

UNIVERZITA PARDUBICE

DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

TUAN HIEP DO

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Boroskopie leteckých proudových motorů
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tuan Hiep Do**
Osobní číslo: **D22154**
Studijní program: **B0716P040001 Technika, technologie a řízení letecké dopravy**
Téma práce: **Boroskopie leteckých proudových motorů**
Zadávací katedra: **Katedra letecké dopravy**

Zásady pro vypracování

Bakalářská práce se bude zabývat diagnostikou a údržbou leteckých proudových motorů pomocí boroskopie. Práce bude obsahovat:

- Teoretické základy boroskopie
- Technický postup
- Praktická aplikace
- Shrnutí přínosů a omezení boroskopie

Rozsah pracovní zprávy: **35-45**
Rozsah grafických prací: **3-5**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

dle pokynů vedoucího práce

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jozef Čerňan, Ph.D.**
Katedra letecké dopravy

Datum zadání bakalářské práce: **24. února 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **12. května 2025**

L.S.

doc. Ing. Ladislav Řoutil, Ph.D.
děkan

Ing. Michaela Ledvinová, Ph.D.
pověřená vedením katedry

V Pardubicích dne 25. února 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem Boroskopie leteckých proudových motorů jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

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

V Pardubicích dne 12.05.2025

Tuan Hiep Do v. r.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval své rodině a kamarádům, kteří mě podporují v mém studiu. Rovněž vedoucímu své bakalářské práce panu docentu Čerňanovi a celému týmu techniků údržby firmy UG Jet, kteří mi umožnili nahlédnout do reálného provozu údržby letadel.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zaměřuje na použití boroskopie při údržbě leteckých proudových motorů. Popisuje principy nedestruktivního zkoušení, přičemž se soustředí na vizuální metody, a hlavně na boroskopickou inspekci, která umožňuje detekci vnitřních vad motorů bez nutnosti pracné demontáže. Práce rovněž rozebírá různé typy boroskopů, technické postupy inspekce a specifika provádění těchto kontrol v leteckém údržbovém průmyslu. Cílem je ukázat, jak boroskopie přispívá k prevenci motorových poruch, zajištění bezpečnosti letového provozu a prodloužení životnosti motorů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Letectví, boroskopie, bezpečnost, nedestruktivní zkoušení, proudové motory, údržba

TITLE

Boroscopy of Aircraft Jet Engines

ANNOTATION

This bachelor's thesis focuses on the use of borescopy in the maintenance of aircraft jet engines. It describes the principles of nondestructive testing, with an emphasis on visual methods, particularly borescope inspection, which allows the detection of internal engine defects without the need for time-consuming disassembly. The thesis also discusses different types of borescopes, inspection procedures, and the specifics of conducting these inspections in the aviation maintenance industry. The aim is to demonstrate how borescopy contributes to preventing engine failures, ensuring flight safety, and extending engine lifespan.

KEYWORDS

Aviation, safety, borescopy, nondestructive testing, jet engines, maintenance

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	10
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	12
ÚVOD.....	14
1 TEORETICKÉ ZÁKLADY	15
1.1 Nedestruktivní zkoušení (NDT).....	15
1.1.1 Klasifikace metod a technik NDT	15
1.2 VIZUÁLNÍ METODA (VT)	17
1.2.1 Světlo	17
1.2.2 Přímá a nepřímá vizuální kontrola.....	22
1.2.3 Provedení vizuální kontroly.....	22
1.2.4 Hodnocení vad	27
1.3 BOROSKOPIE	27
1.3.2 Druhy průmyslových boroskopů	28
1.3.3 Boroskopie a letecké proudové motory	31
2 TECHNICKÝ POSTUP	35
2.1 Motor PW306C.....	35
2.3 Průmyslový endoskop IPLEX NX.....	37
2.3.1 Základní jednotka	37
2.3.2 Vybavení.....	38
2.3.3 Měřicí funkce.....	39
2.4 Inspekce	41
2.4.1 Vstupní usměrňovací lopatky primárního proudu	41
2.4.2 Výstupní usměrňovací lopatky sekundárního proudu	41
2.4.3 Proměnné vstupní usměrňovací lopatky (VIGV)	42
2.4.4 Lopatky prvního stupně HP kompresoru	43
2.4.5 Lopatky druhého a třetího stupně HP kompresoru	44
2.4.6 Lopatky čtvrtého stupně HP kompresoru	44
2.4.7 Kryt oběžného kola radiálního kompresoru (Impeller shroud)	46
2.4.8 Palivové trysky	46
2.4.9 Vložka spalovací komory	47
2.4.10 Statorová část prvního stupně HP turbíny	50

2.4.11 Stínící prstenec (shroud segment) rotorové části prvního stupně HP turbíny	54
2.4.12 Lopatky rotoru prvního stupně HPT	56
2.4.13 Lopatky rotoru druhého stupně HPT	61
2.4.14 Stínící prstenec (shroud segment) rotorové části druhého stupně HP turbíny	63
2.4.15 Statorová část druhého stupně HPT	64
2.4.16 Statorové lopatky LP turbíny	65
2.4.17 Rotorové lopatky LP turbíny	66
3 Praktická aplikace	68
4 Shrnutí přínosů a omezení boroskopie	73
4.1 Přínosy	73
4.2 Omezení	73
Závěr	75
SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	76
SEZNAM PŘÍLOH	77

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 Spektrum elektromagnetického záření	18
Obrázek 2 Odraz světla	21
Obrázek 3 Lom světla	21
Obrázek 4 Úplný odraz	22
Obrázek 5 Směr pohledu a zorné pole pozorovací hlavice	28
Obrázek 6 Pevný boroskop	29
Obrázek 7 Přístupové body	36
Obrázek 8 Seznam, označení a specifikace distálních konců pro sondu s průměrem 4 mm. ...	38
Obrázek 9 Dlouhé tuhé rukávy různého průměru	39
Obrázek 10 Tuhé rukávy pro jednodušší uchopení	39
Obrázek 11 Znázornění měření vzdálenosti	39
Obrázek 12 Znázornění měření bodu k přímce	40
Obrázek 13 Znázornění měření hloubky	40
Obrázek 14 Znázornění měření přímek a plochy	40
Obrázek 15 Vstupní usměrňovací lopatka	41
Obrázek 16 Výstupní usměrňovací lopatka	41
Obrázek 17 Proměnná vstupní usměrňovací lopatka (VIGV)	42
Obrázek 18 VIGV a lopatka prvního stupně HPT	42
Obrázek 19 Lopatka prvního stupně HP kompresoru	43
Obrázek 20 Odfukový otvor P2.5	45
Obrázek 21 Lopatka čtvrtého stupně HP kompresoru	45
Obrázek 22 odfukové ventily kompresoru	46
Obrázek 23 Zapalovací svíčky	47
Obrázek 24 Vložka spalovací komory	50
Obrázek 25 Příklad nálezů na satorové části prvního stupně HPT (část a)	51
Obrázek 26 Příklad nálezů na satorové části prvního stupně HPT (část b)	52
Obrázek 27 Příklad nálezů na satorové části prvního stupně HPT (část c)	52
Obrázek 28 Příklad nálezů na satorové části prvního stupně HPT (část d)	53
Obrázek 29 Příklad nálezů na satorové části prvního stupně HPT (část e)	54
Obrázek 30 Příklad přijatelných nálezů na shroud segmentu rotorové části	55
Obrázek 31 Příklad nepřijatelných nálezů na shroud segmentu rotorové části	56
Obrázek 32 čelní kryt, těsnění tvaru L a rotor turbíny HP	56
Obrázek 33 Přijatelné umístění těsnění tvaru L	57
Obrázek 34 Nepřijatelné (posunuté) umístění těsnění tvaru L	57
Obrázek 35 Příklad nálezů na lopatkách prvního stupně HPT	60
Obrázek 36 Zaslépací zátka boroskopického otvoru	61
Obrázek 37 Možné nálezy na lopatkách rotoru druhého stupně HPT	62
Obrázek 38 Možné nálezy na shroud segmentu rotorové části druhého stupně HPT	63
Obrázek 39 Možné nálezy na satorové části druhého stupně HPT	65
Obrázek 40 Oblasti nálezů na satorové části LPT	66
Obrázek 41 Oblasti nálezů na rotorových lopatkách LPT	67
Obrázek 42 Palivové trysky	68
Obrázek 43 Přejít z spalovací komory a statorem prvního stupně HPT	68
Obrázek 44 Otevřená prasklina na satoru HPT	69

Obrázek 45 Lopatky prvního stupně HPT	69
Obrázek 46 Špičky lopatek druhého stupně HPT	70
Obrázek 47 Lopatky druhého stupně HPT	70
Obrázek 48 ITT sonda	71
Obrázek 49 Lopatky LPT	71
Tabulka 1 Kategorie metod nedestruktivního zkoušení	16
Tabulka 2 Seznam přístupových bodů a příslušných oblastí inspekce.....	37

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

AGB – Accessory gearbox (převodovka příslušenství)

AMM – Aircraft Maintenance Manual (manuál údržby letadla)

CCD – Charge coupled device

DOF – depth of field (hloubka ostrosti)

DOV – direction of view (směr pohledu)

EASA – European Union Aviation Safety Agency (Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví)

EEC – Electronic engine control (elektronická řídicí jednotka)

FAA – Federal Aviation Administration (Federální letecký úřad)

FH – Flight hour (letová hodina)

FOD – Foreign object damage (vniknutí cizího předmětu)

FOV – field of view (zorné pole)

HP – High pressure (vysokotlaké)

HPT – High pressure turbine (vysokotlaká turbína)

ITT- Interstage turbine temperature

LCD – Dispej z tekutých krystalů (liquid crystal display)

LE – leading edge (náběžná hrana)

LP – Low pressure (nízkotlaké)

LPT – Low pressure turbine (nízkotlaká turbína)

MM – Maintenance manual (údržbový manuál)

MPD – Maintenance planning document (plán údržby letadla)

NDT – nondestructive testing (nedestruktivní zkoušení)

TE – trailing edge (odtoková hrana)

VIGV – Variable inlet guide vanes (proměnné vstupní usměřovací lopatky)

VT – visual testing (vizuální metoda)

ÚVOD

V oblasti letectví je údržba motorů klíčovým prvkem pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti letového provozu. Jednou z metod preventivní údržby je kontrola boroskopem. Díky své schopnosti vizuálně kontrolovat vnitřní části motoru bez nutnosti pracné demontáže je boroskopie nezbytným nástrojem při údržbě leteckých motorů. Podle statistik je až 90 % neplánovaných výměn motoru odhaleno právě boroskopií^{1 s. 1}. Kromě plánovaného monitorování mechanického stavu motoru je boroskopie důležitou metodou pro diagnostiku problémů, jako je nevyžádoucí fluktuace výkonu motoru, vibrace či jiné nežádoucí stavy motoru. Tato technologie hraje zásadní roli v preventivní údržbě, protože její správné využití umožňuje odhalit drobné defekty a anomálie v raných fázích, čímž přispívá k minimalizaci rizik selhání motoru, tím ke snížení rizika nehod a k prodloužení životnosti motoru. Ke zmíněným defektům a anomáliím patří praskliny, deformace, trhliny, škrábance, koroze či jiné defekty, které mohou negativně ovlivnit výkon motoru a celkovou bezpečnost provozu letadla.

Samotný proces boroskopické inspekce zahrnuje použití speciálních optických přístrojů umožňujících vizuální kontrolu i v obtížně přístupných oblastech motoru. Inspekce se provádí podle přesně definovaných postupů a regulací, které stanovují letecké regulační orgány, jako jsou EASA a FAA. Tyto standardy zajišťují konzistenci a vysokou kvalitu prováděných inspekcí. Úspěšné provedení boroskopické kontroly závisí nejen na kvalitě používané technologie, ale také na odborných znalostech a zkušenostech personálu. Je tedy nezbytné, aby byl personál, odpovědný za tyto inspekce, pravidelně školen a certifikován v souladu s platnými normami a předpisy.

Cílem této práce je přiblížit čtenářům význam boroskopie s využitím v kontextu údržby leteckých proudových motorů. Práce se zaměří na boroskopii jako takovou, přístrojové vybavení a postup vizuálních inspekcí.

1 TEORETICKÉ ZÁKLADY

1.1 Nedestruktivní zkoušení (NDT)

Nedestruktivní zkoušení představuje vědní obor zabývající se hodnocením kvality a použitelnosti materiálů a konstrukcí bez jejich poškození. Tato disciplína zahrnuje širokou škálu technologií určených k monitorování procesů, detekci vad, jako jsou trhliny, vnitřní nespojivosti či jiné materiálové vady. Nedestruktivní zkoušení je aplikováno jak ve fázi vývoje a výzkumu materiálů, tak i při testování hotových výrobků v provozních podmínkách. Jedním z hlavních přínosů, jak bylo řečeno výše, nedestruktivního zkoušení je jeho schopnost analyzovat materiály a konstrukce bez narušení jejich provozuschopnosti. Tento přístup umožňuje odhalování skrytých vlastností a nesrovnalostí, které by mohly ovlivnit funkčnost a bezpečnost výrobků. Díky tomu je nedestruktivní zkoušení nepostradatelným nástrojem nejen v oblasti kvality výroby, ale také při diagnostice a údržbě technických systémů^{2 s. 2}.

1.1.1 Klasifikace metod a technik NDT

Nedestruktivní zkoušení je definováno klasifikací různých metod. V praxi se nedestruktivní zkoušení uplatňuje v mnoha průmyslových odvětvích, včetně letectví, energetiky, stavebnictví a automobilového průmyslu. Správná volba a kombinace těchto metod umožňuje efektivní kontrolu jak během výroby, tak i v průběhu provozu jednotlivých komponentů a celých systémů.

Nedestruktivní zkoušení lze rozdělit do několika metodických kategorií na základě klasifikace vypracované odbornou komisí Comimitee on Nondestructive Evaluation stanovenou Národním poradním orgánem pro materiály (NMAB – The National Materials Advisory Board). Tento americký výbor definoval systém, který zahrnuje šest základních metod využívaných v praxi³
s.10

KATEGORIE	OBJEKT ZJIŠTĚNÍ
Mechanické a optické	Barva, trhliny, rozměry, tloušťka filmu, kalibrování, odrazivost, rozdělení napětí, jakost povrchu, povrchové vady, průchozí trhliny
Pronikavé záření	Trhliny, hustota a chemická kolísání, rozdělování prvků, cizí předměty, vměstky, mikroskopická pórovitost, nesprávné seřízení, chybějící části, segregace, selhání funkčnosti, smršťení, svrašťení, tloušťka, dutiny
Elektromagnetické a elektronické	Obsah slitiny, anizotropie, dutiny, studený spoj, místní napětí, tvrdost, kompozice, kontaminace, koroze, praskliny, hloubka trhliny, krystalická struktura, elektrická vodivost, vločky, tepelné zpracování trhliny, vměstky, iontová koncentrace, přeložky, napětí mřížky v krystalu, tloušťka vrstvy, vlhkost, polarizace, švy, segregace, smršťení, stav vulkanizace, pevnost v tahu, dutiny
Zvukové a ultrazvukové	Iniciace a šíření trhlin, dutiny, trhliny, úlomový faktor, stupeň vytvrzování, stupeň impregnace, stupeň slinování, dělení vrstev, hustota, rozměry, modul pružnosti, velikost zrna, vměstky, mechanická degradace, přesazení, pórovitost, degradace záření, struktura kompozic, povrchové napětí, pevnost v tahu, smyku, stříhu a tlaku, narušitel vazeb, opotřebení, mez únavy
Infračervené a termální	Anizotropie, spoje, kompozice, emisní schopnost, tepelné hranice, tloušťka pokovování, pórovitost, tloušťka, dutiny, trhliny, štěpení, tepelné zpracování, stav vulkanizace, vlhkost, koroze
Chemické a analytické	Identifikace slitiny, kompozice, trhliny, analýza a rozdělení prvků, zrnitost, vměstky, makrostruktura, pórovitost, segregace, povrchové anomálie

Tabulka 1 Kategorie metod nedestruktivního zkoušení

Zdroj: (3 s. 13)

Z tabulky 1 vyplývá, že žádná z metod NDT neumožňuje sama o sobě zjištění všech typů vad, které se mohou ve zkoušeném výrobku vyskytnout. Každá z metod má své možnosti a omezení dané jejich fyzikální podstatou, které je nutno nejdříve adekvátně pochopit a poté efektivně použít. V další části se budeme zabývat jen kategorií mechanické a optické (vizuální).

1.2 VIZUÁLNÍ METODA (VT)

Vizuální metoda je jednou z nejstarších a nejdůležitějších metod nedestruktivního testování, která se široce využívá k detekci povrchových nespojitostí u většiny materiálů a podpovrchových vad u průsvitných materiálů. Tato metoda je zpravidla prvním krokem při kontrole objektů a někdy slouží jako doplněk k dalším pokročilejším technikám NDT.

Principem vizuálního zkoušení je přímá nebo nepřímá kontrola testovaného objektu za účelem vyhodnocení jeho stavu, detekce případných nespojitostí a ověření shody se specifikacemi.

Hlavním cílem vizuální kontroly je identifikace strukturálních nespojitostí. Tato metoda se využívá například při inspekci leteckých konstrukcí, potrubních systémů, tlakových nádob, mostních konstrukcí, motorů vozidel a dalších mechanických součástí. Vizuální testování umožňuje detekci trhlin, nesouososti, deformací, koroze, opotřebení či fyzického poškození materiálů. Kromě toho hraje také důležitou roli při identifikaci potenciálních poruch vysoce namáhaných součástí, které jsou vystaveny únavovým mechanismům.

Úspěšnost vizuálního zkoušení závisí nejen na kvalitě použitých optických přístrojů, ale také na odborné způsobilosti inspektora. Nezbytným předpokladem pro efektivní provedení této metody je znalost výrobních procesů, historie provozu testovaného objektu a možných mechanismů jeho selhání. Přestože existují pokročilejší NDT metody, vizuální inspekce zůstává klíčovým nástrojem pro rychlou a ekonomicky nenáročnou detekci závad^{4 s. 48}.

1.2.1 Světlo

Při vizuální kontrole je nutno dostatečného osvětlení kontrolovaného povrchu (denním nebo umělým osvětlením). Seznámíme se tedy se základní podstatou světla a jeho fungováním, jak uvádí Bernard Kopec a kol.^{3 s. 420-424}.

1.2.1.1 Co je světlo?

Světlo patří do oblasti optického záření, které je součástí širší skupiny elektromagnetického spektra. Jeho důležitou vlastností je rychlost šíření, označovaná jako rychlost světla. Ve vakuu, a přibližně i ve vzduchu, se světlo šíří rychlostí $300\,000\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato hodnota představuje fundamentální fyzikální konstantu, která hraje klíčovou roli v mnoha oblastech fyziky, optiky a moderních technologií.

Světlo můžeme charakterizovat vlnovou délkou λ :

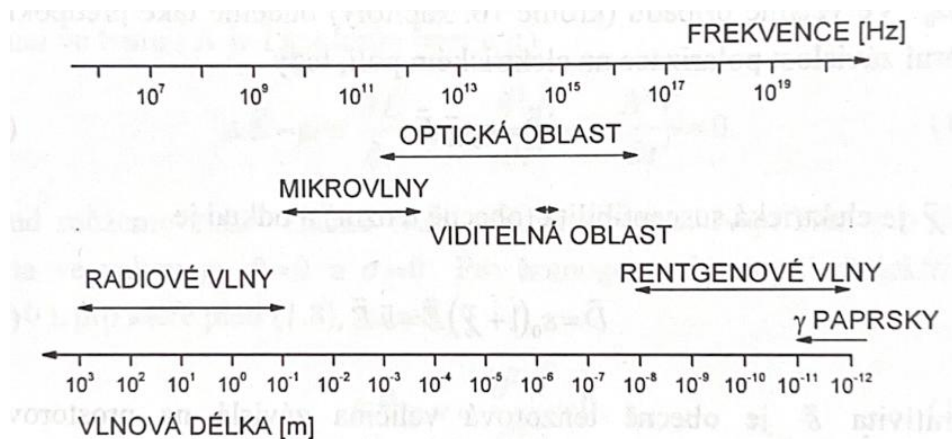
$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad [\text{m}]$$

Kde: λ vlnová délka [m]

crychlost šíření [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Tperioda [s]

ffrekvence [Hz]



Obrázek 1 Spektrum elektromagnetického záření

Zdroj: (5 s. 19)

Optické záření rozdělujeme na 3 skupiny:

- Ultrafialové záření (UV)
 - Jedná se o elektromagnetické záření (vlnění), které má vlnovou délku kratší, než je viditelné světlo. Pro lidské oko neviditelné, avšak při nadměrné expozici může mít škodlivé účinky na zrakový orgán.
- Viditelné světlo
 - Malá část elektromagnetického spektra, která je vnímána naším okem. Světlo různých frekvencí vyvolává u člověka odlišné zrakové vjemy, které jsou vnímány jako různé barvy. Tento jev je způsoben interakcí elektromagnetického záření v oblasti viditelného spektra s fotoreceptory v lidském oku. Každá barva odpovídá specifické vlnové délce, přičemž kratší vlnové délky jsou vnímány jako modré a fialové odstíny, zatímco delší vlnové délky odpovídají červené barvě.
- Infračervené záření (IR)
 - Elektromagnetické záření (vlnění), které je především vytvořeno horkými předměty, které teplo mohou přenášet.

1.2.1.2. Optické jevy

Optické jevy reprezentují soubor fyzikálních dějů, které lze vnímat prostřednictvím lidského zraku, jehož smyslovým orgánem je oko. Vnímání optických jevů je tedy klíčovým prostředkem lidské interakce s okolním prostředím. Znalost a porozumění základním principům optických jevů, jako je šíření světla, lom, odraz, je nezbytná nejen pro správnou interpretaci vizuálních vjemů, ale také pro efektivní provedení inspekce.

Šíření světla

Světlo vzniká v tzv. světelném zdroji, v němž dochází k energetickým změnám, které jsou doprovázeny uvolněním energie do okolního prostoru. Tato uvolněná energie je následně přenášena ve formě světelných vln. Světelné záření může být zachyceno buď lidským okem nebo technickými prostředky – detektory, jež umožňují přeměnu světelné energie na jiný druh energie, například v případě televizní kamery. Světlo se od svého zdroje šíří přímočaře, a to nejen skrze různé prostředí, ale i vakuem, podobně jako ostatní formy elektromagnetického vlnění.

Optickým prostředím rozumíme prostředí, ve kterém prochází světlo, rozdělujeme ho do 3 skupin:

- Průhledné
 - Těleso, které umožňuje průchod světla přímo, bez rozptylu, a zároveň dovoluje jasné a zřetelné pozorování objektů nacházejících se za ním. Takové prostředí nezpůsobuje zkreslení obrazu a zachovává původní směr světelného paprsku. Mohou být čirá (voda, bezbarvé sklo) nebo barevná (propouští světlo je některých vlnových délek).
- Průsvitné
 - Těleso, které propouští světlo převážně rozptýlenou formou, čímž znemožňuje jasné a ostré rozeznání objektů umístěných za ním. V takovém materiálu dochází k rozptylu světelných paprsků, což způsobuje, že pozorovaný obraz je neostrý nebo zcela nerozeznatelný (matné sklo).
- Neprůsvitné
 - Těleso, které prakticky nepropouští světlo. V takovém prostředí dochází buď k výraznému pohlcování světelných paprsků, nebo ke zpětnému odrazu na rozhraní s okolním prostředím (zrcadlo). Výsledkem je, že světlo skrze toto těleso neproniká a nelze jím pozorovat objekty umístěné za ním.

Odraz a lom světla

K popisu šíření světla se využívá pojem světelný paprsek, jenž představuje přímkou znázorňující směr, kterým se světelná energie šíří. Tento zjednodušený model usnadňuje znázornění a analýzu optických jevů v různých prostředích. Když světlo dopadá na rozhraní dvou izotropních prostředí (tj. prostředí s rovnoměrnými optickými vlastnostmi ve všech směrech), dochází typicky ke dvěma klíčovým jevům: odraz a lom světla.

Zákon odrazu světla nám říká:

1. Úhel odrazu je roven úhlu dopadu. To znamená, že velikost úhlu, pod kterým světelný paprsek dopadá na rozhraní (úhel dopadu), je stejná jako úhel, pod kterým se paprsek od povrchu odráží (úhel odrazu).

$$\alpha' = \alpha$$

Kde: α' úhel odrazu

α úhel dopadu

2. Dopadající paprsek, odražený paprsek a normála (kolmice) k povrchu v místě dopadu leží v jedné rovině.

Zákon lomu světla nám říká:

K lomu světla dochází tehdy, když světelný paprsek přechází z jednoho optického prostředí do jiného (např. ze vzduchu do vody). Při tomto přechodu se mění rychlost šíření světla, což způsobuje změnu směru paprsku. Tento jev se označuje jako lom světla a řídí se Snellovým zákonem.

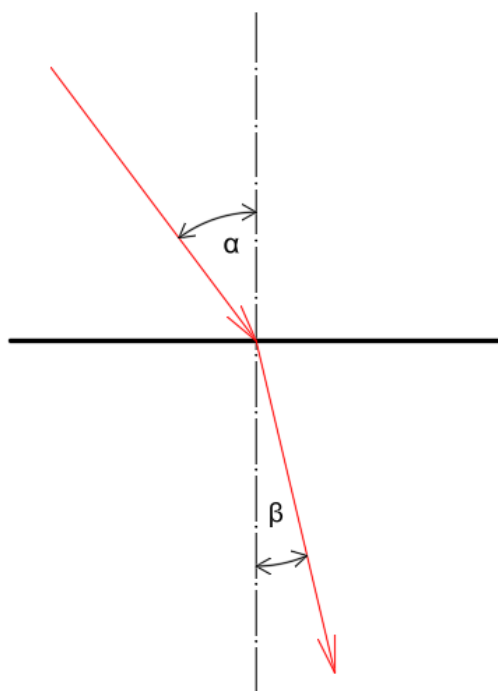
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

Kde: α úhel dopadu

β úhel lomu

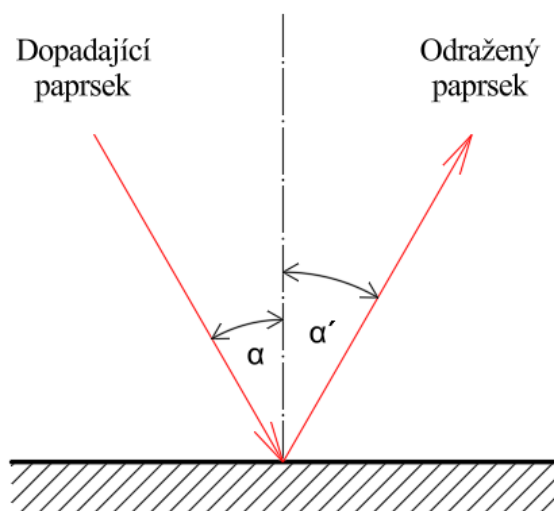
v_1 rychlost světla v prvním prostředí

v_2 rychlost světla v druhém prostředí



Obrázek 2 Odraz světla

Zdroj: Vlastní zpracování v aplikaci AutoCAD



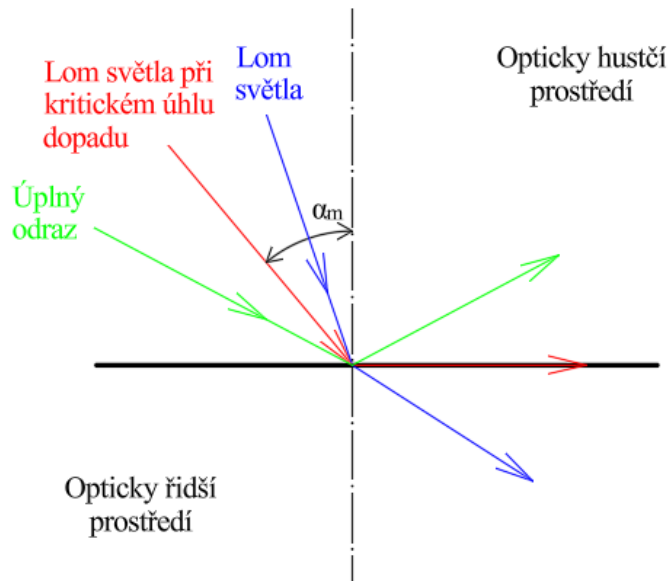
Obrázek 3 Lom světla

Zdroj: Vlastní zpracování v aplikaci AutoCAD

Úplný Odraz

Úplný odraz je zvláštní případ lomu světla, který nastává tehdy, když světelný paprsek přechází z opticky hustšího prostředí do prostředí opticky řidšího (například ze skla do vzduchu) a úhel dopadu přesáhne tzv. hraniční úhel (kritický úhel) – α_m . V tomto případě nedochází k lomu světla – světlo se zcela odrazí zpět do původního prostředí.

Když je úhel dopadu právě roven kritickému úhlu, lomený paprsek se šíří podél rozhraní. Pokud je úhel dopadu větší než tento kritický úhel, lomený paprsek nevzniká a paprsek se odrazí zpět do původního prostředí – nastává úplný odraz.



Obrázek 4 Úplný odraz

Zdroj: Vlastní zpracování v aplikaci AutoCAD

Porozumění základním principům světla a optiky je nezbytné pro správnou interpretaci obrazu během boroskopické kontroly i pro volbu vhodného vybavení (např. objektivů s různými zornými úhly, úpravou osvětlení apod.).

1.2.2 Přímá a nepřímá vizuální kontrola

Přímá vizuální kontrola se liší od nepřímé kontroly tím, že personál provádějící kontrolu je v blízké přítomnosti kontrolovaného objektu a optická dráha mezi okem pozorovatele a plochou kontrolovaného objektu není přerušena. Toto platí, když se pozorovatel dívá například skrz lupu nebo endoskop. V případě nepřímých kontrol je kontrolovaný objekt buď nepřístupný (např. potrubí) nebo je přímý kontakt nebezpečný (ionizující záření) a k vyhodnocení se používá např. videoskop, fotografie či videa^{4 s. 63}.

1.2.3 Provedení vizuální kontroly

Spolehlivost vizuální kontroly je úzce spojena s takzvanou viditelností detailu, tedy schopností pozorovatele rozlišit a vnímat jednotlivé objekty nebo nespojitosti na zkoumaném povrchu. Tento pojem odkazuje zejména na schopnost odlišit od sebe různé objekty, které se nacházejí v těsné blízkosti. Viditelnost detailu je ovlivněna nejen fyziologickými a psychickými vlastnostmi člověka, ale také celou řadou dalších faktorů. Mezi tyto faktory patří kontrast mezi objektem a pozadím, jas, kvalita osvětlení, vlastnosti materiálu, úhel pohledu nebo správné

použití optických pomůcek (zrcadla, boroskopy). Všechny tyto prvky hrají zásadní roli při hodnocení výsledků vizuální kontroly a ovlivňují její celkovou přesnost^{3. s. 430}.

1.2.3.1 Jas a svítivost

Jas (L) v určitém bodě plochy a konkrétním směru se definuje jako podíl svítivosti plošného elementu zdroje, který obsahuje daný bod a vyzařuje v daném směru, ku průmětu tohoto plošného elementu do roviny kolmé na daný směr. Jas tedy vyjadřuje, kolik světla je vyzařováno nebo odráženo z jednotkové plochy v určitém směru a je jedním ze základních parametrů popisujících světelnou charakteristiku povrchu z hlediska jeho viditelnosti pro lidské oko^{3 s. 430-431}.

$$L = \frac{I}{S \cdot \cos \alpha} \quad [\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}]$$

Kde: I.....svítivost

S.....velikost plochy

αúhel mezi normálou plochy a směrem

Svítivost, označovaná I, představuje základní fotometrickou veličinu, která vyjadřuje schopnost světelného zdroje vyzařovat světlo. Jednotkou svítivosti je kandela (cd). Jedna kandela odpovídá přibližně svítivosti běžné voskové svíčky. Pro představu – klasická žárovka o příkonu 100 W má přibližnou svítivost okolo 200 cd^{3 s. 429}.

1.2.3.2 Kontrast

Kontrast (K) je veličina nebo vlastnost, která vyjadřuje rozdíl v jasu nebo barvě mezi dvěma oblastmi obrazu, předmětu nebo pozadí. V kontextu vizuální kontroly a optických jevů kontrast ovlivňuje schopnost lidského oka rozeznat detaily a nespojitosti na pozorovaném povrchu.

$$K = \frac{L_o - L_p}{L_p} \quad [1]$$

Kde: L_o.....jas pozorovaného objektu

L_p.....jas pozadí

Pokud je hodnota $K > 0,5$, jedná se o vysoký kontrast. V rozmezí $0,2 < K \leq 0,5$ se kontrast považuje za střední a při hodnotách $K < 0,2$ se jedná o nízký kontrast. Nejlepší rozpoznatelnosti a zřetelnosti objektu je dosaženo při maximálním kontrastu mezi pozorovaným předmětem a jeho okolím. Pro účely vizuální kontroly se jako optimální

považuje kontrastní poměr přibližně $K = 0,3$, který zajišťuje dostatečnou viditelnost detailů bez nadměrného oslnování nebo ztráty jemných nespojitostí^{3 s.430}.

1.2.3.3 Osvětlení^{2 s. 116-117}

Účelem kvalitního osvětlení je zajištění dostatečného kontrastu mezi kontrolovaným objektem a jeho pozadím. Právě rozdíl v jasu nebo barvě mezi nespojitostí a okolním prostředím umožňuje pozorovateli daný detail efektivně zaznamenat. Zvláště jasový kontrast, tedy rozdíl v intenzitě odraženého světla mezi pozorovanou nespojitostí a pozadím, hraje při detekci defektů klíčovou roli. Čím vyšší je kontrast, tím snáze lze detekovat drobné odchylky nebo poruchy na povrchu materiálu. Kromě kontrastu je významným faktorem také kvalita osvětlení v kontrolované oblasti. Ta zahrnuje nejen intenzitu světla, ale především jeho rovnoměrné rozložení, správnou orientaci světelných zdrojů a vhodné spektrální složení. Optimálně navržené osvětlení přispívá nejen ke zvýšení zrakové výkonnosti inspektora, ale také ke snížení únavy očí a zvýšení přesnosti hodnocení. Kvalitní osvětlení by mělo zahrnovat kombinaci celkového plošného osvětlení a cíleného zkušebního osvětlení, zaměřeného na kritická místa posuzované plochy. Poměr svítivosti mezi jednotlivými částmi kontrolního prostoru by měl být nastaven tak, aby nedocházelo k oslnění a zároveň byla podpořena schopnost detekce jemných detailů.

Plošné osvětlení

Plošné neboli prostorové osvětlení představuje základní způsob osvětlování pracovních prostorů, přičemž může nabývat různých forem – přímého, polopřímého nebo rozptýleného osvětlení.

V případě přímého osvětlení je 90 až 100 % světelného toku ze stropních svítidel směřováno směrem dolů. Tento typ osvětlení poskytuje vysokou úroveň vertikální osvětlenosti, která je vhodná pro detailní práci, avšak může zároveň vytvářet výrazné stíny a oslnění. Pro zmírnění těchto nežádoucích jevů se doporučuje použití povrchů s vysokou odrazivostí, zejména na stěnách místnosti.

Polopřímé osvětlení směřuje přibližně 60 až 90 % světelného toku dolů, zatímco zbývající část světla je rozptýlena směrem vzhůru. Tento způsob osvětlení pomáhá snižovat stíny na stropě a vytváří rovnoměrnější světelné podmínky, nicméně by se měl vyhnout použití jasných nebo lesklých stropních povrchů, které mohou způsobit rušivé odrazy.

Rozptýlené (difúzní) osvětlení zajišťuje rovnoměrné rozložení světla směrem nahoru, dolů i do stran. Tento typ osvětlení nabízí vyvážené poměry jasů v celé místnosti, čímž přispívá k redukci stínů a vytváří horizontální osvětlení s minimálním oslněním. Je zvláště vhodné v prostředích, kde je důležitý zrakový komfort a dlouhodobé soustředění.

Lokální osvětlení

Lokální osvětlení nabízí rovnoměrné osvětlení, které je specificky směřováno na oblast, kde probíhá kontrola. Lokální osvětlení, například ve formě stolních lamp nebo jiných přenosných světelných zařízení, poskytuje velmi intenzivní osvětlení v konkrétním bodě. Tento typ osvětlení je obzvláště užitečný tam, kde je potřeba zvýšit kontrast pomocí stínování. Zároveň ale může docházet k výskytu přímého i odraženého oslnění, což může být při delší práci únavné pro oči.

Aby se předešlo zrakové únavě způsobené častou adaptací oka na rozdílné světelné podmínky, doporučuje se, aby celkové osvětlení místnosti poskytovalo alespoň 20 až 30 % intenzity oproti samotnému lokálnímu osvětlení.

1.2.3.4 Stav povrchu^{6 s. 11-12}

Stav povrchu kontrolovaného objektu má zásadní vliv na správné vyhodnocení vizuální kontroly. Stav povrchu, tedy jeho drsnost, lesk nebo čistota, přímo ovlivňuje viditelnost detailů a schopnost detekovat povrchové vady. Hladký a čistý povrch zpravidla umožňuje snazší identifikaci nespojitostí, jako jsou trhliny, vrypy, koroze nebo nehomogenity. Naopak drsné nebo znečištěné povrchy mohou vady maskovat, a tím snižovat účinnost kontroly

Povrch se může také chovat opticky aktivně, což znamená, že odráží nebo rozptyluje světlo různým způsobem. Lesklé nebo reflexní povrchy mohou způsobit oslnění, které znesnadňuje pozorování, zatímco matné nebo tmavé povrchy mohou naopak snižovat kontrast mezi vadou a pozadím.

Barva

Barva dopadajícího světla může mít při vizuální kontrole zásadní význam, zejména při detekci drobných nespojitostí na povrchu zkoumaného objektu. Správně zvolená barevná teplota nebo spektrální složení osvětlení může výrazně zvýšit kontrast mezi nespojitostí a okolním materiálem, a tím usnadnit její identifikaci.

Barva světla se využívá ke zvýraznění nebo naopak potlačení určitých barevných vlastností kontrolovaného povrchu:

- Pro zvýraznění určité barvy se používá světelný zdroj, který má v daném spektrálním pásmu vysokou intenzitu. Například červené světlo může zvýraznit tmavé praskliny na světlém pozadí.
- Pro potlačení konkrétní barvy je vhodné použít zdroj světla s nižší intenzitou v dané části spektra. To pomáhá eliminovat rušivé odrazy nebo sjednotit barevnost pozadí^{6 s. 12}.

Drsnost povrchu

Povrchová úprava materiálu výrazně ovlivňuje množství a kvalitu světla, které se od něj odráží směrem k oku. Hladké, vysoce lesklé povrchy mohou způsobovat nežádoucí oslnění, které narušuje zrakové vnímání kontrolované oblasti a ztěžuje detekci nespojitostí. V takových případech je nezbytné pečlivě zvolit typ a uspořádání osvětlení, aby bylo dosaženo optimálních podmínek pro pozorování.

Na druhé straně velmi drsné nebo hrubé povrchy mohou rozptylovat světlo natolik, že je obtížné zajistit dostatečné osvětlení bez ztráty kontrastu nebo překrytí detailů. I zde může být zapotřebí speciálně upravené osvětlení, které umožní rovnoměrné nasvícení zkoumané oblasti.

1.2.3.5 Úhel pohledu^{2 s. 112-114}

Pro zajištění co nejpřesnějšího hodnocení by se měl pozorovatel snažit sledovat kontrolovaný objekt, pokud možno, ve směru centrální osy oka, tedy přímo. Ideálně by zorný úhel neměl překročit 45° od kolmice (normály) k pozorovanému povrchu. Doporučená vzdálenost oka od objektu během vizuální kontroly je maximálně 600 mm, přičemž úhel pozorování by neměl být menší než 30° vůči kontrolnímu povrchu. Tyto zásady platí nejen při přímém pozorování, ale i při použití optických pomůcek, jako jsou zrcadla či boroskopy. V takových případech je důležité, aby bylo zachováno zorné pole obdobné tomu, které by bylo dosaženo přímým pohledem. V případech, kdy není možné umístit oko do doporučené pozorovací pozice – například kvůli nepohyblivosti nebo špatné dostupnosti kontrolovaného povrchu – je nezbytné využít vhodné pomůcky, které umožní dodržení správného pozorovacího úhlu a zorného pole.

Správné držení těla má také vliv na kvalitu pozorování. Optimální postoj pozorovatele umožňuje stabilní udržení osy pohledu a minimalizuje únavu očí, celkovou fyzickou zátěž i rozptylování pozornosti. Při kontrole povrchů s lesklým pozadím je vhodné volit úhel pohledu mimo kolmici, ale zároveň ne větší než 45°, čímž se zamezí přímému odrazu světla do oka

pozorovatele. Tím se zvýší kontrast obrazu a sníží riziko oslnění. Správně zvolený úhel zároveň umožňuje přesnější hodnocení nespojitostí, bez zkreslení jejich velikosti, barvy nebo prostorového umístění. U obtížně přístupných ploch, které nejsou viditelné přímým pohledem, je správné nastavení pozorovacího úhlu klíčové např. správné použití zrcadla.

1.2.4 Hodnocení vad

Hodnocení vad během vizuální kontroly jakéhokoliv výrobku je do značné míry subjektivní činností, která klade vysoké nároky na zkušenosti pracovníka, jeho zrakové schopnosti. Aby bylo možné dosáhnout srovnatelných a co nejvíce objektivních výsledků, je nezbytné zajistit optimální podmínky pro pozorování, včetně dostatečného osvětlení a dodržování standardizovaných postupů. Vizuální kontrola proto není pouze technickou činností, ale vyžaduje také praktické dovednosti a individuální vnímání detailů, které se rozvíjejí s praxí a cíleným školením.

Při vizuální kontrole jakéhokoliv výrobku se hodnocení vad obvykle provádí dvěma základními způsoby. Prvním je prohlídka s porovnáním vnějších znaků vad, například s katalogem reprezentativních vad, při níž se pracovník řídí k tomu svými zkušenostmi a znalostmi běžného vzhledu výrobku. Druhým přístupem je prohlídka spojená s měřením rozměrových nebo tvarových parametrů vad, přičemž se vychází z předem stanovených pravidel, jako jsou technické normy, interní předpisy nebo specifikace zákazníka. Oba postupy slouží k posouzení, zda zjištěná odchylka ovlivňuje funkčnost, bezpečnost nebo estetickou kvalitu výrobku^{3 s. 432-433}.

1.3 BOROSKOPIE

Boroskop je optický přístroj podobný lékařskému endoskopu. Je to optický přístroj s vestavěným osvětlovacím systémem pro osvětlení zorného pole. Lze jím vizuálně kontrolovat vnitřní prostory, hluboké otvory a vývrty. Boroskopy jsou k dispozici v pevných a ohebných provedeních. Obecně se používají při vizuální kontrole leteckých motorů, leteckých a průmyslových plynových turbín, parních turbín, diesellových motorů a motorů automobilů a nákladních vozidel. Boroskopickou kontrolou motorů lze zabránit zbytečné údržbě, která hlavně u proudových motorů může být velice nákladná. Tento typ kontroly se také používá při výrobě obráběných nebo litých dílů ke kontrole kritických vnitřních povrchů z hlediska otřepů, povrchové úpravy nebo úplných průchozích otvorů^{6 s. 14-25}.

1.3.1 Zorné pole a směr pohledu

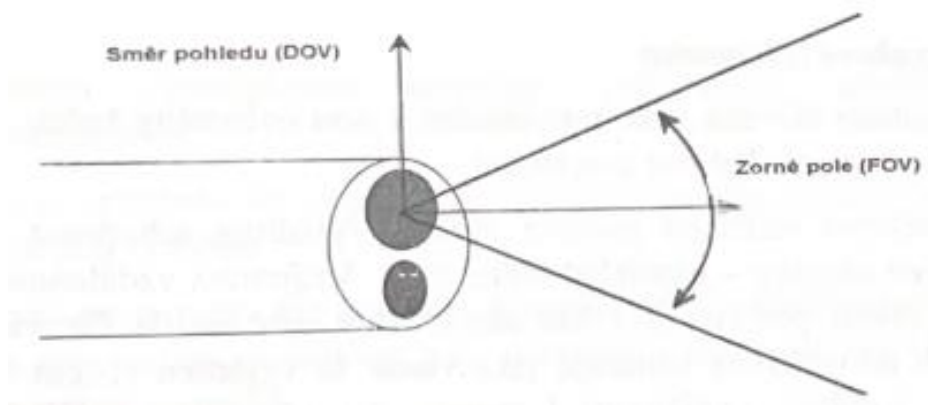
Pro lepší porozumění fungování boroskopů si definujeme, co je zorné pole a směr pohledu, protože v boroskopické kontrole je správné zvolení těchto parametrů nezbytné pro korektní provedení kontroly.

Zorné pole (FOV)

Zorné pole určuje rozsah pozorovatelné oblasti viditelné prostřednictvím kamery, displeje nebo optického zařízení, obvykle měřeno ve stupních. Širší zorné pole zachycuje více prostředí, zatímco užší zorné pole se zaměřuje na menší oblast, často s větším množstvím detailů^{2 s. 89}.

Směr pohledu (DOV)

Směr pohledu označuje konkrétní úhel mezi směrem pozorování a středovou osou optického zařízení. Jedná se o středovou osu zorného pole (FOV). Na rozdíl od zorného pole, které popisuje šířku viditelné oblasti, směr pohledu určuje, kam je tato oblast zaměřena^{2 s. 144}.



Obrázek 5 Směr pohledu a zorné pole pozorovací hlavice

Zdroj: (3 s. 435)

Hloubka ostrosti (DOF)

Jedná se o prostor, ve kterém je obraz stále vnímaný jako ostrý. U optického systému s nižším zvětšením bývá hloubka ostrosti větší, zatímco se zvyšujícím se výkonem se postupně zmenšuje. Mimo tento rozsah je obraz rozmazaný^{7 s. 120}.

1.3.2 Druhy průmyslových boroskopů

1.3.2.1 Pevné boroskopy^{7 s. 127-132}

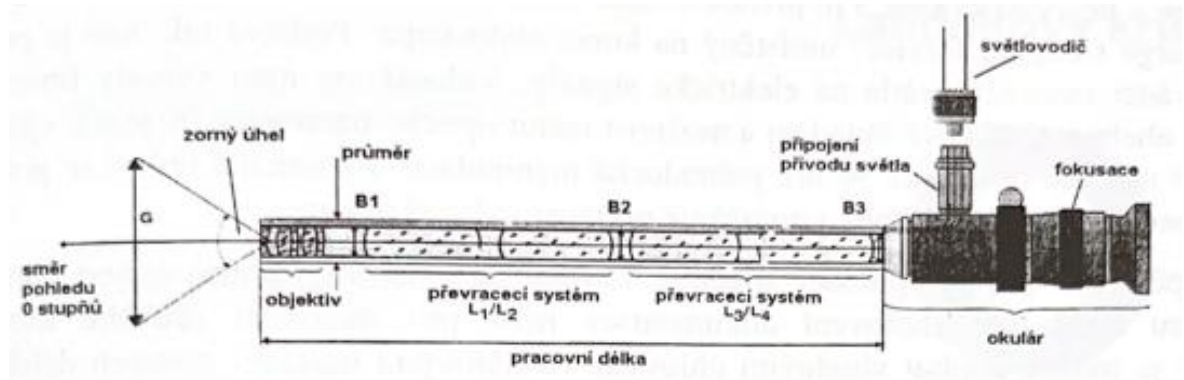
Pevný boroskop je přesný optický přístroj tvořený dlouhým, neohebným tubusem, určený k vizuální kontrole vnitřních povrchů nebo jinak obtížně přístupných míst, k nimž je možný jen

přímý (rovný) přístup. Optická soustava čoček a hranolů propojuje okulár na jednom konci přístroje s objektivem umístěným na druhém, tzv. distálním (pozorovacím) konci boroskopu.

Osvětlení zajišťuje buď žárovka umístěná přímo na distálním konci (tento způsob je v současnosti využíván už jen zřídka), nebo svazek světlovodů z optických vláken vedoucí světlo z externího zdroje. Použití optických vláken namísto elektrických kontaktů minimalizuje riziko vzniku výbuchu, což umožňuje bezpečné použití i ve výbušném prostředí.

Mezi typické použití pevných boroskopů v údržbě letadel patří kontrola aktuátorů podvozku, vzpěr na přítomnost koroze, prasklin či škrábanců na stěnách, dále pro inspekci upevňovacích prvků křídel, nosníků a jiných konstrukčních částí nebo kontrola válcových vložek motoru, pístů a ventilů.

Boroskopy jsou vyráběny v široké škále průměrů (0,9-16 mm) a délek (až 1,6 m) inspekčních tubic, aby pokryly široké spektrum standardních aplikací, přičemž někteří výrobci nabízejí zakázková řešení pro specifické požadavky jednotlivých uživatelů. Objektivy jsou většinou u pevných boroskopů nezaměnitelné. Zorné pole se pohybuje od 30° do 90° a směr pohledu -5° až 130°. Mezi největší přednosti pevných boroskopů patří možnost použití ve výbušném prostředí a schopnost pracovat při vysokých teplotách – až do +150 °C.



Obrázek 6 Pevný boroskop

Zdroj: (3 s.435)

1.3.2.2 Fibroskopy⁷ s. 140-142

Ohebné boroskopy – fibroskopy se používají v případech komplikovaného přístupu do pozorovací oblasti (ohnuté trubky, proudové motory). Typický flexibilní boroskop je tvořen vláknovým optickým svazkem, obrazovým vláknovým svazkem, vyměnitelnými optickými adaptéry a systémem dálkového ovládní pro natáčení distálního konce do požadovaného směru.

Délka inspekční trubice je až 8 m, průměr 0,5-13,5 mm. Fibroskopy často umožňují výměnu optického adaptéru, čímž lze měnit směr pohledu a zorné pole dle potřeby konkrétní aplikace. Typické zorné pole je 40°, 60° nebo 90°, ale může se pohybovat v rozmezí od 10° do 120°. Směr pohledu můžeme měnit v rozmezí mezi 0° až 120°. Většina zařízení rovněž umožňuje nastavení zaostření objektivu pro optimalizaci zobrazení

Svazek světlovodných vláken slouží k přenosu světla ze vzdáleného zdroje do oblasti kontroly. Protože každé vlákno ve světlovodném svazku přenáší pouze světlo, není nutné jejich přesné vyrovnání, a jejich průměr bývá obecně větší než u vláken určených pro přenos obrazu. Naproti tomu obrazový vláknový svazek zajišťuje přenos obrazu vytvořeného objektivem zpět k pozorovacímu oku. Vlákná v tomto svazku jsou přesně uspořádána tak, aby byla zachována jejich vzájemná poloha na obou koncích svazku, což je nezbytné pro dosažení kvalitního rozlišení obrazu. Průměr jednotlivých vláken v obrazovém svazku přímo ovlivňuje výsledné rozlišení – čím větší je počet tenkých vláken, tím vyšší je dosažená kvalita a ostrost obrazu. Vysoké rozlišení umožňuje použití objektivu se širším zorným polem a zároveň umožňuje zvětšení obrazu v okuláru, což zlepšuje viditelnost detailů i na okrajích pozorovaného pole.

Typické použití v letectví je podobné jako u pevných boroskopů: kontrola nosníků a stěn na praskliny, škrábance, kontrola lopatek motorů na korozi, erozi atd. Výhodou oproti pevným boroskopům je ohebnost a délka inspekční trubice, ale maximální teplota prostředí je menší – +80°C.

1.3.1.3 Videoskopy^{7 s. 145}

Videoskopy využívají na distálním konci polovodičové zařízení CCD (Charge coupled device), které přeměňuje energii dopadajícího světla (fotony) na energii elektrického signálu (elektrony)⁸. Tradiční obrazový vláknový svazek uvnitř inspekční trubice je v tomto případě nahrazen kabelovým svazkem, jenž přenáší barevné nebo černobílé obrazy ve formě video signálů na výstupní zařízení – video monitor.

Rozlišení videoskopů, podobně jako u pevných boroskopů a fibroskopů, závisí na vzdálenosti mezi pozorovaným objektem a objektivem a na zorném poli přístroje, protože tyto faktory ovlivňují výsledné zvětšení obrazu. Obecně platí, že díky technologii CCD videoskopy nabízejí vyšší rozlišení a vyšší kvalitu barev než fibroskopy, ačkoli některé špičkové fibroskopy s jemnějšími vlákny mohou dosahovat podobné kvality obrazu.

Při stejném množství osvětlení na distálním konci jsou videoskopy schopny přenášet obraz na větší vzdálenosti (až 30 m) než fibroskopy. Ovládání vychýlení distálního konce a proměnná ohebnost inspekční trubice je stejná jako u fibroskopů.

Mezi hlavní přednosti videoskopů patří zobrazení na monitoru, které významně pomáhá snižovat únavu očí, ačkoliv neposkytuje možnost přímého pozorování skrze okulár. Nedochozí k vzniku nepravidelného zkreslení obrazu, jaké se mohou objevit u některých typů fibroskopů. Elektronický přenos obrazového signálu umožňuje digitální zpracování: vylepšení kvality obrazu, videozáznam nebo sledování průběhu kontroly dalším pracovníkem. Dalšími významnými funkcemi jsou možnost změny velikosti zorného pole, zmrazení obrazu, automatické řízení světelné citlivosti nebo generování zaměřovacích křížů přímo na obrazovce, což usnadňuje přesné měření polohy bodů v rámci kontrolovaného obrazu. Videoskopy jsou tedy z hlediska variability funkcí a možnosti implementace moderních technologií a postupů nejlepší zařízení k provádění boroskopických kontrol.

1.3.3 Boroskopie a letecké proudové motory

Existují dva základní typy boroskopických kontrol: plánované (scheduled inspections) a neplánované (unscheduled inspections).

1.3.3.1 Plánované kontroly motoru (Scheduled Inspections)^{9 s. 547}

Plánované kontroly se provádějí za účelem zjištění poškození vnitřních částí motoru v pravidelných intervalech – stanoveného počtu provozních hodin, letových cyklů nebo kombinace obou, a to podle pokynů uvedených v dokumentech jako jsou:

- Maintenance Planning Document (MPD) – Plán údržby letadla
- Aircraft Maintenance Manual (AMM) – Příručka údržby letadla

Tyto kontroly se zaměřují na konkrétní oblasti motoru, aby bylo možné zhodnotit jeho stav. Pokud se nezjistí žádné poškození, považuje se motor za provozuschopný. V případě zjištění závady je nutné se řídit oficiální dokumentací, která určí, zda je motor provozuschopný, a to s ohledem na počet cyklů nebo časové omezení.

1.3.3.2 Neplánované kontroly motoru (Unscheduled Inspections)^{9 s. 548}

Neplánované kontroly se provádějí, když motor vykazuje nežádoucí stavy nebo po konkrétní události, která mohla způsobit poškození motoru. Mezi typické případy, kdy je nařízena neplánovaná boroskopická kontrola, patří:

- vniknutí cizího předmětu (FOD)
- přehřívání
- nadměrné otáčky
- náhlé změny tahu
- vibrace
- tvrdé přistání
- olej ve spalínách
- kontaminace hasicí látkou
- selhání motoru za letu
- nasátí sopečného popela

Během neplánované kontroly lze kontrolovat všechny části motoru. Požadavky na tyto úkony jsou specifikovány v provozní příručce specifického motoru (letadla).

1.3.3.3 Vady zjištěné při boroskopické kontrole^{10 s. 371}

K popisu častých vad zjištěných při boroskopické kontrole si jich několik definujeme. Mezi nejčastější vady patří:

Trhliny

Praskliny představují postupné oddělení kovového materiálu, které vzniká v důsledku působení mechanického nebo tepelně-mechanického namáhání, jako jsou vibrace, přetížení, vnitřní pnutí, nesprávná montáž nebo únava materiálu. Typickým znakem trhlin je jejich zubatý vzhled, který je způsoben lomem podél hranic zrn materiálu. Hloubka trhlin se může pohybovat od několika tisícín milimetru až po celou tloušťku dané součásti.

Vrypy

Rýhy nebo prohlubně s profilem ve tvaru písmene „V“, která obvykle vzniká v důsledku neopatrné manipulace s nástroji, přípravky nebo jednotlivými díly během údržby či montáže. Tento typ povrchového poškození je potencionálně nebezpečný, protože výrazně zvyšuje lokální napětí v materiálu, čímž může přispět k iniciaci prasklin a následnému porušení součásti v důsledku únavy nebo přetížení.

Abraze

Abraze neboli mechanické obroušení je oblast s výrazně zdrsňeným povrchem, bývá obvykle výsledkem vniknutí cizích částic mezi pohyblivé součásti nebo vzájemně se stýkající plochy. Tento typ poškození je charakteristický pro kontaktní místa, kde dochází k relativnímu pohybu za přítomnosti nežádoucích pevných nečistot, které narušují povrchovou integritu materiálu.

Promáčkliny

Drobné, zaoblené prohloubení na povrchu materiálu, které vzniká v důsledku nárazu tupého předmětu. Nejčastější příčinou je FOD. Jako u vrypů tato vada zvyšuje lokální napětí v materiálu.

Lom

K lomovému porušení kovového materiálu dochází tehdy, když působící mechanická síla překročí jeho mez pevnosti. V takovém případě se materiál náhle zlomí, a to bez předchozího výrazného plastického přetvoření. Tento typ porušení se obvykle nešíří podél hranic zrn, ale probíhá napříč zrn kovu, což je známkou křehkého lomu. Takové selhání materiálu bývá často spojeno s rozsáhlým a vážným poškozením, většinou vniknutím relativně velkého cizího předmětu.

Eroze

Úbytek kovového materiálu z povrchu v důsledku mechanického působení cizích částic, jako je například šterk nebo jemný písek. Takto erodovaná oblast bývá charakteristicky drsná a může vykazovat směrové rýhování nebo lemování v závislosti na směru pohybu erozivního materiálu vůči poškozenému povrchu.

Usazeniny

Akumulace nežádoucích cizorodých látek na povrchu. Nejčastěji vznikají v důsledku provozu v prašném prostředí, v mořských oblastech (nánosy soli) nebo mohou být důsledkem nedokonalých chemických procesů (karbonové usazeniny). Usazeniny mohou negativně ovlivnit chlazení či aerodynamické vlastnosti. Pokud nejsou včas odstraněny, mohou předcházet dalším problémům, jako je přehřívání, koroze nebo mechanické opotřebení.

Škrábance

Mělké, úzké linie různé šířky, které vznikají v důsledku kontaktu s jemnými cizorodými částicemi během provozu, nebo při manipulaci.

Opálení

Vzniká v důsledku vystavení nadměrnému teplu. Nejčastěji bývá způsobeno nesprávným upevněním dílů, či provozem za příliš vysoké provozní teploty. Spálený kov je obvykle zuhelnatělý v důsledku oxidace, přičemž dochází k poklesu jeho strukturální pevnosti. Tento typ poškození se často vyskytuje na vysoce tepelně namáhaných místech, jako jsou palivové trysky, spalovací komora a vysokotlaká turbína (HPT). Počáteční známkou opálení bývá lehké zbarvení povrchu, které postupně přechází do černého odstínu s hladkým povrchem. V pokročilém stádiu získává poškozené místo černý, zrnitý vzhled a může docházet ke tvorbě trhlin.

Zkroucení

Mechanická deformace, při níž dochází k nerovnoměrnému stočení nebo pokroucení součásti v důsledku působení vnějších sil, teplotních změn nebo nesprávné montáže. Tento jev často vede k narušení tvarové a rozměrové přesnosti dílu, což může negativně ovlivnit jeho funkčnost nebo souosost s dalšími komponenty. Obvykle se toto poškození nachází ve vysokotlaké části kompresoru.

Koroze

Degradace kovového materiálu v důsledku chemických reakcí s okolním prostředím, přičemž dochází ke ztrátě kovové hmoty. Nejčastěji se jedná o reakci kovu s kyslíkem, vlhkostí nebo jinými agresivními látkami, které vedou k tvorbě koroze. Koroze může výrazně ovlivnit pevnost, funkčnost a životnost kovových součástí.

2 TECHNICKÝ POSTUP

2.1 Motor PW306C

Motor výrobce Pratt & Whitney PW306C je dvouhřídelový turbodmychadlový motor s prstencovým obtokovým kanálem rozprostřeným po celé délce motoru.

Hnací ústrojí tvoří soustředný hřídelový systém, který zahrnuje:

- vnitřní hřídel, nesoucí dmychadlo, které slouží jako nízkotlaký kompresor, poháněné třístupňovou nízkotlakou turbínou umístěnou v zadní části motoru
- vnější hřídel, která je mechanicky nezávislá na nízkotlaké hřídeli a pohání čtyřstupňový axiální a jednostupňový radiální vysokotlaký kompresor. Tento kompresor je poháněn dvoustupňovou vysokotlakou turbínou, rovněž umístěnou v zadní části

Vzduch vstupuje do motoru přes skříň dmychadla, ten je dmychadlem urychlen a následně rozdělen do primárního proudu (směřujícího do jádra motoru) a obtokového (sekundárního) proudu. Oba proudy se na výstupu motoru smíchávají ve směšovači.

Primární proud vzduchu prochází přes aktivně řízené vstupní usměrňovací lopatky a variabilní statorové lopatky prvního stupně, jejichž poloha se mění podle potřeby prostřednictvím hydraulického systému ovládaného tlakem paliva, na základě pokynů z elektronické řídicí jednotky motoru (EEC). Takto řízený vzduch dále proudí do vysokotlakého kompresoru, odkud je veden do 24 difuzorových trubek, které mění rychlost proudění na statický tlak. Následně proud vstupuje do prstencové spalovací komory obklopující vložku spalovací komory.

Vložka spalovací komory je navržena jako prstencová průchozí sestava s otvory pro míchání vzduchu s palivem a ředění spalovacích plynů. Palivo je do komory přiváděno pomocí 24 trysek, napájených z jednovláknového palivového potrubí. Dvě z těchto trysek mají hybridní konstrukci, která umožňuje samostatný primární průtok paliva při startování. Zapálení směsi zajišťují dvě zapalovací svíčky vyčnívající do vložky spalovací komory.

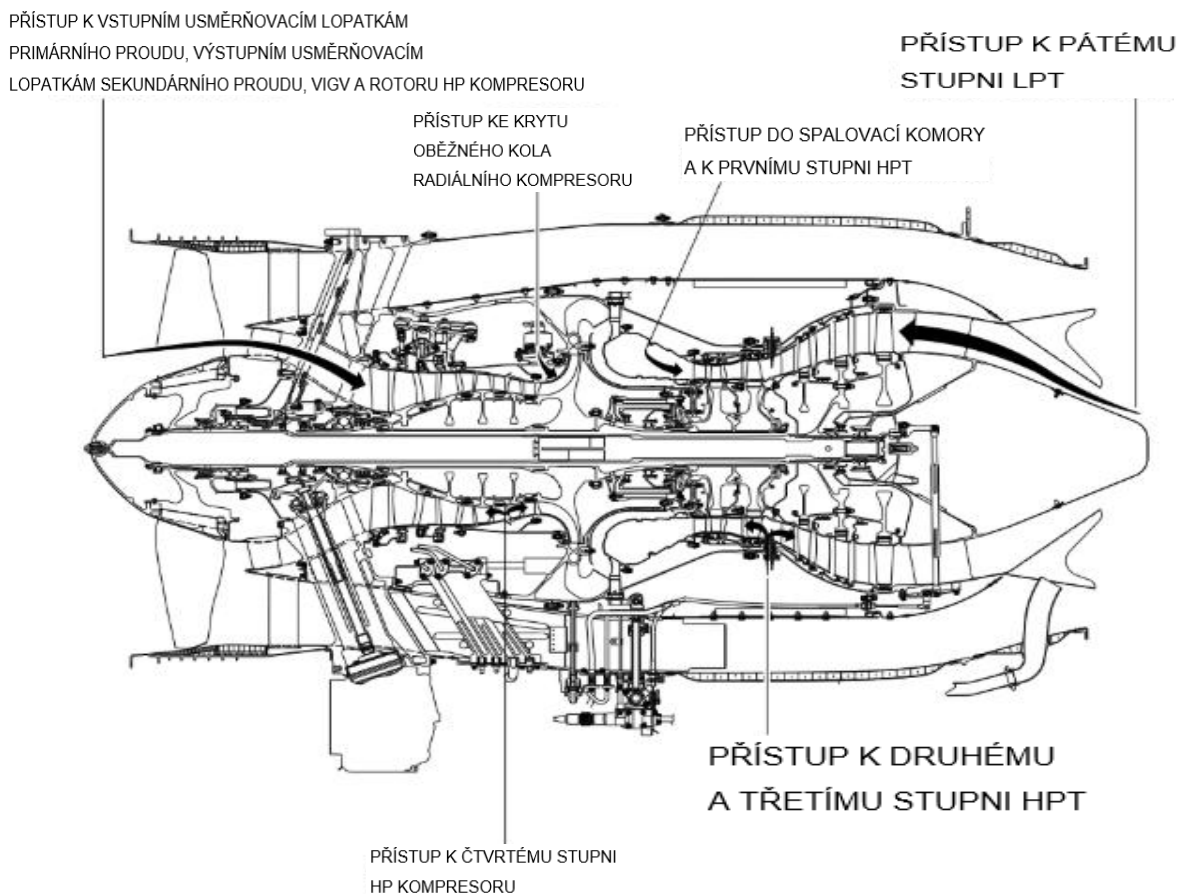
Spaliny expandují a proudí přes statorové lopatky vysokotlaké turbíny do jejího prvního stupně rotoru, kde se uvolňuje část energie. Lopatky této turbíny jsou chlazeny vnitřními vzduchovými kanálky. Proud dále postupuje do druhého stupně vysokotlaké turbíny a

následně do tříступňové nízkotlaké turbíny, odkud je odváděn směrem k výstupní trysce a smíchán s obtokovým vzduchem, čímž je dosaženo vyšší účinnosti a nižší hlučnosti.

Přídavná zařízení motoru (např. generátor, palivové čerpadlo, olejové čerpadlo atd.) jsou připevněna na převodové skříně, která je uložena ve spodní části meziskříně. Pohon těchto zařízení zajišťuje věžová hřídel propojená s vysokotlakým rotorem (N2), která se otáčí skrz meziskřín do převodovky. Rychlost otáček N2 je snímána pomocí elektromagnetických pulzních snímačů, které přenášejí data do řídicí jednotky EEC. Otáčky nízkotlakého rotoru (N1) jsou sledovány dvěma snímači umístěnými v přední části motoru.

Olejová nádrž motoru je integrována do meziskříně mezi jádrem motoru a obtokovým kanálem, čím se zajišťuje kompaktní konstrukce a efektivní chlazení mazacího systému. 2.2 Přístupové body.

Přístupové body pro boroskopii v leteckých proudových motorech jsou určená místa na motoru, která umožňují zavedení boroskopu za účelem vnitřní inspekce bez nutnosti rozsáhlé demontáže.



Obrázek 7 Přístupové body

Zdroj: (10)

Tabulka 2 Seznam přístupových bodů a příslušných oblastí inspekce

Přístupový bod	Oblast inspekce
Vstupní kanál	Věnc vstupních usměřňovacích lopatek primárního proudu
	Věnc výstupních usměřňovacích lopatek sekundárního proudu
	Proměnné vstupní usměřňovací lopatky (VIGV)
	Lopatky prvního stupně HP kompresoru
Odfukový otvor P2.5	Lopatky třetího stupně HP kompresoru
	Lopatky čtvrtého stupně HP kompresoru
Odfukový otvor P2.8	Kryt oběžného kola radiálního kompresoru (Impeller shroud)
Příruba zapalovací svíčky	Palivové trysky
	Vložka spalovací komory
	Statorová část prvního stupně HP turbíny
	Rotorové lopatky prvního stupně HP turbíny
	Stínící prstenec rotorové části prvního stupně HP turbíny
Boroskopický otvor skříně LP turbíny	Statorové lopatky druhého stupně HP turbíny
	Rotorové lopatky druhého stupně HP turbíny
	Segmenty stínícího prstence druhého stupně HP turbíny
	Statorové lopatky třetího stupně LP turbíny
	Rotorové lopatky třetího stupně LP turbíny
Výstupní kanál	Statorové lopatky pátého stupně LP turbíny
	Rotorové lopatky pátého stupně LP turbíny

Zdroj: (10)

Z přístupových bodů je volně přístupný vstupní a výstupní kanál, ty nevyžadují demontáž žádné části motoru. Ostatní přístupové body jsou zakryty ventily, zapalovací svíčkou a krytem. Tyto místa vyžadují deinstalaci dle údržbového manuálu.

2.3 Průmyslový endoskop IPLEX NX

V této části se seznámíme s videoskopem IPLEX NX výrobce Olympus, se kterým jsem měl možnost pracovat při své praxi ve společnosti UG Jet. S tímto videoskopem se prováděla boroskopická kontrola motoru PW306C.

2.3.1 Základní jednotka

Primární částí je základní jednotka spojená s nastavitelným, dotykovým LCD displejem. Na hlavní jednotce se nachází tlačítka pro zapnutí přístroje a zapnutí/vypnutí osvětlení sondy. V dolní části LCD displeje najdeme funkce na otočení obrazu, joystick na ovládání vychýlení konce sondy, zmrazení sondy v konkrétní poloze, pořízení záznamu a zmrazení obrazu (viz

přílohy A a B). Videoskop je napájen baterií nebo přímo napájecím kabelem. Do hlavní jednotky se může připojit paměťová karta, USB flash disk pro pořízení záznamu, LCD kabel pro přenos obrazu na další obrazovku, mikrofon nebo síťový kabel. Je také možné využít ramenní popruh.

2.3.2 Vybavení

V pojízdném kufru je uložena hlavní jednotka s vybavením. Do vybavení patří:

- Dálkový ovladač – s tímto ovladačem lze přibližovat a zmrazit obraz, nastavovat intenzitu osvětlení, vychylovat konec sondy, či spustit nahrávání. Všechny tyto funkce může uživatel ovládat i na dotykovém displeji
- dvě endoskopické jednotky – jedna se sondou o průměru 4 mm a druhá se sondou o průměru 6 mm (viz přílohy C a D)
- optické adaptéry různého druhu ke přizpůsobení zorného pole (FOV), směru pohledu (DOV) a hloubky ostrosti (DOF) podle konkrétních požadavků, adaptéry jsou označeny barevně pro jednodušší rozpoznání

Název adaptéru		AT120D/NF -IV94	AT120D/FF -IV94	AT100S/NF -IV94N	AT100S/FF -IV94N
Zkratka názvu výrobku		A120N	A120F	A100N	A100F
Barva písmen		Červená	Zelená	Červená	Zelená
Optická soustava	Zorné pole	120°	120°	100°	100°
	Směr pohledu	Pohled zepředu	Pohled zepředu	Pohled z boku	Pohled z boku
	Hloubka ostrosti* ¹	2 až 200 mm	17 až ∞ mm	2 až 15 mm	8 až ∞ mm
Distální konec	Vnější průměr* ²	Ø 4,0 mm	Ø 4,0 mm	Ø 4,0 mm	Ø 4,0 mm
	Délka tuhé části distálního konce* ³	20,2 mm	20,1 mm	22,9 mm	22,9 mm

Název adaptéru		AT80D/FF -IV94N	AT70D/70D -IV94N	AT50S/50S -IV94N
Zkratka názvu výrobku		A80F	A70/70	A50/50
Barva písmen		Zelená	Modrá	Modrá
Optická soustava	Zorné pole	80°	70°/70°	50°/50°
	Směr pohledu	Pohled zepředu	Pohled zepředu	Pohled z boku
	Hloubka ostrosti* ¹	35 až ∞ mm	5 až 200 mm	3 až 150 mm
Distální konec	Vnější průměr* ²	Ø 4,0 mm	Ø 4,0 mm	Ø 4,0 mm
	Délka tuhé části distálního konce* ³	20,1 mm	22,3 mm	26,7 mm

*¹ Označuje rozsah, ve kterém je možné obraz pozorovat jasně.
*² Když se instaluje na sondu, lze vložit do otvoru Ø 4,0 mm.
*³ Když se instaluje k sondě, označuje délku tuhé části distálního konce.

Obrázek 8 Seznam, označení a specifikace distálních konců pro sondu s průměrem 4 mm.

Zdroj: (11 s. 95)

- tuhé rukávy sloužící k zajištění přímé a stabilní trajektorie nebo pro ochranu sondy před mechanickým poškozením (zavádění přes ostré hrany nebo přes drsné povrchy)



Obrázek 9 Dlouhé tuhé rukávy různého průměru.

Zdroj: Vlastní archív



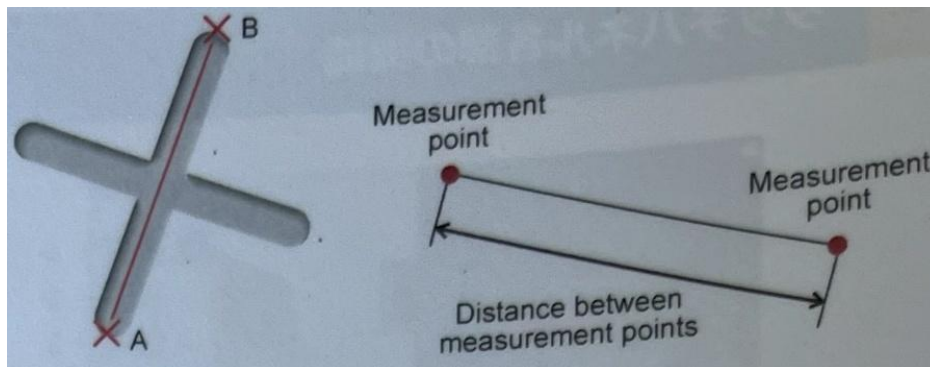
Obrázek 10 Tuhé rukávy pro jednodušší uchopení

Zdroj: Vlastní archív

2.3.3 Měřicí funkce

Videoskop IPLEX NX nabízí různé funkce měření^{12 s. 1-2} pro efektivnější inspekci a rychlejší vyhodnocení. Toto měření se provádí na LCD displeji hlavní jednotky.

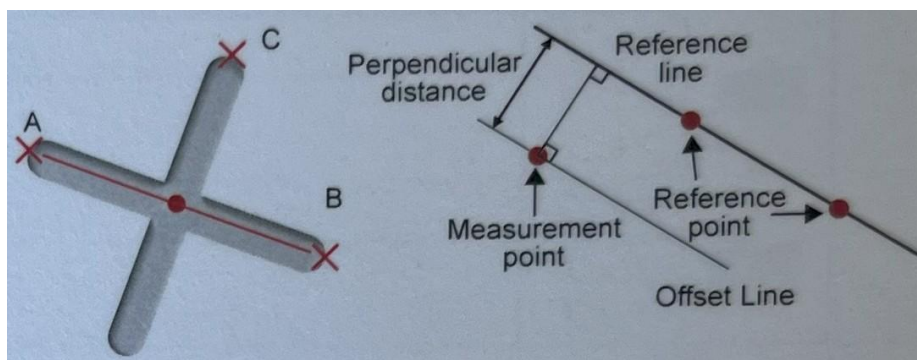
Vzdálenost – měření úseku přímky mezi dvěma měřicími body.



Obrázek 11 Znáznornění měření vzdálenosti

Zdroj: (12)

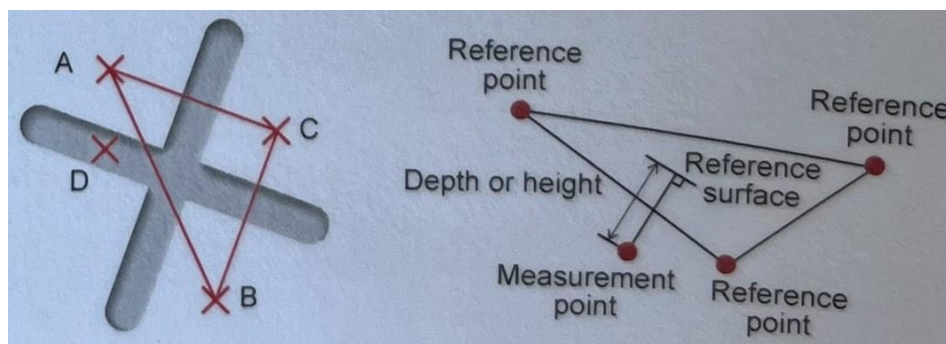
Bod k přímce – měření vzdálenosti mezi měřícím bodem a referenční přímkou určenou dvěma body. Zobrazuje také odsazenou přímku, která prochází měřícím bodem a je rovnoběžná s referenční přímkou.



Obrázek 12 Znáornění měření bodu k přímce

Zdroj: (12)

Hloubka – měření vzdálenosti od měřicího bodu k referenční rovině definované třemi referenčními body.

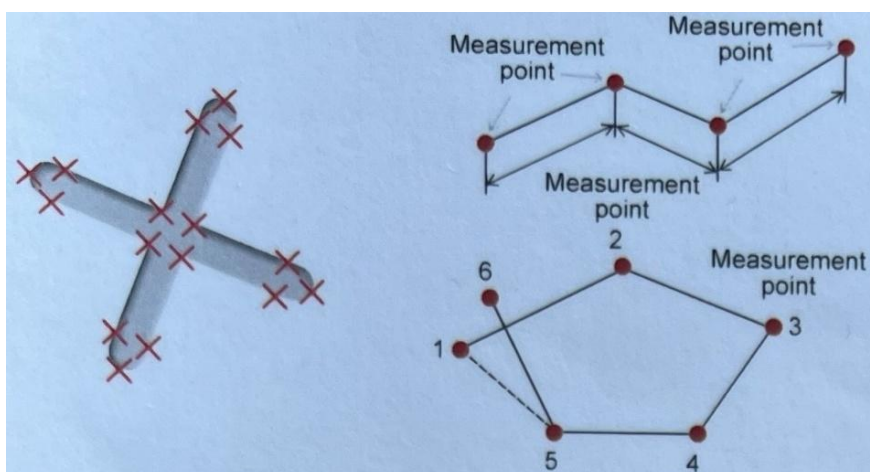


Obrázek 13 Znáornění měření hloubky

Zdroj: (12)

Plocha – měření plochy definované více měřicími body.

Přímky – měření celkové délky čar definovaných více měřicími body.



Obrázek 14 Znáornění měření přímek a plochy

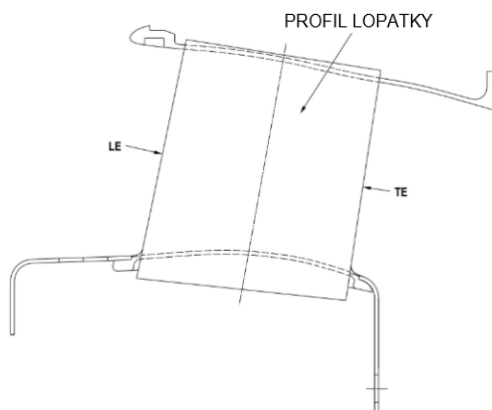
Zdroj: (12)

2.4 Inspekce

Pro každou oblast inspekce je dle údržbového manuálu¹⁰ definován postup a přípustné poškození. Doporučuje se, aby se před provedením boroskopické kontroly provedlo mytí kompresoru.

2.4.1 Vstupní usměrňovací lopatky primárního proudu

Pro provedení inspekce této části zasuneme sondu videoskopu skrz dmychadlo, dokud nejsou vidět vstupní usměrňovací lopatky, poté změním polohu sondy abychom mohli zopakovat inspekci pro všechny lopatky. Pravidla poškození vstupních usměrňovacích jsou uvedena v příloze E.

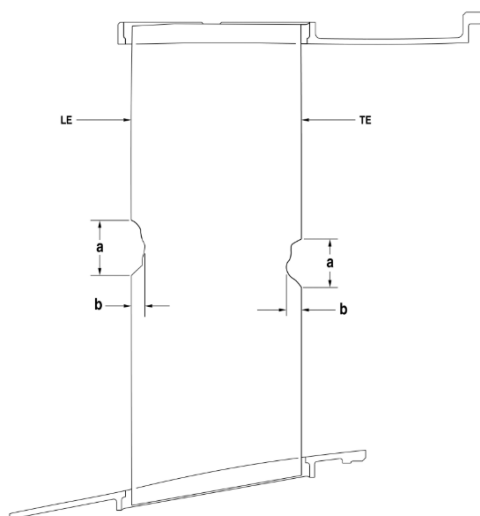


Obrázek 15 Vstupní usměrňovací lopatka

Zdroj: (10)

2.4.2 Výstupní usměrňovací lopatky sekundárního proudu

Inspekce výstupních usměrňovacích lopatek sekundárního proudu je obdobná jako u vstupních usměrňovacích lopatek – zasunutí sondy přes dmychadlo a kontrola všech lopatek. Pravidla poškození výstupních usměrňovacích jsou uvedena v příloze F.

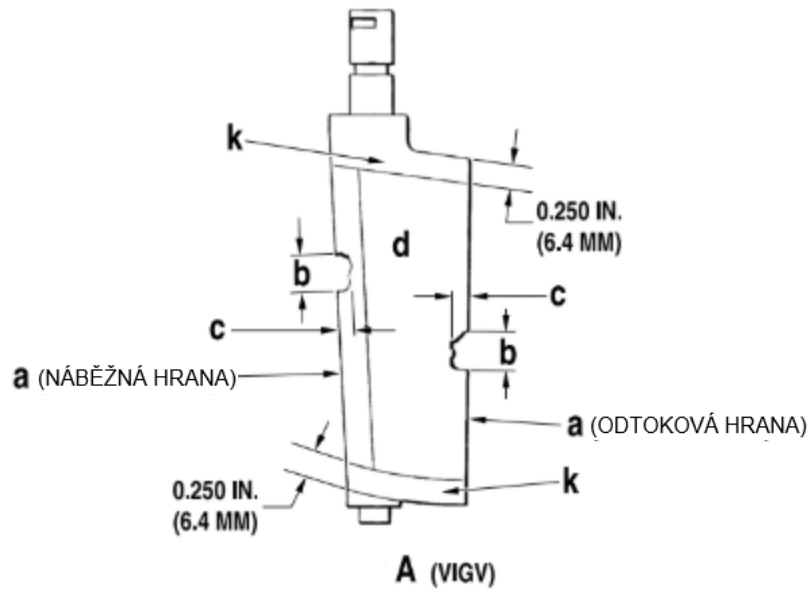


Obrázek 16 Výstupní usměrňovací lopatka

Zdroj: (10)

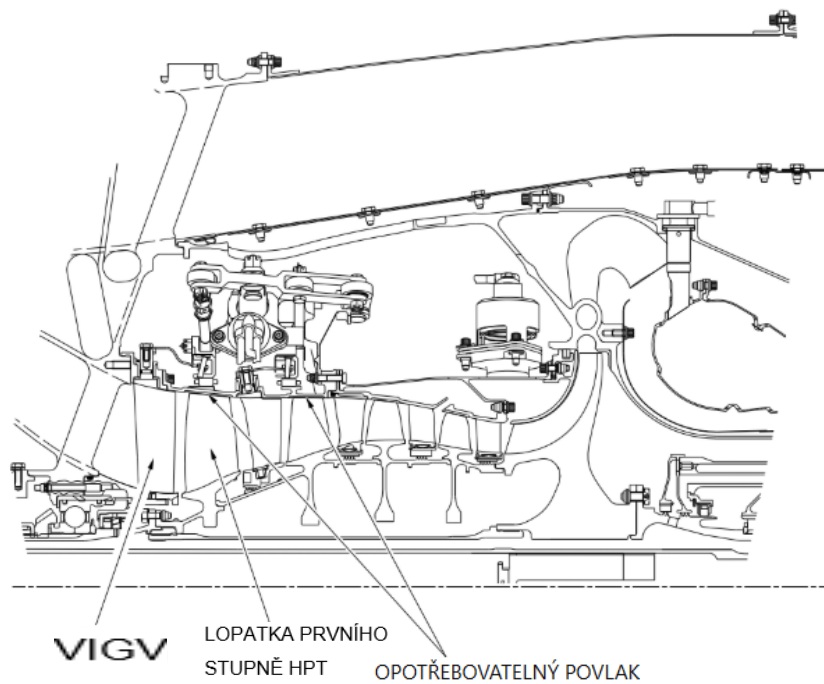
2.4.3 Proměnné vstupní usměrňovací lopatky (VIGV)

Pro inspekci VIGV zasuneme sondu skrz dmychadlo, dokud nejsou vidět proměnné vstupní usměrňovací lopatky (VIGV), poté měníme polohu sondy, dokud nezkontrolujeme všech 29 lopatek. Pravidla poškození VIGV jsou uvedena v příloze G.



Obrázek 17 Proměnná vstupní usměrňovací lopatka (VIGV)

Zdroj: (10)

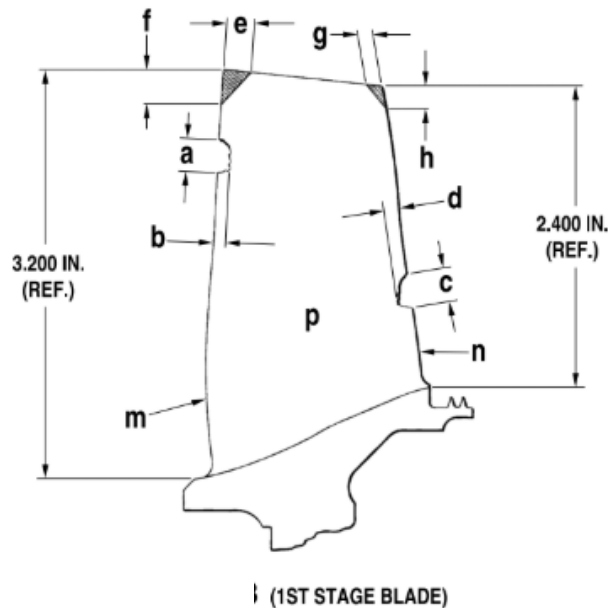


Obrázek 18 VIGV a lopatka prvního stupně HPT

Zdroj: (10)

2.4.4 Lopatky prvního stupně HP kompresoru

Abychom nemuseli pracně měnit polohu sondy pro kontrolu všech 23 lopatek, jako u inspekcí předchozích částí, je možné otáčení vysokotlakého kompresoru a vysokotlaké turbíny deinstalací odstředivého odvodušňovacího výstupu převodovky přidavných zařízení (AGB) a nasazením vhodné ruční kliky s čtyřhranným nástavcem o velikosti ½ palce. Aby nebylo poškozeno kartáčové těsnění, je nutno dodržovat směr otáčení proti směru hodinových ručiček. Pravidla poškození lopatek prvního stupně HP jsou uvedena v příloze H a I.



Obrázek 19 Lopatka prvního stupně HP kompresoru

Zdroj: (10)

Opotřebení obrousitelného povlaku na statorové skříně vysokotlakého kompresoru je považováno za přípustné, pokud motor nevykazuje známky sníženého výkonu:

- Opotřebení v těsnící oblasti rotoru (tzv. „zaběhnutí“) je akceptovatelné pro první a druhý stupeň
- Rýhy a jiné povrchové opotřebení jsou přípustné za předpokladu, že nedošlo k odhalení základního materiálu.
- Odlupování obrousitelného povlaku je rovněž přípustné, pokud základní materiál zůstává neodhalen a celková plocha poškození nepřesahuje 6452–9677 mm² (10-15 in²) nebo 25 % celkové plochy dané oblasti (první a druhý stupeň). Pokud je rozsah poškození větší, je nutné kontaktovat technickou podporu výrobce pro další posouzení a rozhodnutí o způsobilosti
- Výskyt trhlin není přípustný v žádném případě

2.4.5 Lopatky druhého a třetího stupně HP kompresoru

V rámci boroskopické kontroly dle údržbového manuálu motoru PW306C nejsou druhý a třetí stupeň vysokotlakého kompresoru specifikovány k inspekci. Důvodem je pravděpodobně omezený přístup k těmto dvěma stupňům kompresoru z hlediska geometrie motoru nebo nízká pravděpodobnost výskytu závad, které by bylo nutné tímto způsobem ověřovat. Obecně nejsou boroskopické kontroly kompresoru tak časté, jako kontroly spalovací komory a turbínové části.

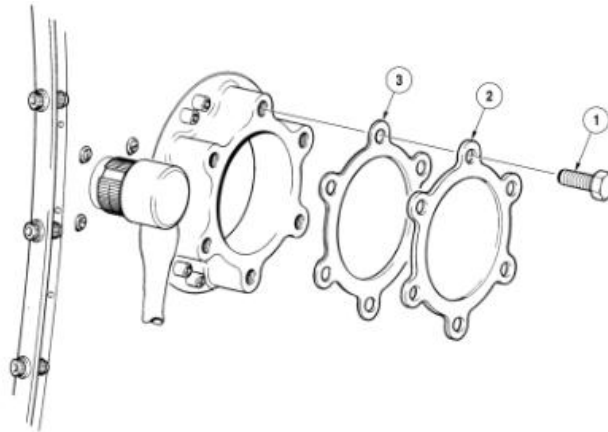
Důvodem pro kontrolu i těchto méně přístupných částí může být např. FOD nebo jiné poruchové stavy jako náhlé změny tahu nebo vibrace. Pokud příčina poruchových stavů nebyla identifikována nebo odstraněna v jiné části motoru (po příslušných inspekcích a motorových testech) a je velká pravděpodobnost výskytu příčiny v těchto nepřístupných částech, je nutno podrobit motor ke kontrole v rámci dílenské opravy nebo generální revize.

Ze schématu motoru (obr. 7) je ale vidět, že přístup k druhému a třetímu stupni HP kompresoru není nemožný. Pokud bychom chtěli tyto části zkontrolovat je možné se dostat k LE druhého a třetího stupně přes vstupní kanál nebo přes k TE druhého stupně přes ventil odběru vzduchu z kompresoru P2.5. Nicméně se sondou uvnitř nemůžeme pomocí ruční kliky otáčet s rotorem kompresoru, protože by byla sonda skřípnuta a zničena otáčejícími se lopatkami prvního stupně (případně třetího u kontroly TE druhého stupně přes ventil odběru vzduchu z kompresoru P2.5). Bylo by nutno sondu po inspekci každé lopatky vyndat a až po otočení zase vložit. Jediná část s relativně snadným přístupem je TE třetího stupně, kde můžeme, pomocí ruční kliky, motorem otáčet i s vloženou sondou, protože sonda prochází jen statorovou částí třetího stupně kompresoru.

2.4.6 Lopatky čtvrtého stupně HP kompresoru

K inspekci této části se instaluje ruční klika (pokud již nebylo učiněno), aby bylo možno otáčet lopatkami. Dále se odšroubuje 6 šroubů, sejmem se kryt a těsnění odfukového otvoru (viz obr. 20). Vložením sondy a postupným otáčením se provede kontrola 39 lopatek tohoto stupně HP kompresoru. Vzhledem ke konstrukci je možné zobrazit pouze LE lopatek. Pravidla poškození lopatek čtvrtého stupně HP kompresoru jsou uvedena v příloze J.

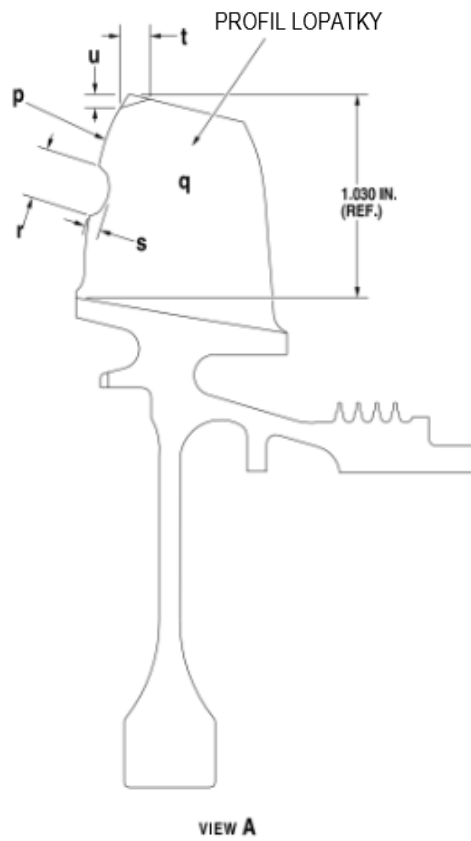
Pro opotřebení obrousitelného povlaku v těsnicí oblasti rotoru čtvrtého stupně jsou podmínky téměř stejné jako u prvního a druhého stupně. Jediný rozdíl je, že není přípustné jakékoli odlupování. Při nálezu je nutno kontaktovat výrobce.



Obrázek 20 Odfukový otvor P2.5

Pozn.: 1 – šroub; 2 – kryt; 3 – těsnění

Zdroj: (10)

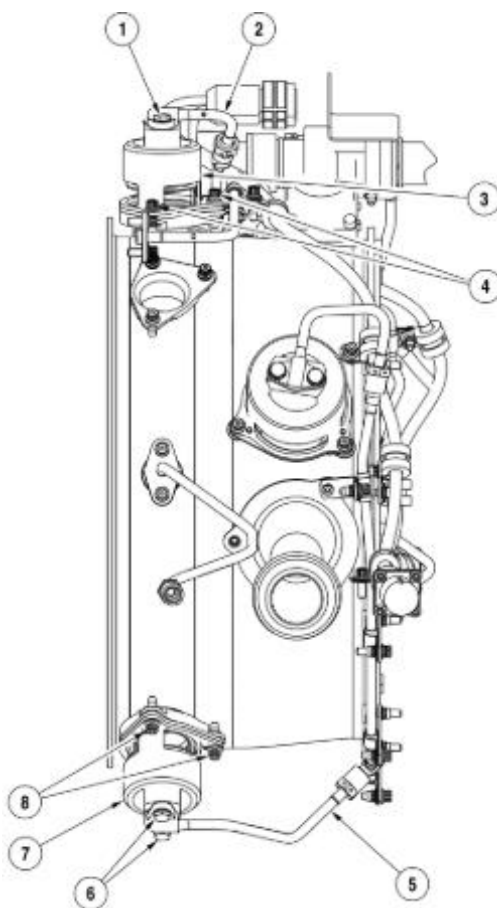


Obrázek 21 Lopatka čtvrtého stupně HP kompresoru

Zdroj: (10)

2.4.7 Kryt oběžného kola radiálního kompresoru (Impeller shroud)

Přístup ke kontrole krytu oběžného kola radiálního kompresoru je možný přes dva odfukové otvory P2.8. Na otvorech jsou nainstalovány odfukové ventily kompresoru (viz obr. 22), které je nutno, dle manuálu, nejprve deinstalovat. Zasunutím sondy se provede kontrola krytu od náběžné hrany po zadní upevňovací přírubu po celém obvodu. Žádné praskliny nejsou povoleny, v případě nálezu je nutná výměna krytu.



Obrázek 22 odfukové ventily kompresoru

Pozn.: 1, 4, 6, 8 – šrouby; 2, 5 – trubky; 3 – horní ventil; 7 – dolní ventil

Zdroj: (10)

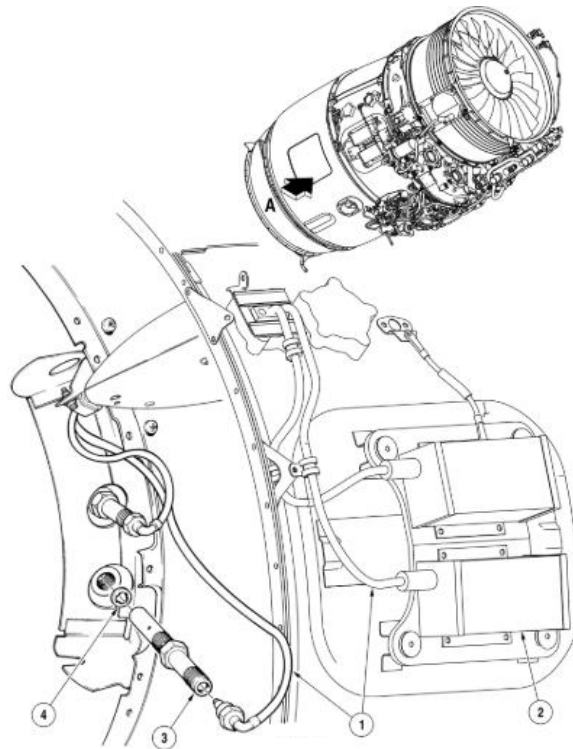
2.4.8 Palivové trysky

Pro inspekci palivových trysek je nutno deinstalovat zapalovací svíčky. Pokud není nutná inspekce obou zapalovacích svíček, stačí pro získání přístupu vyjmout jen jednu.

Je potřeba mít na paměti, že výstupní napětí budicí jednotky zapalování je dostatečně vysoké k tomu, aby způsobilo smrtelný elektrický šok. Zbytkové napětí jednotky může být také nebezpečně vysoké, a proto je nutno se před jakoukoli manipulací ujistit, že zapalování je vypnuto. Nejprve se odpojí napájecí konektor hlavní budicí jednotky, vyčká se minimálně šest

minut, pak se odpojí zapalovací kabel u budící jednotky a dále na zapalovací svíčky (v tomto pořadí). Při demontáži spojovacích matic kabelů je nutno používat izolované nástroje a nedotýkat se výstupních konektorů ani spojovacích matic holýma rukama. Po odpojení zapalovacího kabelu od zapalovací svíčky se deinstaluje zapalovací svíčka s těsněním a zasune se sonda k boroskopické inspekci.

Inspekce 24 palivových trysek se zaměřuje na následující závady:



Obrázek 23 Zapalovací svíčky

Zdroj: (10)

Pozn.: 1 – zapalovací kabel; 2 – hlavní budící jednotka; 3 – zapalovací svíčka; 4 - těsnění

- Usazování uhlíku ovlivňující funkci palivové trysky
- Ucpání trysek
- Tepelné poškození

Pokud je některý z výše uvedených stavů zřejmý, zkontrolují se navazující oblasti. V případě, že nebyly zjištěny další nesrovnalosti., může motor pokračovat v provozu se sníženou frekvencí boroskopické inspekce na 50 provozních hodin.

2.4.9 Vložka spalovací komory

Postup a místo zavedení sondy je stejné jako u palivových trysek – demontáž zapalovací svíčky dle postupu uvedeného v MM (viz kap. 2.4.8 Palivové trysky)

Pro nálezy jsou definovány různé postupy:

Následující podmínky jsou přijatelné pro pokračování v provozu s následnou boroskopickou kontrolou v pravidelných intervalech (tento interval není definován, je určen v závislosti na rychlosti postupu poškození nebo zhoršení stavu):

- Ztráta plazmového povlaku
- Nesbíhající se praskliny ve stěnách vložky spalovací komory
- Praskliny v okolí palivových trysek nebo zapalovacích svíček, které nepřesahují 180 stupňů
- Trhliny v chladicím prstenci, které tvoří uzavřený (souvislý) vzor
- Trhliny podél svarových spojů chladicího prstence, které nepřesahují délku 152,4 mm 6,0 in

Přijatelné podmínky pro pokračování v provozu s opakovanou inspekcí postiženého místa nebo míst před dosažením nejdéle 1200 FH:

- Sbíhající se nebo otevřené trhliny ve stěnách vložky spalovací komory
 - Otevřené trhliny ve stěně vložky spalovací komory, nacházející se mezi montážními body zapalovacích svíček a palivových trysek, mohou ovlivnit startovací charakteristiky motoru. Pokud nedojde k včasnému zážehu nebo je doba při snížení výkonu do volnoběhu příliš dlouhá, je nutná demontáž motoru
- Trhliny ve svarových spojích chladicího prstence, které jsou delší než 152,4 mm (6,0 in), ale kratší než 304,8 mm (12 in)
- Vyboulení stěny vložky spalovací komory a/nebo místa nadměrného tepelného namáhání (tepelné skvrny)
- Úbytek materiálů na thumbnail bandu způsobené oxidací
 - Thumbnail band představuje chladicí pruh s otvory (viz obr. 24)

Přijatelné podmínky pro pokračování v provozu s opakovanou inspekcí postiženého místa nebo míst před dosažením nejdéle 800 FH:

- Axiální trhliny spojené s úbytkem materiálů na thumbnail bandu, způsobené oxidací, trhliny nesmí zasahovat za vnější řadu chladicích otvorů v-pásu

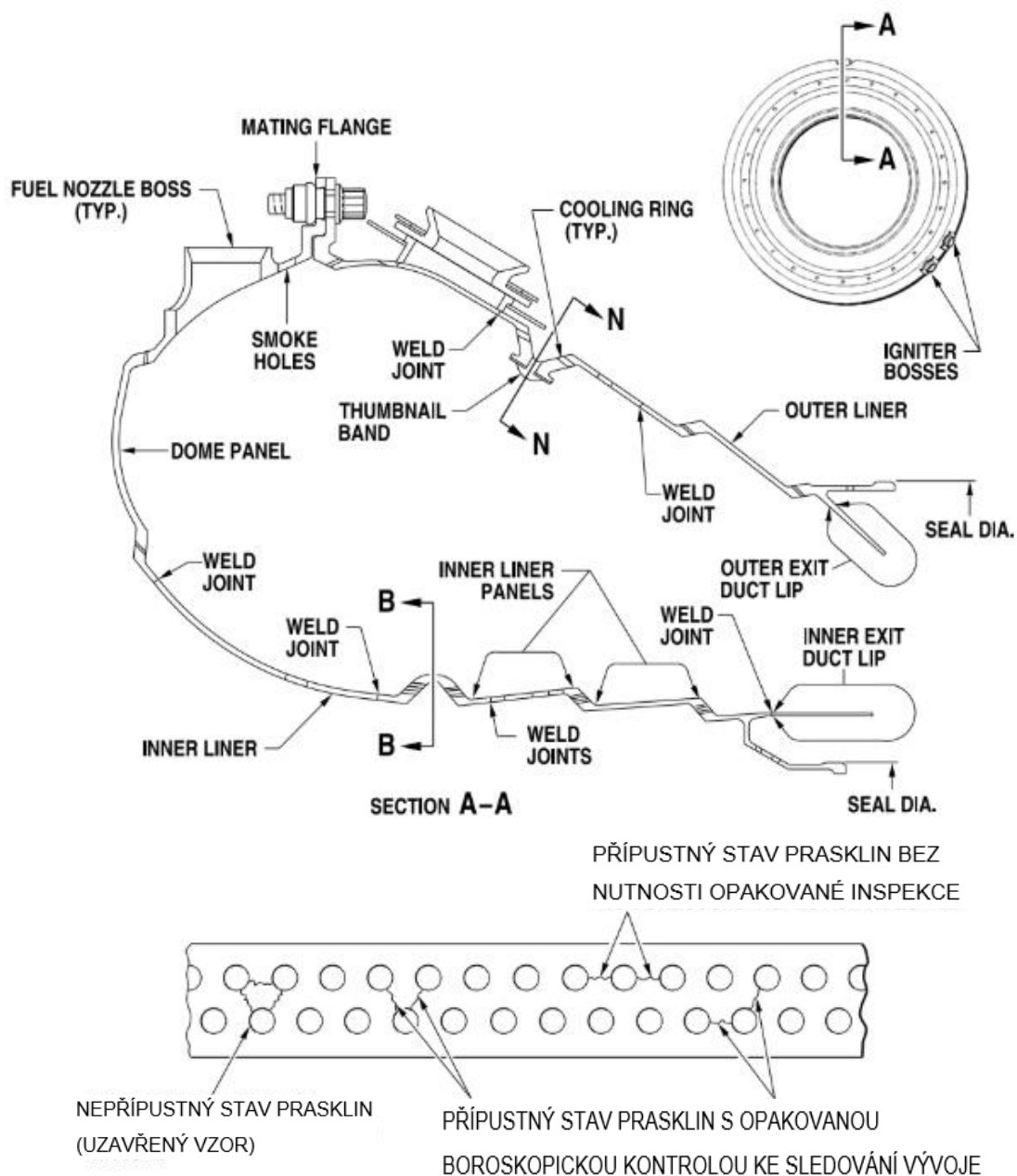
- Axiální trhliny spojené s úbytkem materiálů na thumbnail bandu, způsobené oxidací, které překračují šířku v-pásu nebo se šíří z otvoru uprostřed pásu k jeho okraji – tyto dva defekty musí být od sebe odděleny minimálně čtyřmi chladicími otvory
- Axiální trhliny spojené s úbytkem materiálů na thumbnail bandu, způsobené oxidací, které se nesmí šířit tak, aby propojily více než tři chladicí otvory v uzavřeném vzoru

Přijatelné podmínky pro pokračování v provozu s opakovanou inspekcí postiženého místa nebo míst před dosažením nejdéle 400 FH:

- Úbytek materiálu na zadní hraně výstupního okraje vnitřní vložky spalovací komory (inner exit duct lip – viz obr. 24) do axiální délky 5,08 mm (0,20 in) s jakoukoli obvodovou délkou
- Úbytek materiálu mimo zadní hranu na výstupním okraji vnitřní vložky spalovací komory (inner exit duct lip) do axiální délky 12,7 mm (0,5 in) a do obvodové délky 12,7 mm (0,5 in)

Podmínky vyžadující demontáž motoru do 100 FH za účelem výměny vložky spalovací komory:

- Otvory ve stěnách spalovací vložky na jiném místě, než na vnitřních panelech vložky (inner liner panels) nebo na vnitřním výstupním okraji vložky (inner exit duct lip)
- Otvory na vnitřních panelech vložky (inner liner panels) s průměrem přesahující 5,175 mm (0,225 in)
- Úbytek materiálu na zadní hraně výstupního okraje vnitřní vložky spalovací komory (inner exit duct lip) přesahující axiální délku 5,08 mm (0,20 in) s jakoukoli obvodovou délkou nebo přesahující axiální délku 12,7 mm (0,5 in) a obvodovou délku 12,7 mm (0,5 in)
- Otvory v chladicích prstencích, způsobené úbytkem materiálu v důsledku oxidace/spálení, otevírající se trhliny nebo sbíhající se trhliny tvořící uzavřený vzor
- Praskliny ve svárech chladicího prstence delší než 304,8 mm (12,0 in)
- Úbytek materiálu na thumbnail bandu, způsobené oxidací, spojené s vícenásobnými trhlinami šířícími se do chladicího prstence



Obrázek 24 Vložka spalovací komory

Zdroj: (10)

2.4.10 Statorová část prvního stupně HP turbíny

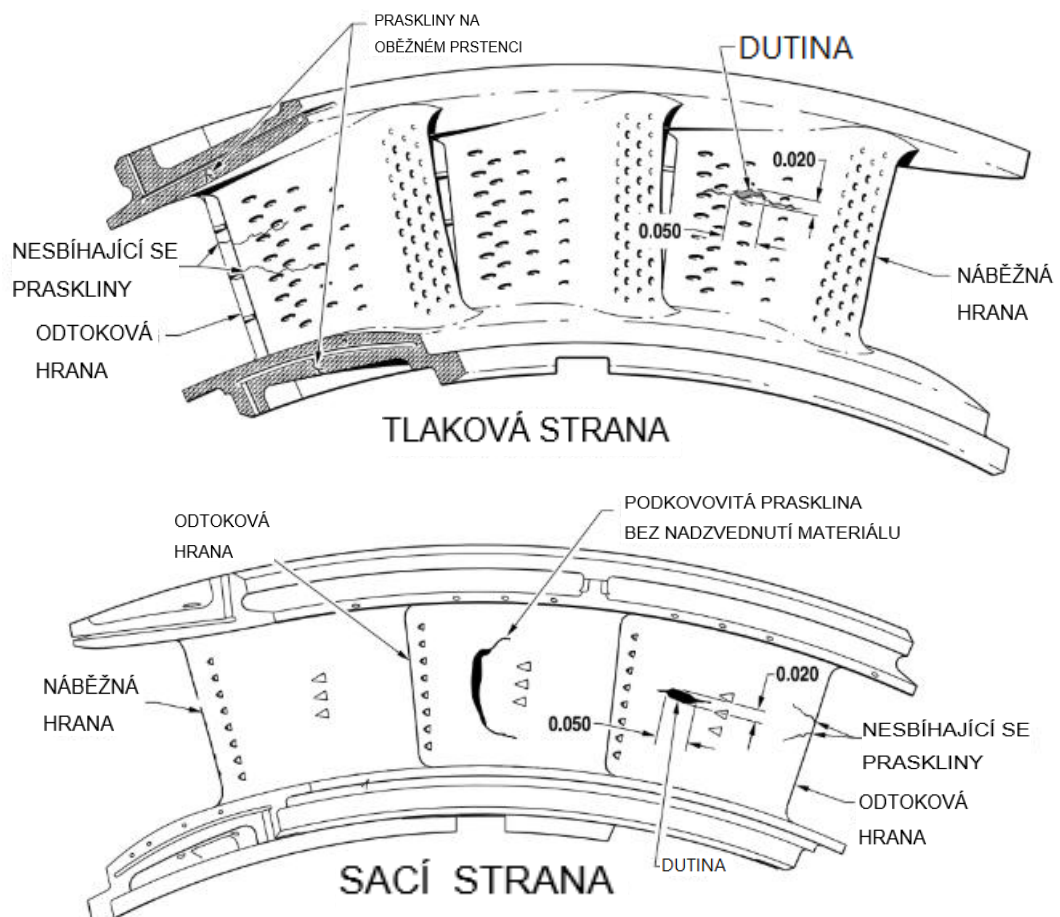
Statorové lopatky prvního stupně HP turbíny jsou uspořádány do segmentů – obloukovitých dílů obsahujících více lopatek, které jsou složeny do úplného prstence. K těmto segmentům se dostaneme deinstalací zapalovací svíčky jako v kapitole 2.4.8 a 2.4.9.

Sonda musí směřovat k přední části motoru směrem dolů pod úhlem 30° až 45°. Poté se sonda vloží do přístupového bodu a ve chvíli, kdy je vidět LE lopatek prvního segmentu, se pečlivě

provede kontrola a postupně se sonda posouvá proti směru hodinových ručiček, aby bylo možno zkontrolovat co nejvíce lopatek. Poté se sonda vyndá a natočí se, aby směřovala pod úhlem 10° až 15° k přední části motoru směrem nahoru. Až sonda po vložení narazí na LE zasune se distální konec mezi dvě nejbližší lopatky. Postupně se sondou posouvá po směru hodinových ručiček a otáčí její osou, přičemž se kontroluje sací plocha lopatek HPT a shroud segmenty (prstencové obruče, které tvoří obvodové stěny kolem statorových lopatek a jsou s nimi spojeny) statorové části. Takto se postupuje, dokud není provedena kontrola celé části.

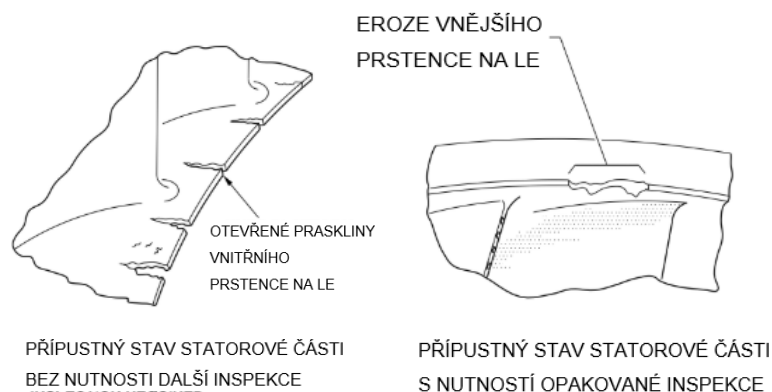
Podmínky přijatelné pro pokračování v provozu s následnou boroskopickou kontrolou v pravidelných intervalech (dle stavu a postupu nálezu):

- Nesbíhající se praskliny na těle lopatky nebo vnějším/vnitřním shroud segmentu
- Praskliny na sací straně plochy lopatek bez odtržení plochy profilu
- Otevřené praskliny na TE vnějšího a vnitřního shroud segmentu
- Eroze LE lopatek bez známek úbytku materiálu



Obrázek 25 Příklad nálezů na statorové části prvního stupně HPT (část a)

Zdroj: (10)

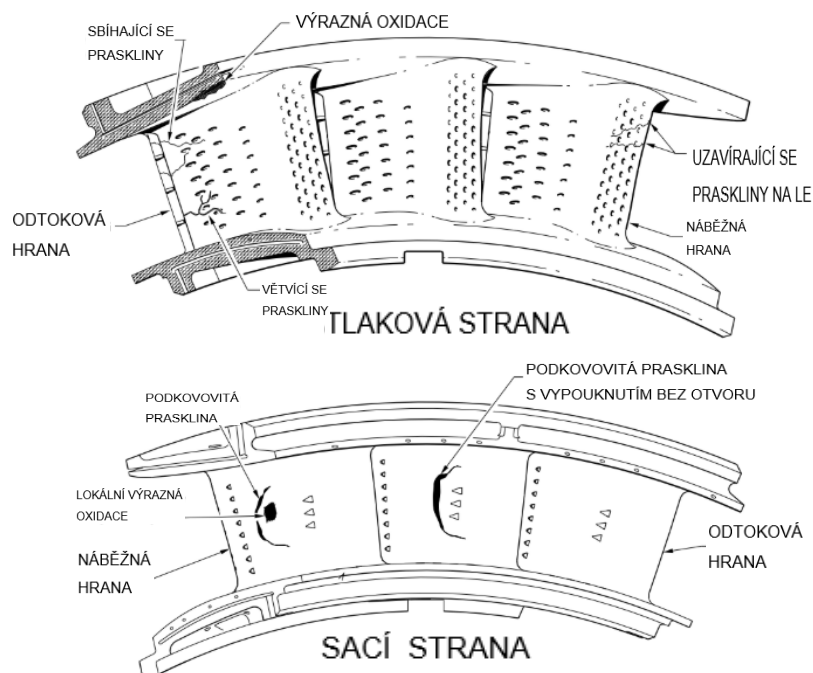


Obrázek 26 Příklad nálezů na statorové části prvního stupně HPT (část b)

Zdroj: (10)

Přijatelné podmínky pro pokračování v provozu s opakovanou inspekcí postiženého místa nebo míst před dosažením nejdéle 1200 FH:

- Praskliny, které se sbíhají, větví, jsou otevřené a/nebo tvoří kruhový vzor
- Praskliny na sací straně plochy lopatek s náznaky odtržení plochy profilu, ale bez otvoru
- Lokální silná oxidace a/nebo eroze s úbytkem materiálu, která neodhaluje vnitřní dutinu lopatky
- Lokální silná oxidace a/nebo eroze s úbytkem materiálu na vnějším a vnitřním shroud segmentu mezi segmenty lopatek

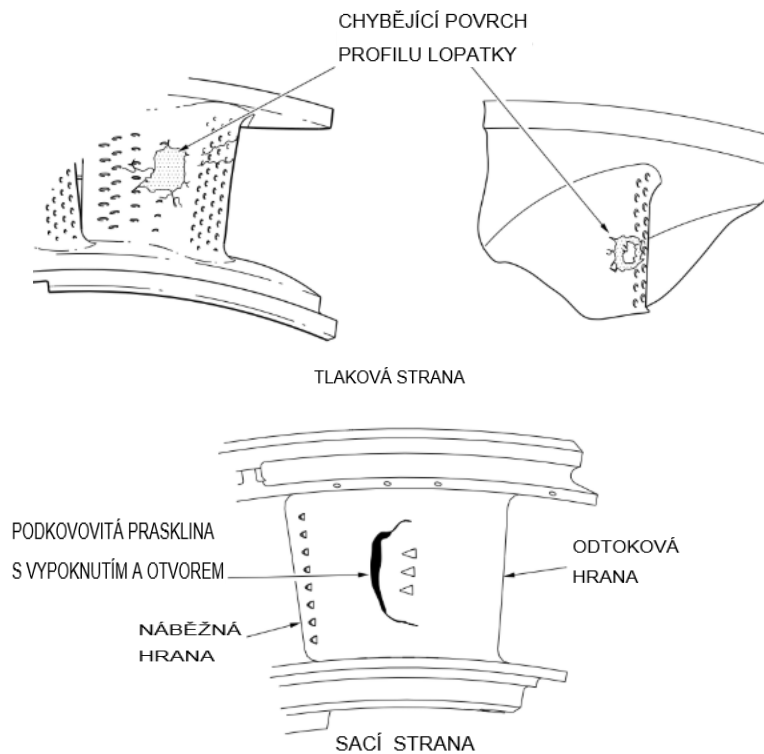


Obrázek 27 Příklad nálezů na statorové části prvního stupně HPT (část c)

Zdroj: (10)

Přijatelné podmínky pro pokračování v provozu s opakovanou inspekcí postiženého místa nebo míst před dosažením nejdéle 200 FH:

- Otvory na profilu lopatky odhalující vnitřní dutinu
- Praskliny na sací straně plochy lopatek s odtržením plochy profilu a vytvořeným otvorem
 - Díra a/nebo silná oxidace na jedné nebo dvou sousedních lopátkách statoru prvního stupně HPT může být způsobena poškozenou palivovou tryskou. Doporučuje se, aby byly palivové trysky podrobeny kontrole

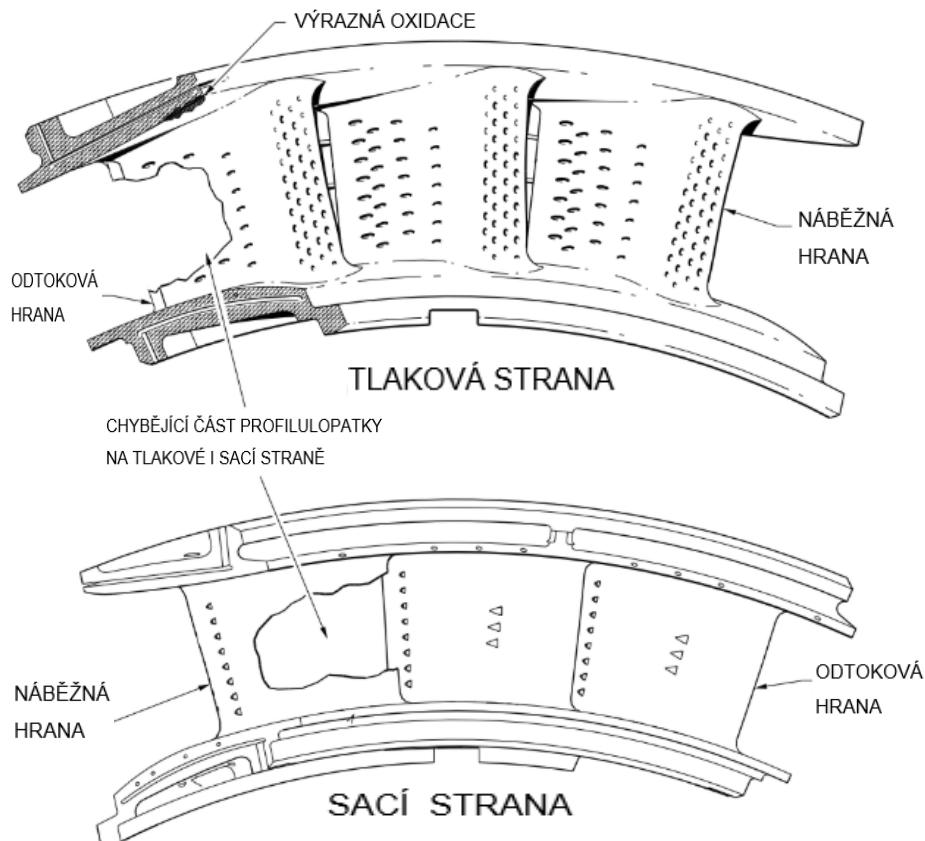


Obrázek 28 Příklad nálezů na statorové části prvního stupně HPT (část d)

Zdroj: (10)

Podmínky vyžadující demontáž motoru do 100 FH za účelem výměny prvního statorového stupně HPT:

- Ztráta části profilu lopatky a/nebo části TE vnějšího/vnitřního shroud segmentu
- Silná oxidace a/nebo eroze s úbytkem materiálu po celé délce vnějšího a/nebo vnitřního shroud segmentu mezi segmenty lopatek



Obrázek 29 Příklad nálezů na statorové části prvního stupně HPT (část e)

Zdroj: (10)

2.4.11 Stínící prstenec (shroud segment) rotorové části prvního stupně HP turbíny

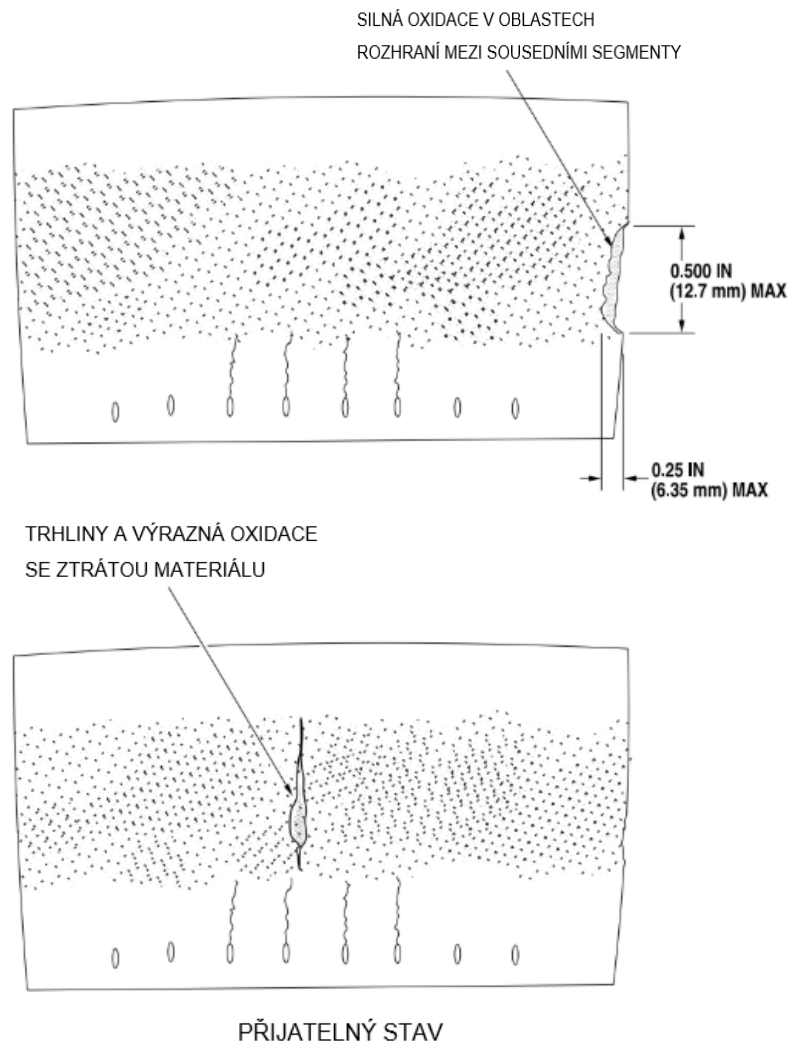
I přesto, že se shroud segment se nachází jak na statorové části, tak na rotorové části turbín, je nutno si uvědomit, že tyto části jsou rozdílné. Shroud segment, v kontextu rotorových lopatek turbíny, je obvodový prvek umístěný na koncích rotorových lopatek (na jejich špičkách), který utěšňuje mezeru mezi rotorovými lopatkami a skříní turbíny. Funguje jako takové těsnění, zatímco u statorové části se jedná o obvodový rám zajišťující pevnost struktury. Toto těsnění je rozděleno na více částí (samostatných segmentů), které pospolu tvoří prstenec.

Přístupovým bodem pro inspekci shroud segmentu rotorové části prvního stupně HPT je příruba zapalovací svíčky.

Podmínky přijatelné pro pokračování v provozu s následnou boroskopickou kontrolou v pravidelných intervalech (dle stavu a postupu nálezů):

- Eroze a/nebo oxidace vnitřního povrchu shroud segmentu
- Praskliny na vnitřním povrchu

- Eroze a/nebo oxidace shroud segmentu mezi spojujícími se sousedními částmi s šířkou menší než 6,35 mm (0,25 in) a délkou menší než 12,7 mm (0,5 in)
- Zkroucení nebo odchlípnutí okrajů shroud segmentu s šířkou menší než 6,35 mm (0,25 in) a délkou menší než 12,7 mm (0,5 in)

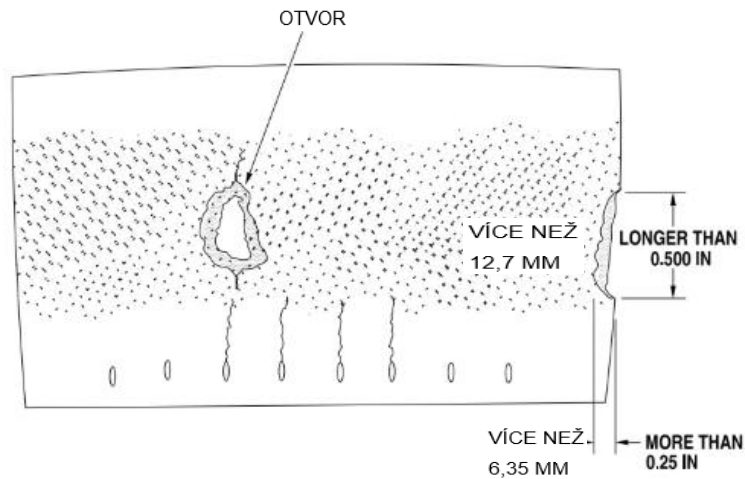


Obrázek 30 Příklad přijatelných nálezů na shroud segmentu rotorové části

Zdroj: (10)

Podmínky vyžadující demontáž motoru do 100 FH za účelem výměny shroud segmentu rotorové části prvního stupně HPT:

- Otvory na shroud segmentu způsobené silnou oxidací a praskáním
- Eroze a/nebo oxidace shroud segmentu mezi spojujícími se sousedními částmi s šířkou větší než 6,35 mm (0,25 in) a délkou větší než 12,7 mm (0,5 in)



Obrázek 31 Příklad nepřijatelných nálezů na shroud segmentu rotorové části

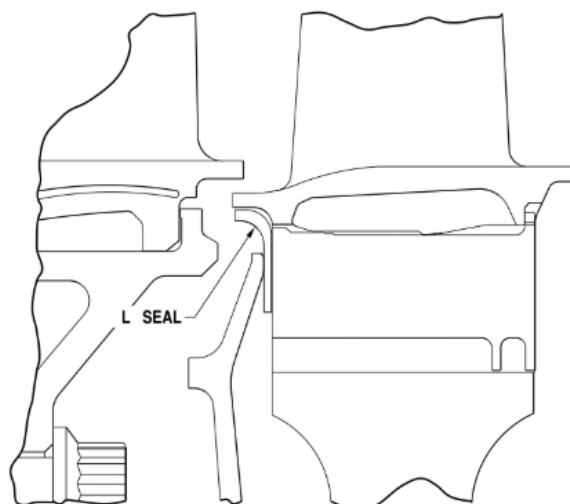
Zdroj: (10)

2.4.12 Lopatky rotoru prvního stupně HPT

Pro inspekci lopatek rotoru prvního stupně HPT sondu vsuneme přes přírubu zapalovací svíčky. K inspekci této části můžeme použít ruční kliku na otáčení rotoru (viz kap. 2.4.4).

U kontroly lopatek rotoru prvního stupně HPT se nejdříve zaměřuje na těsnění ve tvaru L (L seal), které se nachází mezi statorovou a rotorovou částí prvního stupně HPT. K těsnění se dostaneme po vsunutí sondy přes statorovou část prvního stupně HPT.

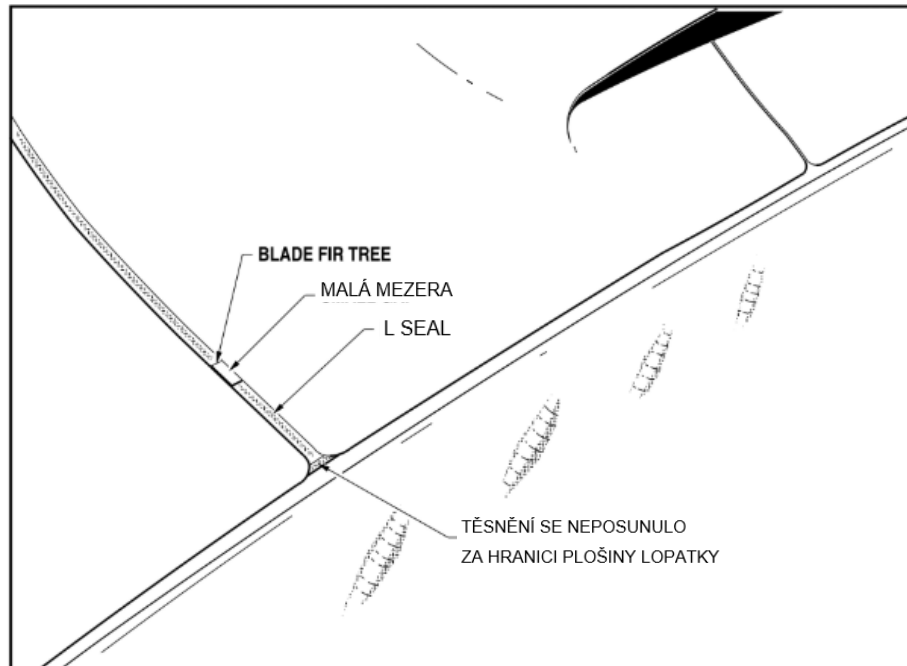
- L seal by mělo být viditelné mezerou mezi lopátkovými plošinami prvního stupně HPT a mělo by být upevněno na přední straně rotoru prvního stupně HPT pomocí čelní krycí desky



Obrázek 32 čelní kryt, těsnění tvaru L a rotor turbíny HP

Zdroj: (10)

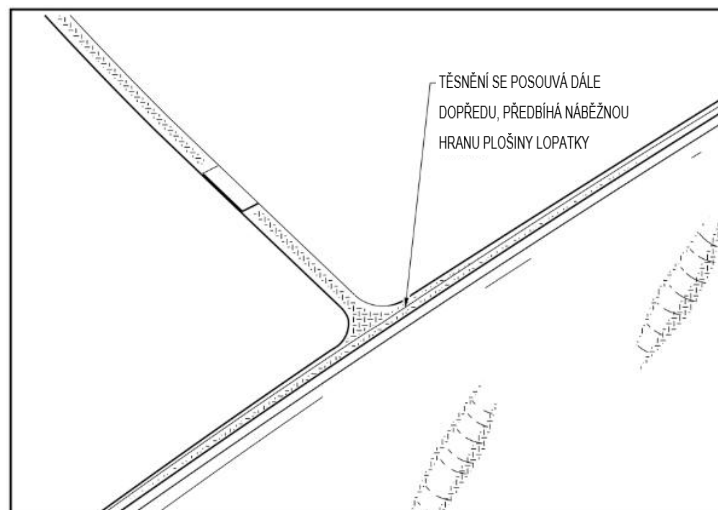
- Je přípustné, aby těsnění bylo umístěno tak, že jeho přední hrana lícuje s přední hranou plošin lopatek prvního stupně HPT



Obrázek 33 Příjemné umístění těsnění tvaru L

Zdroj: (10)

- Není přípustné, aby přední hrana těsnění vyčnívala do plošin lopatek vysokotlaké turbíny v jakékoli části obvodu rotoru. V tomto případě musí být motor vyřazen z provozu do 50 FH



Obrázek 34 Nepříjemné (posunutě) umístění těsnění tvaru L

Zdroj: (10)

- Pokud má těsnění viditelné trhliny nebo chybějící část je nutno motor vyřadit z provozu

Po kontrole těsnění tvaru L se přejde na rotorové lopatky.

Podmínky přijatelné pro pokračování v provozu s následnou boroskopickou kontrolou v pravidelných intervalech (dle stavu a postupu nálezu):

- Nesbíhající praskliny na špičkách lopatek
- Oxidace a/nebo odření na špičkách lopatek bez úbytku materiálu
- Ztráta keramického povlaku, či oxidace bez úbytku materiálu na LE a/nebo povrchu lopatky
- Eroze LE
- Praskliny na sací straně plošiny lopatky, které nezasahují do zaoblení (rádiusu přechodu)
- Oxidace plošiny TE bez měřitelného úbytku materiálu

Přijatelné podmínky pro pokračování v provozu s opakovanou inspekcí postiženého místa nebo míst před dosažením nejdéle 200 FH nebo 200 cyklů (dle toho, co nastane dříve):

- Ztráta keramického povlaku na LE s výraznou oxidací spojenou s úbytkem materiálu, pokud nedochází k odkrytí vnitřní dutiny lopatky a chladicí otvory v postižené oblasti nejsou ucpané
- Otevřené trhliny na špičce lopatky, výrazná oxidace a/nebo eroze s úbytkem materiálu, která však neodhaluje vnitřní dutinu lopatky
- Lokální ztráta keramického povlaku a oxidace na tlakové straně lopatky, obvykle začínající na špičce ve tvaru písmene V a vycentrovaná na svislé řadě chladicích otvorů, bez ztráty základního materiálu a bez deformace nebo částečného ucpání chladicích otvorů
- Trhliny v plošině lopatky zasahující do profilu lopatky až po úroveň nejnižšího chladicího otvoru na LE, avšak tuto úroveň nepřesahující
- Oxidace plošiny lopatky na TE s úbytkem materiálu, která nepřesahuje 5,08 mm (0,20 in) od okraje plošiny
- Svislé trhliny spojující až tři chladicí otvory ve svislé řadě chladicích otvorů

Přijatelné podmínky pro pokračování v provozu s opakovanou inspekcí postiženého místa nebo míst před dosažením nejdéle 100 FH nebo 100 cyklů (dle toho, co nastane dříve):

- Lokální ztráta keramického povlaku a výrazná oxidace na LE spojená s deformací a/nebo částečným ucpáním chladicích otvorů a s úbytkem materiálu, která však neodhaluje vnitřní dutinu lopatky

- Lokální ztráta keramického povlaku a výrazná oxidace na tlakové straně lopatky, obvykle začínající na špičce ve tvaru písmene V a vycentrovaná na svislé řadě chladicích otvorů, doprovázená erozí, úbytkem základního materiálu a deformací a/nebo částečným ucpáním chladicích otvorů
- Axiální trhliny kratší než 0,76 mm (0,03 in) na tlakové nebo sací straně profilu lopatky, které vznikají v jednom z chladicích otvorů ve svislé řadě a šíří se směrem k LE. Trhliny se mohou nacházet buď na tlakové, nebo na sací straně, ale ne současně na obou stranách
- Svislé trhliny spojující čtyři nebo více chladicích otvorů ve svislé řadě chladicích otvorů

Přijatelné podmínky pro pokračování v provozu s opakovanou inspekcí postiženého místa nebo míst před dosažením nejdéle 50 FH nebo 50 cyklů (dle toho, co nastane dříve):

- Axiální trhliny kratší než 1,27 mm (0,05 in) na tlakové nebo sací straně profilu lopatky, které vznikají v jednom z chladicích otvorů ve svislé řadě a šíří se směrem k LE. Trhliny se mohou vyskytovat buď na tlakové straně, nebo na sací straně, ale ne současně na obou stranách
- Axiální trhliny delší než 0,76 mm (0,03 in), ale kratší než 1,27 mm (0,05 in) na tlakové nebo sací straně profilu lopatky, avšak ne současně na obou stranách
- Axiální trhliny kratší než 0,76 mm (0,03 in) na tlakové i sací straně profilu lopatky

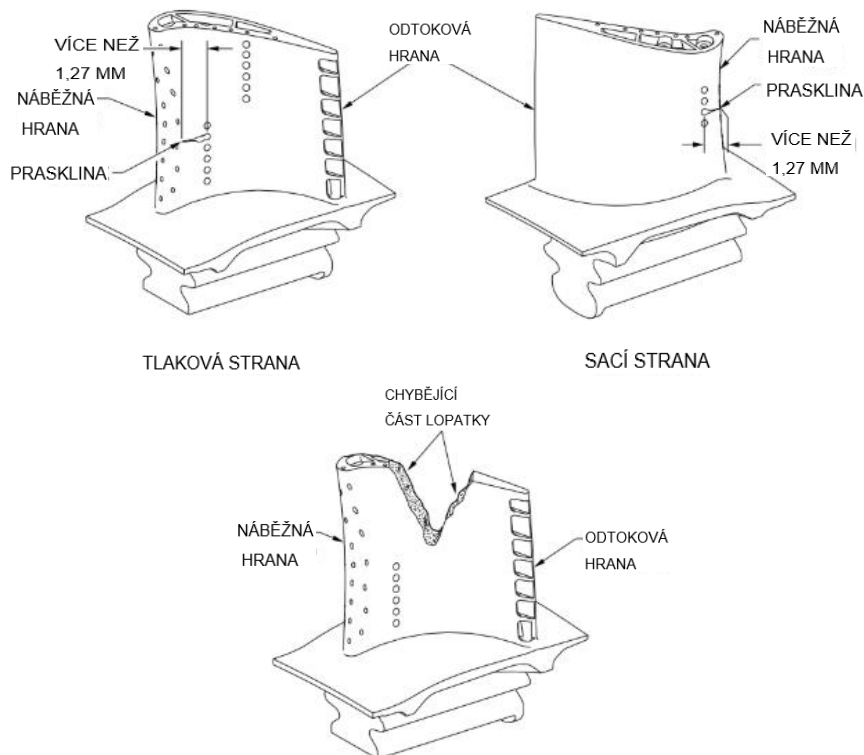
Podmínky vyžadující demontáž motoru do 50 FH za účelem výměny lopatek rotoru prvního stupně HPT:

- Výrazná oxidace na LE spojená se ztrátou materiálu, která odhaluje vnitřní dutinu lopatky
- Otevřené trhliny na špičce lopatky, výrazná oxidace a/nebo eroze se ztrátou materiálu, která odhaluje vnitřní dutinu lopatky
- Otvory v jiných částech profilu lopatky odhalující vnitřní dutinu lopatky
- Trhliny v plošině lopatky zasahující do profilu lopatky a přesahující úroveň nejnižšího chladicího otvoru na LE
- Chybějící materiál plošiny lopatky na straně LE nebo úbytek přesahující 5,08 mm (0,20 in) na straně TE

Podmínky vyžadující okamžitou demontáž motoru:

- Axiální trhliny na profilu lopatky, které vznikají v oblasti chladicích otvorů, přesahující 1,27 mm (0,05 in) délky

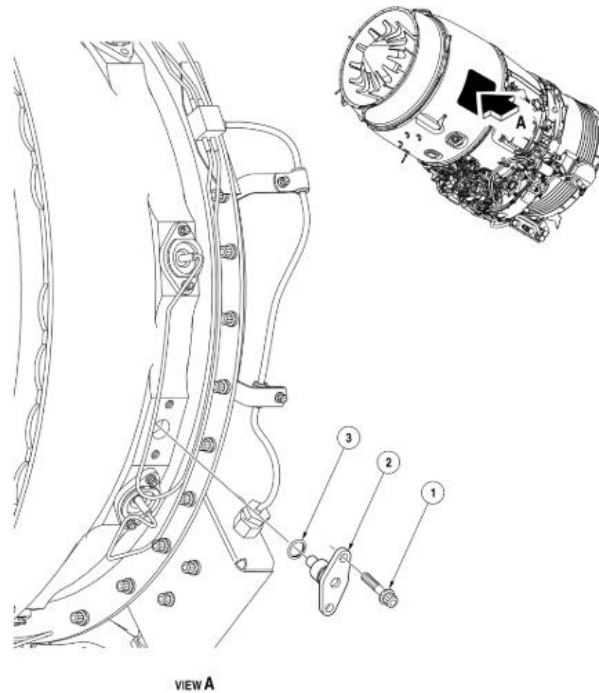
- Trhliny libovolné délky na profilu lopatky, které vznikají v oblasti chladicích otvorů na tlakové i sací straně
- Lopatky s chybějícími částmi profilu
- Lopatky s uvedeným poškozením na tlakové straně:
 - Radiální trhlina přesahující délku 10,16 mm (0,40 in) nebo zasahující až k některému okraji profilu lopatky
 - Deformovaný materiál nebo nadzvednutý povrch vytvářející schod na profilu lopatky
 - Ztráta materiálu lopatky odhalující vnitřní dutinu
 - Sbíhající se nebo větvcí se trhliny



Obrázek 35 Příklad nálezů na lopatkách prvního stupně HPT

Zdroj: (10)

2.4.13 Lopatky rotoru druhého stupně HPT



Obrázek 36 Zaslepovací zátka boroskopického otvoru

Zdroj: (10)

Pro přístup do oblasti druhého stupně HPT a třetího stupně LPT je nutno nejprve deinstalovat zaslepovací zátka boroskopického otvoru na zadní části skříně motoru. Zátka je upevněna dvěma šrouby (viz obr. 36). Pro usnadnění práce je možno opět nainstalovat ruční kliku pro otáčení rotorem (viz kap. 2.4.4).

Podmínky přijatelné pro pokračování v provozu s následnou boroskopickou kontrolou v pravidelných intervalech (dle stavu a postupu nálezu):

- Oxidace a/nebo otěr na špičce lopatky
- Lokální ztráta keramického povlaku na LE a/nebo profilu lopatky

Přijatelné podmínky pro pokračování v provozu s opakovanou inspekcí postiženého místa nebo míst před dosažením nejdéle 1200 FH:

- Výrazná oxidace na náběžné hraně spojená s úbytkem materiálu
- Trhliny na špičce lopatky, výrazná oxidace a/nebo eroze spojená s úbytkem materiálu
- Puchýře na profilu lopatky způsobené korozi nebo sulfidací

Přijatelné podmínky pro pokračování v provozu s opakovanou inspekcí postiženého místa nebo míst před dosažením nejdéle 430 FH:

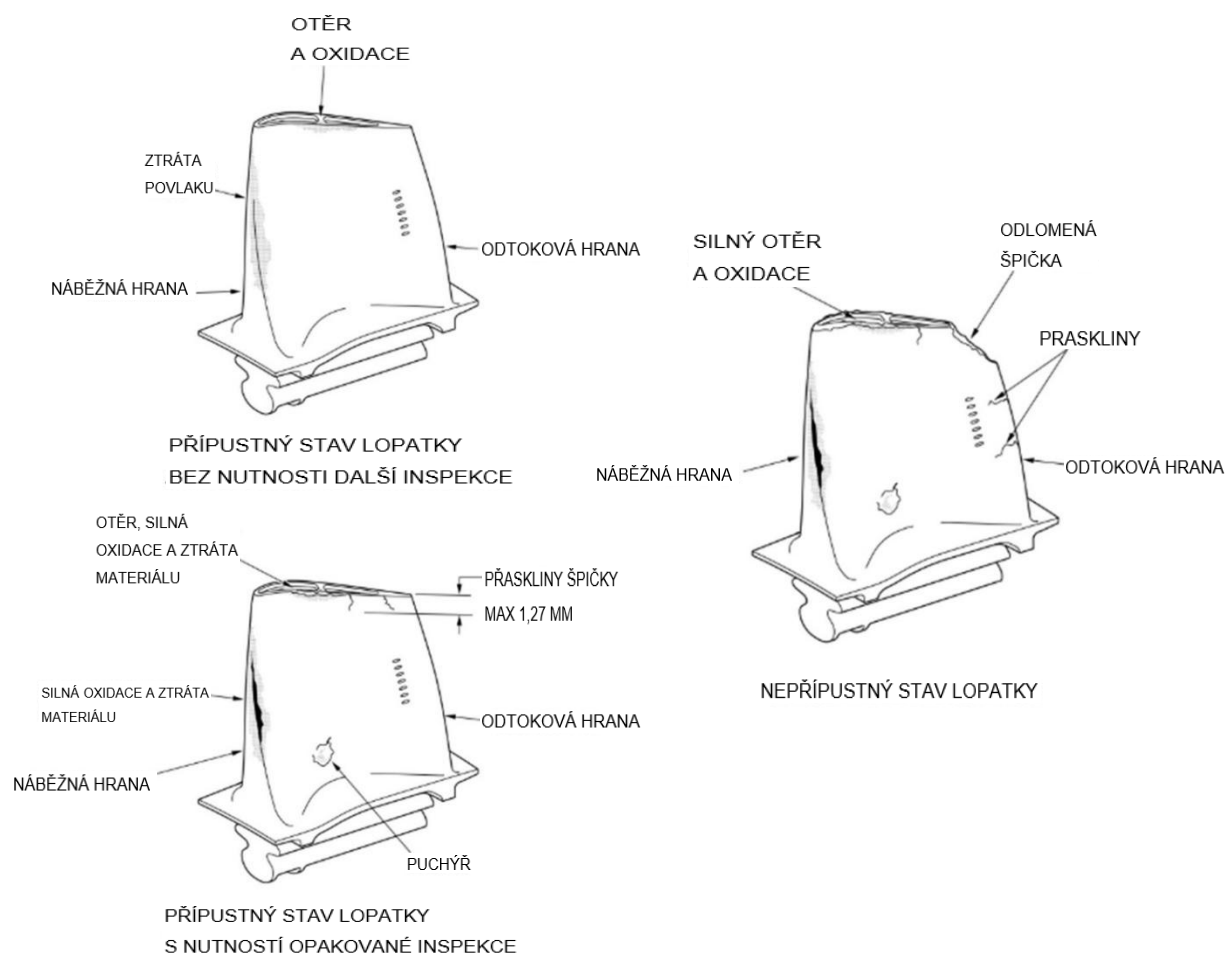
- Trhlina, která začíná z chladicího otvoru ve spodních čtyřech řadách od LE
- Ztráta materiálu na tlakové a/nebo sací straně plošiny lopatky

Podmínky vyžadující demontáž motoru do 50 FH za účelem výměny lopatek rotoru druhého stupně HPT:

- Trhliny na sací straně profilu lopatky
- Odštipnutá špička lopatky na TE
- Otevřené trhliny na špičce lopatky, výrazná oxidace a/nebo eroze s úbytkem materiálu, která odhaluje vnitřní dutinu lopatky
- Trhliny, které se šíří z chladicího otvoru směrem skrz otvor (pronikající trhlina)

Podmínky vyžadující okamžitou demontáž motoru:

- Trhliny, které spojují dva nebo více chladicích otvorů



Obrázek 37 Možné nálezy na lopatkách rotoru druhého stupně HPT

Zdroj: (10)

2.4.14 Stínící prstenec (shroud segment) rotorové části druhého stupně HP turbíny

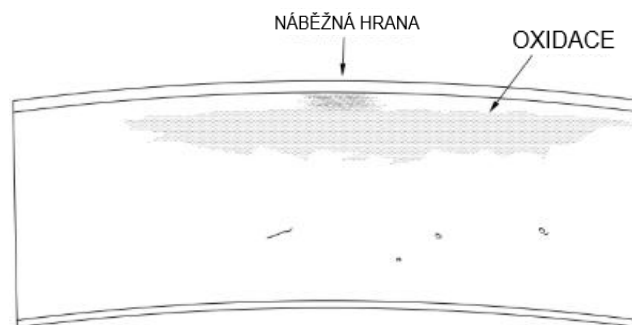
Shroud segment druhého stupně HPT je přístupný ze stejného bodu jako rotorové lopatky druhého stupně HPT (viz kap. 2.4.13).

Podmínky přijatelné pro pokračování v provozu s následnou boroskopickou kontrolou v pravidelných intervalech (dle stavu a postupu nálezu):

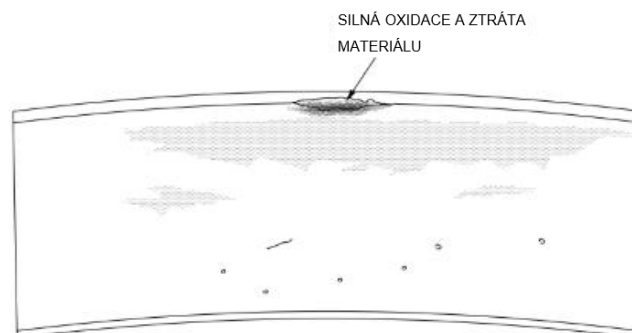
- Otěr, eroze a/nebo oxidace vnitřního povrchu shroud segmentu

Podmínky vyžadující demontáž motoru do 1200 FH za účelem výměny shroud segmentu druhého stupně HPT:

- Silná eroze a/nebo oxidace přední hrany shroud segmentu spojená se ztrátou materiálu a/nebo trhlinami



PŘÍPUSTNÝ STAV BEZ
NUTNOSTI DALŠÍ INSPEKCE



PŘÍPUSTNÝ STAV S
NUTNOSTÍ DALŠÍ INSPEKCE

Obrázek 38 Možné nálezy na shroud segmentu rotorové části druhého stupně HPT

Zdroj: (10)

2.4.15 Statorová část druhého stupně HPT

Statorová část druhého stupně HPT je přístupná ze stejného bodu jako rotorové lopatky druhého stupně HPT (viz kap. 2.4.13).

Podmínky přijatelné pro pokračování v provozu s následnou boroskopickou kontrolou v pravidelných intervalech (dle stavu a postupu nálezů):

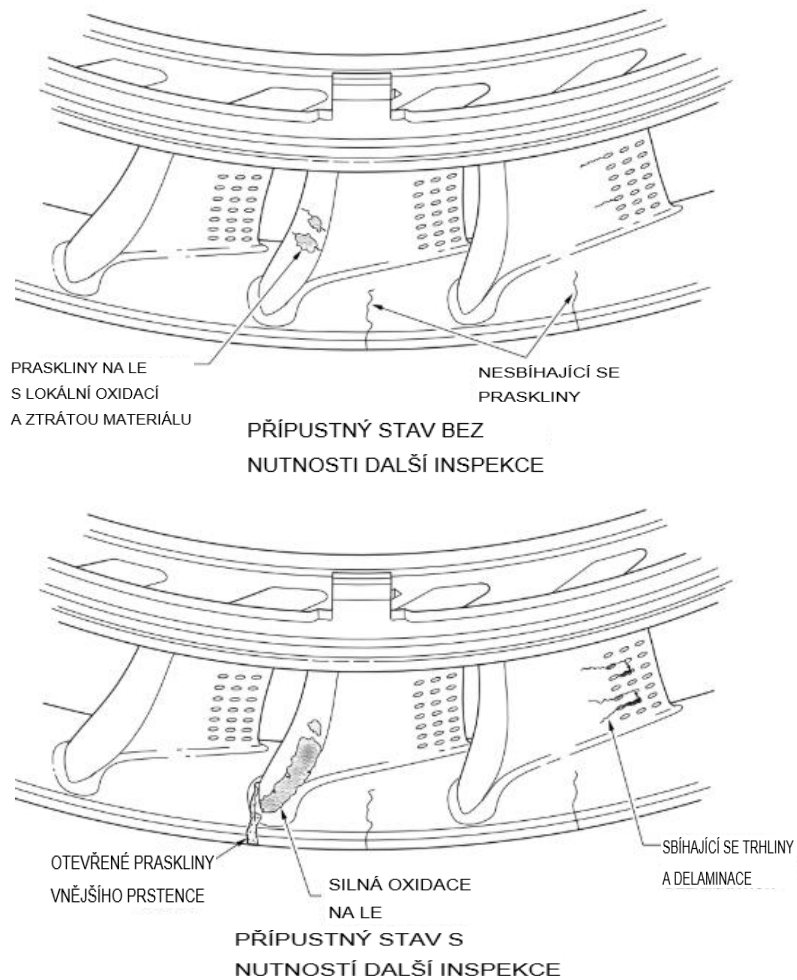
- Nesbíhavé trhliny na profilu lopatky a/nebo na shroud segmentu
- Trhliny na LE s místní erozí/oxidací a ztrátou materiálu

Přijatelné podmínky pro pokračování v provozu s opakovanou inspekcí postiženého místa nebo míst před dosažením nejdéle 1200 FH:

- Sbíhavé trhliny, větvičí se trhliny, otevřené trhliny a/nebo delaminace s menší ztrátou materiálu v oblasti chladicích otvorů na TE
- Výrazná oxidace a/nebo eroze se ztrátou materiálu podél LE
- Otevřené trhliny, které nepřesahují celou šířku vnitřního a/nebo vnějšího prstence (shroud segmentu)

Podmínky vyžadující demontáž motoru do 100 FH za účelem výměny poškozeného segmentu statorových lopatek druhého stupně HPT:

- Otvory v profilu statorové lopatky odhalující vnitřní dutinu lopatky
- Otevřené trhliny přesahující celou šířku vnitřního a/nebo vnějšího prstence (shroud segmentu) Ztráta části odtokové hrany profilu statorové lopatky



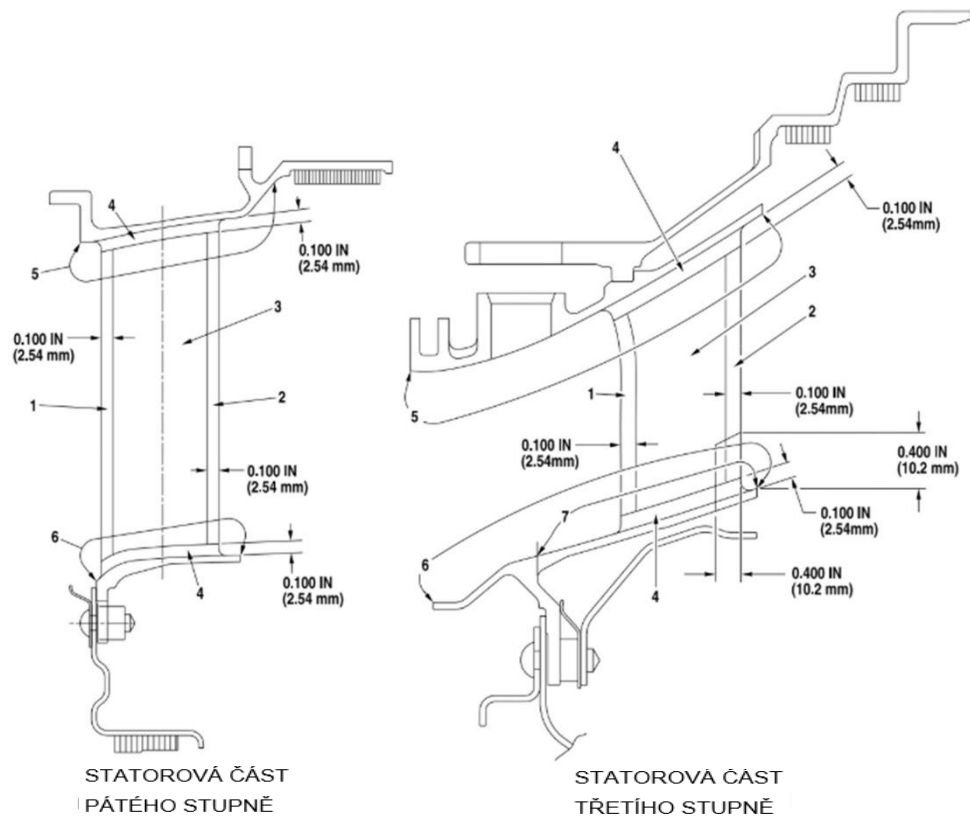
Obrázek 39 Možné nálezy na statorové části druhého stupně HPT

Zdroj: (10)

2.4.16 Statorové lopatky LP turbíny

Přístup ke kontrole třetího stupně statorové části LPT je opět přes boroskopický otvor na zadní části skříně motoru. Pro inspekci pátého stupně se sonda zavede výstupním kanálem motoru (viz kap. 2.2).

Pravidla inspekce jsou dána pro pátý a třetí stupeň LPT (viz přílohy K, L a M)



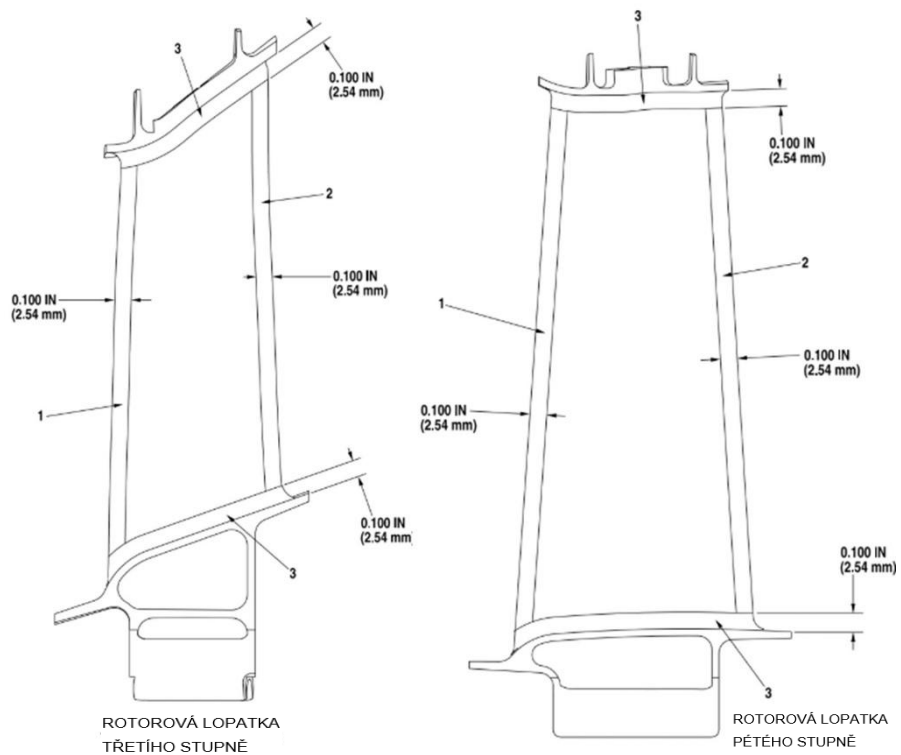
Obrázek 40 Oblasti nálezů na statorové části LPT

Zdroj: (10)

2.4.17 Rotorové lopatky LP turbíny

Přístup ke kontrole třetího stupně rotoru části LPT je přes boroskopický otvor na zadní části skříňe motoru. Pro inspekci pátého stupně se sonda zavede výstupním kanálem motoru (viz kap. 2.2).

Pravidla inspekce jsou dána pro pátý a třetí stupeň LPT pro čtvrtý stupeň není v MM kontrola nijak specifikována (viz přílohy N a O).



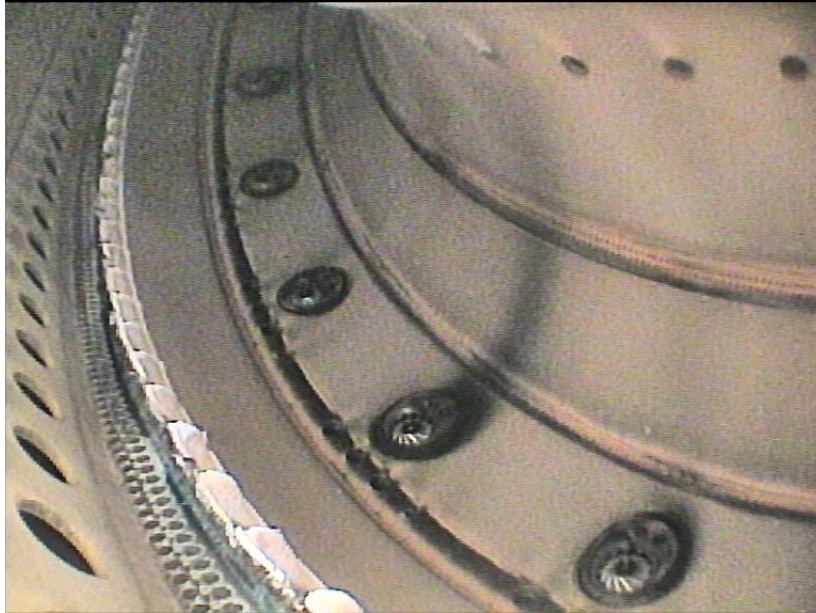
Obrázek 41 Oblasti nálezů na rotorových lopatkách LPT

Zdroj: (10)

3 Praktická aplikace

Tato kapitola slouží jako praktická ilustrace poznatků popsaných v předchozích částech bakalářské práce. Předložené fotografie zachycují vybrané části motoru tak, jak byly zobrazeny během boroskopické inspekce, provedené v rámci údržby.

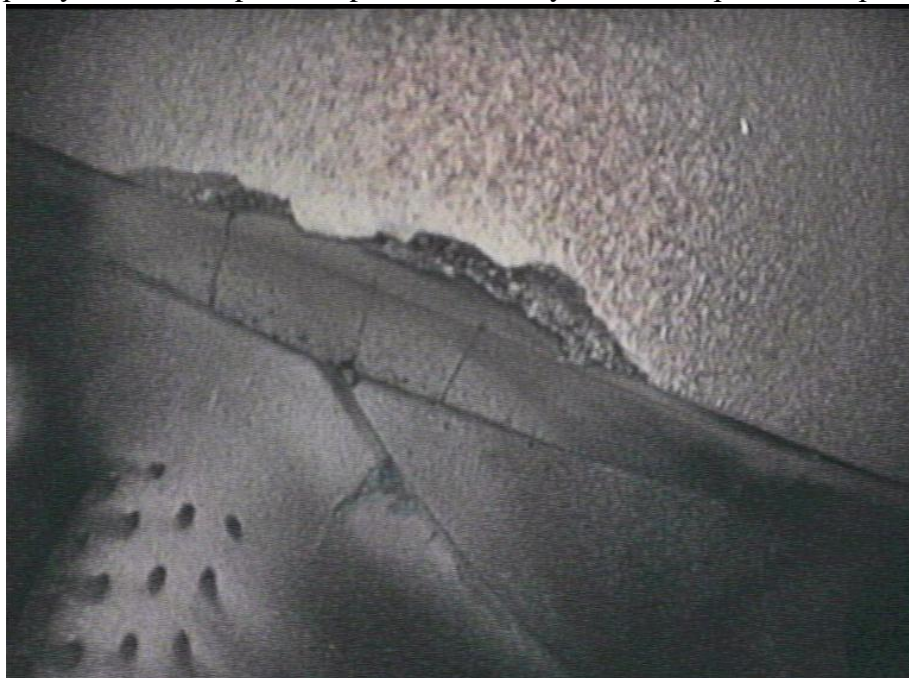
Pohled ve spalovací komoře na palivové trysky:



Obrázek 42 Palivové trysky

Zdroj: Archiv firmy UG Jet

Odštipnutý materiál na pomezí spalovací komory a statorem prvního stupně HPT:



Obrázek 43 Přejech mezi spalovací komorou a statorem prvního stupně HPT

Zdroj: Archiv firmy UG Jet

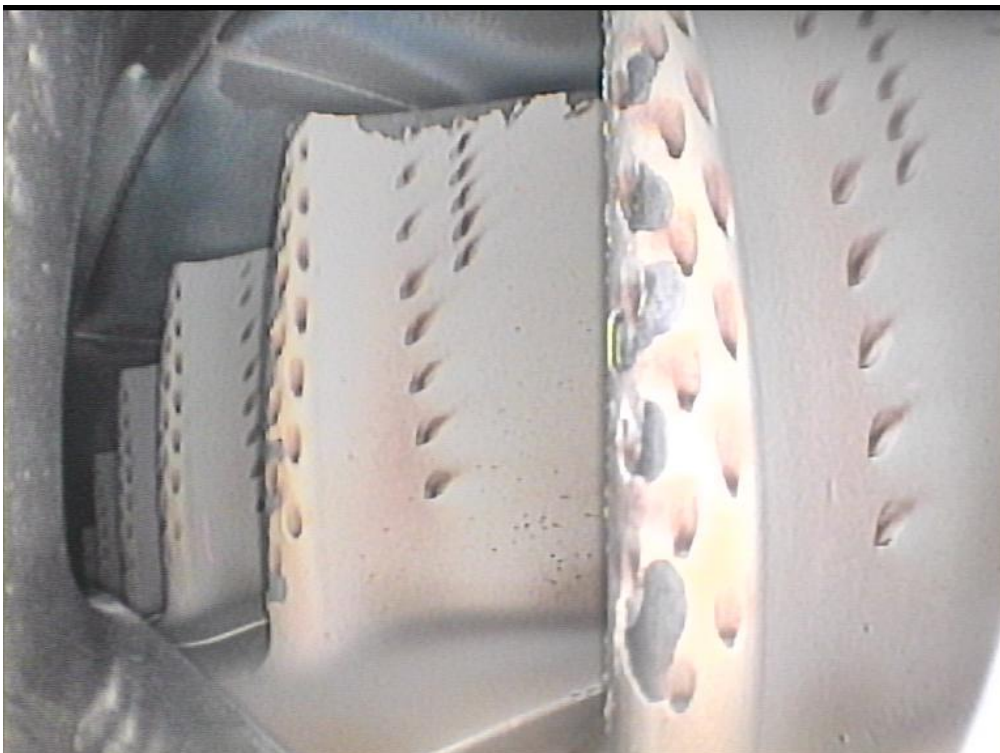
Závažné poškození v podobě otevřené praskliny na statoru HPT:



Obrázek 44 Otevřená prasklina na statoru HPT

Zdroj: Archiv firmy UG Jet

Pohled na rotorové lopatky prvního stupně HPT, můžeme pozorovat ztrátu ochranného keramického povlaku:



Obrázek 45 Lopatky prvního stupně HPT

Zdroj: Archiv firmy UG Jet

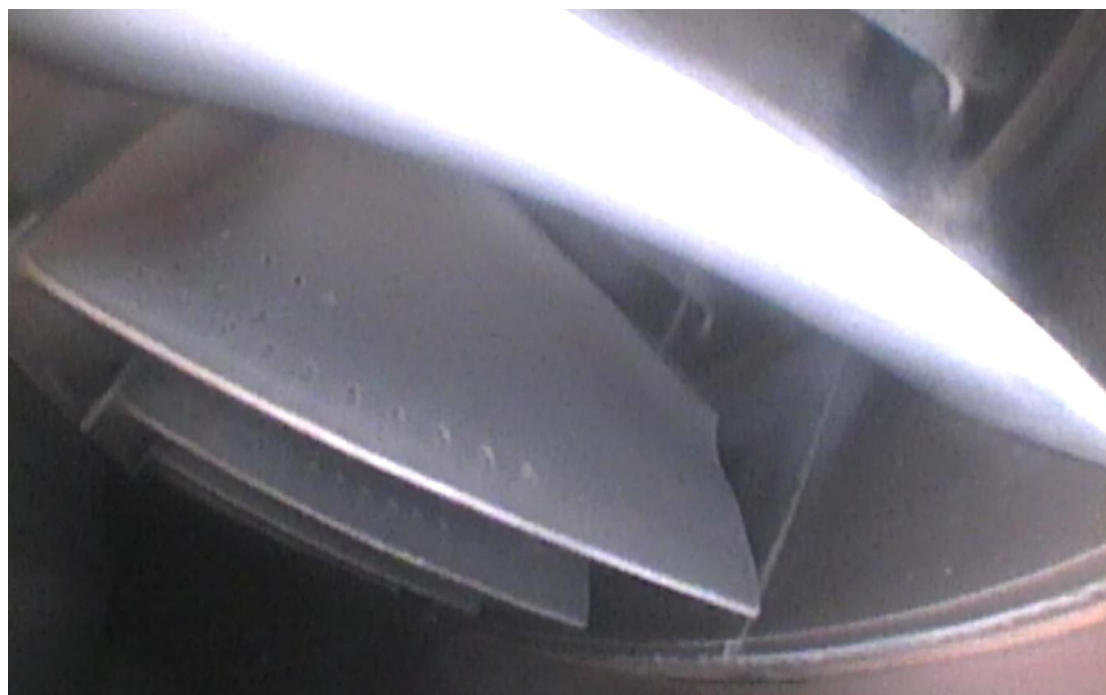
Pohled ze zadní strany motoru na špičky lopatek druhého stupně HPT:



Obrázek 46 Špičky lopatek druhého stupně HPT

Zdroj: Archiv firmy UG Jet

Pohled z tlakové strany na lopatky druhého stupně HPT:



Obrázek 47 Lopatky druhého stupně HPT

Zdroj: Archiv firmy UG Jet

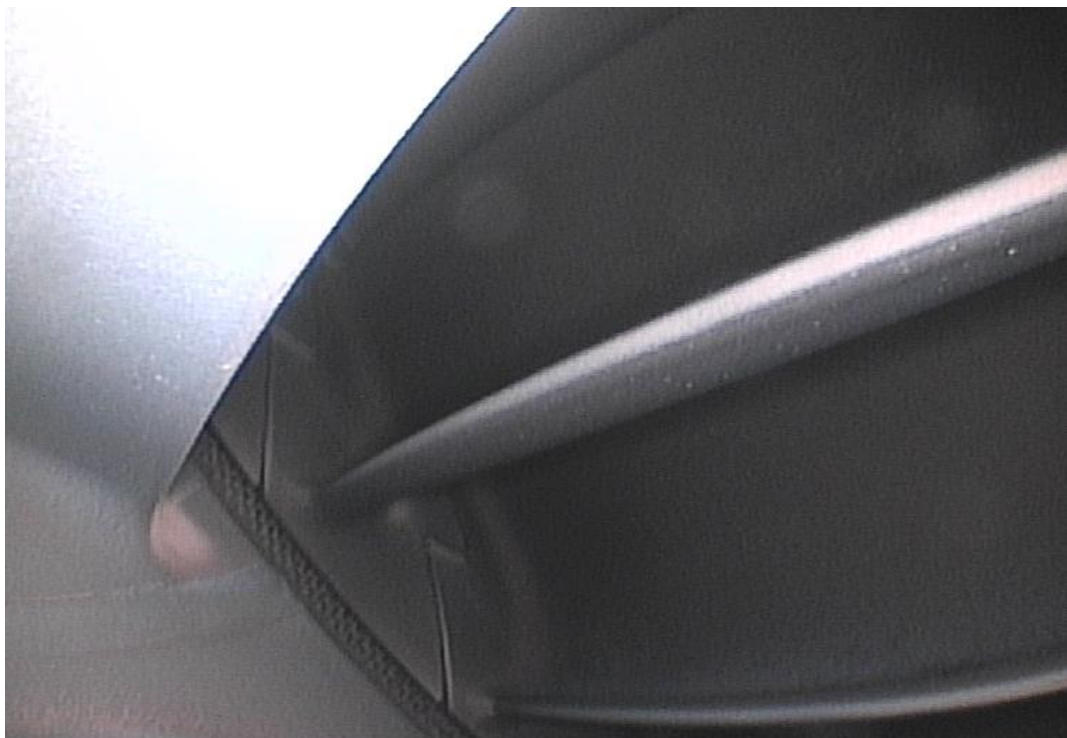
Pohled na ITT sondu. Tato sonda slouží ke snímání teploty spalin mezi vysokotlakou a nízkotlakou sekcí turbín.



Obrázek 48 ITT sonda

Zdroj: Archiv firmy UG Jet

Pohled na lopatky nízkotlaké turbíny:



Obrázek 49 Lopatky LPT

Zdroj: Archiv firmy UG Jet

Všechny obrazové záznamy pořízené během boroskopické kontroly musí být pečlivě archivovány jako součást technické dokumentace motoru. Slouží nejen jako důkaz o provedené inspekci, ale také jako podklad pro další diagnostiku v budoucnu. Záznamy lze také poslat výrobci za účelem konzultace.

Jakýkoli zjištěný nález, který překračuje stanovené limity, musí být vyhodnocen v souladu s příslušnými instrukcemi údržbového manuálu (MM). Na základě závažnosti nálezu je poté nutno přistoupit k odpovídajícímu opatření – ať už formou další kontroly, opravného zásahu, nebo vyřazení dané části z provozu.

4 Shrnutí přínosů a omezení boroskopie

4.1 Přínosy

Mezi klíčové přínosy boroskopie patří zejména:

- Minimální invazivnost
 - Boroskopická kontrola nevyžaduje úplnou demontáž motoru. Díky přístupovým bodům lze zkontrolovat kritické části motoru
- Vysoká flexibilita zobrazení
 - Moderní videoskopy umožňují natáčet a ohýbat sondou, což umožňuje detailní pohled i do obtížně přístupných míst
- Možnost dokumentace
 - Technologie dnešních videoskopů umožňuje zaznamenávat nálezy a inspekce v podobě fotografií nebo videí a archivovat pro další analýzu nebo srovnání při opakované kontrole
- Včasná detekce poškození
 - Díky optickému zvětšení a osvětlení lze identifikovat defekty jako jsou trhliny, spálení, odlupování povlaku, eroze, korozní napadení, deformace nebo vniknutí cizích těles (FOD) a napomáhá k prevenci závažných poruch a zvyšuje celkovou provozní spolehlivost

4.2 Omezení

Boroskopie má ale i určitá omezení, které jsou nutné zohlednit:

- Omezený rozsah detekce
 - Jedná se o metodu výhradně vizuální, tedy vhodnou pouze pro odhalení povrchových nebo blízko povrchových vad. Vady skryté pod povrchem, jako jsou podélné vnitřní trhliny, separace vrstev či dutiny, nejdou detekovat
- Závislost na kvalifikaci inspektora
 - Výsledek kontroly je do značné míry subjektivní a závisí na znalostech a zkušenostech osoby provádějící inspekci. Chybná interpretace nálezu může vést ke zbytečné opravě nebo naopak k přehlédnutí vážné závady.

- Citlivost na podmínky inspekce
 - Kvalita osvětlení, čistota objektivu a správný výběr optických adaptérů mají zásadní vliv na výsledný obraz. Příliš nízký kontrast, špatné zaostření nebo odlesky mohou ztížit nebo způsobit chybnou interpretaci
- Náklady na vybavení
 - Pořizovací cena kvalitního průmyslového videoskopu s možností měření, výměnnou optikou a digitálním záznamem je vysoká (řády milionů). Vybavení samozřejmě vyžaduje také pravidelnou kalibraci a údržbu.

Závěr

Boroskopie se v oblasti letectví ukazuje jako nezbytná metoda pro údržbu a inspekci leteckých proudových motorů, zejména díky možnosti provádět detailní vizuální kontrolu vnitřních komponent bez nutnosti pracné demontáže celého motoru. Tato metoda je klíčová pro detekci drobných vad a anomálií, které mohou ovlivnit výkon motoru, a tedy i celkovou bezpečnost letu. Identifikovatelné defekty, jako jsou praskliny, deformace, koroze nebo škrábance, mohou být odhaleny v raných fázích, což umožňuje včasné provedení údržby a tím pádem prodloužení životnosti motoru jako celku.

Významnou roli hraje také kvalita použitého optického vybavení a odborná způsobilost pracovníka, která je klíčová pro efektivní detekci problémů.

Boroskopická kontrola je tedy nedílnou součástí standardních údržbových procedur, přičemž její provádění podléhá přísným regulacím a standardům stanoveným leteckými úřady, jako je EASA a FAA. Tato práce prokázala, že boroskopie leteckých proudových motorů je komplexní problematika a nejedná se jen o jednoduché strkání kamery do útrobu motoru. Je nezbytnou součástí moderního leteckého průmyslu a přispívá k zajištění bezpečnosti a spolehlivosti leteckých operací.

SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

1. ZHONGDA, Yuan. *Borescope Inspection Management for Engine*. Online. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, roč. 128. ISSN 1755-1307. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/128/1/012013>. [cit. 2025-03-29].
2. MOORE, Patrick O. *Nondestructive Testing Handbook, Vol. 9: Visual Testing (VT), 3rd ed.* Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2010. ISBN 978-1-57117-266-2.
3. KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
4. MOORE, Patrick O. *Nondestructive Testing Handbook, Vol. 10: Overview, 3rd ed.* Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2012. ISBN 978-1-57117-265-5.
5. MALÝ, Petr. *Optika*. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0.
6. KRAUSS, Douglas. *ASNT Level II Study Guide, Visual and Optical Testing Method*. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 1998. ISBN 1-57117-063-4.
7. UNITED STATES. Federal Aviation Administration. *Advisory Circular 43-204: Visual Inspection for Aircraft*. Online. Washington, D.C.: FAA, 1997. Dostupné z: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/43-204.pdf. [cit. 2025-04-26].
8. REICHL, Jiří. *CCD – základní princip*. Online. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/748-ccd-zakladni-princip>. [cit. 2025-04-2].
9. WILD, Thomas W. a KROES, Michael J. *Aircraft powerplants*. Eighth edition. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-179-913-3.
10. UNITED STATES. Federal Aviation Administration. *Aviation Maintenance Technician Handbook–Powerplant*. FAA-H-8083-32B. Online. Washington, D.C.: FAA, 2023. Dostupné z: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/amt_powerplant_handbook.pdf. [cit. 2025-05-01].
11. PRATT & WHITNEY CANADA. *Maintenance Manual Turbofan Engine Model PW306C*. Manual Part No. 30B4422. Issue No. 43.0. Longueuil: Pratt & Whitney Canada, 2021.
12. OLYMPUS. *Návod k obsluze IPLEX NX Průmyslový endoskop*. Tokyo: Olympus Corporation, 2019.
13. OLYMPUS. *IPLEX NX Stereo measurement reference guide*. Tokyo: Olympus Corporation, 2019.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A Hlavní jednotka (pohled ze předu)	78
Příloha B Hlavní jednotka (pohled ze strany).....	79
Příloha C Endoskopická jednotka připojená na hlavní jednotku	80
Příloha D Druhá endoskopická jednotka	81
Příloha E: Pravidla poškození vstupních usměrňovacích lopatek	82
Příloha F Pravidla poškození výstupních usměrňovacích lopatek.....	83
Příloha G Pravidla poškození proměnných výstupních usměrňovacích lopatek (VIGV)	84
Příloha H Pravidla poškození lopatek prvního stupně HP kompresoru (část a).....	85
Příloha I Pravidla poškození lopatek prvního stupně HP kompresoru (část b)	86
Příloha J : Pravidla poškození lopatek čtvrtého stupně HP kompresoru	87
Příloha K Pravidla poškození statorových lopatek LPT (část a)	88
Příloha L Pravidla poškození statorových lopatek LPT (část b)	89
Příloha M Pravidla poškození statorových lopatek LPT (část c).....	90
Příloha N Pravidla poškození rotorových lopatek LPT (část a)	91
Příloha O : Pravidla poškození rotorových lopatek LPT (část b).....	92

Příloha A Hlavní jednotka (pohled ze předu)



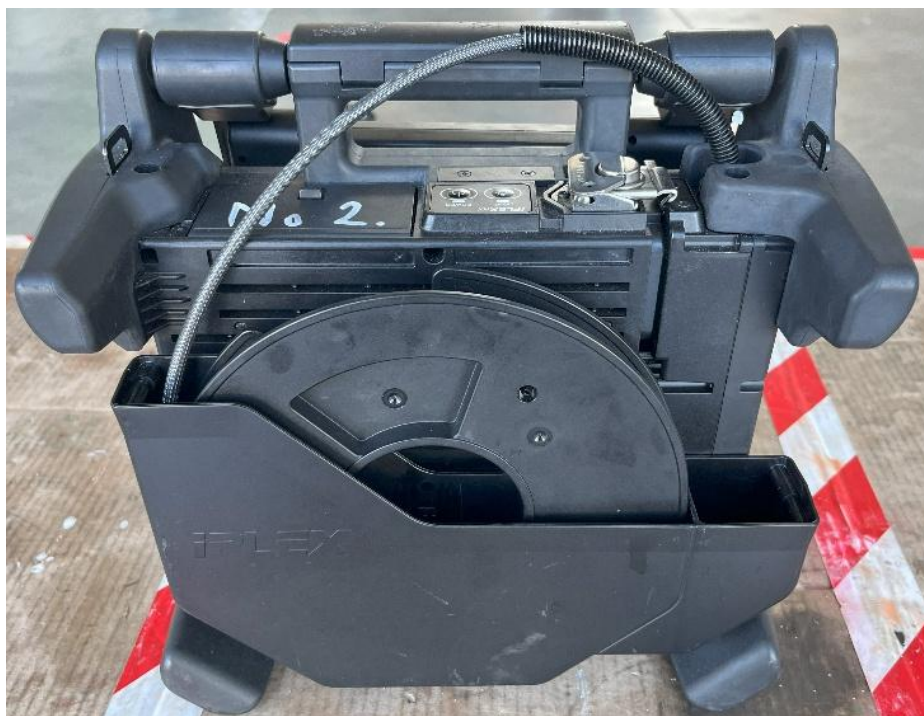
Zdroj: Vlastní archív

Příloha B Hlavní jednotka (pohled ze strany)



Zdroj: vlastní archív

Příloha C Endoskopická jednotka připojená na hlavní jednotku



Zdroj: vlastní archív

Příloha D Druhá endoskopická jednotka



Zdroj: vlastní archiv

Příloha E: Pravidla poškození vstupních usměrňovacích lopatek

Poškození	Přijatelné limity bez dalších opatření	Nepřijatelné, nutná oprava
Trhliny a praskliny	-	Trhliny nebo praskliny na jakémkoli povrchu
Promáčkliny na povrchu lopatky	Za předpokladu, že promáčknutí není spojeno s vyboulením na stejném místě na opačném povrchu	Promáčknutí je spojeno s vyboulením na stejném místě na opačné straně povrchu
Promáčkliny na náběžné (LE) a odtokové (TE) hraně	Do hloubky 0,635 mm (0,025 in)	Hlubší než 0,635 mm
Deformace náběžné (LE) a odtokové (TE) hrany	Přijatelné, pokud je hloubka menší než 1,016 mm (0,040 in) a délka 12,7 mm (0,500 in)	Deformace přesahuje 1,016 mm (0,040 in) hloubky a 12,7 mm (0,500 in) délky
Vrypy na profilu lopatky	Do hloubky 0,254 mm (0,010 in)	Hlubší než 0,254 mm (0,010 in)
Vrypy a promáčkliny na vnitřním a vnějším unašeči lopatky	Do hloubky 0,254 mm (0,010 in)	Hlubší než 0,254 mm (0,010 in)

Zdroj: (10)

Příloha F Pravidla poškození výstupních usměrňovacích lopatek

Poškození	Přijatelné limity bez dalších opatření	Nepřijatelné, nutná oprava
Trhliny a praskliny	-	Jakékoli trhliny a praskliny
Vrypy a promáčkliny na LE	Maximálně 4 na lopatku, pokud: - rozměr <i>a</i> je menší než 3,8 mm (0,150 in) - rozměr <i>b</i> je menší než 3,2 mm (0,125 in) - jsou od sebe vzdáleny minimálně 7,6 mm (0,300 in)	Více než čtyři nebo pokud je rozměr <i>a</i> a <i>b</i> větší než stanovený limit nebo jsou od sebe blíže než stanovený limit
Vrypy a promáčkliny na TE	Maximálně 4 na lopatku, pokud: - rozměr <i>a</i> a <i>b</i> jsou menší než 1,3 mm (0,050 in) - jsou od sebe vzdáleny minimálně 7,6 mm (0,300 in)	Více než čtyři nebo pokud je rozměr <i>a</i> a <i>b</i> větší než stanovený limit nebo jsou od sebe blíže než stanovený limit
Vrypy a promáčkliny na povrchu lopatky	Maximálně 1 na každé straně lopatky do hloubky 0,5 mm (0,020 in), nesmí být přímo naproti sobě na sací a tlakové straně lopatky	Více než 1, hlubší než 0,5 mm (0,020 in) a/nebo když se nacházejí přímo naproti sobě na sací a tlakové straně lopatky
Ohnutí LE	Maximálně 1 na lopatku, pokud: - rozměr <i>a</i> je menší než 6,3 mm (0,250 in) - průhyb je maximálně 0,8 mm (0,030 in)	Více než 1 ohnutí nebo rozměr <i>a</i> a průhyb jsou větší než stanovený limit

Pozn.: Pro rozměry *a* a *b* platí obr. 16

Zdroj: (10)

Příloha G Pravidla poškození proměnných výstupních usměřovacích lopatek (VIGV)

Poškození	Přijatelné limity bez dalších opatření	Přijatelné limity – další kontrola do 400 FH	Nepřijatelné, nutná oprava
Trhliny a praskliny	-	-	Jakékoli trhliny a praskliny
Vrypy na LE a TE (oblasti a)	Maximálně 2 na lopatku, pokud: - rozměr <i>b</i> je menší než 3,8 mm (0,150 in) - rozměr <i>c</i> je menší než 1,3 mm (0,050 in) - jsou od sebe vzdáleny minimálně 5,1 mm (0,200 in) - nejsou v oblasti 6,4 mm (0,250 in) od kořene nebo špičky lopatky	Maximálně 2 na lopatku s četností max. 4 lopatek pokud: - rozměr <i>b</i> je menší než 5,1 mm (0,200 in) - rozměr <i>c</i> je menší než 1,8 mm (0,070 in) - jsou od sebe vzdáleny minimálně 5,1 mm (0,200 in) - nejsou v oblasti 6,4 mm (0,250 in) od kořene nebo špičky lopatky	Více než 2 vrypy na lopatku, více než 4 poškozené lopatky nebo: - rozměr <i>b</i> je větší než 5,1 mm (0,150 in) - rozměr <i>c</i> je větší než 1,8 mm (0,070 in) - jsou od sebe vzdáleny méně než 5,1 mm (0,200 in) - jsou v oblasti 6,4 mm (0,250 in) od kořene nebo špičky lopatky
Vrypy a promáčkliny (oblasti k)	V oblasti 6,4 mm (0,250 in) od TE do maximální hloubky 0,254 mm (0,010 in)	V oblasti 6,4 mm (0,250 in) od TE do maximální hloubky 0,508 mm (0,020 in)	Hlubší než 0,508 mm (0,020 in) nebo dále než 6,4 mm (250 in) od TE
Vrypy a promáčkliny na povrchu lopatky (oblast d)	Mělké vrypy nebo promáčkliny jsou přípustné za předpokladu, že poškození není přímo naproti sobě na sací a tlakové straně lopatky a profil lopatky není deformován	-	Vrypy nebo promáčkliny, které jsou přímo proti sobě na sací a tlakové straně lopatky a/nebo je profil lopatky deformován

Pozn.: Pro oblasti a, k, d a rozměry b, c platí obr. 17

Zdroj: (10)

Poškození	Přijatelné limity bez dalších opatření	Přijatelné limity – další kontrola do 400 FH	Nepřijatelné, nutná oprava
Trhliny a praskliny	-	-	Jakékoli trhliny a praskliny
Vrypy na LE (oblast <i>m</i>)	Maximálně 2 na lopatku, pokud: - rozměr <i>a</i> je menší než 3,2 mm (0,125 in) - rozměr <i>b</i> je menší než 1,3 mm (0,050 in) - jsou od sebe vzdáleny minimálně 5,1 mm (0,200 in) - nejsou v oblasti 6,4 mm (0,250 in) od kořene nebo 7,6 mm (0,300 in) od špičky lopatky	Maximálně 2 na lopatku s četností max. 4 lopatek pokud: - rozměr <i>a</i> je menší než 6,4 mm (0,250 in) - rozměr <i>b</i> je menší než 2,5 mm (0,200 in) - jsou od sebe vzdáleny minimálně 5,1 mm (0,200 in) - nejsou v oblasti 6,4 mm (0,250 in) od kořene nebo 7,6 mm (0,300 in) od špičky lopatky	Více než 2 vrypy na lopatku, více než 4 poškozené lopatky nebo: - rozměr <i>a</i> je větší než 6,4 mm (0,250 in) - rozměr <i>b</i> je větší než 2,5 mm (0,100 in) - jsou od sebe vzdáleny méně než 5,1 mm (0,200 in) - jsou v oblasti 6,4 mm (0,250 in) od kořene nebo 7,6 mm (0,300 in) od špičky lopatky
Eroze LE (oblast <i>m</i>)	Četné vrypy, promáčkliny, rýhy, odlupování a škrábance s rozměrem <i>a</i> menší než 1,6 mm (0,063 in) a rozměrem <i>b</i> menší než 0,6 mm (0,025 in)	-	Četné vrypy, promáčkliny, rýhy, odlupování a škrábance s rozměrem a větší než 1,6 mm (0,063 in) a rozměrem <i>b</i> větší než 0,6 mm (0,025 in)
Vrypy na TE (oblast <i>n</i>)	Maximálně 2 na lopatku, pokud: - rozměr <i>c</i> je menší než 1,8 mm (0,070 in) - rozměr <i>d</i> je menší než 0,5 mm (0,020 in) - jsou od sebe vzdáleny minimálně 5,1 mm (0,200 in) - nejsou v oblasti 6,4 mm (0,250 in) od kořene lopatky	Maximálně 2 na lopatku s četností max. 4 lopatek pokud: - rozměr <i>c</i> je menší než 3,8 mm (0,150 in) - rozměr <i>d</i> je menší než 1,0 mm (0,040 in) - jsou od sebe vzdáleny minimálně 5,1 mm (0,200 in) - nejsou v oblasti 6,4 mm (0,250 in) od kořene lopatky	Více než 2 vrypy na lopatku, více než 4 poškozené lopatky nebo: - rozměr <i>c</i> je větší než 3,8 mm (0,150 in) - rozměr <i>d</i> je větší než 1,0 mm (0,040 in) - jsou od sebe vzdáleny méně než 5,1 mm (0,200 in) - jsou v oblasti 6,4 mm (0,250 in) od kořene lopatky

Pozn.: Pro oblast *m*, *n* a rozměry *a*, *b*, *c*, *d* platí obr. 19

Zdroj: (10)

Příloha I Pravidla poškození lopatek prvního stupně HP kompresoru (část b)

Poškození	Přijatelné limity bez dalších opatření	Přijatelné limity – další kontrola do 400 FH	Nepřijatelné, nutná oprava
Vrpy a promáčkliny na povrchu lopatky (oblast <i>p</i>)	-	Maximálně 1 na každé straně lopatky do hloubky 0,025 mm (0,010 in), nesmí být přímo naproti sobě na sací a tlakové straně	Více než 1, hlubší než 0,25 mm (0,010 in) a/nebo když se nacházejí přímo naproti sobě na sací a tlakové straně
Odštiplý roh špičky lopatky na LE	Povoleno, pokud: - rozměr <i>e</i> je menší než 2,5 mm (0,100 in) - rozměr <i>f</i> je menší než 5,0 mm (0,200 in)	Povoleno, pokud: - rozměr <i>e</i> je menší než 5,0 mm (0,200 in) - rozměr <i>f</i> je menší než 10,1 mm (0,400 in)	Rozměr <i>e</i> je větší než 5,0 mm (0,200 in) a/nebo rozměr <i>f</i> je větší než 10,1 mm (0,400 in)
Odštiplý roh špičky lopatky na TE	Povoleno, pokud: - rozměr <i>g</i> je menší než 0,7 mm (0,030 in) - rozměr <i>h</i> je menší než 0,7 mm (0,030 in)	Povoleno, pokud: - rozměr <i>g</i> je menší než 1,5 mm (0,060 in) - rozměr <i>h</i> je menší než 1,5 mm (0,060 in)	Rozměr <i>g</i> je větší než 1,5 mm (0,060 in) a/nebo rozměr <i>h</i> je větší než 1,5 mm (0,060 in)

Pozn.: Pro oblast *p* a rozměry *e*, *f*, *g*, *h* platí obr. 19

Zdroj: (10)

Poškození	Přijatelné limity bez dalších opatření	Přijatelné limity – další kontrola do 400 FH	Nepřijatelné, nutná oprava
Trhliny a praskliny	-	-	Jakékoli trhliny a praskliny
Vrypy na LE (oblast <i>p</i>)	Maximálně 2 na lopatku, pokud: - rozměr <i>r</i> je menší než 1,5 mm (0,060 in) - rozměr <i>s</i> je menší než 1,0 mm (0,040 in) - jsou od sebe vzdáleny minimálně 5,1 mm (0,200 in) - nejsou v oblasti 6,4 mm (0,250 in) od kořene nebo 3,2 mm (0,125 in) od špičky lopatky	Maximálně 2 na lopatku s četností max. 4 lopatek pokud: - rozměr <i>r</i> je menší než 3,2 mm (0,125 in) - rozměr <i>s</i> je menší než 2,0 mm (0,080 in) - jsou od sebe vzdáleny minimálně 5,1 mm (0,200 in) - nejsou v oblasti 6,4 mm (0,250 in) od kořene nebo 3,2 mm (0,125 in) od špičky lopatky	Více než 2 vrypy na lopatku, více než 4 poškozené lopatky nebo: - rozměr <i>r</i> je větší než 3,2 mm (0,125 in) - rozměr <i>s</i> je větší než 2,0 mm (0,080 in) - jsou od sebe vzdáleny méně než 5,1 mm (0,200 in) - jsou v oblasti 6,4 mm (0,250 in) od kořene nebo 3,2 mm (0,125 in) od špičky lopatky
Eroze LE (oblast <i>p</i>)	Četné vrypy, promáčkliny, rýhy, odlupování a škrábance s rozměrem <i>r</i> menší než 0,8 mm (0,030 in) a rozměrem <i>s</i> menší než 0,5 mm (0,020 in)	-	Četné vrypy, promáčkliny, rýhy, odlupování a škrábance s rozměrem <i>r</i> větší než 0,8 mm (0,030 in) a rozměrem <i>s</i> větší než 0,5 mm (0,020 in)
Vrypy a promáčkliny na povrchu lopatky (oblast <i>q</i>)	-	Maximálně 1 na každé straně lopatky do hloubky 0,025 mm (0,010 in), nesmí být přímo naproti sobě na sací a tlakové straně	Více než 1, hlubší než 0,25 mm (0,010 in) a/nebo když se nacházejí přímo naproti sobě na sací a tlakové straně
Odštíplý roh špičky lopatky na LE	Povoleno, pokud: - rozměr <i>t</i> je menší než 1,3 mm (0,050 in) - rozměr <i>u</i> je menší než 1,3 mm (0,050 in)	Povoleno, pokud: - rozměr <i>t</i> je menší než 2,5 mm (0,100 in) - rozměr <i>u</i> je menší než 2,5 mm (0,100 in)	Rozměr <i>t</i> je větší než 2,5 mm (0,100 in) a/nebo rozměr <i>u</i> je větší než 2,5 mm (0,100 in)

Pozn.: Pro oblasti *p*, *q* a rozměry *r*, *s*, *t*, *u* platí obr. 21

Zdroj: (10)

Příloha K Pravidla poškození statorových lopatek LPT (část a)

Oblast inspekce	Přijatelné limity bez dalších opatření	Přijatelné limity – další kontrola do 1200 FH	Nutná oprava do 100 FH
Oblasti 1 (LE)	Vrypy a promáčkliny do hloubky 1,5 mm (0,060 in)	-	Vrypy a promáčkliny hlubší než 1,5 mm (0,060 in)
	Více trhlin kratších než 2,0 mm (0,080 in) a/nebo jedna trhlina na profilu lopatky kratší než 3,0 mm (0,120 in)	-	Sbíhající se trhliny a/nebo více než jedna trhlina na profilu lopatky delší než 2,0 mm (0,080 in), trhliny delší než 3,0 mm (0,120 in)
	<u>Pouze pro stator třetího stupně</u> : jedna trhlina na profilu lopatky, v blízkosti umístění termočlánku nebo maximálně 8 trhlin na jednu lopatku, každá kratší než 7,6 mm. (0,3 in)	<u>Pouze pro stator třetího stupně</u> : jedna trhlina na profilu lopatky, v blízkosti umístění termočlánku nebo maximálně 8 trhlin na jednu lopatku, každá kratší než 10,2 mm (0,400 in)	<u>Pouze pro stator třetího stupně</u> : více než 8 trhlin nebo trhliny delší než 10,2 mm (0,400 in)
Oblasti 2 (TE)	Vrypy a promáčkliny do hloubky 0,76 mm (0,030 in)	-	Vrypy a promáčkliny hlubší než 0,76 mm (0,030 in)
	Více trhlin kratších než 5,1 mm (0,200 in) nebo jedna trhlina na profilu lopatky kratší než 7,6 mm (0,300 in)	Více trhlin kratších než 7,6 mm (0,300 in) nebo trhlina na profilu lopatky kratší než 10,2 mm (0,400 in)	Sbíhající se trhliny nebo více než jedna trhlina na profilu lopatky delší než 7,6 mm (0,300 in) nebo trhliny delší než 10,2 mm (0,400 in)
	Maximálně 12 ohybů na shroud segmentech, přičemž každý ohyb může zasahovat maximálně do 25 % délky TE a jeho maximální vychýlení činí 1,5 mm (0,060 in)	-	Více než 12 ohybů na shroud segmentech, přičemž každý ohyb může zasahovat maximálně do 25 % délky TE a jeho maximální vychýlení činí 1,5 mm (0,060 in)

Pozn.: Pro oblasti 1 a 2 platí obr. 40

Zdroj: (10)

Příloha L Pravidla poškození statorových lopatek LPT (část b)

Oblast inspekce	Přijatelné limity bez dalších opatření	Přijatelné limity – další kontrola do 1200 FH	Nutná oprava do 100 FH
Oblasti 2 (TE)	-	Jedna trhlina na profilu lopatky kratší než 2,5 mm (0,100 in)	Více než trhlina na profilu lopatky kratší než 2,5 mm (0,100 in)
Oblasti 3 (profil lopatek)	Maximálně 2 trhliny na jednu lopatku, každá kratší než 2,5 mm (0,100 in)	Maximálně 3 trhliny na jednu lopatku, každá kratší než 6,4 mm (0,250 in)	Sbíhající se trhliny. Více než 12 trhlín delších než 6,4 mm (0,250 in) nebo trhliny delší než 7,6 mm (0,300 in)
Oblasti 5 (vnější buben)	Více trhlín kratších než 3,0 mm (0,120 in). Trhliny kratší než 5,1 mm (0,200 in). Maximálně 12 trhlín na prstenci lopatek, každá kratší než 7,6 mm (0,300 in), za předpokladu, že mezi dvěma sousedními lopatkami se nachází maximálně jedna trhlina	Více trhlín kratších než 6,4 mm (0,250 in). Trhliny kratší než 7,6 mm (0,300 in). Maximálně 8 trhlín na prstenci lopatek, každá kratší než 10,2 mm (0,400), za předpokladu, že mezi dvěma sousedními lopatkami se nachází maximálně jedna trhlina.	Sbíhající se trhliny. Více trhlín delších než 6,4 mm (0,250 in). Více než 8 trhlín delších než 7,6 mm (0,300 in). Trhliny delší než 10,2 mm (0,400).
	Maximálně 12 trhlín ve tvaru podkovy na prstenci lopatek, každá kratší než 7,6 mm (0,300 in)	-	Více než 12 trhlín ve tvaru podkovy na prstenci lopatek delších než 5,1 mm (0,200 in) nebo trhliny ve tvaru podkovy delší než 7,6 mm (0,300 in)

Pozn.: Pro oblasti 2, 3 a 5 platí obr. 40

Zdroj: (10)

Oblast inspekce	Přijatelné limity bez dalších opatření	Přijatelné limity – další kontrola do 1200 FH	Nutná oprava do 100 FH
Oblasti 6 (vnitřní prsteneček / vnitřní shroud)	Více axiálních trhlin a trhlin ve tvaru podkovy kratších než 12,7 mm (0,5 in) nebo jedna axiální trhlina přesahující celou šířku vnitřního bubnu, která může zasahovat do profilu lopatky v oblasti 8. Obvodové trhliny do délky 4,1 mm (0,160 in).	-	Otevřené trhliny. Trhliny způsobující schod. Sbíhavé trhliny.
Oblasti 7	Maximálně 15 axiálních trhlin na prstenci lopatek bez ohledu na délku za předpokladu, že: Trhliny nepřesahují oblast 7 na vnitřním prstenci. Pouze dvě trhliny, oddělené minimálně třemi lopatkami, dosahují až k odtokové hraně. Trhliny zasahující do profilu lopatky nepřesahují oblast 8.	-	Otevřené trhliny. Trhliny způsobující schod. Sbíhavé trhliny.
Profil statorových lopatek (povrchová ochrana pouze u třetího a čtvrtého stupně). Pozn.: Sulfidace se projevuje zeleným až světle modrým zbarvením	Mírné zbarvení a místní ztráta povlaku. Lokální důlková koroze.	Sulfidace na méně než 40 % povrchu profilu lopatky, za předpokladu, že nejsou přítomny puchýře ani ztráta základního materiálu.	Sulfidace na více než 40 % povrchu profilu lopatky nebo výskyt puchýřů či ztráta základního materiálu.

Pozn.: Pro oblasti 6 a 7 platí obr. 40

Zdroj: (10)

Oblast inspekce	Přijatelné limity bez dalších opatření	Přijatelné limity – další kontrola do 1200 FH	Nutná oprava do 50 FH
Všechny oblasti lopatek	Trhliny nejsou přípustné	Trhliny nejsou přípustné	Trhliny nejsou přípustné, s výjimkou oblastí 1 a 2 (viz níže)
	Lokální eroze a oxidace bez ovlivnění základního materiálu	Lokální eroze a oxidace náběžné hrany spojená s drobnou ztrátou základního materiálu.	Výrazná nebo rozsáhlá eroze a oxidace spojená se ztrátou základního materiálu
	Lokální důlková korozie	-	Poškození profilu lopatky cizím předmětem (FOD)
	Mírné zbarvení a lokální ztráta povlaku	Sulfidace na méně než 40 % povrchu profilu lopatky, za předpokladu, že nejsou přítomny puchýře ani ztráta základního materiálu	Sulfidace na více než 40 % povrchu profilu lopatky, nebo výskyt puchýřů či ztráta základního materiálu

Pozn.: Pro oblasti 1 a 2 platí obr. 41

Zdroj: (10)

Příloha O : Pravidla poškození rotorových lopatek LPT (část b)

Oblast inspekce	Přijatelné limity bez dalších opatření	Přijatelné limity – další kontrola do 1200 FH	Nutná oprava do 50 FH
Oblasti 1 (LE) a oblasti 2 (TE)	Trhliny nejsou přípustné	Jedna trhlina na lopatku kratší než 1,0 mm (0,040 in), za předpokladu, že není postiženo více než 5 lopatek	Více než jedna trhlina na lopatku kratší než 1,0 mm (0,040 in), za předpokladu, že není postiženo více než 5 lopatek
	Vrypy a promáčkliny do hloubky menší než 0,25 mm (0,01 in)	-	Vrypy a promáčkliny hlubší než 0,25 mm (0,01 in)
	Jeden ohyb na TE do maximální délky 25 % TE a s maximálním vychýlením 0,35 mm (0,015 in), za předpokladu, že není postiženo více než 5 lopatek	-	Více než jeden ohyb na TE nebo ohyb delší než 25 % TE nebo vychýlení větší než 0,35 mm (0,015 in), nebo je postiženo více než 5 lopatek
Oblast 3 (vnitřní a vnější zaoblení u patky lopatky)	Vrypy a promáčkliny nejsou přípustné	Vrypy a promáčkliny do hloubky menší než 0,13 mm (0,005 in)	Vrypy a promáčkliny větší hloubky než 0,13 mm (0,005 in)

Pozn.: Pro oblasti 1 a 2 platí obr. 41

Zdroj: (10)