrazení nanášení alitace ručně za automatické.

## 4.4 Provoz

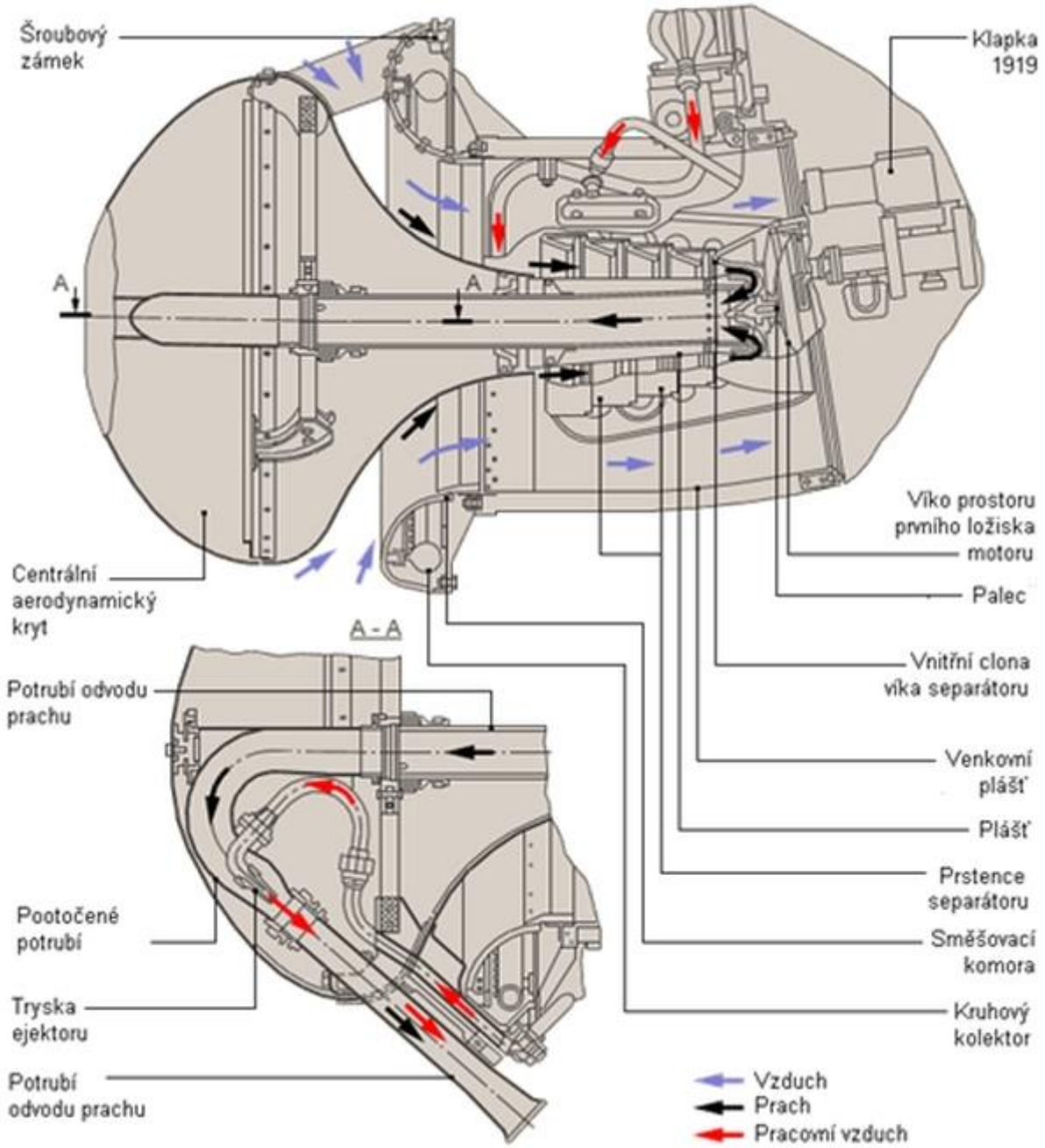
Z provedené analýzy na vybraných motorech vyplývá, že velký podíl na životnost lopatek turbíny z hlediska provozu má prostředí, ve kterém jsou motory provozovány.

Zejména pak provoz v prašných a písčitých oblastech. Motory v těchto prostředí bývají vybaveny na vstupním zařízením PZU, které je na Obr. 19.

## Protiprachové zařízení (PZU)

PZU zajišťuje čistění vzduchu od prachu a dalších nečistot vstupujícího do motoru v době pojíždění, přistávání, vzletu nebo visení nad prašnými plochami. Stupeň čištění PZU je 70-75 %. Výkon, který odebere zařízením PZU, je přibližně 100 koní, spotřeba paliva se zvyšuje o 1 %. (1; 12)

Princip funkce PZU je takový, že proud vzduchu s prachem obtéká centrální aerodynamický kryt a vstupuje do PZU. Vlivem odstředivé síly, těžší částečky (prach, písek atd.) proudí po obvodu centrálního aerodynamického krytu a dostávají se do separátoru. V potrubí odvodu prachu je skrze trysku ejektoru protlačován pracovní vzduch odebíraný od 12. stupně kompresoru, který urychluje proudění, čímž vzniká podtlak. Tímto podtlakem je nasáván prach ze separátoru, který je propojen s odváděcím potrubím a vytlačuje prach a část vzduchu ven ze vstupního ústrojí (viz Obr. 19). Zbytek vzduchu, který byl tímto zbaven velké části prachu, proudí dále do motoru. PZU se uvádí do činnosti otevřením klapky 1919 (viz Obr. 19), čímž se dostane stlačený vzduch z kompresoru k ejektoru. (1; 12)

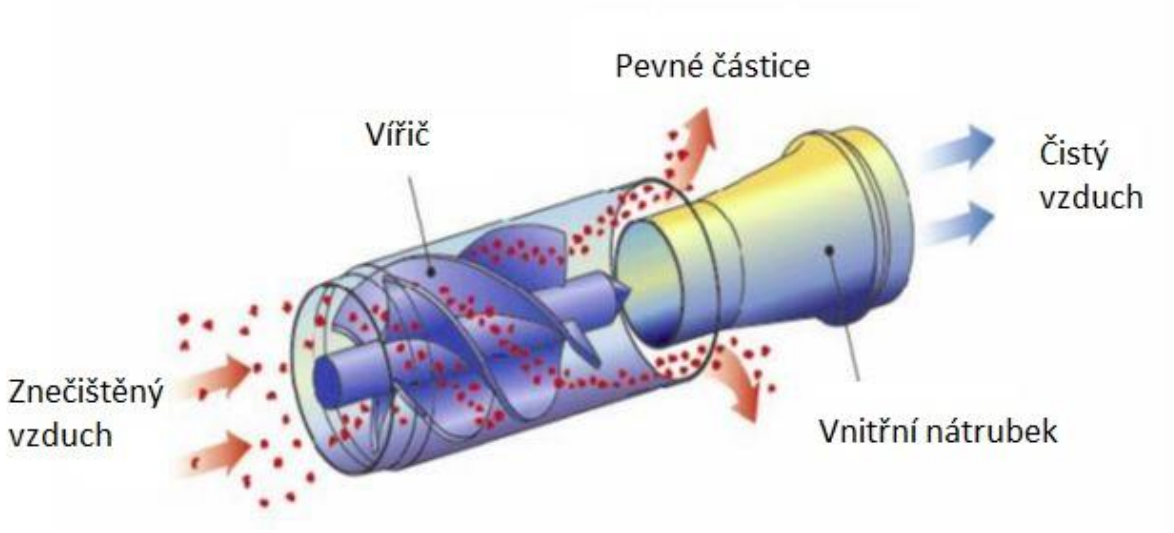



*Obr. 19: Protiprachové zařízení PZU [1]*

Stupeň čištění neboli účinnost PZU je 70-75 % (1). Z analýzy vlivů je patrné, že i přes používání PZU jsou lopatky rotoru turbíny nadměrně opotřebovávány abrazí. Doporučuji proto v oblastech s extrémním výskytem písku a prachu používat místo PZU odlučovač prachu Centrisep.

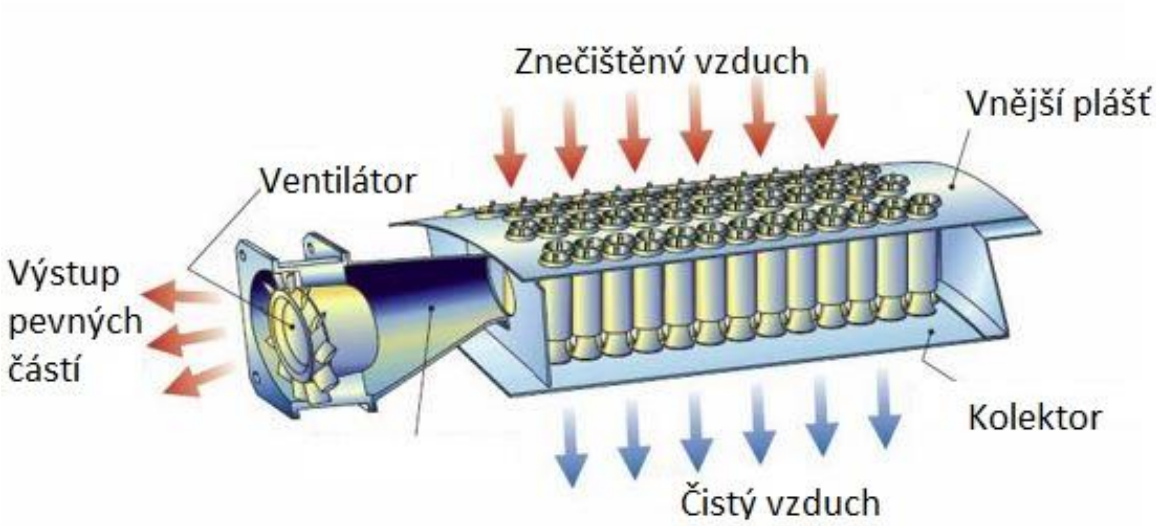
## Odlučovač prachu Centrisep

Při práci motoru proudí znečistěný vzduch přes vstupy do vírových trubek, ve kterých se mění směr proudu vzduchu z přímého na spirálový viz Obr. 20. (12)



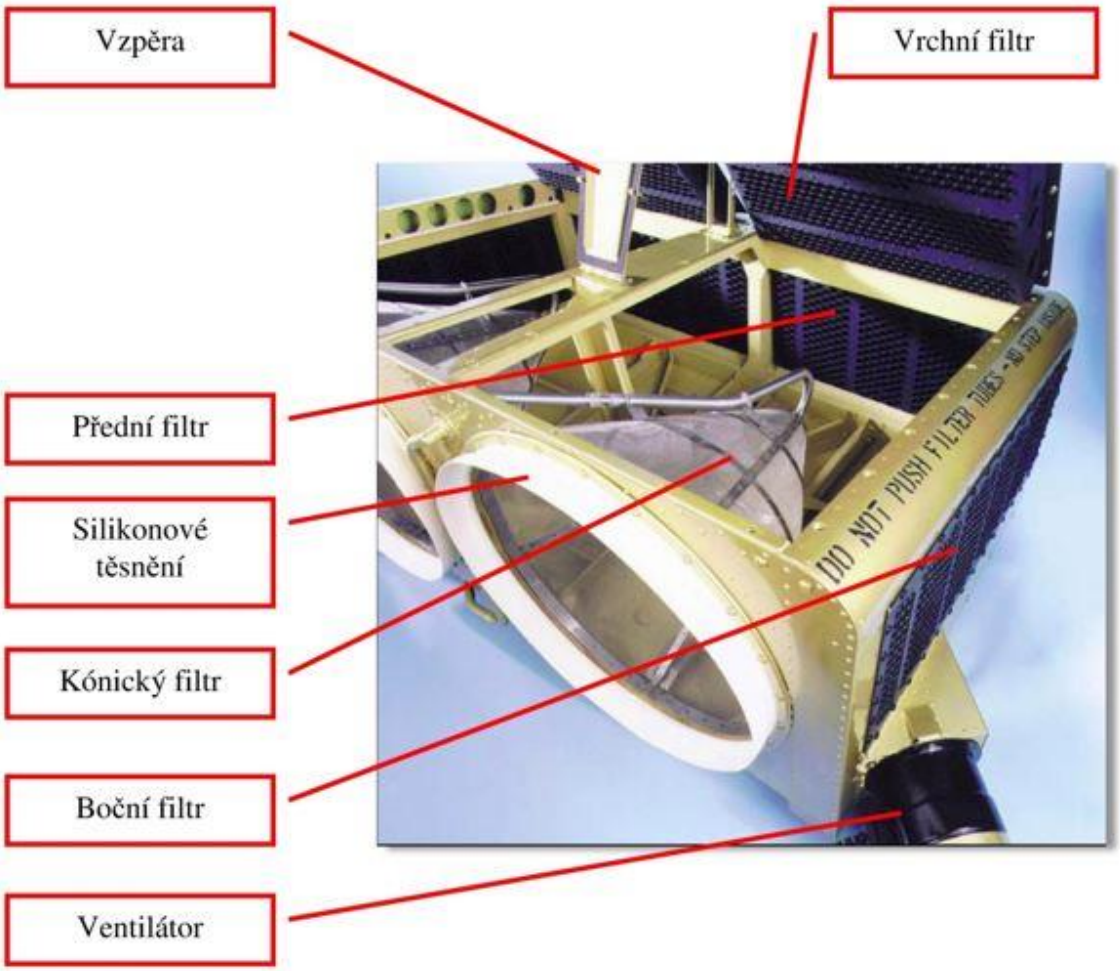

*Obr. 20: Vírová trubice Cetrisepu (12)*

Na prachové částice působí odstředivé síly, jejichž důsledkem je, že prachové částice se pohybují nejdříve ke krajům trubek vírových trubic a poté vlétají kruhovou štěrbinou mezi tělem trubky vířiče a difuzorem (vnitřním nátrubkem) do odsávacího kanálu a dále do kolektoru. Z něj jsou pak odsávány ventilátorem a přes nátrubek jsou vypouštěny mimo vrtulník do atmosféry (viz Obr. 21). Složením několika sběrných panelů s vírovými trubicemi je tvořen vrchní, boční a přední filtr, které jsou vidět na Obr. 22. Vrchní filtr je tvořen 952 vírovými trubicemi, boční 436 a čelní 351 vírovými trubicemi. (12)




*Obr. 21: Sběrný panel s vírovými trubicemi (12)*

Vyčištěný vzduch postupuje přes kuželová síta Obr. 22 na vstupy motorů TV3-117. (12)




*Obr. 22: Kuželová síta Centrisepu (12)*

Účinnost Centrisepu je přes 90 % a odebírá 3 % výkonu (přibližně 60 koní). Má tedy vyšší účinnost a nižší odběr výkonu (12). Proto by mohl být výhodnější variantou odlučovače prachu než PZU.

Provozování Centrisepu je doporučeno v suchých a teplých klimatických podmínkách. V prostředí mrznoucích vodních srážek a ze zasněžených ploch je provoz zakázán. (12)

Nevýhodou Centrisepu je jeho větší rozměr oproti PZU. Např. při montáži Centrisepu na vrtulníky řady Mi-8 je znemožněn přístup k motorům stropním průlezem pilotní kabiny (nouzový východ), proto se při údržbě používá skládací žebřík. (12)

Protože je Centricep finančně nákladnější než PZU, závisí tedy na požadavku zákazníků, kteří většinou preferují levnější variantu, tedy PZU.

# Závěr

Cílem práce bylo zanalyzování jednotlivých faktorů ovlivňujících životnost lopatek a doporučení na eliminaci negativně působících vlivů. Pro splnění těchto cílů byla vytvořena analýza. Na základě této analýzy byly zjištěny vlivy negativně působící v oblasti vývoje, výroby, údržby a provozu turbínových lopatek. Díky zjištěným parametrům byly stanoveny vhodnější postupy, které byly aplikovány nebo jsou v procesu schvalování v LOM PRAHA s.p.

Z vývojového hlediska bylo doporučeno nahrazení materiálu ŽS6K za novější a pro tuto aplikaci lepší slitiny Ni. Vzhledem k omezení příručkami pro generální opravy motorů TV3-117 toto nahrazení není v LOM PRAHA s.p. možné. Tento návrh by tedy musel být předložen výrobci a následně schválen.

Výroba turbínových lopatek není prováděna v LOM PRAHA s. p. a její kvalitu nelze ovlivnit. Z tohoto důvodu bylo doporučeno zpřísnit vstupní kontrolu lopatek při přejímání od dodavatele a eliminovat tak možnost vstupu vadných lopatek na turbínu.

Z hlediska údržby by bylo výhodné prodloužit životnost lopatek jejich opakovanou alitací, která doposud nebyla prováděna, přestože příručka pro generální opravy motorů TV3-117 toto umožňuje. Pokud obnovená alitace nevyhovuje kontrolním podmínkám, byla stanovena dvě doporučení pro obnovu a prodloužení životnosti lopatek:

1. Omíláním ve vibračních bubnech
2. Otryskáním a případně následným opakováním alitačního procesu

V prvním případě se jedná o omílání lopatek ve vibračních bubnech. Toto doporučení lze použít v případech, kdy je obnovená alitace lehce nadlimitní a je potřeba odstranit jen několik mikronů vrstvy. Druhé doporučení se vztahuje na lopatky, u kterých byly vyhodnoceny větší nedostatky, jako je např. extrémně nadlimitní vrstva, podlimitní vrstva, nenaalitované části lopatky atd. Po aplikaci těchto doporučení v LOM PRAHA s. p. vzrostl počet vyhovujících lopatek a bylo dosaženo snížení nevyhovujících kusů.

Dalším návrhem pro zkvalitnění a prodloužení životnosti z hlediska údržby turbínových lopatek je zkvalitnění samotného procesu alitování. Jedná se o vytvoření

ochranné bariérové vrstvy, vytvořené nanesením alitační barvy s následným difuzním žíháním. Tento proces je velmi náročný na čistotu, a tak by bylo vhodné, aby byl prováděn ve vakuové peci se samostatnou retortou. Dále jsou zde neopomenutelnými a velmi důležitými parametry teploty žíhání, které jsou stanoveny a musí být dodržovány. Je zde však nutná kontrola, a to minimálně čtyřmi termočlánky-dvěma termočlánky ve vakuové komoře a dvěma v samotné retortě co nejblíže samotným lopatkám. Toto doporučení je finančně velmi náročné, a proto je prozatím pouze v jednání.

Z analýzy vlivů na životnost rotorových lopatek turbíny motoru TV3-117 bylo zjištěno, že nejvýznamnějším provozním faktorem ovlivňující životnost lopatek je prašné nebo písčité prostředí. Na všech motorech provozovaných v prašném prostředí, které byly uvedeny v analýze, bylo použito PZU (protiprachové zařízení). Toto zařízení má účinnost přibližně 70-75 %. Zbylých 25-30 % prachu proudí skrze vzduchoplynový trakt motoru a dochází k abrazi nejen kompresorových, ale také turbínových lopatek. Mimo to může docházet k zanesení chladících cest turbíny, a to pak vede k přehřívání a rychlejší degradaci lopatek vlivem vysokých teplot. Již navrženou vhodnější možností odlučovače prachu je tzv. Centrisep, který má účinnost přes 90 %.

# Seznam použité literatury


(1) Motory TV3-117. *221. TIGER SQUADRON* [online]. b.r. Dostupné také z: https://221sqn.cz/motory-tv3-117/

(2) [online]. b.r. Dostupné také z: http://www.esacademic.com/pictures/eswiki/84/Turboshaft_operation-es.svg

(3) KOCÁB, J a J ADAMEC. *Letadlové motory*. 2008. Praha: CORONA, b.r. ISBN 978-80-86116-54-9.

(4) LOM Praha. Konstrukce TV3-117, KOLEKTIV *SPOLEČNOSTI LOM Praha.: Interní dokument pro údržbu TV3-117*. Praha, b.r.

(5) Příručka pro generální opravy motoru *TV3-117. Vydáno hlavním konstruktérem Д.Ю.КОЗЛОВ, АО* ОДК-КЛИМОВ,. 1998.

(6) RŮŽIČKA, Milan. Pevnost a *životnost letadel. Praha: České vysoké učení technické, 2000*. ISBN 80-01-02254-4.

(7) ROHLOVÁ, Marie. Optimalizace procesu *alitování turbínových lopatek. Praha, 2017. Diplomová práce.* České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Elena Čižmárová, PhD.

(8) ELISEEV, I͡U., N.*V ABRIMOV a V.V. KRYMOV. Khimiko-termicheskai͡a* obrabotka i zashchitnye pokrytii͡a v aviadvigatelestroenii. Moskva: Vysshai͡a shkola, 1999. ISBN 5-06-003649-9.

(9) ŽUJA, Jaroslav. Technologie vytavitelného *modelu v současnosti. Brno, 2013. Bakalářské práce.* Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

(10) PTÁČEK, Luděk. Nauka o *materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. *ISBN* 80-720-4283-1.

(11) ČSN ISO 3452-1. ČESKÁ TECHNICKÁ *NORMA: Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část* 1: Obecné zásady. 1. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

(12) FURDA, Miroslav. Vrtulník Mi-171Š, *motor TV3-117VM, motor SAFIR 5 K/G MI. Vyškov*: Velitelství výcviku-Vojenská akademie Vyškov, 2018.

# Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma motoru TV3-117 [2] ..... 8

Obr. 2: Schéma a popis hlavních částí motoru TV3-117 [1] ..... 9

Obr. 3: Vstupní ústrojí motoru TV3-117 ..... 11

Obr. 4: Stator kompresoru [4] ..... 12

Obr. 5: Rotor kompresoru [4] ..... 14

Obr. 6 Prstencová spalovací komora motoru TV3-117 [4] ..... 16

Obr. 7: Demontovaná turbína kompresoru s drážkovaným hřídelem ..... 17

Obr. 8: Schéma chlazení turbíny kompresoru [4] ..... 20

Obr. 9: Volná turbína [4] ..... 21

Obr. 10: Schéma chlazení volné turbíny [4] ..... 23

Obr. 11: Wöhlerova křivka; upraveno pro vlastní potřeby dle [6] ..... 27

Obr. 12: Graf pracovních režimů motoru TV3-117 ($n_{TK}$ [%]-Otáčky turbíny kompresoru, $t_H$ [ºC]-teplota na vstupu do motoru) [1] ..... 34

Obr. 13: Princip kapilární defektoskopie [10] ..... 38

Obr. 14: Měření alitační vrstvy [7] ..... 41

Obr. 15:Graf teplotního pole [4].....43

Obr. 16: Vyhovující mikrostruktura lopatky .....45

Obr. 17: Nevyhovující mikrostruktura lopatky.....45

Obr. 18: Vývoj niklových slitin [8] .....46

Obr. 19: Protiprachové zařízení PZU [1] .....49

Obr. 20: Vírová trubice Cetrisepu [12].....50

Obr. 21: Sběrný panel s vírovými trubicemi [12] .....51

Obr. 22: Kuželová síta Centrisepu [12] .....51

# Seznam tabulek

Tab. 1: Počet lopatek statoru jednotlivých stupňů [4] ..... 13

Tab. 2: Počet lopatek rotoru jednotlivých stupňů [4] ..... 14

Tab. 3 Počet lopatek rotoru a statoru turbíny kompresoru ..... 18

Tab. 4: Počet lopatek rotoru a statoru volné turbíny ..... 22

Tab. 5: Chemické složení materiálu lopatek kompresorové turbíny (ŽS6K) [8]. 31

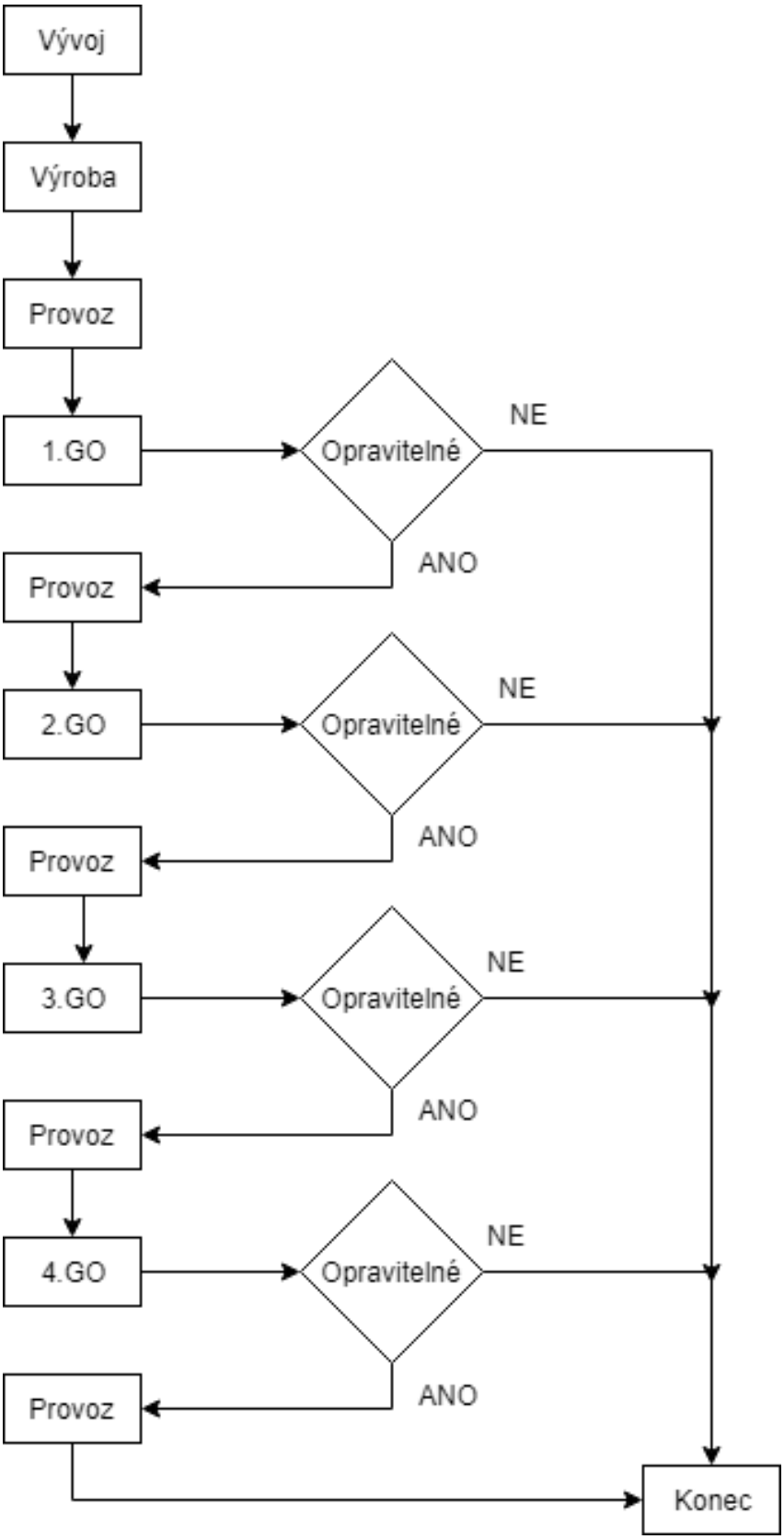
Tab. 6: Chemické složení materiálu volné turbíny (CHN77TJUR) [8] ..... 31

Tab. 7: Základní provozní omezení motoru TV3-117 [4] ..... 36

Tab. 8: Parametry pro měření frekvence rotorových lopatek turbíny [5] ..... 40

# Seznam příloh

Příloha č. 1: Vývojový diagram životního cyklu -1-

Příloha č. 2: Analýza vlivů na životnost rotorových lopatek turbíny -2-

## PŘÍLOHA Č. 1: Vývojový diagram životního cyklu