

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

FUNKČNÍ ANALÝZA KONSTRUKCE A VHODNOSTI POUŽITÉHO MATERIÁLU TEPELNÉHO ŠTÍTU TURBODMYCHADLA Z HLEDISKA SPOLEHLIVOSTI V PODMÍNKÁCH PROVOZU BĚŽNÉHO SILNIČNÍHO MOTOROVÉHO VOZIDLA

FUNCTIONAL ANALYSIS OF THE DESIGN AND USED MATERIAL SUITABILITY OF
THE TURBO-BLOWER HEAT SHIELD IN TERMS OF RELIABILITY IN THE CONDITIONS
OF A COMMON ROAD MOTOR VEHICLE OPERATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tereza Dvořáková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Maria Krbalová, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka:	Bc. Tereza Dvořáková
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	Ing. Maria Krbalová, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Funkční analýza konstrukce a vhodnosti použitého materiálu tepelného štítu turbodmychadla z hlediska spolehlivosti v podmínkách provozu běžného silničního motorového vozidla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Materiály současných turbodmychadel musí vyhovovat provozu za náročných podmínek, správné pochopení jejich funkce je tedy stěžejní nejen z hlediska trvanlivosti turbodmychadla. Řada využívaných nástrojů takové pochopení umožňuje a napomáhá k rozšíření znalostí o jeho jednotlivých komponentách, čímž přispívá k eliminaci rizika vzniku podobných opakovaných selhání, redukcí délky vývojového cyklu a v neposlední řadě i ke snížení nákladů potřebných k vývoji.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu problematiky.

Systémový rozbor řešené problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.

Vypracování Boundary Diagramu pro tepelný štít ve vztahu k okolním dílům.

Sestavení Causal Map.

Zpracování Fault tree analysis (FTA) a Failure Mode and Effects Analysis (FMEA).

Příprava dokumentace Root Cause Analysis (RCA) s využitím výsledků pokročilých materiálových analýz.

Návrh nápravných opatření pro odstranění příčin selhání.

Návrh plánu systémových opatření pro návrh tepelného štítu k eliminaci rizika vzniku podobných selhání.

Vlastní závěry a/nebo doporučení.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 61025. Analýza stromu poruchových stavů (FTA). Praha: Český normalizační institut, 2007.

ČSN EN 60812. Techniky analýzy bezporuchovosti systémů - Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA). Praha: Český normalizační institut, 2007.

ČSN EN 62740. Analýza kořenových příčin (RCA). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá řešením problému s tepelným štítem turbodmychadla pro těžké nákladní automobily. V práci je zahrnut popis prvotního původu problému se zaměřením na ekologické normy a z nich plynoucí nutnost změn v konstrukci turbodmychadla. Dále je krok po kroku popsán postup při hledání příčin selhání součásti s využitím výsledků zátěžových testů a provedených analýz. Převážná část praktické části je zaměřena na použití vybraných nástrojů kvality pro nalezení kořenových příčin selhání tepelného štítu a také na pokročilé materiálové analýzy ověřující výsledky provedených kvalitativních analýz. V závěru práce jsou uvedena navrhaná a přijatá opatření pro eliminaci opětovného vzniku podobného selhání a doporučení pro další vývoj.

ABSTRACT

Diploma thesis deals with solving of the problem with heat shield used in a turbocharger for heavy duty vehicles. The description of the problem origin with focus on environmental standarts and therefore a need of changes in turbocharger construction, is included. Further, the procedure for finding the component failure causes using the results of stress tests and analyses performed is described step by step. Most of the practical part is focused on a use of quality tools for finding a root cause of heat shield failure and also on advanced material analysis, verifying the results from quality analysis performed. An the end of the thesis there are suggested and accepted measures for elimination of similar failure recurrence and recommendations for further development.

KLÍČOVÁ SLOVA

Emisní limity v automobilovém průmyslu, tepelný štít turbodmychadla, nástroje kvality, Boundary diagram, FMEA, FTA, RCA, Ishikawa, 5 Proč, materiálová analýza.

KEYWORDS

Emission standarts in automotive industry, turbocharger heat shield, quality tools, Boundary diagram, FMEA, FTA, RCA, Ishikawa, 5 Whys, material analysis.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DVOŘÁKOVÁ, T. *Funkční analýza konstrukce a vhodnosti použitého materiálu tepelného štítu turbodmyhadla z hlediska spolehlivosti v podmínkách provozu běžného silničního motorového vozidla*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2019, 87 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Maria Krbalová, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat paní Ing. Marii Krbalové, Ph.D., za vedení, cenné rady a vstřícný přístup při vytváření práce. Zároveň chci poděkovat inženýrům z firmy Garret – Advancing motion, zejména pánům Ing. Jindřichu Šeneklovi a Ing. Petru Škarovi za vytvoření zadání diplomové práce a všestrannou podporu při jejím vypracování a paní Ing. Veronice Řičánkové za významnou pomoc při provádění materiálových analýz. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za cennou podporu v průběhu celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Marii Krbalové, Ph.D., a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. 5. 2019

.....

Dvořáková Tereza

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	VLIV EMISNÍCH NOREM NA AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL	17
2.1	Emise v dopravě	17
2.2	Emisní normy EURO	18
2.3	Výhody a nevýhody použití motorů na CNG palivo	19
2.3.1	Cena paliva	19
2.3.2	Ekologie a CNG	20
2.3.3	Celosvětové zásoby CNG	20
2.3.4	Nevýhody motoru na CNG palivo	20
2.3.5	Vliv náhrady vznětového motoru na používání turbodmychadel	20
3	SYSTÉMOVÝ ROZBOR PRÁCE	21
3.1	Problémová situace	21
3.2	Formulace problému	21
3.3	Formulace cílů a řešení	21
3.4	Popis řešené soustavy	21
4	KONSTRUKCE A PRINCIP TURBODMYCHADLA	22
4.1	Konstrukce turbodmychadla	22
4.2	Princip funkce turbodmychadla	23
4.3	Vysoké provozní teploty	24
4.4	Tepelný štít	24
5	UVEDENÍ DO ŘEŠENÉHO PROBLÉMU	25
6	TEORIE K POUŽITÝM NÁSTROJŮM KVALITY	27
6.1	Bloková schémata, boundary diagram	27
6.1.1	Blokové schéma I. Stupně	27
6.1.2	Blokové schéma II. Stupně	27
6.1.3	Boundary diagram	28
6.2	Analýza kořenových příčin – Root Cause Analysis (RCA)	28
6.3	Diagram příčin a následků – Cause-and-Effect Diagram (Ishikawa)	30
6.4	Analýza 5 Proč – 5 Why's Analysis	31
6.5	Analýza stromu poruchových stavů – Fault Tree Analysis (FTA)	32
6.6	Analýza způsobů a důsledků poruch - Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)	33
6.6.1	Stanovení způsobů poruch	34
6.6.2	Stanovení příčin poruch	34
6.6.3	Stanovení důsledků poruch	35
6.6.4	Klasifikace závažnosti konečných důsledků	35
6.6.5	Četnost či pravděpodobnost výskytu	36
6.6.6	RPN (UPR) –Risk Priority Number (Ukazatel priority rizika)	36
6.7	Kauzální mapa (Causal map)	36
7	POSTUP PŘI ŘEŠENÍ STANOVENÉHO ÚKOLU	39
7.1	Data získaná od zákazníka	39
7.2	Posloupnost přijatých opatření, analýz a testů	39
7.2.1	KROK 1 – Prvotní změna materiálu, designu a uložení	39
7.2.2	KROK 2 – Zátěžové testy	40

7.2.3	KROK 3 – Kvalitativní analýzy	41
7.2.4	KROK 4 – Výpočet deformačních charakteristik	41
7.2.5	KROK 5 – Materiálové analýzy	42
8	KVALITATIVNÍ ANALÝZY	43
8.1	Blokový a boundary diagram	43
8.1.1	Blokový diagram I. Stupně	43
8.1.2	Blokový diagram II. Stupně	43
8.1.3	Boundary diagram	44
8.1.4	Boundary diagram se zaměřením na oblast přímo ovlivňující tepelný štít	46
8.2	Analýzy kořenových příčin	47
8.2.1	Diagram Rybí kost (Ishikawův diagram)	48
8.2.2	Analýza 5 Proč	50
8.3	Analýza stromu poruchových stavů (FTA – Fault Tree Analysis)	52
8.4	Kauzální mapa (Causal map)	54
8.5	Analýza příčin a důsledků poruch (FMEA – Failure Mode and Effect Analysis)	54
9	MATERIÁLOVÉ ANALÝZY	59
9.1	Součást č. 1	62
9.1.1	Přehledové fotografie součásti, pozorování stereomikroskopem	62
9.1.2	Pozorování součástí pomocí SEM, analýza složení materiálu pomocí EDX ..	63
9.1.3	Mikrostruktura	64
9.2	Součást č. 2	65
9.2.1	Přehledové fotografie součásti, pozorování stereomikroskopem	66
9.2.2	Pozorování součástí pomocí SEM, analýza složení materiálu pomocí EDAX ..	66
9.2.3	Mikrostruktura	68
9.3	Součást č. 3 a 4	70
9.3.1	Přehledové fotografie součástí, pozorování stereomikroskopem	70
9.3.2	Pozorování součástí pomocí SEM, analýza složení materiálu pomocí EDX ..	72
9.3.3	Mikrostruktura	73
10	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	75
11	ZÁVĚR	77
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	79
13	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	83
13.1	Seznam zkratk	83
13.2	Seznam tabulek	83
13.3	Seznam obrázků	83

1 ÚVOD

V automobilovém průmyslu, jako i v jiných průmyslových odvětvích, jsou nyní žhavým tématem emisní normy EURO. Tyto normy nutí automobilové výrobce k zásadním obměnám, které výrazně ovlivňují celkovou konstrukci vozidel a tím i jejich náročnost na výrobu a výslednou cenu. Zároveň s těmito změnami přichází řada problémů, ať už konstrukčních nebo výrobních, které je potřeba urychleně řešit.

Největší nutnost obměn se v posledních letech vyskytla u těžkých nákladních automobilů, zejména pak u kamionů. Ty jsou totiž využívány téměř nepřetržitě a často na velmi dlouhé trasy, proto se jim Evropské normy věnují přísněji.

Jedním z přijatelných řešení problému s emisními limitami pro těžké nákladní automobily byla náhrada vznětového motoru motorem zážehovým s alternativním palivem CNG. Bohužel motor na CNG palivo sice splňuje limity předepsané v normách, ale pracuje za mnohem vyšších teplot, než původní vznětový motor, a tudíž vpouští do turbodmychadla spaliny o zhruba 200 – 300°C vyšší teplotě. V důsledku toho jsou všechny komponenty turbodmychadla vystavovány horším provozním podmínkám, než na jaké byly původně koncipovány.

Ve firmě Garrett - Advancing Motion bylo nutno řešit problém s komponentou, jejímž účelem je chránit teplotně méně odolné části turbodmychadla. Součást, která je i u vznětového motoru vystavena hraničním teplotám pro materiál, ze kterého je vyrobena, musela najednou vydržet teploty daleko za hranicí její odolnosti.

Jako nápravné opatření byl nahrazen původní materiál tepelného štítu materiálem, který byl dříve v teplotách nad 1000°C úspěšně testován na jiných aplikacích. Bohužel i po této náhradě problém přetrvával. Ve firmě bylo tedy rozhodnuto, že je nutno provést kvalitativní analýzy ke zjištění kořenových příčin daného problému a pomocí nich a laboratorních testů navrhnout přijatelné řešení k odstranění příčin poruchy.

2 VLIV EMISNÍCH NOREM NA AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL

Jedním ze základních předpokladů firmy k udržení si konkurenceschopnosti a odbytu výrobků je následování trendů moderní doby. Nejedná se ovšem pouze o neustálé inovace a vylepšení již stávajících výrobků kvůli obavám z nasycení trhu či strachu z konkurence. Důležitým aspektem přežití firmy na trhu je následování a plnění norem, nařízení a předpisů, které jsou vydávány každým rokem. Jednou z těchto norem je norma kvality ISO 9001, která je nyní považována za základní pilíř, bez kterého firma nemůže příliš dlouho obstát na světovém a mnohdy i domácím trhu. Největší firmy, které shánějí své dodavatele se opírají zejména o tuto normu, která jim v mezích zaručí, že jejich dodavatelé splňují dané standardy a tudíž by měli zaručit i požadovanou kvalitu výrobku.

Ovšem na rozdíl od norem, které nejsou závazné a firmy je zavádějí dobrovolně, je nutné předpisy a nařízení vlády a nadvládních organizací dodržovat bez výjimek. Chce-li tedy firma dodávat své výrobky na trh zemí, kde jsou platná určitá vládní nařízení, která předepisují jisté hodnoty výrobkům (ať se jedná např. o rozměry, složení výrobku, tvar či míru kvality), musí se ujistit, že tato nařízení jejich výrobek splňuje. Je-li daná země také součástí mezinárodní organizace je třeba brát v potaz i tato nařízení. Speciálním případem je pak Evropská unie, která nemá přesný charakter mezinárodní organizace, ale je na rozdíl od ostatních organizací členským státům nadřazena, a tudíž jsou její nařízení a směrnice pro členské státy závazné a neměnné vnitřními předpisy jednotlivých států (v případě směrnic si státy sami pouze upravují způsoby dosažení cílů v nich uvedených). Proto je nutné, chce-li firma dodávat své výrobky na trh zemí EU, aby dodržovala všechna platná nařízení, směrnice a normy, které EU vydává. [1]

2.1 Emise v dopravě

V automobilovém průmyslu (a nejen zde) je jedním z neutuchajících bojů snaha o dodržování ekologických předpisů. Tyto předpisy zahrnují mimo jiné energetickou úsporu i snižování emisí v ovzduší. S postupující dobou i technologiemi jsou také předpisy týkající se ekologie stále přísnější. Limitní obsahy emisních prvků v ovzduší zejména velkých měst (např. Londýn) mohou výrazně poškodit lidské zdraví. Zdrojů těchto emisí je nespočet, a tak se vlády jednotlivých zemí snaží snížit je zejména v těch oblastech průmyslu, kde se jim to zdá nejméně náročné, a zároveň je množství vypouštěných emisí vysoké. Mezi tato odvětví patří například právě doprava, výroba energie (tepelné elektrárny, vodní elektrárny – emise skleníkových plynů), průmyslová výroba nebo spalování odpadu.



Obr. 1) Příklad HDV – kamion [3]



Obr. 2) Příklad LDV – pickup [4]

Zaměříme-li se přímo na emise v dopravě, musíme brát v potaz vytiženost jednotlivých druhů dopravních prostředků. Samozřejmě čím vytiženější a častěji používaný dopravní prostředek je, tím více vypouští emisí do ovzduší. Také záleží na velikosti a hmotnosti vozu, z níž plyne velikost motoru a jeho energetická náročnost.

V automobilovém průmyslu rozlišujeme z hlediska vytiženosti a ekologie dva druhy vozidel, které se od sebe výrazně liší z pohledu četnosti používání, energetické náročnosti a množství vypouštěných emisí: [2]

HDV (Heavy Duty Vehicles = Těžké nákladní vozy)

- Těžké nákladní automobily
- Kamiony – viz. obr. 1)
- Autobusy
- Těžká zemědělská technika
- Těžká stavební technika

LDV (Light Duty Vehicles = Lehké užitkové vozy)

- Osobní automobily
- Lehké nákladní automobily – viz. obr. 2)
- Sportovní užitková vozidla (SUV)

2.2 Emisní normy EURO

Evropská unie se zabývá emisemi automobilů ve velkém. Vydává pravidelně Normy EURO (již od roku 1992) pro těžké nákladní vozy i lehké užitkové vozy. Pro každý z těchto dvou druhů silničních motorových vozidel předepisuje jinou řadu norem s odlišným číslováním. Pro těžké nákladní automobily se používá označení EURO I-VI (číslováno římskými číslicemi) a pro lehké užitkové vozy EURO 1-6 (číslováno arabskými číslicemi).

S těmito normami stoupá tlak Evropské unie na výrobce silničních motorových vozidel z hlediska ekologie silničního provozu. Výrobci jsou tedy nuceni hledat stále lepší řešení jak emise efektivně snižovat.

EURO normy jsou **závazné**. Stanovují limitní hodnoty škodlivých prvků ve výfukových plynech motorových vozidel **nově uváděných na trh**. Limitní hodnoty obsahu škodlivin se určují jako závislost ujeté vzdálenosti na hmotnosti vypuštěných škodlivin. S každou nově číslovanou verzí normy přicházejí přísnější limitní hodnoty (limitní hodnoty pro emise benzínu a nafty z EURO VI jsou uvedeny v tab. 1). [5]

Limity obsažené v emisních normách EURO se týkají těchto prvků: [5]

- Oxid uhelnatý (CO)
- Uhlovodíky (HC)
- Oxidy dusíku (NO_x)
- Pevné prachové částice – drobné pevné částice unášené vzduchem

EURO normy se **nezabývají oxidem uhličitým ani sloučeninami síry** – tyto se řeší zvlášť.

Tab 1) Limitní hodnoty škodlivin u benzínu a nafty, obsažené v EURO VI [5]

Rok	Číslo Normy	CO <i>benzin</i>	CO <i>nafta</i>	NO _x <i>benzin</i>	NO _x <i>nafta</i>	HC <i>benzin</i>	HC+N Ox <i>benzin</i>	HC+N Ox <i>nafta</i>	PČ <i>nafta</i>
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
1992	I	3,16	3,16	-	-	-	1,13	1,13	0,18
1996	II	2,20	1,00	-	-	-	0,5	0,70	0,08
2000	III	2,30	0,64	0,15	0,50	0,20	-	0,56	0,05
2005	IV	1,00	0,50	0,08	0,25	0,10	-	0,30	0,025
2009	V	1,00	0,50	0,06	0,18	0,10	-	0,23	0,005
2014	VI	1,00	0,50	0,06	0,08	0,10	-	0,17	0,005

Evropská unie není jediná, která vydává normy ohledně emisních limit u silničních motorových vozidel. Velké země jako Čína (China), Indie (BS), Japonsko (JP), USA (EPA) či Brazílie (P) vydávají své vlastní emisní normy, které mají nastavené podobné hranice přípustnosti obsahu škodlivin ve výfukových plynech, jako normy EURO platící pro podobný časový úsek.

V rámci následování požadavků norem bylo jedním ze zásadních kroků směrem k větší ekologii v dopravě přiřazení **turbodmychadla** k motoru. Toto zařízení v sobě kombinuje mezi jinými (např. větší výkon) také dvě zásadní vlastnosti – **snižuje spotřebu paliva** na počet ujetých kilometrů a tedy i **snižuje množství emisí**, jelikož využívá část energie unikající ve výfukových plynech. Díky tomuto zařízení se dá vcelku kvalitně regulovat určité množství emisí vypouštěných motorovými vozidly. [6]

Se stále se zpřísňujícími požadavky emisních norem EURO však přestává pouhé používání takových prostředků ke snížení emisí stačit. S očekávaným příchodem normy EURO VII se předpokládá, že maximální obsah jednotlivých škodlivých prvků v emisích silničních motorových vozidel bude prakticky nedosažitelný. U vznětových motorů používaných u HDV vozidel se již pokládá za nemožné dosažení tolerovaného množství některých emisních prvků. Jak tedy zařídit, aby tyto druhy vozidel splňovali emisní normy, aby se mohly udržet na trhu bez výraznějších změn?

2.3 Výhody a nevýhody použití motorů na CNG palivo

Jedním z řešení, které nakonec bylo přijato jako nejideálnější, je změna typu motoru používaného u těžkých nákladních vozidel. Tyto motory mají řadu výhod oproti nejvíce používaným vznětovým motorům a zážehovým motorům na benzínové palivo.

2.3.1 Cena paliva

Se stále se zvyšujícími cenami pohonných hmot, závisujícími na celosvětově se snižujících zásobách ropy, se pohon na CNG jeví jako nejlepší volba jak snížit náklady na provoz vozidla. Zatímco u CNG vychází cena na zhruba 1kč na 1 ujetý kilometr, u benzínu nebo nafty se tato cena pohybuje mnohdy výše než 2 kč/km.

Vzhledem k vysokým celosvětovým zásobám CNG se narozdíl od ropy dlouhodobě nepředpokládá růst jeho ceny. [7]

2.3.2 Ekologie a CNG

Porovnáme-li poměr emisí jednotlivých typů spalovacích motorů používaných u běžných silničních motorových vozidel zjistíme, že emisně nejčistším typem spalovacího motoru je motor na CNG palivo – viz Tab 2) [7]

Tab 2) Množství emisí CNG v porovnání s benzínem a naftou [7]

Druh emisí	CNG má v porovnání s benzínem	CNG má v porovnání se naftou
CO ₂	až o 30% nižší	-
CO	až o 75% nižší	až o 50% nižší
NO _x a aromatické uhlovodíky	až o 80% nižší	až o 80% nižší

2.3.3 Celosvětové zásoby CNG

Zatímco LPG vzniká při zpracování ropy, a tudíž jsou jeho zásoby na množství ropy závislé, CNG ve zkratce znamená „Compressed Natural Gas“, tedy stlačený zemní plyn, který je převážně tvořen metanem (přes 90%) a etanem (až 6%). Dle některých odhadů jsou světové zásoby přírodního plynu asi 511 000 miliard kubických metrů a měly by vydržet až 200 let. [8]

2.3.4 Nevýhody motoru na CNG palivo

Použití motorů na CNG má ovšem i několik negativ. Jedním z nich může být omezená síť plnicích stanic. V roce 2017 jich bylo pouze 145 po celé České republice. [8]

Vozy na CNG umožňují pohon jak na zemní plyn, tak na benzín (bivalentní konstrukce) a díky této kombinaci je jim umožněn daleký dojezd. Bohužel ale dojezd vyloženě na CNG palivo je malý – tedy v závislosti na velikosti obou nádrží (plynové a benzinové). CNG je obvykle nutno doplňovat častěji a proto je potřebná širší síť palivových stanic. [8]

2.3.5 Vliv náhrady vznětového motoru na používání turbodmychadel

Náhrada vznětového motoru motorem na CNG palivo neovlivní konstrukci vozidla pouze samotnou náhradou motoru. Tím, že motor na CNG palivo pracuje za jiných podmínek a především za jiných teplot než vznětový motor, ovlivní tato náhrada fungování i dalších zařízení, nacházejících se v blízkosti motoru - tedy především již zmíněné **turbodmychadlo**.

Zatímco u vznětových motorů pracuje turbodmychadlo se spalinami o teplotách maximálně okolo 760°C, u motorů na CNG palivo je to většinou 840 – 920°C ale teploty se mohou v krajních případech vyšplhat až na **1050°C**. Tyto rozdíly bohužel zcela ovlivňují odolnost některých částí turbodmychadla, které jsou koncipovány pouze pro teploty do zhruba 800°C.

3 SYSTÉMOVÝ ROZBOR PRÁCE

3.1 Problémová situace

Při stále se zpřísnujících požadavcích na ekologii silničního provozu a snížení emisí vypouštěných silničními motorovými vozidly přichází u výrobců automobilů změny ve volbě spalovacích motorů pro různé typy vozidel, zejména u hojně užívaných těžkých nákladních vozidel (HDV), pro které jsou emisní limity obzvláště přísné. Jelikož však každý typ spalovacího motoru (dle použitého paliva) pracuje za jiných provozních podmínek (zejména co se týká teploty vypouštěných spalin), pro výrobce turbodmychadel to zpravidla znamená provedení změn i na samotném turbodmychadle. Tyto změny se většinou týkají materiálu, designu nebo uložení jednotlivých součástí, aby se zabránilo nežádoucím funkčním selháním v závislosti na změně provozních podmínek.

3.2 Formulace problému

Snížení deformací vybrané součásti turbodmychadla pomocí nápravných opatření provedených na základě výsledků z analýz kořenových příčin selhání součásti a přidružených analýz a testů.

Detailnější popis problému je uveden v kapitole 5.

3.3 Formulace cílů a řešení

Cíle diplomové práce byly stanoveny následovně:

- Popis současného stavu problematiky.
- Systémový rozbor řešené problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.
- Vypracování Boundary Diagramu pro tepelný štít ve vztahu k okolním dílům, sestavení Causal Map.
- Zpracování Fault tree analysis (FTA) a Failure Mode and Effect Analysis (FMEA).
- Příprava dokumentace Root Cause Analysis (RCA) s využitím výsledků pokročilých materiálových analýz.
- Návrh nápravných opatření pro odstranění příčin selhání. Návrh plánu systémových opatření pro návrh tepelného štítu k eliminaci rizika vzniku podobných selhání.
- Vlastní závěry a/nebo doporučení.

Popsaný postup při řešení problému byl zvolen z důvodu velmi nízké úspěšnosti prvotních nápravných opatření, která se zavedla bezprostředně po selhání součásti. Firma se rozhodla použít systematičtější přístup a proto si vybrala uvedené kvalitativní a další analýzy, které chce, aby byly na součásti a systému provedeny, na základě jejichž výsledků budou přijata příslušná opatření.

3.4 Popis řešené soustavy

Jelikož se tato práce soustřeďuje na komponentu, která je součástí turbodmychadla, je třeba pro pochopení problému samotného kromě pochopení funkce problémové součásti nejdříve pochopit funkci celého systému. **Obojí je popsáno v kapitole 4.**

4 KONSTRUKCE A PRINCIP TURBODMYCHADLA

Turbodmychadlo je turbínou poháněné zařízení, určené ke stlačování vzduchu vstupujícího do motoru, čímž výrazně zvyšuje jeho objemovou účinnost. [20]

Při spalování paliva se uvolňuje energie, z níž pouze přibližně jedna třetina je přeměněna na práci klikového hřídele. Zbytek energie se ztrácí v chladicím systému nebo odchází ven výfukovým systémem. Znamená to, že **více než polovina získané energie může zůstat nevyužita**. Turbodmychadlo je schopné **využít energii spalin** vycházejících výfukovým systémem, a tedy až jednu třetinu celkové energie z paliva. Tyto spaliny mají velmi vysokou teplotu a značné množství kinetické energie, která je schopná roztočit turbínu turbodmychadla pohánějící kompresor a tak může být využita ke **zvýšení účinnosti motoru**. [20]

4.1 Konstrukce turbodmychadla

Turbodmychadlo se skládá ze dvou hlavních částí: (viz obr. 3) a obr. 4)) [21]

- **Turbínová část** (také zvaná „horká část turbodmychadla“)
- **Kompresorová část** (také zvaná „studená část turbodmychadla“)

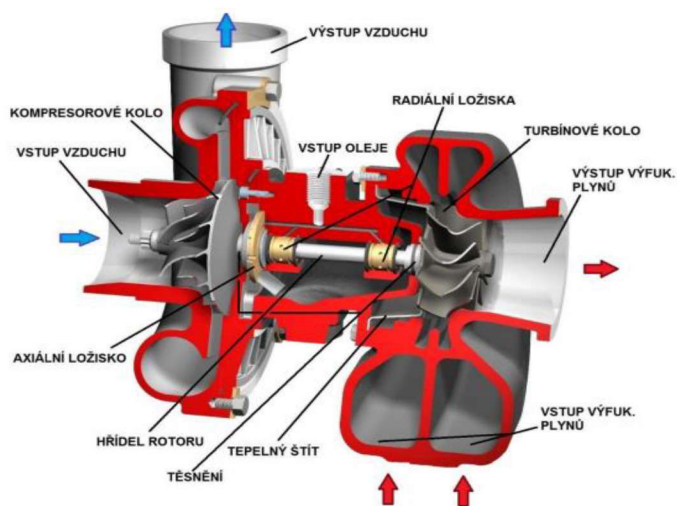
Tyto dvě části jsou propojeny **ložiskovou skříní**, ve které je uložena rotační soustava – turbínové a kompresorové kolo. Obě kola jsou ve vzájemném kontaktu skrze hřídel, která je s turbínovým kolem napevno spojena svarem. [21]



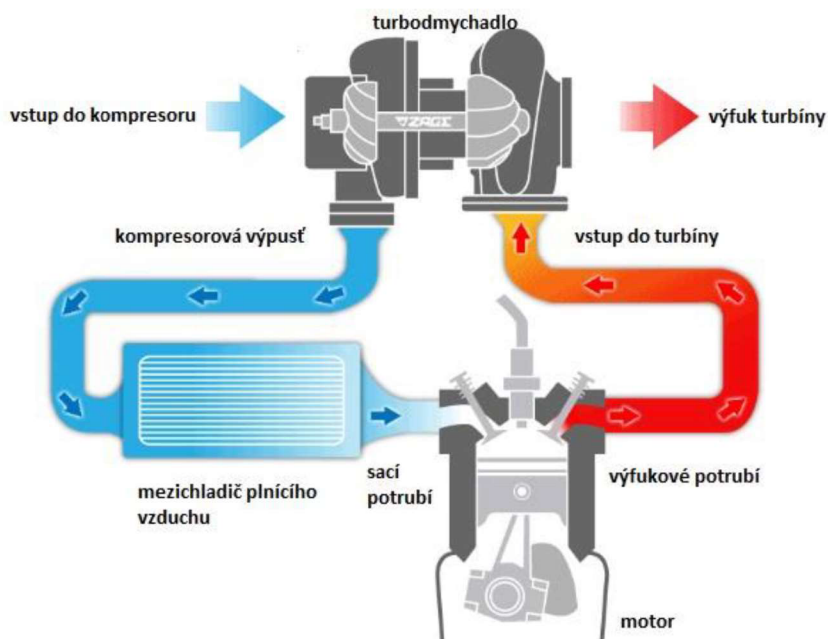
Obr. 3) Konstrukce turbodmychadla – Vnější pohled [9]

4.2 Princip funkce turbodmychadla

V horké části turbodmychadla – turbínové skříni – je turbínové kolo roztáčeno spaliny vystupujícími z motoru. Ty předávají turbínové části turbodmychadla jak kinetickou, tak i nepříznivou tepelnou energii. Turbodmychadlo tedy musí být schopné pracovat za velmi vysokých provozních teplot (které u motorů na CNG palivo obvykle dosahují teplot okolo 900°C, mimořádně i přes 1000°C). Turbínové kolo přes společnou hřídel roztáčí kompresorové kolo ve studené části turbodmychadla. Díky tomu je kolem do kompresorové skříňe nahnán vzduch, který je posléze stlačen a poslán vedením zpět k motoru. Jelikož se při stlačování vzduch ohřívá, je nutné jej před vstupem do motoru zchladit. K tomu funguje ve vedení zabudovaný mezichladič plnicího vzduchu, který vzduch schladí na příznivou teplotu a tím ještě více sníží jeho objem. Celý princip funkce je graficky znázorněn na obr. 5). [22]



Obr. 4) Konstrukce turbodmychadla – pohled v řezu na vnitřní součásti [10]



Obr. 5) Schéma pohybu pracovních plynů turbodmychadla [11]

Díky stlačenému vzduchu, přiváděnému do motoru, můžeme spálit rychleji větší množství paliva, což vede k většímu výkonu motoru. Vzhledem k využívání energie výfukových plynů se zlepšuje energetická bilance motoru, zvyšuje se termická účinnost a snižuje spotřeba paliva. Dalšími výhodami turbodmychadla jsou mimo jiné také menší velikost i hmotnost motoru, nižší hluk a **snížení emisí**. [22]

4.3 Vysoké provozní teploty

Jak již bylo řečeno výše, turbodmychadlo musí pracovat za velmi vysokých teplot, které přichází se spalinami do turbínové skříně. Například u vznětových motorů jsou tyto teploty až 760°C. Kompresorová skříň ale pracuje naopak za nízkých teplot, a proto se musí pečlivě vybírat materiály použité pro jednotlivé části turbodmychadla. Tyto materiály jsou vybírány tak, aby byli efektivní jak z hlediska výrobní ceny a délky výrobního procesu, tak i kvality materiálu a jeho odolnosti pro dané provozní podmínky. Nejen výběr materiálu je však důležitý pro kvalitu turbodmychadla. Významná je také konstrukce jednotlivých součástí, aby nedocházelo například ke vzniku nežádoucích koncentrátorů napětí, které by způsobily selhání některé z nich.

4.4 Tepelný štít

Aby se nepříznivá tepelná energie nepřenesla z turbínové do ložiskové a kompresorové části (což by vedlo k poškození součástí citlivějších na vysoké teploty), je mezi turbínovou a ložiskovou skříň umístěna součást zvaná **Tepelný štít**. Ta je při provozu dlouhodobě vystavena velmi vysokým teplotám spalin.

Tepelný štít je kruhovitá tenkostěnná součást, nacházející se v těsné blízkosti turbínového kola. Tato součást uměle vytváří mezi turbínovým kolem a centrální ložiskovou skříň **dutinu vyplněnou vzduchem**. Jelikož vzduch má násobně nižší tepelnou vodivost než kovy, **eliminuje tato dutina přenos tepla** z turbínové skříně a snižuje tak teploty ložiskové skříně a dalších částí turbodmychadla. V dutině probíhá přenos tepla radiací, a předpokládá se i přenos přirozenou konvekcí a kondukcí.

Tepelný štít je součástí, která může nabývat nespočet velikostí a tvarů v závislosti na typu vozidla a tedy i typu turbodmychadla používaného pro daný motor – viz obr. 6) a obr. 7). Jeho konstrukce a materiálové složení je uzpůsobeno k použití v rozličných aplikacích.



Obr. 6) Příklad tepelných štítů, používaných u HDV [24]



Obr. 7) Příklad tepelných štítů, používaných u LDV [23]

5 UVEDENÍ DO ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

Na základě emisních limit v normě EURO VI bylo nutné nahradit používaný vznětový motor u HDV motorem na CNG palivo, který má emise škodlivých prvků, jenž jsou předmětem EKO norem, mnohem nižší.

Při náhradě motoru byl do turbodmychadla k němu přiřazenému použit klasický tepelný štít z nerezové oceli s nižším obsahem legujících prvků (*pro účel této práce bude tento materiál dále uváděn jako „původní materiál“ nebo „materiál A“*), který se používal i na původních vznětových motorech. Bohužel se ukázalo, že tak vysoké teploty, jakých dosahují spaliny motorů na CNG, původní materiál neustojí. Na štítu docházelo k **velkým tvarovým deformacím**, které vedly ke kontaktu tepelného štítu s turbínovým kolem a následnému odírání. Výsledkem byla **ztráta funkce tepelného štítu** a odbroušení značné jeho části. To vedlo i k poškození turbínového kola – ať už samotným odíráním nebo následným kontaktem lopatek kola s uvolněným materiálem štítu.

Prvním krokem při řešení tohoto problému byla tedy **náhrada původního materiálu nerezovou ocelí s vyšším obsahem legujících prvků – zejména chromu** (*pro účel této práce bude tento materiál dále uváděn jako „nový materiál“ nebo „materiál B“*), která má odolnost proti oxidaci až do zhruba **1090°C** (původní materiál pouze do 820°C) a byl dříve **úspěšně otestován** na jiných aplikacích.

Ačkoliv byl materiál nahrazen, byl od zákazníka vrácen štít s obdobným poškozením, jaký se vyskytoval u součástí z původního materiálu. **Bylo tedy rozhodnuto, že je nutné provést kvalitativní analýzy a laboratorní testy ke zjištění příčin poškození součástí.**

6 TEORIE K POUŽITÝM NÁSTROJŮM KVALITY

K analýze systému, u kterého potřebujeme zjistit požadované informace, lze v praxi použít některý z nástrojů kvality. Tyto nástroje jsou založené na obecných postupech a pomáhají ke shromáždění a logickému uspořádání požadovaných informací a nalezení jejich logických souvislostí. Výsledky získané pomocí těchto nástrojů lze využít k provedení dalších analýz či k přímým rozhodnutím při řešení problému.

6.1 Bloková schémata, boundary diagram

Diagramy, sloužící jako reprezentace zkoumaného systému, se mají utvářet jednoduché a přehledné, **musí být ale dostačující**. Nesmí obsahovat mnoho zbytečných informací, ale informace musí být dostatečné k tomu, aby vypověděli vše nutné pro následné provedení některé z analýz. Diagram tedy musí obsahovat všechny **funkce zásadně důležité** pro zkoumaný systém.

Aby byly pokryty rozličné etapy provozu zkoumaného systému, je možno použít rozličné druhy diagramů.

Blokový diagram je analýza systému, kde jsou jednotlivé prvky systému vepsané do bloků (čtverců a obdélníků), reprezentujících operace a vztahy v daném systému. Každý blok reprezentuje element systému a čáry nebo šipky reprezentují tok dat nebo materiálu.

Blokový diagram musí obsahovat alespoň:

- Rozdělení systému na subsystémy, včetně funkčních vztahů
- Vhodně označené vstupy i výstupy a odkazová identifikační čísla jednotlivých subsystémů
- Technické vlastnosti (zálohy, alternativní cesty apod.), poskytující ochranu proti poruše systému

Blokové schéma je rychlá a vcelku jednoduchá cesta jak graficky zobrazit základní operace v systému a jejich návaznost. [12]

6.1.1 Blokové schéma I. Stupně

K analýze systému a toku materiálu tímto systémem je potřeba nejprve pochopit jeho vztah jako celku k okolí. Jedině tak pochopíme jejich vzájemnou funkční závislost a zjistíme, jak může být systém okolím ovlivněn.

K zobrazení tohoto vztahu nám pomáhá **blokové schéma I. stupně**. Toto schéma nám ukazuje vstupy a výstupy informací (data/materiál), které systém musí zpracovávat.

6.1.2 Blokové schéma II. Stupně

Když se zkoumaný systém skládá z několika subsystémů, je někdy zapotřebí vidět jednotlivé vztahy a toky mezi nimi – to nám pomůže k pochopení dalšího složitějšího větvení celého systému.

Blokové schéma I. stupně nám ukazuje důležité uzly mezi subsystémy - často totiž k poruchám dochází právě na přechodu mezi subsystémy.

6.1.3 Boundary diagram

Smyslem boundary diagramu je identifikovat a zároveň reprezentovat komponenty systému, stejně tak jako komponenty se systémem související. Je tedy vytvářen na vyšší úrovni, než je úroveň samotného systému.

Pro boundary diagram je typické, že zahrnuje všechny součásti systému a mechanismy, stejně jako:

- Další systémy
- Nástroje montáže
- Servisní/zákaznické nastavení

Při vytváření boundary diagramu je nutné vzít do úvahy všechna uživatelská prostředí. [13]

6.2 Analýza kořenových příčin – Root Cause Analysis (RCA)

Přesná obecně přijatelná verze definice analýzy kořenových příčin není známá. Obecně se ale v několika publikacích udává, že „Analýza kořenových příčin je strukturované zkoumání, jehož cílem je identifikování pravé příčiny problému a opatření nezbytných pro jeho eliminování.“ [přímá citace 14].

I když se často mluví o analýze kořenových příčin, jakoby to byla jedna samostatná metoda, není tomu tak. Tato analýza se neprovádí pomocí jednoho jednoduchého nástroje a postupu, ale skládá se z několika různých technik, které se nejčastěji používají v kombinaci. Jedná se tedy o nadřazený termín, jímž se popisuje větší množství nástrojů, technik a metod, používaných pro odhalení základních (kořenových) příčin problémů. [19]

RCA je základním stavebním kamenem organizací ve snaze o neustálé zlepšování. Produktem této analýzy nejsou pro danou organizaci žádné podstatné výsledky. RCA musí být brána jako **součást trvalé snahy o zlepšování** v každé části organizace a v každém stupni všech procesů. [14]

Analýza kořenových příčin se skládá z 5 základních kroků: [15]

1. Definování problému

Problém je nutno definovat úplně a správně. Stane-li se, že se v definování podstaty problému naskytne chyba, objeví se většinou chyba i v samotné analýze, jelikož se analytik snaží řešit něco, co ve skutečnosti není cílem.

2. Pochopení problému

K pochopení problému je zapotřebí sehnat všechny potřebné informace, které popisují všechny jeho důsledky a známé okolnosti jeho vzniku. V tomto kroku se často používá analýz jako jsou např. analýza příčiny a důsledku (Cause and Effect Analysis) či brainstorming.

3. Bezprostřední akce

Tento krok zahrnuje implementování dočasných protiopatření v místě problému k zamezení velkého dopadu na chod firmy. V tomto kroku je nutné se řídit poučkou: **„Čím dál od zdroje problému přijmu příslušná protiopatření, tím s menší pravděpodobností přispěji k řešení problému“.**

4. Opravné akce

Jedná se o determinaci a prioritizaci nejpravděpodobnějších základních příčin problému, jelikož většinou bezprostřední akce nevyřeší daný problém. Opravné akce se implementují ke zmírnění, nebo přinejlepším eliminování důsledků problému.

5. Přijetí řešení

Poté, co byla opatření stanovena a implementována, je třeba zavést a přijmout konečné řešení. Je-li řešení potvrzeno jako úspěšné, je nutné zavedení pravidel a kontrolních metod, které zabrání opakování problému v budoucnosti.

Jednotlivé nástroje RCA můžeme rozdělit do celkem **7 základních skupin**, podle jejich účelu jak je uvedeno v následujícím přehledu, i s příklady k jednotlivým skupinám: [14]

1. Pochopení problému

- Postupové digramy,
- Kritická událost,
- Hvězdicový diagram,
- Matice výkonnosti.

2. Brainstorming příčiny problému

- Brainstorming,
- Brainwriting,
- Matice „je-není“,
- Nominální skupinová metoda,
- Párová srovnávání apod.

3. Shromáždění údajů o příčině problému

- Vzorkování, Průzkumy,
- Seznam kontrolovaných částí apod.

4. Analýza údajů o příčině problému

- Histogram, Paretův diagram,
- Bodový korelační diagram,
- Diagram pro koncentraci problémů,
- Diagram souvztažností,
- Diagram afinity.

5. *Identifikování kořenových příčin*

- **Diagram příčiny a následku (např. Ishikawa),**
- Maticový diagram,
- Pět proč,
- **Analýza stromu poruchových stavů.**

6. *Eliminování kořenových příčin*

- Six thinking hats,
- Teorie tvůrčího řešení problémů,
- Systematické tvůrčí myšlení.

7. *Implementování řešení*

- Stromový diagram,
- Analýza silového pole.

6.3 Diagram příčin a následků – Cause-and-Effect Diagram (Ishikawa)

Pomocí diagramu příčiny a následku analyzujeme vztahy, které existují mezi daným problémem a jeho jednotlivými příčinami. V tomto diagramu se kombinuje chaotický druh analýzy (např. Brainstorming) s cílem vytvořit systematickou účinnou metodu. Hlavním účelem diagramu je pochopit, co zapříčiňuje daný problém. [19]

Diagramů příčiny a následku existuje několik. Nejčastěji používaným je diagram „Rybí kost“ – viz obr. 8), který dostal název podle svého tvaru, připomínajícím rybí kostru. Dalším typem může být diagram procesu, který se používá k analýze problémů vyskytujících se v podnikových procesech.[14]

Diagram rybí kost má dva rozdílné způsoby sestavení: [14]

1. Analýzou rozptylu – Analyzovaný problém se zakreslí v pravé části diagramu, kde ústí konec hlavní šipky. Jako odbočky této šipky se stanoví hlavní skupiny pravděpodobných příčin. U těchto skupin se poté jako vedlejší odbočky zakreslí možné příčiny nižších úrovní.
2. Výčtem příčin – Pomocí brainstormingu se zjistí všechny pravděpodobné příčiny. Ty se následně seskupují a až poté se zakreslí do diagramu.

Hlavní skupiny příčin je možno vytvářet jakékoliv, v závislosti na typu řešeného problému. Jejich počet bývá obvykle 4-6. Nejčastěji používané hlavní skupiny jsou tyto 4: [16]

- Stroj (machine),
- Materiál (material),
- Člověk (man),
- Metody (methods).

Jednotlivé položky v diagramu (příčiny) zjišťujeme pokládáním otázky „Proč?“. K nalezení kořenových příčin je nutno otázku „Proč“ položit nejméně třikrát, nejvíce však Pětkrát.

Již na třetí úrovni diagramu se mohou vykytovat kořenového příčiny problému, které je nutno eliminovat. Jeden problém může mít však několik kořenových příčin, a proto je zapotřebí analýzu provést do důsledku a projít všechny možnosti, protože nalezení jedné kořenové příčiny neznamená vždy úspěšné ukončení analýzy. [16]

6.4 Analýza 5 Proč – 5 Why's Analysis

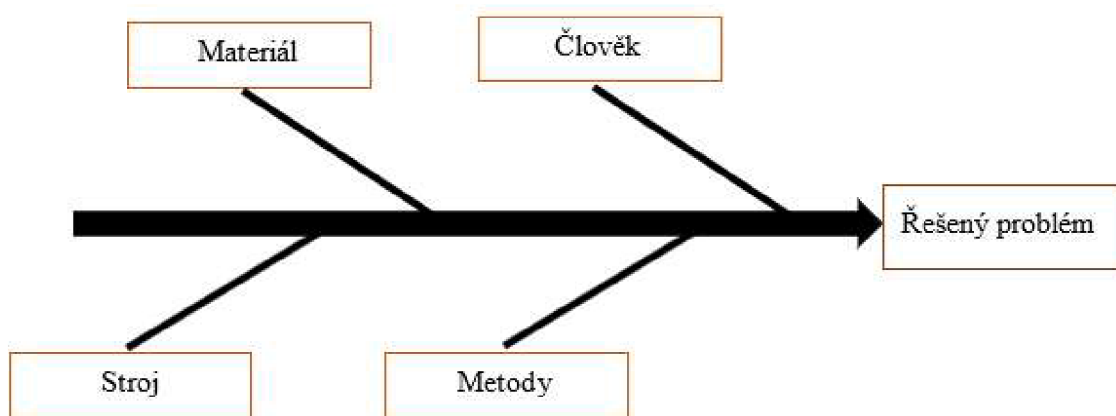
5 Proč patří mezi jednoduché analýzy kořenových příčin – není příliš komplexní a většinou se její pomocí nelze dobrat ke všem možným příčinám. Podstatou je nořit se hlouběji do jednotlivých úrovní příčin a tedy přiblížení koncepce RCA. [19]

Hlavní část analýzy spočívá v neustálém dotazování se slovem „Proč?“ a to pokaždé, byla-li nalezena nějaká příčina. Nelze-li již na otázku odpovědět, a tedy neexistuje již další úroveň pro dotazování, pokládá se daná příčina za kořenovou. [14]

Postup při analýze: [14]

1. **Určení počátku analýzy** – tedy výchozího bodu, což může být řešený problém, nebo příčina nějakého problému, kterou chceme dále analyzovat.
2. Užití některého z přístupů identifikace příčin v úrovni pod zvoleným výchozím bodem (např. brainstorming).
3. U každé možné příčiny **se zeptat, proč nastala**.
4. Po každé odpovědi na otázku Proč **se dotazovat stále znovu až do doby, kdy již není možno odpovědět**. Nejčastěji se touto metodou lze dostat nejdále na 5 úrovní příčin.

Analýza 5 Proč bývá často užívána jako **základní stavební kámen pro analýzu stromu poruchových stavů (FTA)**. [14]



Obr. 8) Příklad diagramu rybí kost

6.5 Analýza stromu poruchových stavů – Fault Tree Analysis (FTA)

Ačkoliv se pro tuto metodu v Českém jazyce používá nespočet názvů (Analýza stromu chyb, analýza stromu vad, analýza stromu poruch apod.), což je zapříčiněno nesprávným překladem anglického slova „fault“, je Českým normalizačním institutem uznáván pouze jeden správný překlad, a to „Analýza stromu poruchových stavů“.

„Analýza stromu poruchových stavů (FTA – Fault tree analysis) se zabývá identifikací a analýzou podmínek a faktorů, které způsobují nebo mohou potenciálně způsobit výskyt nebo přispívat k výskytu specifikované vrcholové události.“ [přímá citace 17]

K FTA lze přistupovat dvěma způsoby: [17]

a) Kvalitativní přístup

- Pravděpodobnost události a přispívajících faktorů, či četnost výskytu se **nesleduje**. Provádí se podrobně pouze kvalitativní analýza poruchových stavů a událostí – **hledání potenciálních příčin poruchových stavů**, nikoliv pravděpodobnost jejich výskytu.
- Tomuto přístupu se též říká tradiční FTA.

b) Kvantitativní přístup

- Pomocí analýzy stromu poruchových stavů se modeluje produkt, systém či proces a většina poruchových stavů a událostí má pomocí analýzy nebo zkoušky stanovenou pravděpodobnost výskytu vrcholové události.

Při FTA se používají značky a identifikátory (někdy také zvané hradla) - viz obr. 9), reprezentující vztahy poruchových stavů a odhalující tak kombinace stavů vedoucích k dané poruše – toto je také výhodou této metody, jelikož se díky ní lze dobrat i k nalezení událostí se společnými příčinami, či takových, které se přihodí pouze při kombinaci více faktorů.

Nejpoužívanější hradla:

- **AND** - událost nastane jen tehdy, pokud současně nastanou všechny vstupní události
- **OR** - událost nastane jen tehdy, když nastane jakákoliv vstupní událost, nebo jejich libovolná kombinace.
- **Základní událost** - Událost na nejnižší úrovni, pro kterou jsou k dispozici pravděpodobnosti výskytu nebo informace o bezporuchovosti

Tato analýza je **deduktivní** metoda probíhající takzvaně odshora dolů – tedy od určené vrcholové události krok po kroku zpět až k jejím prvotním příčinám. Je tedy pravým opakem analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA), která je metodou induktivní.

FTA je použitelná nezávisle na jiných analýzách příčin poruch, ale může být také jednou ze skupiny více analýz provedených na vybraném systému. Je obzvláště vhodná pro analýzu systémů skládajících se z více funkčně souvisejících či závislých subsystémů.



Obr. 9) Často používané značky pro diagram FTA

Nejčastěji je tato analýza prováděna před vytvořením nového produktu nebo nějaké modifikace ve všech etapách návrhu. Jedná se zejména o potřebu identifikace potenciálních problémů návrhu, včetně časných etap, kdy ještě nejsou známy veškeré informace o podrobnostech daného návrhu. [17]

Identifikují se také potenciální problémy mající původ v: [17]

- fyzickém návrhu daného produktu
- namáhání během provozu
- namáhání provozním prostředím
- závadách výrobních procesů
- postupech údržby

Kombinace s jinými analýzami bezporuchovosti

FTA se často používá v kombinaci s jinými typy analýz. Lze tak dosáhnout praktické kontroly či rozšíření získaných poznatků.

Mezi analýzy, se kterými bývá FTA často kombinovaná patří např. analýza stromu událostí (ETA), Markovova analýza, binární rozhodovací diagram (BDD) a blokový diagram bezporuchovosti. Nejčastěji se však nachází v kombinaci s analýzou způsobů a důsledků poruch (FMEA). Je to proto, že každá z analýz využívá opačný přístup zdůvodnění příčin – FTA využívá deduktivní, zatímco FMEA induktivní. Jedná se tedy o kombinaci, která nám poskytne dobrý argument pro důvěru v úplnost a správnost analýzy. [17]

Kontrola konzistence FTA a FMEA: [17]

- kterákoliv z poruch identifikovaných v FMEA, jež vedou k vrcholové události určené v FTA se musí objevit jako jednobodová porucha (porucha, jež by při svém výskytu zapříčinila poruchu celého systému)
- kterákoliv jednobodová porucha z analýzy FTA se musí objevit i v FMEA

6.6 Analýza způsobů a důsledků poruch - Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

„Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA – Failure Mode and Effects Analysis) je systematický postup analýzy systému za účelem zjištění potenciálních způsobů poruch, jejich příčin a důsledků na technické parametry (výkonnost) systému (bezprostřední montážní sestavy i celého systému či procesu). Termín systém se zde používá jako představitel hardwaru, softwaru (s jejich vzájemným působením) nebo procesu.“ [přímá citace 18]

Jelikož je cílem analýzy preventivní odstranění možných poruch (FMEA je iterativní proces, jež je prováděn doprovodně k procesu návrhu), provádí se většinou v počátcích vývojového cyklu. Tím se sníží náklady na všechny analýzou objevené poruchy, které by se mohly objevit v následujících vývojových etapách. [18]

Před provedením analýzy je nutno dostatečně vymezit zkoumaný systém a vytvořit funkční blokový diagram systému s technickými parametry jednotlivých prvků. Díky tomu lze mít názornou představu o jednotlivých interakcích prvků v systému, a tudíž o možných problémových místech. [18]

Kvalitní analýza způsobů a důsledků poruch je založena na práci **týmu složeného z odborníků**, kteří dle svých zkušeností a znalostí dokážou nezávisle na ostatních odhadnout

možné chování a poruchy systému. Doporučené je mít tým složený z odlišně odborně zaměřených jedinců, aby tak byl poskytnuty názory z různých úhlů pohledu. [18]

Jelikož se FMEA zabývá jednotlivými způsoby poruch a jejich důsledky, a tedy se veškeré způsoby poruch zpracovávají nezávisle, **není tato analýza vhodná pro zjišťování poruch vzniklých posloupanostmi několika událostí či poruch závislých**. Může se tedy stát, že i po provedení zevrubné analýzy FMEA se objeví závažná porucha, jež nebyla predikována a vznikla kombinací několika zdánlivě nedůležitých příčin. [13,18]

Analýza způsobů a důsledků poruch je pružným nástrojem, který je možno přizpůsobit dle specifických potřeb daného odvětví či produktu. [18]

Existují čtyři hlavní důvody pro provedení FMEA: [18]

1. Zjištění poruch s nežádoucími dopady na provoz systému
2. Splnění zákaznických požadavků dle smlouvy
3. Snížení poruchovosti systému nebo zlepšení bezpečnosti
4. Zlepšení udržitelnosti systému

Jedním ze základních kamenů analýzy je vymezení hranice zkoumaného systému. Tato hranice má tvořit fyzické a funkční rozhraní systém-okolní prostředí, včetně systémů se kterými ten analyzovaný vzájemně interaguje. Tato hranice by měla být pokud možno totožná s hranicí pro návrh a údržbu. [13,18]

6.6.1 Stanovení způsobů poruch

Každý systém má své kritické prvky, jejichž stav ovlivňuje provoz celého systému. Proto je zjištění těchto kritických prvků klíčem pro vyhodnocení systému z hlediska jeho technických parametrů. Efektivita zjišťování způsobů poruch a jejich důsledků se zvyšuje vypracováním seznamu těch způsobů poruch, jež lze předvídat podle: [18]

- Způsobu použití systému
- Konkrétních prvků použitých v systému
- Provozního režimu
- Provozních specifikací
- Časových omezení
- Působících vlivů prostředí
- Působících vlivů provozu

6.6.2 Stanovení příčin poruch

Nejpravděpodobnější příčiny každého zapsaného způsobu poruchy je nutno zjistit a stručně popsat. Zjišťování a popis, jakož i návrhy na zmírnění těchto poruch se má provádět na základě závažnosti jejich důsledků. Tím se předejde zbytečnému složitému rozšiřování analýzy bezvýznamnými poruchami. Naopak, čím závažnější jsou důsledky dané poruchy, tím přesnější musí být popis její příčiny. [18]

Příčiny poruch lze stanovit také na základě analýz poruch během provozu nebo při zkušebních testech. Pokud se však jedná o návrh nový bez předchozích testů a zkušeností, je možné analýzu stavět na názorech odborníků z dané oblasti. [18]

6.6.3 Stanovení důsledků poruch

Důsledek poruchy bývá následkem jednoho či více způsobů poruch pro funkci, provoz či stav objektu. Je nutné zjistit, vyhodnotit a následně zaznamenat všechny způsoby poruch. Pokud je to vhodné, měly by se uvážit také činnost údržby a cíle systému. [18]

Důsledek poruchy na nižší úrovni může ovlivnit také následující vyšší stupeň či dokonce nejvyšší analyzovaný stupeň daného rozčlenění, proto je dobré na každém stupni vyhodnotit i důsledky poruch pro stupeň vyšší. [18]

6.6.4 Klasifikace závažnosti konečných důsledků

Závažnost je zde brána jako posouzení důsledku způsobu poruchy a jeho významnosti z hlediska provozu objektu. Klasifikace samotná silně závisí na druhu aplikace FMEA, proto je nutné zvažovat mnoho faktorů: [18]

- Povaha systému brána ve vztahu k možným následkům pro uživatele či životní prostředí, které mohou vyplynout z poruchy
- Technické charakteristiky systému/procesu (funkční výkonnost)
- Požadavky od zákazníka (Smluvní požadavky)
- Požadavky na bezpečnost vyplývající z vládních nařízení/ oborové bezpečnostní požadavky pro určitá průmyslová odvětví
- Záruční požadavky

Přehled klasifikací, užívaných především v **automobilovém průmyslu** je v tab. 3.

Tab 3) Závažnost způsobu poruchy – automobilový průmysl [18]

Závažnost	Kritéria	Klasifikace
Žádná	Žádný zjistitelný důsledek	1
Velmi málo významná	Skřípající a chrastící objekt není ve shodě s požadavky na správné uložení a opracování. Vadu zpozorují nároční zákazníci (méně než 25%)	2
Málo významná	Skřípající a chrastící objekt není ve shodě s požadavky na správné uložení s opracováním. Vadu zpozoruje 50% zákazníků.	3
Velmi nízká	Skřípající a chrastící objekt není ve shodě s požadavky na správné uložení a opracování. Vadu zpozoruje většina zákazníků.(Více než 75%)	4
Nízká	Vozidlo je provozuschopné/objekt je provozuschopný, ale objekt (objekty) zajišťující pohodlí je provozuschopný (jsou provozuschopné) se sníženými technickými parametry. Zákazník je poněkud nespokojen.	5
Střední	Vozidlo je provozuschopné/objekt je provozuschopný, ale objekt (objekty) zajišťující pohodlí není provozuschopný (nejsou provozuschopné). Zákazník je nespokojen.	6
Vysoká	Vozidlo je provozuschopné/objekt je provozuschopný, ale se sníženou úrovní technických parametrů. Zákazník je velmi nespokojen.	7
Velmi vysoká	Vozidlo není provozuschopné/objekt není provozuschopný (ztráta základní funkce)	8
Nebezpečná s varováním	Velmi vysoká klasifikace závažnosti, když potenciální způsob poruchy, který na sebe upozorňuje varováním, ovlivňuje bezpečný provoz vozidla a/nebo znamená nesoulad s vládními vyhláškami a nařízeními.	9
Nebezpeční bez varování	Velmi vysoká klasifikace závažnosti, když potenciální způsob poruchy, který na sebe neupozorňuje varováním, ovlivňuje bezpečný provoz vozidla a/nebo znamená nesoulad s vládními vyhláškami a nařízeními.	10

6.6.5 Četnost či pravděpodobnost výskytu

Četnost či pravděpodobnost výskytu všech zjištěných způsobů poruchy se má stanovit za účelem správnosti posouzení důsledku nebo kritičnosti daného způsobu poruch. [18]

Stanovení pravděpodobnosti výskytu poruch je možné u návrhu odhadnout na základě dat o: [18]

- Zkouškách životnosti jednotlivých součástí systému nebo jedné určité součásti
- Databázi intenzity poruch (je-li dostupná)
- Poruchách z provozu (záruka)
- Poruchách podobných objektů či součástí dané třídy

Po odhadnutí pravděpodobnosti výskytu se FMEA musí zaměřit na časové období, ve kterém byli učiněny odhady (obvykle se jedná o záruční dobu nebo předem stanovené období života objektu nebo produktu). [18]

6.6.6 RPN (UPR) –Risk Priority Number (Ukazatel priority rizika)

Při tvoření procesní FMEA (PFMEA) nebo FMEA návrhu (DFMEA) se počítá tzv. Číslo priority rizika (RPN). Pomocí tohoto čísla se rozdělují jednotlivá rizika podle závažnosti – od nejméně po nejvíce závažné. [18]

RPN se počítá pomocí součinu tří čísel v číselných sloupcích analýzy: [18]

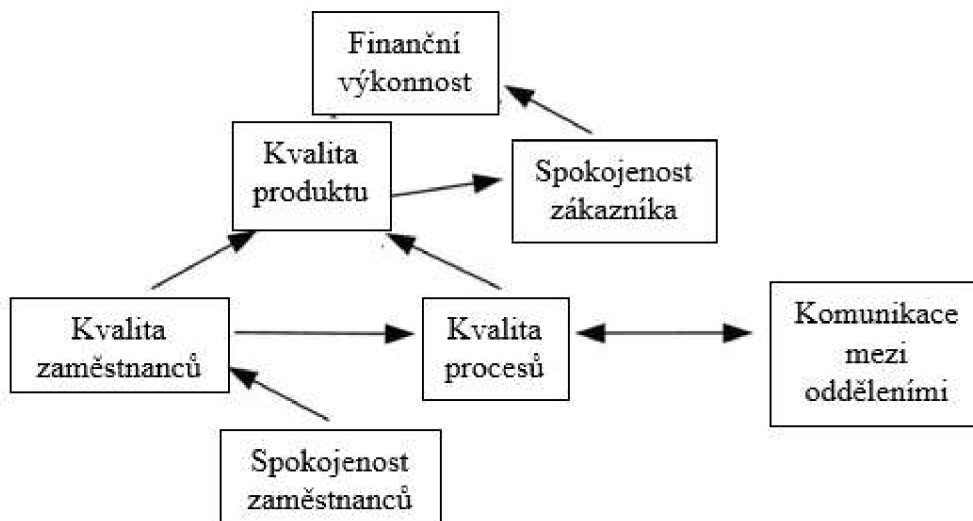
- Závažnost (Severity),
- Výskyt (Occurrence),
- Odhalitelnost (Detection).

Dle aplikace se může rozsah hodnot všech tří čísel značně lišit. Nejčastěji (především v DFMEA) se používá rozsah 1-10. Číslo RPN může tedy nabývat hodnot od minima 1 po maximum 1000. Firma si sama určí hranici hodnoty RPN, po jejímž překročení se daná porucha bere jako závažná a je nutno ji nějak řešit – pokud možno tak, aby se přijatým řešením výsledné číslo RPN snížilo pod určenou hranici. [18]

6.7 Kauzální mapa (Causal map)

Kauzální mapy v obecném pojetí ilustrují individuální chápání souvislostí a spojení mezi událostmi vyskytujícími se v daném čase. Tyto mapy jsou prezentovány jednotlivými uzly událostí a šipkami, které reprezentují vztah příčina-důsledek – viz obr. 10). Směr šipek ukazuje předpokládanou kauzalitu vztahu mezi příslušnými uzly. [25]

Jelikož se kauzální mapy používají především pro popis procesů ve společnosti, je jejich použití jako nástroje k analýze příčin poruchy součástí minimální. V takovém případě se často výsledek podobá (někdy i ztotožňuje) s analýzou stromu poruchových stavů (FTA).



Obr. 10) Příklad kauzální mapy [25]

7 POSTUP PŘI ŘEŠENÍ STANOVENÉHO ÚKOLU

V této kapitole jsou data, se kterými se pracovalo a jednotlivé kroky, které byly podniknuty k vyřešení stanoveného úkolu.

7.1 Data získaná od zákazníka

Po zátěžovém testu na motoru u zákazníka došlo k tvarové deformaci tepelného štítu a odbroušení části čela poblíž místa, kde jsou spaliny svedeny k turbínovému kolu (v místě jazyka turbínové skříně).

Po skončení testu bylo zároveň zjištěno, že jedna z volut je ucpána kousky cizího materiálu uvolněného z motoru, který zasahoval z voluty do prostoru, kde se otáčí lopatky turbínového kola – viz obr. 11).

Turbínové kolo bylo poškozeno následkem kontaktu s tepelným štítem a zejména působením materiálu zaseknutého ve volutě - viz obr. 12).

7.2 Posloupnost přijatých opatření, analýz a testů

Kroky 1,2 a 4 byly provedeny firmou a jejich výsledky poskytnuty pro účel této diplomové práce. Kroky 3 a 5 byly provedeny jako součást této práce.

7.2.1 KROK 1 – Prvotní změna materiálu, designu a uložení

Po vzniku problému s tepelným štítem byla bezodkladně přijata prvotní nápravná opatření ještě před započítím samotných analýz a testů:

- Náhrada materiálu A za materiál B úspěšně odzkoušený na jiných aplikacích za vysokých teplot
- Odstranění zoubků ve spodní části štítu, sloužících k pevnějšímu uložení štítu mezi turbínovou a ložiskovou skříní (tyto zoubky byly častou příčinou poruch tepelných štítů)
- Štít napevno vložen mezi turbínovou a ložiskovou skřín, které tudíž nejsou ve vzájemném kontaktu (původní uložení spočívalo v uložení štítu v mezeře mezi turbínovou a ložiskovou skříní, které se vzájemně dotýkaly – štít měl tedy určitou volnost a měl tendenci při provozu turbodmychadla rotovat)



Obr. 12) Cizí materiál nalezený v testu na motoru u zákazníka [foto autor]



Obr. 13) Detail lopatek turbínového kola poškozeného cizím materiálem ve volutě [foto autor]

7.2.2 KROK 2 – Zátěžové testy

Po provedení prvotních nápravných opatření následovaly zátěžové testy za podmínek srovnatelných s testem na motoru u zákazníka:

- s původními tepelnými štíty = **Varianta I** (materiál A: nerezová ocel s nižším obsahem legujících prvků, zoubky, volné uložení)
- s tepelnými štíty po změnách = **Varianta II** (materiál B: nerezová ocel s vyšším obsahem legujících prvků, bez zoubků, pevné uložení)

Oba druhy štítů testovány za stejných podmínek postupně v různých teplotách a cyklech.

Pro zjištění vlivu ucpání voluty cizím materiálem byly provedeny stejné testy i na turbodmychadlech s pozměněnou turbínovou skříň – skříň se zavařeným hrdlem jedné z volut (viz obr. 13)) – od jazyka po obvod v délce 180° po směru hodinových ručiček.

Jednotlivé testy, provedené po selhání u zákazníka jsou uvedeny v tab. 4). **Teplota T1T (teplota spalin na vstupu do turbodmychadla) byla při všech testech okolo 1000°C.**

Tab 4) Seznam testů provedených po selhání testu na motoru u zákazníka

Test č.	Varianta	Voluta	Stav po testu
1	I	Zavařená	Poškozeno
2	I	Volná	Lehce poškozeno
3	II	Zavařená	Poškozeno
4	II	Volná	Bez poškození
5	II	Volná	Bez poškození
6	II	Zavařená	Poškozeno
7	II	Zavařená	Lehce poškozeno
8	II	X	Lehce poškozeno



Obr. 14) Turbínová skříň po zavaření jedné z volut [foto autor]

Závěry z kroku 2:

1. Při **volné volutě** tepelný štít vydrží teploty okolo 1000°C bez poškození nebo jen s lehkým kontaktem na čelní ploše.
2. Při **zavařené volutě** dochází k **nerovnoměrnému teplotnímu zatížení** kola i tepelného štítu.
3. Zatímco z volné voluty se spaliny dostávají k turbínovému kolu již v místě jazyka turbínové skříně, v ucpané volutě dochází ke kontaktu spalin s kolem až tam, kde ucpání voluty končí. Z toho důvodu je kolo i tepelný štít nejvíce tepelně namáháno právě v místech, kde na ně proudí spaliny z obou volut současně.
4. Nerovnoměrné teplotní zatížení způsobuje, že zatímco se **více zatížená část masivně tepelně roztahuje**, ve druhé části je zvětšení objemu materiálu nižší. Z toho důvodu materiál expanduje v teplotně zatíženější části, která se vzdouvá a následkem toho dochází k vymizení mezery mezi tepelným štítem a turbínovým kolem. Je-li deformace dostatečně velká, **může dojít ke kontaktu** a odbrušování štítu turbínovým kolem v místě, kde je největší teplotní zatížení.

7.2.3 KROK 3 – Kvalitativní analýzy

Jako další krok se provedli kvalitativní analýzy ke **zjištění možných kořenových příčin poruchy** tepelného štítu. Na základě výsledků z nich vyplývajících a z předchozích testů navržený dalšího testování či případných **nápravných opatření**.

Nástroje kvality, kterých bylo při analýzách poruch použito:

- RCA (Root Cause Analysis – Analýza kořenových příčin)
 - 5 Proč
 - Ishikawa (Rybí kost)
- FTA
- FMEA

Provedení jednotlivých kvalitativních analýz je uvedeno v kapitole 8.

7.2.4 KROK 4 – Výpočet deformačních charakteristik

Jedním z výsledků provedených kvalitativních analýz byla možnost špatného designu součásti. Pro kontrolu jeho adekvátnosti u nového typu aplikace (motory na CNG) byla provedena analýza deformačních charakteristik současného designu součásti pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS.

Analýzy pomocí metody konečných prvků byly provedeny pro oba materiály (materiál A i B) v různých teplotách okolo 1000°C pro zmapování chování součásti za různých provozních podmínek, které mohou nastat u motoru na CNG.

Pozn. k získaným deformačním charakteristikám:

V těchto deformačních analýzách se uvažuje **rovnoměrné** teplotní zatížení, které je pro jakoukoliv součást méně nebezpečné, než nerovnoměrné. Proto je nutno brát výsledky analýzy deformačních účinků s určitou rezervou, zejména co se týče hraničních teplot, pro které v simulaci součást ještě přežila bez poškození. Nerovnoměrné zatížení totiž výšku hraniční teploty může snížit.

Závěry z kroku 4:

1. K deformaci štítu může docházet nejen vlivem zvoleného materiálu, ale také vlivem samotné konstrukce součásti:
 - Čím tenčí stěnu součást má, tím nižší má tuhost a tím výraznější je konečný vliv na její plastickou deformaci.
 - Čím větší plochu má čelo štítu, tím více se materiál snaží roztáhnout do stran, a z toho důvodu se čelo pak více deformuje mimo původní rovinu plochy.
2. Dle výstupů z analýz deformačních charakteristik byl navržen **nový design** součásti se zaměřením na odstranění slabých míst původní konstrukce:
 - zvětšení vnitřního průměru součásti – zmenšení plochy čela z vnitřní strany
 - zkosení stěny štítu směrem ke středu – zmenšení plochy čela z vnější strany
 - zvětšení šířky stěny štítu pro větší tuhost součásti

Nově navržený design se nechal opět otestovat analýzou deformačních charakteristik. Deformace štítu s novým designem **se rapidně snížila**.

7.2.5 KROK 5 – Materiálové analýzy

Pro kontrolu vhodnosti materiálu, mechanismu jeho deformace a případných vad způsobujících selhání součásti byly v materiálové laboratoři firmy Garrett - Advancing motion provedeny materiálové analýzy čtyř součástí.

Důležitým aspektem testů byl nález **fáze sigma**. Tato fáze je velmi rozšířenou intermediální fází. Jejím vyloučením z delta-feritu dojde ke **zvýšení křehkosti, tvrdosti, pevnosti a meze kluzu materiálu a zároveň ke snížení tažnosti**. Současně může sigma fáze způsobovat **selektivní korozi** materiálu po hranicích zrn.

Tato fáze **zahajuje nukleaci již po pěti minutách v teplotách mezi 600 a 900°C**, ve kterých se tepelný štít u motorů na CNG pohybuje většinu času. Čím déle je materiál vystaven těmto teplotám, tím větší je konečný podíl sigma fáze v materiálu a tím nižší je jeho houževnatost.

Jednotlivé analýzy a jejich výsledky jsou uvedeny v kapitole 9.

8 KVALITATIVNÍ ANALÝZY

Ke zjištění možných kořenových příčin řešeného problému s tepelným štítem byly provedeny kvalitativní analýzy, na základě jejichž výsledků byly později provedeny další testy.

8.1 Blokový a boundary diagram

Dříve, než započali samotné kvalitativní analýzy systému, bylo potřeba udělat systematický a funkční rozbor systému pomocí blokových diagramů a boundary diagramu. Díky tomu bylo snazší nalézt slabá místa systému, na která je potřeba se zaměřit.

8.1.1 Blokový diagram I. Stupně

Vypracované blokové schéma I. Stupně je uvedeno na obr. 14).

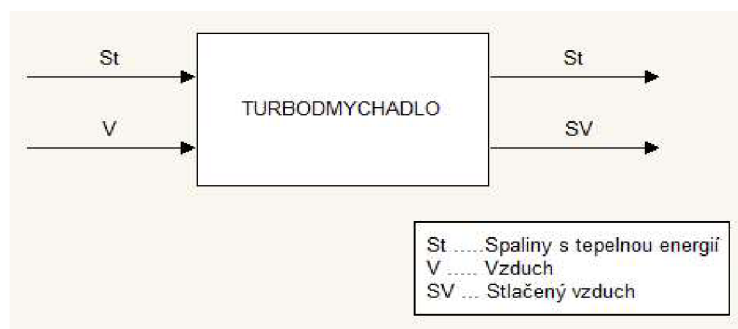
Turbodmychadlo jako systém pracuje s kinetickou energií plynů vzniklých při spalování paliva v motoru. Během práce motoru vznikají plyny s významnou dávkou kinetické energie, jejíž část je díky turbodmychadlu převedena na stlačený vzduch, který putuje zpět do motoru a zvyšuje jeho objemovou účinnost.

Negativním aspektem v tomto procesu je tepelná energie putující se spalinami.

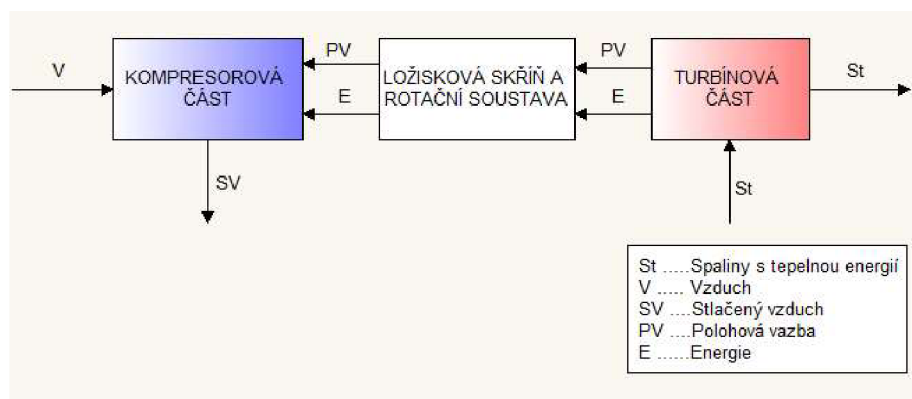
8.1.2 Blokový diagram II. Stupně

Vypracované blokové schéma II. Stupně je uvedeno na obr. 15).

V tomto schématu vidíme vztah mezi třemi hlavními částmi turbodmychadla, jimiž jsou kompresorová skříň, centrální skříň a turbínová skříň. V turbínové části je turbínové kolo roztáčeno spalinami z motoru. Toto kolo přes společnou hřídel roztáčí kolo v kompresorové části, kam je přiváděn a stlačován vzduch z prostředí, který je poté veden do motoru.



Obr. 15) Blokový diagram I. stupně



Obr. 16) Blokový diagram II. stupně

8.1.3 Boundary diagram

V boundary diagramu je detailně rozebrán celý systém turbodmychadla, i ve vztahu k okolnímu prostředí. Jsou zde uvedeny hranice (boundaries) jednotlivých subsystémů (turbínová část, ložisková část, kompresorová část) i celého systému (turbodmychadlo) vzhledem k okolí.

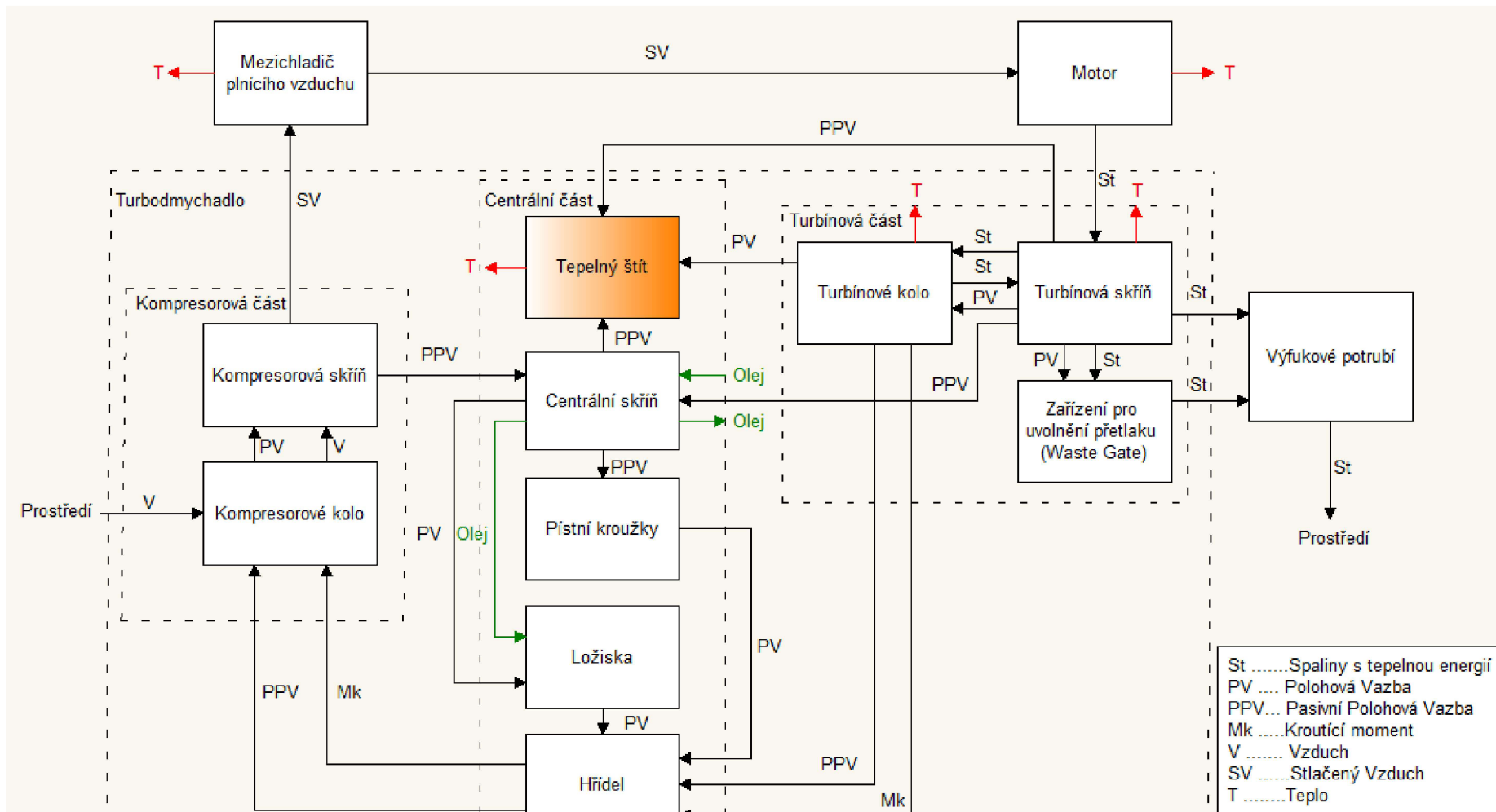
Boundary diagram nám umožňuje lépe se orientovat v jednotlivých funkcích systému, jeho subsystémů a jejich součástí. Nejde o diagram konstrukce turbodmychadla, ale o diagram **funkčních závislostí**. Proto u všech součástí, které mají jakýkoliv vzájemný funkční vztah, musí být tento vztah uveden pomocí vazeb označených jejich funkcemi.

Popis boundary diagramu – obr. 16)

Pracovním médiem v turbodmychadle jsou spaliny přicházející z motoru. Ty s sebou nesou kinetickou, ale i nepříznivou tepelnou energii, které získali při procesu spalování.

Práce turbodmychadla probíhá v několika krocích:

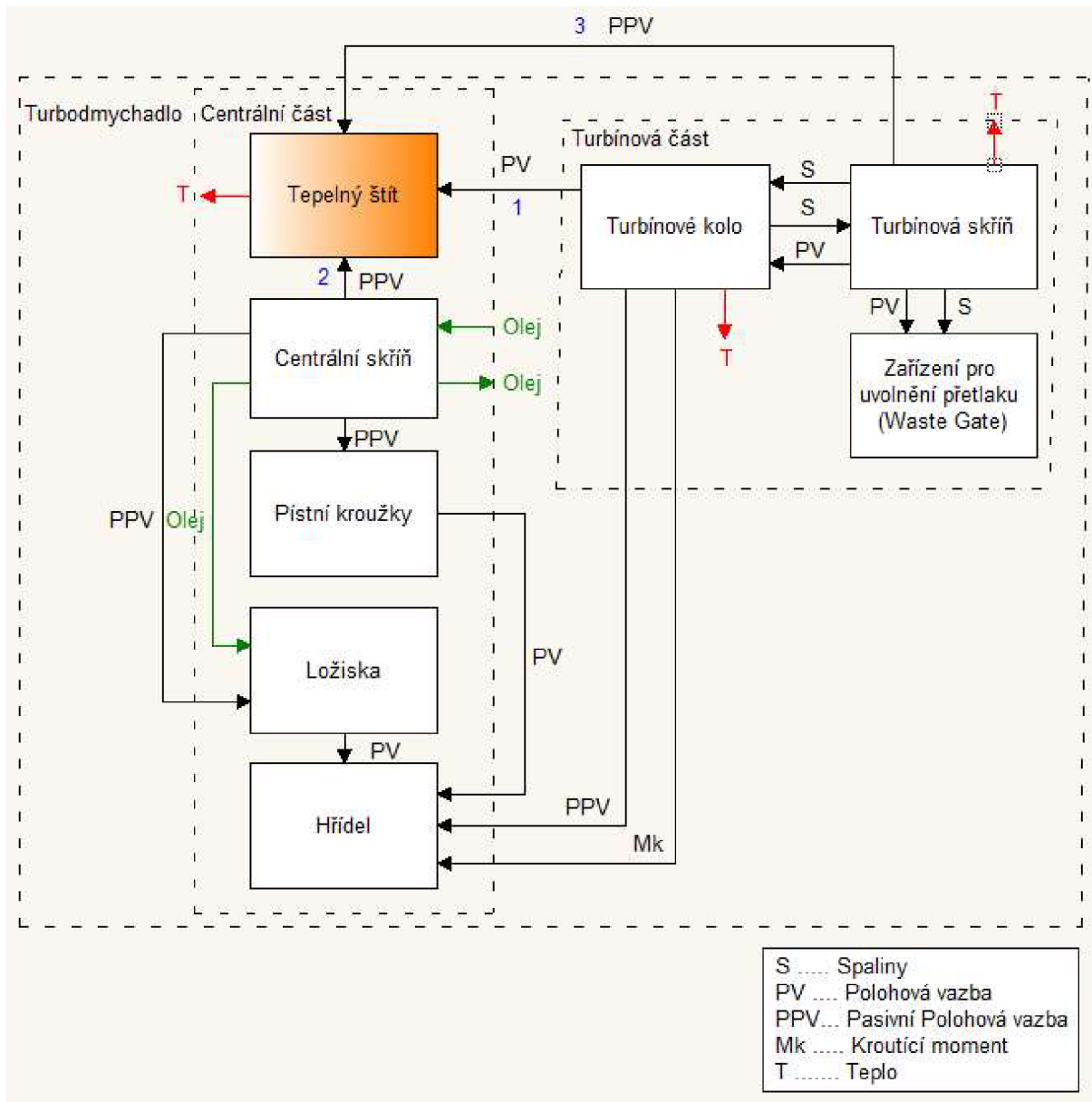
1. Spaliny jsou dopraveny z motoru do turbínové skříně. V té jsou jejím tvarem usměřňovány na turbínové kolo pomocí voluty (případně dvou volut – v závislosti na druhu turbodmychadla). Zároveň při přehlcení turbínové skříně jsou spaliny místo ke kolu odvedeny zařízením pro uvolnění přetlaku do výfukového potrubí.
2. Turbínové kolo je roztáčeno spaliny, které přichází z volut turbínové skříně v místě jazyka, předají část své kinetické energie turbínovému kolu a poté jsou tvarem turbínové skříně a lopatek turbínového kola odvedeny přes nos kola ven do výfukového potrubí.
3. Turbínové kolo je přes hřídel, uloženou v ložiskové skříně, spojeno s kompresorovým kolem v kompresorové skříně. Hřídel je uložen v kluzných ložiscích, která jsou mazána olejem. Zároveň je hřídel opatřena na straně turbínového kola pístními kroužky, které brání průniku oleje k turbínovému kolu. Kvůli ochraně ložiskové skříně od nepříznivé tepelné energie spalin, je mezi ložiskovou a turbínovou skříní umístěn **tepelný štít**, který brání nadměrnému ohřívání ložiskové skříně a tím i předchází například zapékání oleje na pístních kroužcích.
4. Kompresorové kolo je roztáčeno přes hřídel turbínovým kolem, a tudíž se točí stejnou úhlovou rychlostí. Jeho otáčením je do kompresorové skříně naháněn vzduch, který je otáčením lopatek stlačován ve volutě kompresorové skříně.
5. Stlačený vzduch, který při stlačení zvýšil svoji teplotu, je veden do mezichladiče plnicího vzduchu, kde je jeho teplota snížena a tím ještě více zmenšen jeho objem.
6. Z mezichladiče putuje stlačený vzduch zpět do motoru, kde zvyšuje jeho objemovou účinnost.



Obr. 17) Boundary diagram turbodmychadla s vyznačenou součástí, jež je předmětem analýz

8.1.4 Boundary diagram se zaměřením na oblast přímo ovlivňující tepelný štít

Jelikož je celý boundary diagram turbodmychadla dosti rozlehlý a složitý, byl pro lepší přehlednost vytvořen i boundary diagram detailně zaměřený pouze na tepelný štít – viz obr. 17). Modrou barvou jsou zde vyznačeny vazby 1, 2, a 3, nacházející se v analýze FMEA.



Obr. 18) Boundary diagram s detailem na tepelný štít a jeho nejbližší funkční okolí

8.2 Analýzy kořenových příčin

Ve firmě Garrett – Advancing motion se pro analýzu kořenové příčiny používají zejména dva kvalitativní nástroje, a těmi jsou :

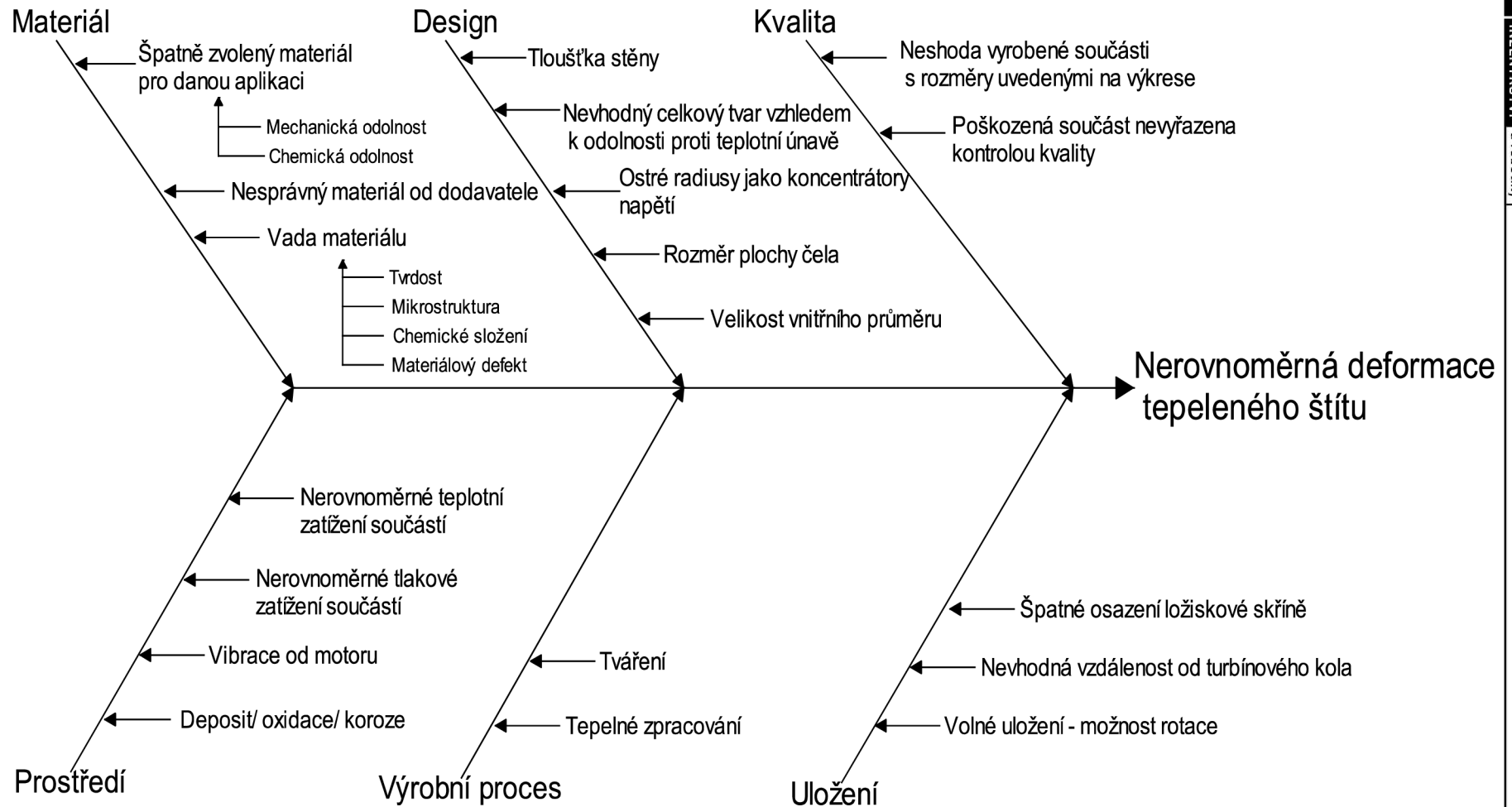
- Diagram rybí kost (Ishikawa)
- Analýza 5 Proč

8.2.1 Diagram Rybí kost (Ishikawův diagram)

Jelikož byly vytvářeny dvě analýzy pro zjištění kořenové příčiny problému, je pro každou jinak formulován problém, který se snažíme řešit. Pro diagram rybí kosti byl zadán problém „**Nerovnoměrná deformace tepelného štítu**“ – viz obr. 18), jelikož to je prvotně vnímáno jako příčina pouze **lokálního opotřebení** a ne opotřebení celého čela tepelného štítu.

Hlavními podúrovněmi, tedy větvemi na druhé úrovni analýzy, byly určeny nejčastější možné skupiny, z nichž pramení většina problémům s opotřebením komponent:

- Materiál
- Design
- Kvalita
- Prostředí
- Výrobní proces
- Uložení

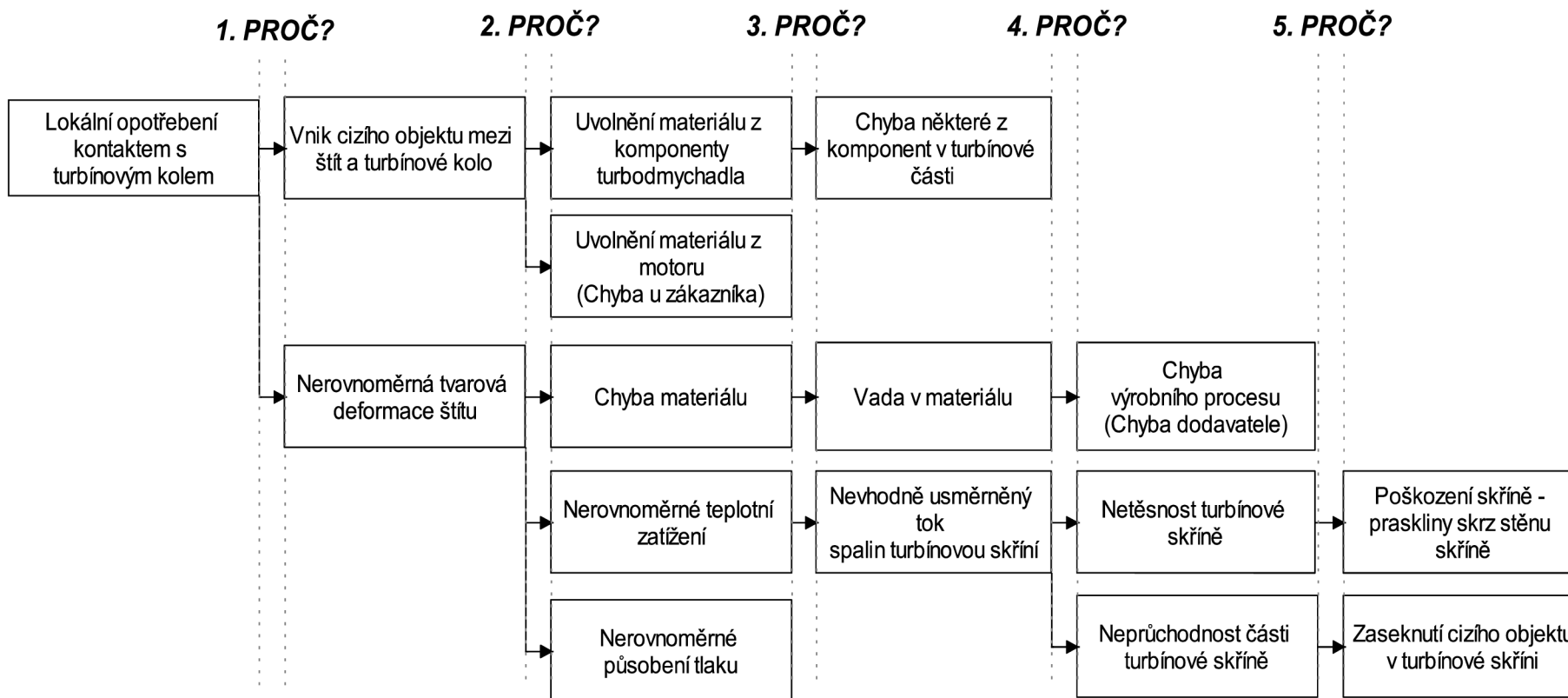


Obr. 19) Ishikawa diagram – nerovnoměrná deformace tepelného štítu

8.2.2 Analýza 5 Proč

I když většinou se provádí jedna analýza kořenové příčiny kombinovaná z jinými analýzami (např FMEA nebo FTA), bylo firmou vyžádáno udělat k diagramu rybí kosti ještě analýzu 5 Proč k ujištění se v úplnosti a správnosti obou analýz. Zároveň bývá analýza **5 Proč používána jako předstupeň FTA**, která je též firmou požadována.

Pro analýzu 5 Proč byl jako řešený problém na rozdíl od Ishikawa diagramu vybráno **„Lokální opotřebení kontaktem s turbínovým kolem“** – viz obr. 19). Zamezí se tak zbytečnému opakování stejných myšlenkových pochodů, jako u předchozího Ishikawa diagramu. Bude tedy vlastně na řešený problém nahlíženo z dvou odlišných perspektiv a zahrne se větší množství výsledků.



Obr. 20) Diagram 5 Proč – lokální opotřebení kontaktem s turbínovým kolem

8.3 Analýza stromu poruchových stavů (FTA – Fault Tree Analysis)

Popis diagramu na obr. 20):

Jako vrcholová událost bylo pro analýzu stromu poruchových stavů určeno „Lokální opotřebení čela štítu“.

Pokud dojde k lokálnímu opotřebení čela štítu, může to mít obecně dvě hlavní příčiny:

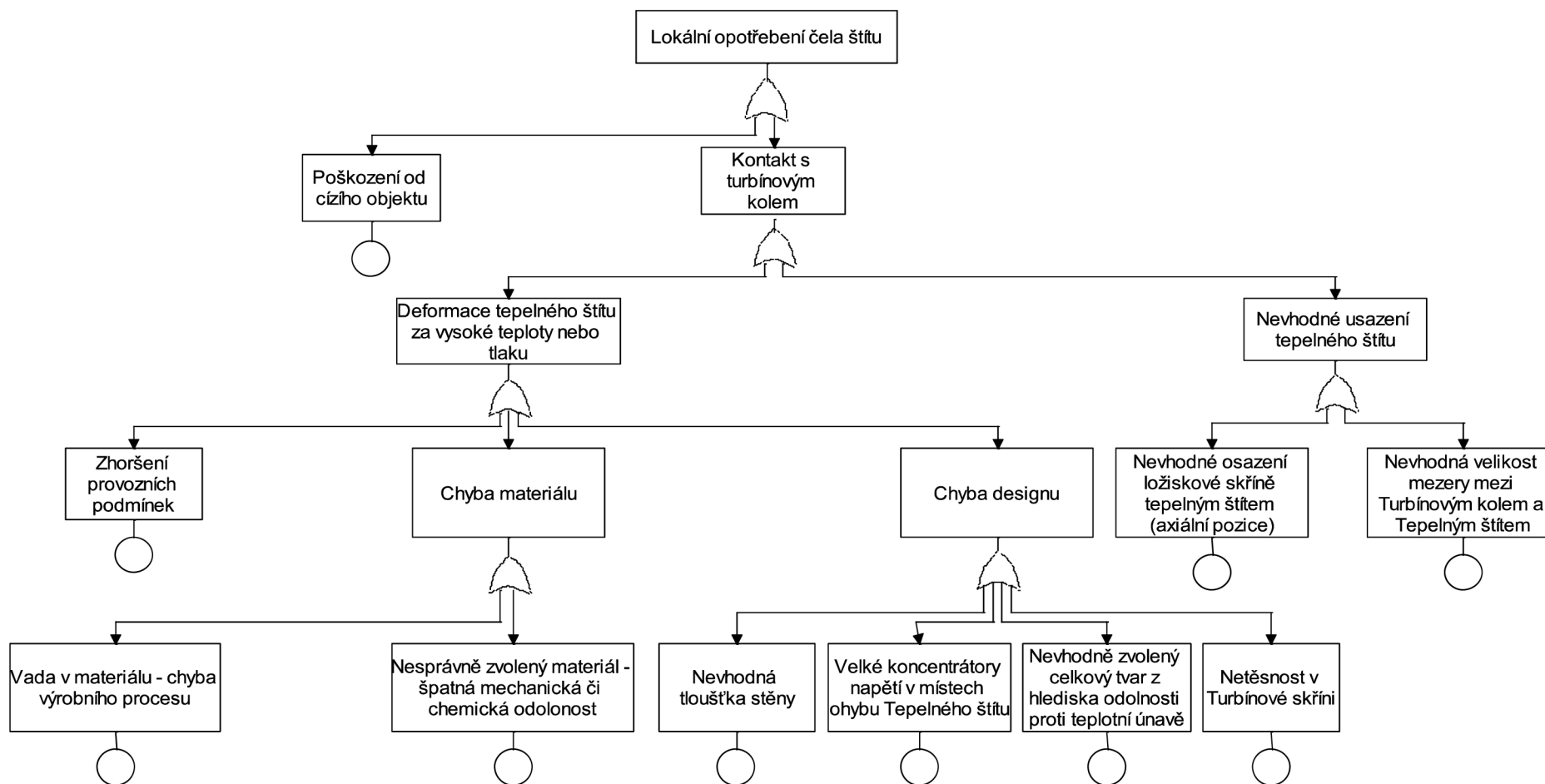
- Poškození od cizího objektu, který vnikl mezi turbínové kolo a tepelný štít (většinou jde o část turbínového kola – lopatka, disk). Objekt se vzpříčí mezi součástmi a začne obě součásti poškozovat
- Kontakt turbínového kola a tepelného štítu - Ke kontaktu může dojít buď kvůli špatnému usazení součásti, nebo kvůli deformaci štítu samotného.

Špatné usazení součásti může být zapříčiněno:

- Nevhodným osazením ložiskové skříně tepelným štítem (axiální pozice)
- Nevhodnou velikostí mezery mezi turbínovým kolem a tepelným štítem

Deformace tepelného štítu za vysoké teploty/tlaku může být způsobena:

- Zhoršením provozních podmínek – Při zhoršení provozních podmínek (myšleno např. ucpání voluty), na které součást není koncipována, může dojít ke zvýšenému lokálnímu teplotnímu zatížení, které způsobí deformace součásti o nebezpečné velikosti.
- **Chybou materiálu:**
 - Vada v materiálu – chyba výrobního procesu. Během výrobního procesu může nastat chyba, při které může být do materiálu vmíchán vměstek, který působí jako koncentrátor napětí, nebo může dojít k záměně materiálu. Také se může stát, že vyrobený materiál z nějakého důvodu není podle předepsané specifikace. **Tyto vady firma nemůže ovlivnit**, může pouze zabránit toku podobných součástí do montáže pomocí pečlivé vstupní kontroly kvality.
 - Nesprávně zvolený materiál – špatná mechanická či chemická odolnost - pro různé aplikace je vždy potřeba použít vhodný materiál, který odolá všem nepříznivým vlivům provozních podmínek.
- **Chyba designu:**
 - Nevhodná tloušťka stěny – jak již bylo řečeno dříve, čím větší je tloušťka stěny součásti exponované vysokým teplotám, tím má součást menší tendenci k velkým deformacím, neboť má větší tuhost.
 - Velké koncentrátoři napětí v místech ohybu tepelného štítu – v místech kde rovná plocha součásti přechází v rádius je definován koncentrátor napětí. Čím ostřejší je přechod či úhel ohybu, tím větší koncentrace napětí se v něm nachází. Při designu součástí, které bývají vystaveny silným nepříznivým vlivům je nutné se tomuto druhu koncentrace napětí pokud možno vyhnout nebo přinejmenším jej zmírnit jemnějším přechodem.
 - Nevhodně zvolený celkový tvar z hlediska odolnosti proti teplotní únavě – do celkového tvaru součásti se v tomto smyslu zařazuje např. velikost teplotně zatížené plochy, zkosení ploch vůči sobě, velikost jednotlivých průměrů kruhových součástí, zbytečné odlehčovací otvory apod.
 - Netěsnost v turbínové skříně – netěsnost nemusí být způsobena pouze špatným ukotvením součásti. Může ji zapříčinit i nevhodný design vzhledem k definovaným podmínkám na výkrese – předepsané tolerance rozměru či tvaru.



Obr. 21) Analýza stromu poruchových stavů

8.4 Kauzální mapa (Causal map)

Jelikož se při vytváření kauzální mapy zjistilo, že její výsledek bude z informačního hlediska totožný s výsledky analýzy stromu poruchových stavů (FTA) bylo zadavatelem tématu diplomové práce rozhodnuto, že bude kauzální mapa z práce vyřazena, aby se zabránilo neúčinnému dublování informací.

8.5 Analýza příčin a důsledků poruch (FMEA – Failure Mode and Effect Analysis)

Jako nejdetailnější a nejobsáhlejší analýza byla provedena i analýza příčin a důsledků poruch – viz Tab 5). Tato je ve firmě Garrett – Advancing Motion základem při vytváření nových součástí, jejich změn nebo pro analýzu celého turbodmychadla a hledání možných příčin poruch v jednotlivých uzlech systému.

Analýza byla zpracována jako DFMEA(Design FMEA) s rozšířením o výpočet čísla priority rizika – RPN (UPR):

- Četnost výskytu vad byla odvozena ze záznamů o řešených problémech se součástí během testů ve firmě Garrett – Advancing Motion a ze záznamů o problémech se součástmi vrácenými od zákazníka.
- Číslo závažnosti poruchy bylo vybíráno pomocí tabulky „Závažnost způsobu poruchy – automobilový průmysl“ z normy pro analýzu FMEA již uvedené v kapitole 6.6.4 této diplomové práce.
- Číslo odhalitelnosti bylo vždy vybráno na základě možností odhalení dané poruchy zákazníkem či firmou. Zohledněna byla především případná nutnost demontáže.
- Jako hraniční velikost RPN pro nutnost nápravného opatření bylo určeno číslo 100.

U příčiny poruchy „Poškození od cizího objektu“ i po nápravných opatřeních zůsta

Tab 5) FMEA analýza příčin a důsledků poruch tepelného štítu turbodmychadla

Vazba v BD	FMEA	Tepelný štít	GT35 a vyšší	Výsledky opatření															
	Prvek / Funkce	Způsob možné závady	Možný důsledek závady	Závaznost	Možná příčina Mechanismus závady	Výskyt	Stávající opatření pro prevenci	Stávající řízení návrhu odhalení	Odhalitelnost	UPR	Doporučená opatření	Odpovídá a termín splnění	Opatření splněno	Závaznost	Výskyt	Odhalitelnost	UPR		
0	Eliminovat přenos tepla a nárůst teploty ložiskové skříně a dalších částí TD	Přehřátí ložiskové skříně a/nebo dalších částí TD	Sniženi účinnosti TD - vyšší teploty přivedené do komp. skříně, přehřátí ložiskové skříně, relaxace pístních kroužků, zapékání oleje na hřídeli a pístních kroužcích	7	Nevhodná tloušťka stěny	1	Design součásti vytvořen na základě zkušeností z předchozích aplikací	Testy v motorových celách, test odolnosti na motoru	5	35									
2				7	Špatný design štítu kv vytvoření tvarové i velikostně správné dutiny pro eliminaci přenosu tepla	1	Design vytvořen na základě zkušeností z předchozích aplikací, výpočtů FEA a testů v motorových celách	Test - turbínová skříně a tepelný štít - teplotní cyklus; Analýzy provedené po testování	4	28									
2				7	Nevhodné osazení ložiskové skříně tepelným štítem (axiální pozice)	1	Zavedení vodičho průměru pro kontrolu přesného usazení	Testy v motorových celách	2	14									
0				7	Nesprávně zvolený materiál - špatná mechanická či chemická odolnost	1	Materiál vybrán na základě zkušeností z předchozích aplikací a na základě pokročilých materiálových analýz	Testy v motorových celách, test odolnosti na motoru, Materiálové analýzy	3	21									
0				7	Vada v materiálu - chyba výrobního procesu	4	Kontroly kvality během výrobního procesu, vstupní kontroly kvality	Testy v motorových celách, Materiálové analýzy	3	84									
1				5	Nevhodná velikost mezery mezi turbínovým kolem a tepelným štítem	1	Správnost usazení kontrolována během testů ve vývojové fázi	Testy v motorových celách, Materiálové analýzy	3	15									
3	5	Design - netěsnost v turbínové skříně	1	Design součásti vytvořen na základě zkušeností z předchozích aplikací	Testy v motorových celách	3	15												





Tab 5) Pokračování

Vazba v BD	FMEA		Tepeľný štít	GT35 a vyšší	Závažnosť	Možná příčina Mechanismus závady	Výskyt	Stávající opatření pro prevenci	Stávající řízení návrhu odhalení	Odhalitelnost	UPR	Doporučená opatření	Odpovídá a termín splnění	Výsledky opatření						
	Prvek	funkce												Způsob možné závady	Možný důsledek závady	Opatření splněno	Závažnost	Výskyt	Odhalitelnost	UPR
3	Odolat vysokým provozním teplotám a tlaku	Příliš vysoká deformace původního tvaru štítu	Hlučnost při provozu, ztráta funkce součásti, nižší účinnost turbodmychadla	7	Nevhodná tloušťka stěny	3	Design součásti vytvořen na základě zkušeností z předchozích aplikací/výpočtů FEA/testů v motorových celách	Testy v motorových celách	4	84										
3				7	Nesprávně zvolený materiál - špatná mechanická či chemická odolnost	3	Materiál vybrán na základě zkušeností z předchozích aplikací a na základě pokročilých materiálových analýz	Testy v motorových celách, Materiálové analýzy	3	63										
0				7	Vada v materiálu - chyba výrobního procesu	4	Kontroly kvality během výrobního procesu, vstupní kontroly kvality	Testy v motorových celách, Materiálové analýzy	3	84										
3				7	Velké koncentrátoř napětí v místech ohybu tepelného štítu	2	Design součásti vytvořen na základě zkušeností z předchozích aplikací	Testy v motorových celách	4	56										
3				8	Nevhodně zvolený celkový tvar z hlediska odolnosti proti teplotní únavě	3			6	144	výpočty FEA/testy v motorových celách					8	2	4	64	

9 MATERIÁLOVÉ ANALÝZY

Na základě výsledků kvalitativních analýz a testů ve firmě Garrett – Advancing motion byly provedeny materiálové analýzy 4 součástí – viz tab. 6) – obr. 21), 22), 23), 24).

Tab 6) Přehled součástí testovaných v materiálové laboratoři




	Součást 1	Součást 2	Součást 3	Součást 4
	 <p>Obr. 22) Součást 1 [foto autor]</p>	 <p>Obr. 23) Součást 2 [foto autor]</p>	 <p>Obr. 24) Součást 3 [foto autor]</p>	 <p>Obr. 25) Součást 4 [foto autor]</p>
Design	Starý	Starý	Nový	Nový
Materiál	Materiál A	Materiál B	Materiál B	Materiál B
Test	Po testu	Po testu	Po testu	Netestováno
Stav po testu	Poškozené	Poškozené	Bez poškození	Nová

Cílem materiálových analýz bylo:



- Zjistit, zda materiály všech analyzovaných součástí souhlasí s jejich specifikacemi ve firemní materiálové databázi
- Popsat případné změny ve struktuře materiálu po zátěžovém testu – zhodnotit možné následky těchto změn na funkčnost součásti a její spolehlivost
- Zhodnotit mechanismus poškození součásti z hlediska změn v materiálu
- Zhodnotit vhodnost materiálu pro danou aplikaci
- Navrhnout případné změny materiálu – bude-li třeba

Analýzy byly provedeny pomocí přístrojů uvedených v tab. 7), na obr. 25), 26), 27), 28) a 29).

Tab 7) Přístroje použité při provádění materiálových analýz

Mikrotvrdoměr (HV, HK):	
 <p>Obr. 26) Mikrotvrdoměr [foto autor]</p>	<p><i>EMCO-TEST PRÜFMASCHINEN GMBH</i></p> <p>Měření tvrdosti materiálu pro kontrolu shodnosti se specifikací ve firemní materiálové databázi</p> <p>Možnost měření:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ HV1 ○ HV0,5 ○ HK0.5 ○ HK0.05
Stereomikroskop	
 <p>Obr. 27) Stereomikroskop [foto autor]</p>	<p><i>OLYMPUS</i></p> <p>Náhled na součást pod zvětšením</p> <p>Pořizování fotografií součásti pod zvětšením</p> <p>Zvětšení 0.8x - 8.0x</p>
Elektronový mikroskop	
 <p>Obr. 28) SEM [foto autor]</p>	<p><i>FEI s.r.o. (dnes Thermofirsher scientific s.r.o.)</i></p> <p>Kontrola struktury materiálu</p> <p>Zkoumání původu defektu v materiálu</p> <p>EDX <i>EDAXs.r.o</i></p> <p>Kontrola složení materiálu pomocí analýzy EDX</p>

Tab. 6) Dokončení

Univerzální tvrdoměr (HBW, HV, HRC)	
	<p><i>Zwick/Roell - INDENTEC</i></p> <p>Měření tvrdosti materiálu pro kontrolu shodnosti se specifikací ve firemní materiálové databázi</p> <p>Možnost měření:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ HBW 2,5 ○ HV10 ○ HRC
Světelný mikroskop:	
	<p><i>Carl Zeiss a.s.</i></p> <p>Kontrola mikrostruktury materiálu – shodnost se specifikací</p> <p>Dokumentace změn v mikrostrukturu následkem zátěžového testu</p> <p>Kontrola případných defektů v materiálu</p> <p>Zvětšení:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 5.0x ○ 10.0x ○ 20.0x ○ 50.0x ○ 100.0x
<p>Obr. 29) Makrotvrdoměr [foto autor]</p>	<p>Obr. 30) Světelný mikroskop [foto autor]</p>

Pro zvýraznění mikrostruktury při zkoumání součásti na světelném mikroskopu je potřeba povrch metalografického vzorku nalepat vhodným leptadlem. Pro všechny vzorky v následujících materiálových analýzách bylo použito leptadlo **Kallings 2 (složení : $\text{CuCl}_2 + \text{HCl} + \text{Ethanol}$)**.

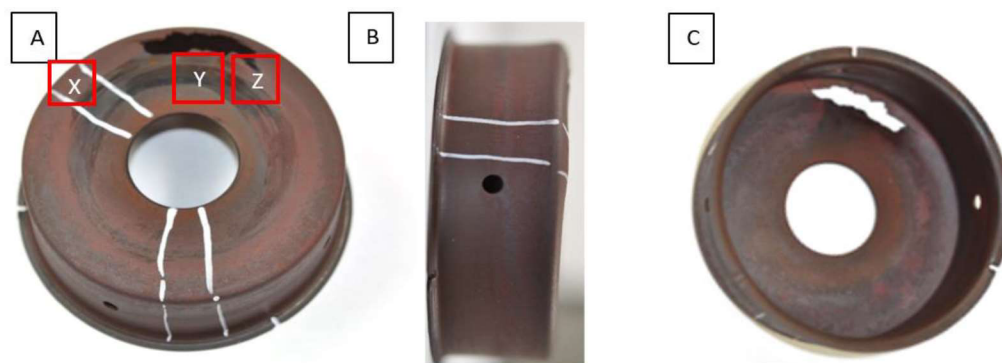
9.1 Součást č. 1

Součást č.1 (obr. 30) byla vybrána k testování z toho důvodu, že součást o stejném materiálu a designu zhavarovala na prvotním testu u zákazníka. U této součásti byl pro testování kladen požadavek, aby byl zjištěn mechanismus deformace a shodnost materiálu součásti se specifikací, uvedenou ve firemní materiálové databázi.

- Materiál A: Korozi-vzdorná ocel s nižším obsahem legujících prvků
- Původní design

9.1.1 Přehledové fotografie součásti, pozorování stereomikroskopem

Prvotní pozorování součásti pomocí stereomikroskopu odhalilo chybějící materiál v oblasti čela poblíž radiusu (plocha chybějícího materiálu se rozprostírala v úhlu asi 50°). Zároveň byla upozorována přítomnost opotřebení v širším úhlu blíže k vnitřnímu průměru štitu. Na povrchu se nacházeli trhliny v oblasti opotřebení a v jeho blízkém okolí, viz obr. 31), 32) a 33).



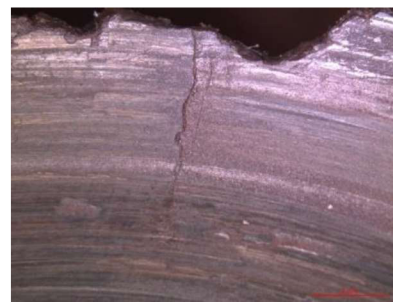
Obr. 31) Součást 1: A) čelní pohled s vyznačenými oblastmi (X,Y,Z); B) pohled z boční strany; C) pohled ze spodní strany štitu. [foto autor]



Obr. 32) Detail na oblast X [foto autor]



Obr. 33) Detail na oblast Y [foto autor]



Obr. 34) Detail na oblast Z [foto autor]

9.1.2 Pozorování součástí pomocí SEM, analýza složení materiálu pomocí EDX

Pomocí SEM bylo zjištěno, že u povrchu fraktury (obr. 34)) jsou **četné povrchové praskliny** vyznačené na obr. 35) a obr. 36) žlutými šipkami.

Na povrchu trhlin od chybějícího materiálu (obr. 37), 38) a 39)) **nebyla** pozorována známka **únavového poškození**. Povrch fraktury byl však **vysoce zoxidován** – viz obr. 38)

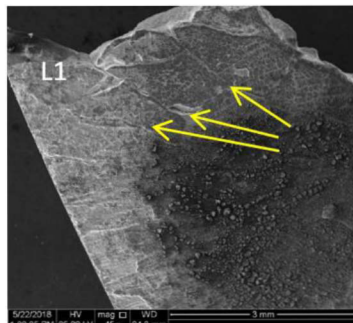
Analýza složení materiálu – EDAX

SEM-EDAX analýza základního materiálu (obr. 40)) odhalila chemické složení, které bylo dle specifikace pro materiál A, uvedené ve firemní materiálové databázi.

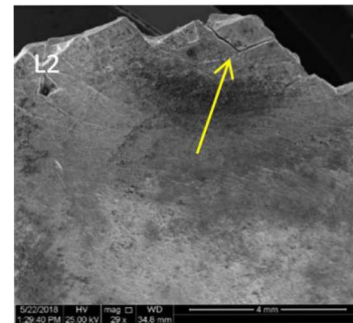


Obr. 35) Detail oblasti zkoumané pod SEM

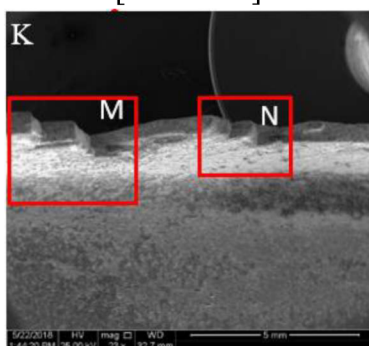
[foto autor]



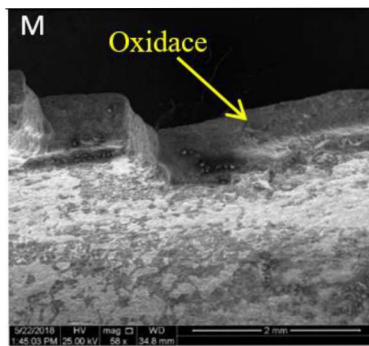
Obr. 36) Detail na oblast L1 [foto autor]



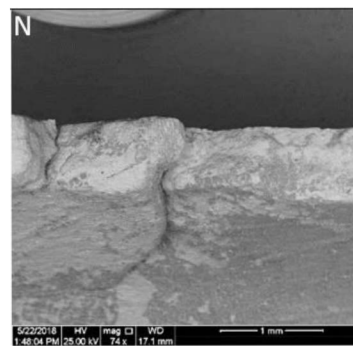
Obr. 37) Detail na oblast L2 [foto autor]



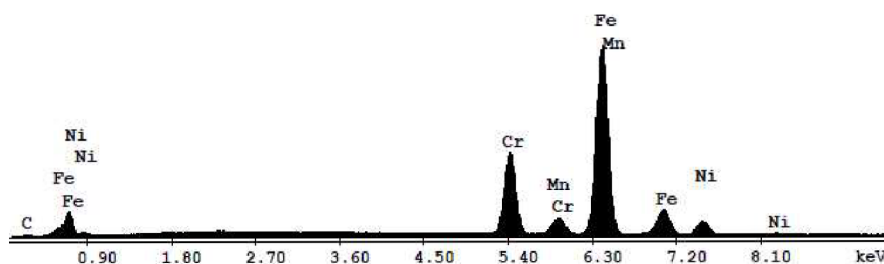
Obr. 38) Detail na oblast K [foto autor]



Obr. 39) Detail na oblast M [foto autor]



Obr. 40) Detail na oblast N [foto autor]



Element	Wt %
C K	3.96
CrK	18.09
MnK	1.85
FeK	68.55
NiK	7.54
Total	100.00

Obr. 41) SEM-EDAX analýza základního materiálu součásti 1

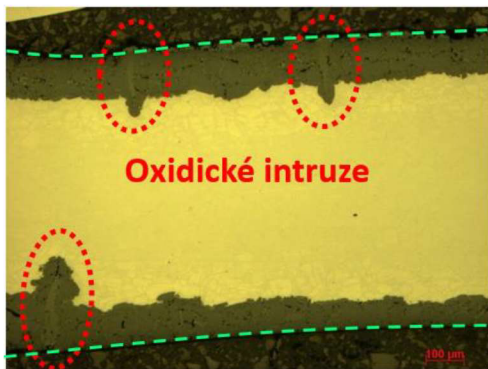
9.1.3 Mikrostruktura

Metalografický vzorek (viz obr. 44)) byl připraven z oblasti X (viz obr. 31)) v řezu dle naznačení na obr. 43). Oblasti G a H označují oblasti pozorované a nafocené světelným mikroskopem.

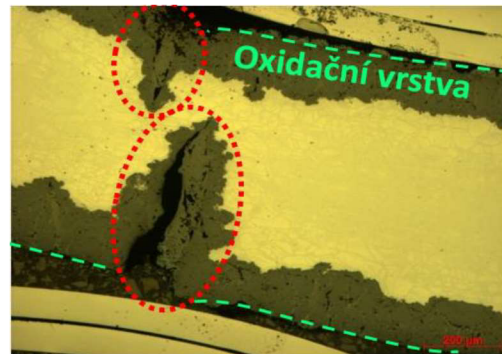
Na vzorku mikrostruktury před naleptáním bylo možno pozorovat silnou vrstvu oxidace po celé ploše povrchu vzorku. Zároveň zde byl výskyt oxidických intruzí (pronikání oxidace do materiálu – obr. 41) a 42)), které postupem času způsobily v místě svého výskytu trhliny později pozorovatelné jako povrchové praskliny.

Po naleptání vzorku, světelný mikroskop odhalil odlišné mikrostruktury v závislosti na poloze ve vzorku:

- V lokaci G (viz obr. 45)) byla mikrostruktura shodná se specifikací dle firemní materiálové databáze.
- V lokaci H (viz obr. 46)) se nacházela prasklina skrz celou šířku vzorku, vzniklá pomocí oxidické intruze. Mikrostruktura v této oblasti nebyla shodná se specifikací – výskyt oxidických intruzí, austenitická struktura a precipitované částice (sekundární karbidy) na povrchu zrn i v zrnech samotných.



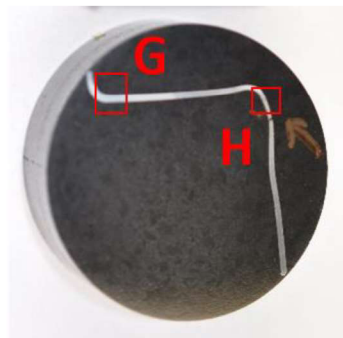
Obr. 42) Detail oxidických intruzí a oxidační vrstvy v okolí opotřebení [foto autor]



Obr. 43) Detail oxidických intruzí a oxidační vrstvy v okolí opotřebení 2 [foto autor]



Obr. 44) Naznačení řezu pro vytvoření metalografického vzorku [foto autor]

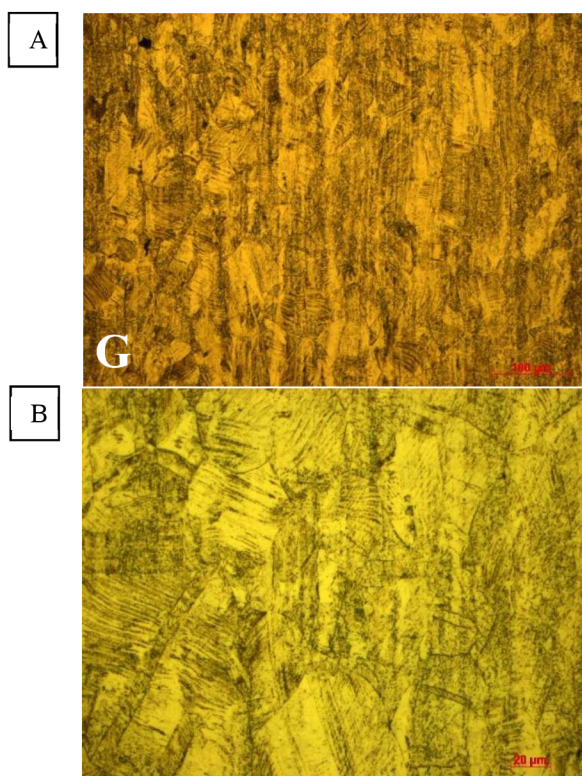


Obr. 45) Metalografický vzorek [foto autor]

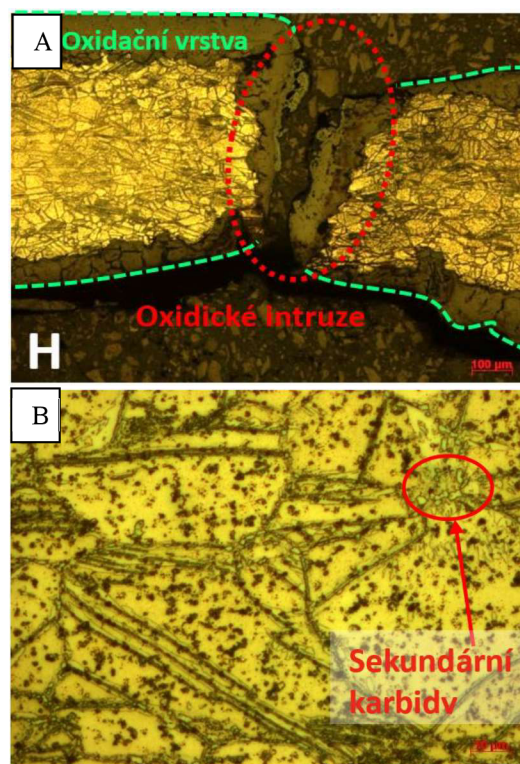
9.2 Součást č. 2

Součást č.2 byla vybrána k testování z toho důvodu, že je vyrobena z nového materiálu B, který má více legujících prvků, je odolnější a byl již dříve úspěšně testován na plynových motorech u jiných typů automobilů. U této součásti byl stále starý typ designu (jako u součásti 1). Pro testování kladen požadavek, aby byl zjištěn mechanismus deformace a byl porovnán s mechanismem u součásti 1. Zároveň je žádáno zjistit shodnost materiálu se specifikací uvedenou ve firemní materiálové databázi.

- Materiál: Korozi-vzdorná ocel s vyšším obsahem legujících prvků (zejména chromu)
- Původní design



Obr. 46) Mikrostruktura v oblasti G: A – se zvětšením 20.0x, B – se zvětšením 50.0x [foto autor]



Obr. 47) Mikrostruktura v oblasti H: A – trhlina vzniklá oxidickou intruzí, B – detail sekundárních karbidů [foto autor]

9.2.1 Přehledové fotografie součásti, pozorování stereomikroskopem

Prvotní pozorování součásti pomocí stereomikroskopu odhalilo četné praskliny a chybějící kusy materiálu v oblasti čela štítu (viz obr. 50): A), poblíž vnitřního průměru (plocha celého opotřebení zajímala plochu v úhlu asi 90°). Celkový tvar součástí byl značně zdeformovaný – jedna polovina čela ze vzdouvala směrem k turbínovému kolu v místě kde byla později kolem opotřebována (viz obr. 37): B). Při pozorování vnitřní části čela štítu (viz obr. 50): C) lze dle změny zabarvení plochy okolo opotřebení pohledem odhadnout, že oblast, která byla vystavena nadměrnému teplotnímu zatížení se rozprostírala v úhlu téměř 180°.

K přesnějšímu zkoumání byly vybrány tři oblasti – X (obr. 47)), Y (obr. 48)) a Z (obr. 49)) pro zdokumentování tvaru povrchových trhlin.

9.2.2 Pozorování součástí pomocí SEM, analýza složení materiálu pomocí EDAX

Pomocí SEM bylo zjištěno, že v okolí opotřebení se nachází četné trhliny i části s chybějícím materiálem. Velká část materiálu byla odbroušena turbínovým kolem – EDAX analýza odhalila přítomnost částic o chemickém složení materiálu turbínového kola (niklová super-slitina). Tato přítomnost je zapříčiněna vzájemným přenášením materiálu z turbínového kola na tepelný štít a naopak během vzájemného tření za vysokých teplot.

V oblasti K (viz obr. 51)) byla pod stereomikroskopem pozorována četná povrchová nerovnost. Pomocí SEM (viz obr. 52)) a EDAX analýzy bylo odhaleno, že se jedná o nerovnoměrně rozloženou povrchovou oxidaci - její mikrostruktura je na obr. 64).

V oblasti L (viz obr. 53)) byla pozorován konec trhliny, rozprostírající se přes celý prostor opotřebení. Dle jejího tvaru, který vypadá jakoby obepisoval hranice jednotlivých zrn materiálu bylo odhadnuto, že se jedná o inter-granulární trhlínu – dále bude ověřeno pomocí metalografie. Materiál v jejím okolí (v oblasti opotřebení) je potažen vrstvou oxidace.



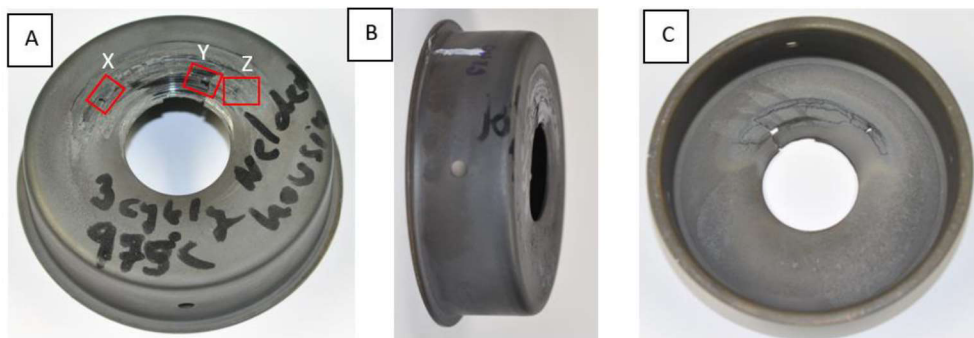
Obr. 48) Detail na oblast X [foto autor]



Obr. 49) Detail na oblast Y [foto autor]



Obr. 50) Detail na oblast Z [foto autor]



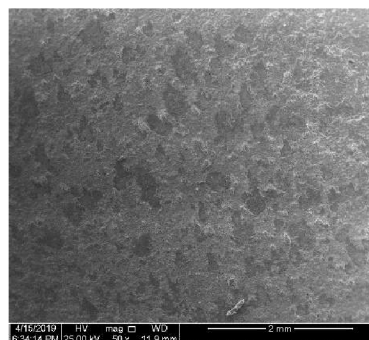
Obr. 51) Součást 2: A) čelní pohled s vyznačenými oblastmi (X,Y,Z); B) pohled z boční strany; C) pohled ze spodní strany štítu. [foto autor]

Zároveň je zde výskyt malých oblastí s chemickým složením super-niklové slitiny (turbínové kolo). Na trhlině v oblasti M (viz obr. 54) v místě chybějícího materiálu byl taktéž detekován zoxidovaný povrch.

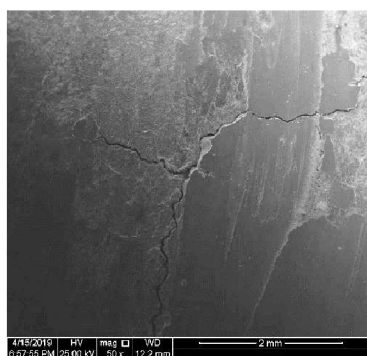
Část trhliny z oblasti L byla otevřena a trhlina zaměřena SEM (viz obr. 55). Z čela tepelného štítu byla pozorována silná vrstva oxidace. V detailu (viz obr. 56) byly zpozorovány zářivě bílé částice. Dle chemického složení bylo zjištěno, že se jedná o nezoxidovaný povrch.



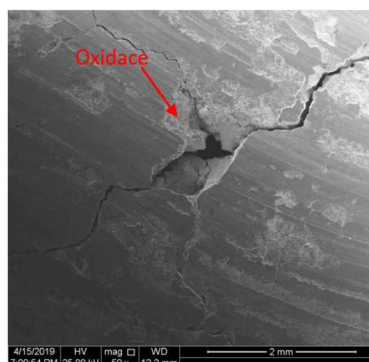
Obr. 52) Detail oblasti zkoumané pod SEM [foto autor]



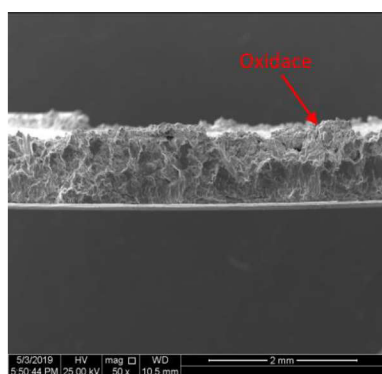
Obr. 53) Detail na oblast K [foto autor]



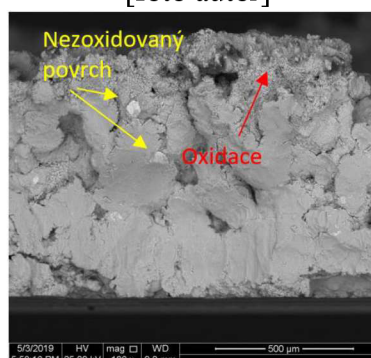
Obr. 54) Detail na oblast L [foto autor]



Obr. 55) Detail na oblast M [foto autor]



Obr. 56) Otevřená trhlina z oblasti L [foto autor]



Obr. 57) Detail trhliny – oxidace, výskyt karbidů [foto autor]

Analýza složení materiálu – EDX

SEM-EDX analýza základního materiálu odhalila chemické složení, které bylo dle specifikace pro materiál B, uvedené ve firemní materiálové databázi (obr. 60).

9.2.3 Mikrostruktura

Byly připraveny dva metalografické vzorky v řezech dle obr. 57):

1. Metalografický vzorek (viz obr. 58)) z oblasti L – viz obr. 53)
2. Metalografický vzorek (viz obr. 59)) z oblasti K – viz obr. 52)

Na obou vzorcích bylo při zkoumání mikrostruktury před naleptáním možno pozorovat silnou vrstvu oxidace po celé ploše povrchu čela vzorku. Byl zde jemný výskyt oxidických intruzí (pronikání oxidace do materiálu).

Na vzorku č. 1 byla k vidění trhlina (viz obr. 61)), která prostupuje vzorkem uprostřed stěny čela od dříve pozorované trhliny v oblasti L směrem k rádiusu. Po naleptání vzorku na mikrostrukturu bylo jasné, že se jedná o inter-granulární trhlinu - z obr. 62) je patrné, že trhlina při svém průchodu materiálem přesně obepisuje hranice jednotlivých zrn.



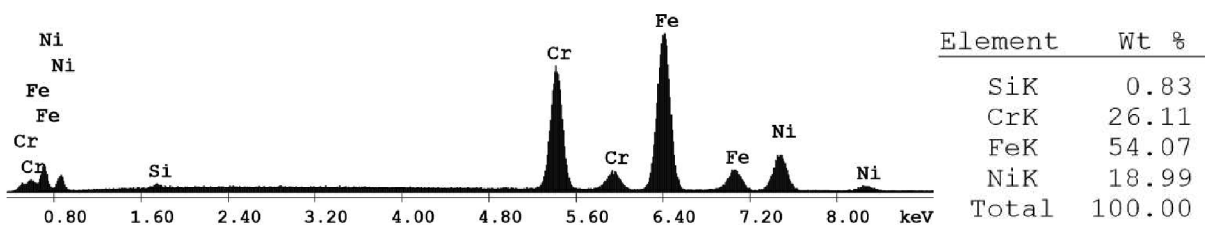
Obr. 58) Naznačení řezů pro vytvoření metalografických vzorků [foto autor]



Obr. 59) Metalografický vzorek 1 [foto autor]



Obr. 60) Metalografický vzorek 2 [foto autor]



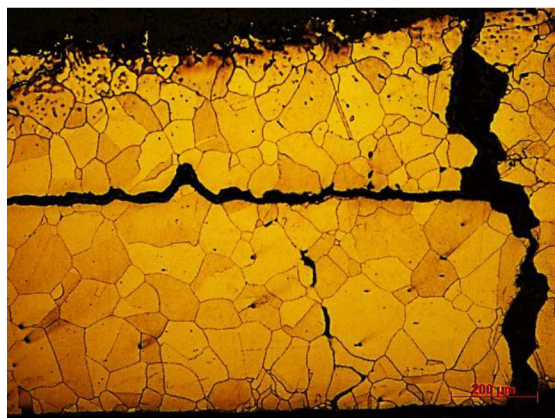
Obr. 61) SEM-EDAX analýza základního materiálu součásti 2

Po naleptání vzorku byla pomocí světelného mikroskopu odhalena odlišná mikrostruktura v závislosti na místě pozorování:

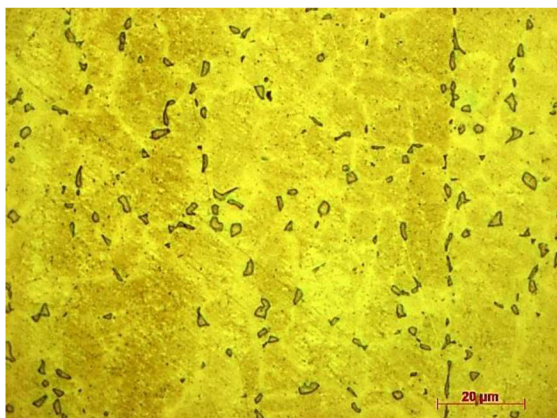
- Ve spodní části tepelného štítu došlo k precipitaci **fáze sigma**, která vzniká po zahřátí na velmi vysokou teplotu přeměnou z delta feritu (obr. 63).
- Bylo zřejmé, že v místě čela vzorku došlo působením vysoké teploty k přetvoření mikrostruktury - zvětšila se zrna austenitu (viz obr. 62)



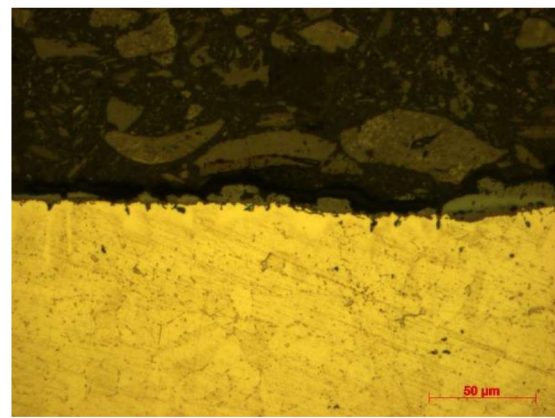
Obr. 62) Trhlina v oblasti L [foto autor]



Obr. 63) Trhlina v oblasti L po naleptání [foto autor]



Obr. 64) Přítomnost fáze SIGMA v dolní oblasti tepelného štítu [foto autor]



Obr. 65) Detail oblasti K na světelném mikroskopu [foto autor]

9.3 Součást č. 3 a 4

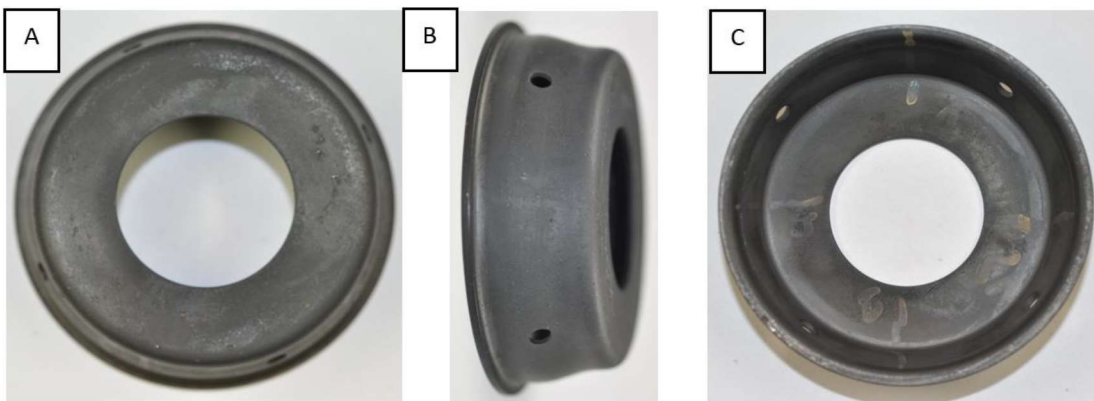
Součásti č. 3 a 4 z materiálu B byly testovány jako prototypy po změně designu tepelného štítu - součást č. 3 (obr. 65)) byla po teplotním zátěžovém testu a součást č. 4 (obr. 66)) byla nová.

Požadavky pro analýzu těchto součástí byly:

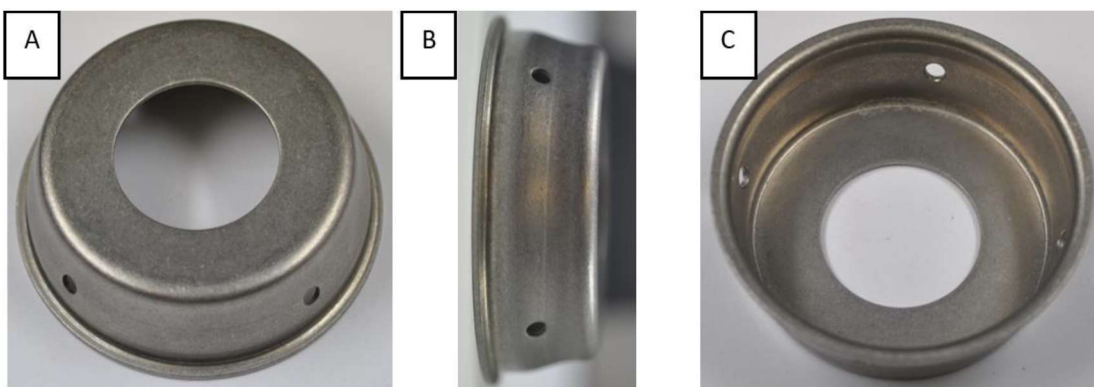
- Ověřit shodnost materiálu součástí se specifikací uvedenou ve firemní materiálové databázi.
- Porovnat struktury materiálů obou součástí a popsat případné změny po testu a jejich možné následky.
 - materiál: Korozi-vzdorná ocel s vyšším obsahem legujících prvků – zejména chromu
 - nový design

9.3.1 Přehledové fotografie součástí, pozorování stereomikroskopem

Po prvotním prohlédnutí součástí na stereomikroskopu byly u obou nalezeny četné praskliny po celém jejich obvodu v místě ohybu na boční straně štítu – viz. obr 67) A,B. Po prozkoumání prasklin v metalografickém vzorku součásti po testu bylo vidět, že prozatím materiál v jejich místě oxiduje stejnou mírou, jako okolní. Mimo tyto praskliny nebyla na žádné ze součástí nalezena známka většího opotřebení.

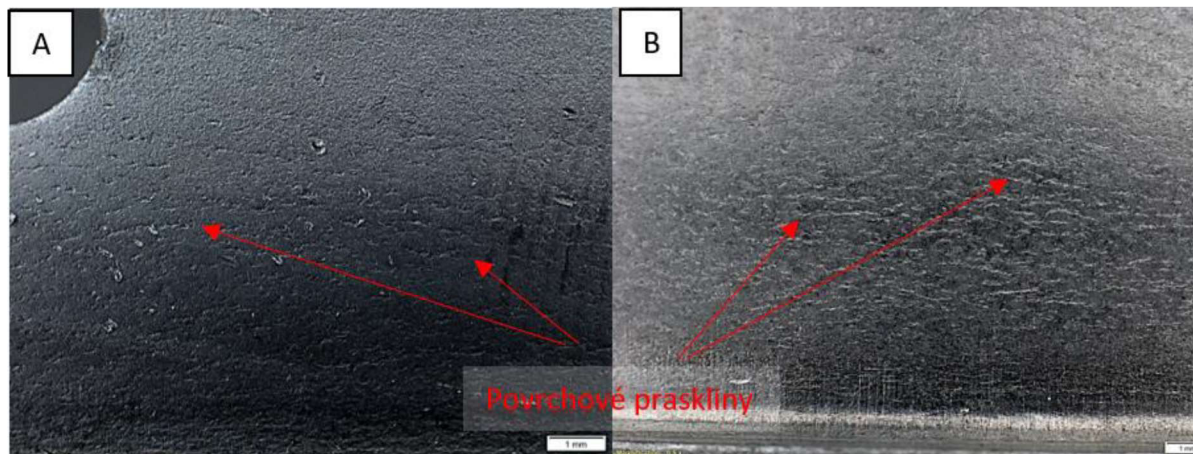


Obr. 66) Součást 3: A) čelní pohled, B) pohled z boční strany, C) pohled ze spodní strany štítu [foto autor]



Obr. 67) Součást 4: A) čelní pohled, B) pohled z boční strany, C) pohled ze spodní strany štítu [foto autor]

Na vnitřní straně boční stěny štítu byl v rádiusu stěny nalezen v jednom místě kousek cizího materiálu – viz obr. 68). Z metalografického vzorku na obr. 76) se zjistilo, že se jedná o zoxidovaný materiál ložiskové skříňě – viz obr. 69), který se během testu začal z povrchu odlupovat a v tomto místě se navařil na tepelný štít. Složení bylo získáno z metalografického vzorku (obr. 75)) pomocí EDAX analýzy.



Obr. 68) Povrchové praskliny na vnější straně rádiusu boční stěny: A - součást po testu, B - nová součást [foto autor]



Obr. 69) Kus cizího materiálu na vnitřní straně štítu [foto autor]



Obr. 70) Ložisková skříň po testu s odloupanou povrchovou oxidací [foto autor]

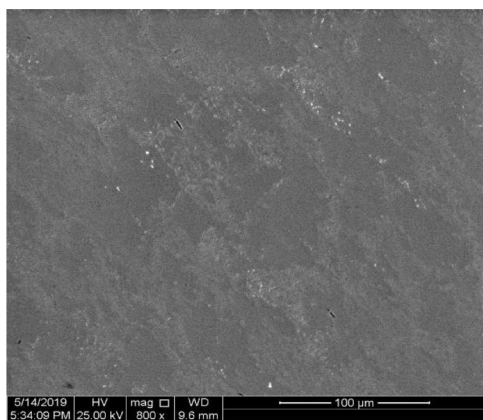
9.3.2 Pozorování součástí pomocí SEM, analýza složení materiálu pomocí EDX

Pomocí SEM analýzy bylo zjištěno, že zatímco v nové součásti byl nalezen delta-ferit, v součásti po testu byl četný výskyt fáze sigma, jak je patrné z obrázku 70) – popis v kapitole 7.2.5.

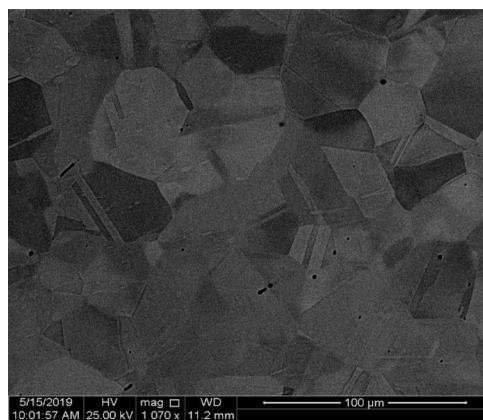
Analýza složení materiálu – EDX

SEM-EDX analýza základního materiálu obou součástí (obr. 72) a obr. 73)) odhalila chemické složení, které bylo dle specifikace pro materiál B, uvedené ve firemní materiálové databázi.

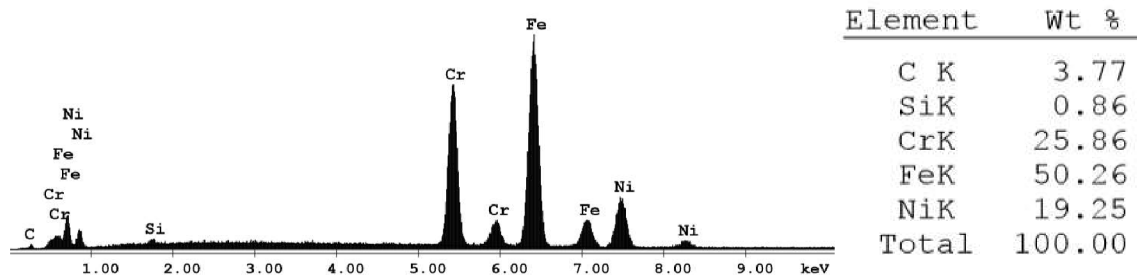
Na obr. 74) je uvedeno mapování jednotlivých prvků ve zvolené oblasti (místa, kde se prvek vyskytuje, jsou zobrazena výrazně světlou barvou). Dle map jednotlivých prvků lze vidět, že je zde vysoký výskyt částic chromu, niklu a železa, což je pro materiál B typické. Avšak v místech, kde je vyznačena největší koncentrace chromu je minimum niklu, jelikož sigma fáze obsahuje zejména chrom a železo, jedná se právě o místa výskytu této fáze.



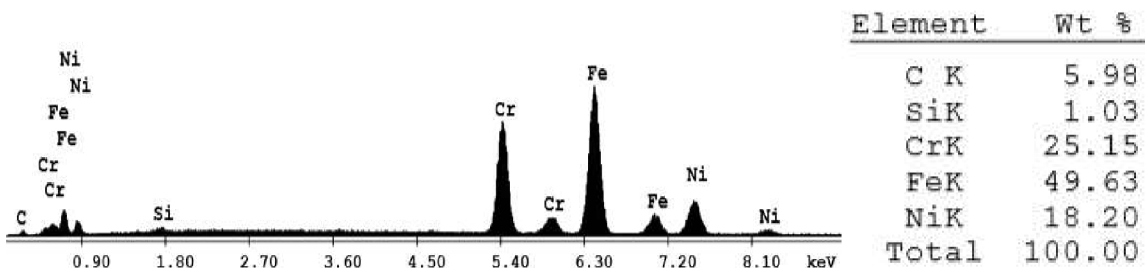
Obr. 71) Detail oblasti vzorku po testu s výskytem fáze sigma (bílé částice) [foto autor]



Obr. 72) Mikrostruktura součásti č. 4 na SEM [foto autor]



Obr. 73) SEM-EDAX analýza základního materiálu součástí 3



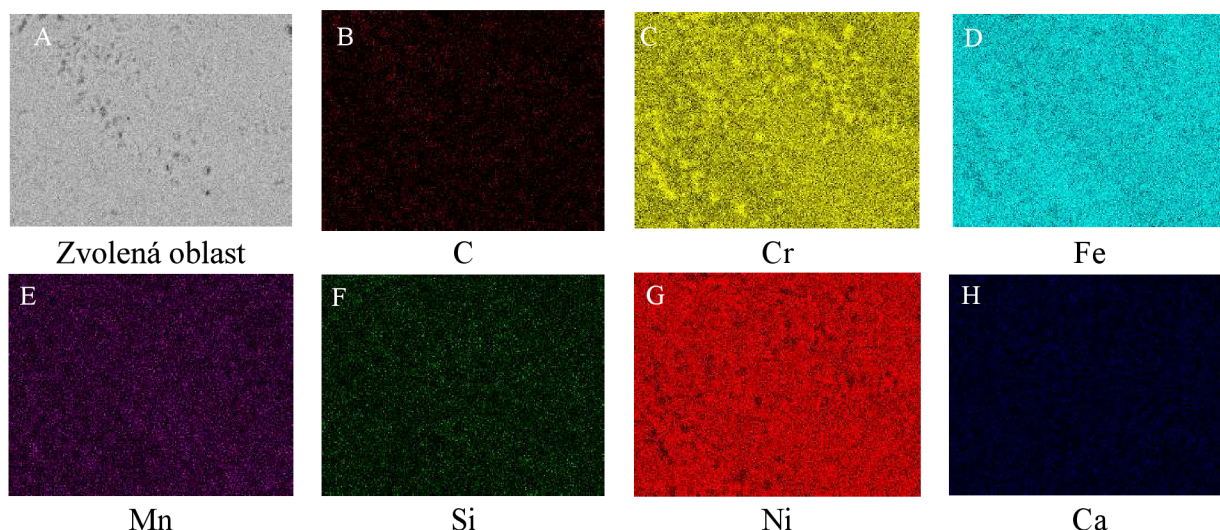
Obr. 74) SEM-EDAX analýza základního materiálu součástí 4

9.3.3 Mikrostruktura

Byly připraveny dva metalografické vzorky – jeden z každé součásti. Metalografický vzorek pro součást č. 3 byl připraven z místa výskytu cizího materiálu. U vzorku č. 4 byl vzorek odebrán z náhodného místa, jelikož by měla být struktura materiálu v jakémkoliv řezu součásti stejná. Na obr. 75) je fotografie vzorku ze součásti č. 3 (vzorek č. 4 vypadal na fotografii totožně).

Po naleptání vzorků byla u součásti č. 3 odhalena v oblasti boční stěny odlišná mikrostruktura (viz. obr. 78)) než u součásti č. 4 (viz obr. 71 a 77)). V místech čela vzorků však vypadaly mikrostruktury totožně. Jedná se o austenitická zrna a struktura je shodná se strukturou ve specifikaci uvedené ve firemní materiálové databázi.

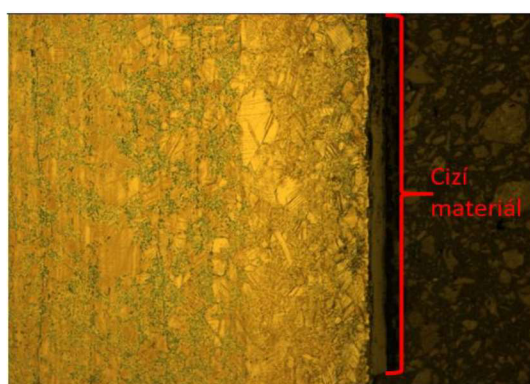
V místě rádiusu u čela štítu a poté po celé boční stěně součásti byla struktura součásti po testu změněna – byla zde precipitována fáze sigma – tmavé částice na obr. 78). V těchto místech se tedy struktura neshodovala se specifikací.



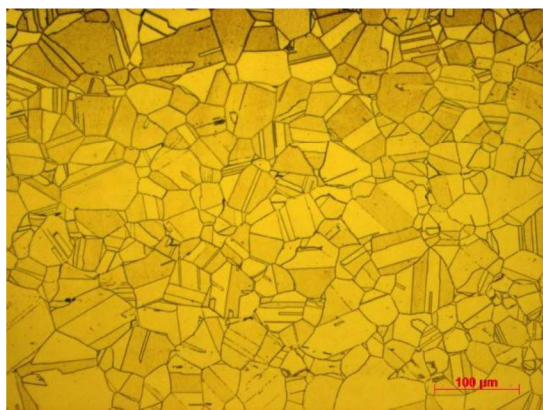
Obr. 75) Mapping složení prvků v materiálu ve zvolené oblasti: A – zvolená oblast, B – uhlík, C – chrom, D – železo, E – mangan, F – křemík, G – nikl, H – vápník



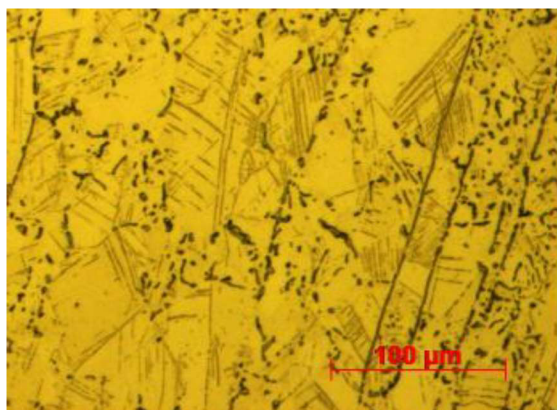
Obr. 76) Metalografický vzorek součásti č. 3 [foto autor]



Obr. 77) Cizí materiál na vzorku součásti č. 3 [foto autor]



Obr. 78) Mikrostruktura vzorku součásti č. 4 [foto autor]



Obr. 79) Mikrostruktura vzorku součásti č. 3 v místě boční stěny – sigma fáze [foto autor]

10 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Ze zátěžových testů součástí s původním designem bylo jasné, že materiál A není vhodný pro danou aplikaci. Materiál B obstál v testech lépe, ale při zhoršení provozních podmínek i u něj docházelo k výrazným plastickým deformacím. Hlavním problémem vyplývajícím ze zátěžových testů bylo nerovnoměrné teplotní zatížení, které způsobilo jednostrannou expanzi materiálu, jež se projevila trvalou plastickou deformací. Bohužel v případě ucpání voluty cizím materiálem nemůže firma sama o sobě přijmout žádná preventivní opatření. Materiál ve volutě pocházel z motoru zákazníka a nikoli z turbodmychadla, což firma Garrett – Advancing motion nemá možnost ovlivnit.

Z výsledků **kvalitativních analýz** vyplynulo, že s největší pravděpodobností může být kořenovou příčinou problému **chyba materiálu, designu součásti, nečekaného zhoršení provozních podmínek nebo nevhodné umístění štítu v turbodmychadle**. Dřívější jemné změny v podobě odstranění zoubků a umístění štítu napevno mezi turbínovou a ložiskovou skříň již pomohly provést kroky k podchycení problému s nevhodným umístěním štítu. **Náhrada materiálu** výrazně zlepšila vlastnosti součásti, ale **nevyřešila daný problém**.

Dle výsledků **analýzy deformačních charakteristik** u jednotlivých materiálů s původním designem součásti bylo zjištěno, že materiál B obstojí při teplotní zátěži lépe, ovšem i u něj se může vyskytnout výrazná deformace. Na základě těchto výsledků byl proveden **návrh nového designu**, jehož deformační charakteristiky ukazovali **výrazně nižší deformaci** za vysokých teplot. Toto je způsobeno zejména zvětšením vnitřního průměru v čele štítu, zvětšením tloušťky stěny celé součásti a snížení koncentrace napětí v rádiusu u čela štítu jeho zvětšením pomocí zkosení jeho boční strany. Při této kombinaci změn se zmenší celková plocha čela štítu, což spolu s větší tloušťkou stěny zvyšuje tuhost štítu a snižuje jeho tendence k výrazné plastické deformaci. Jedno **slabé místo nového designu** může být spatřováno v **prasklinách po obvodu součásti**, které jsou způsobeny ohýbáním při výrobě. Jejich vliv na spolehlivost součásti však bude patrný až **po delší době zatěžování součásti**.

Součást č.3, která přežila zátěžový test nás utvrdila v tom, že nový design součásti pomohl k řešení zadaného problému. Je ovšem potřeba vyčkat, jak se výdrž součásti vyvine postupem času. Z materiálových analýz vyplývá, že materiál B reaguje na vysoké teploty jiným způsobem, než materiál A. Materiál B odolává vystavení vysokým teplotám déle, precipituje se v něm ovšem narozdíl od materiálu A **fáze sigma**, která způsobuje velké **křehnutí materiálu** a její množství se u materiálu zvyšuje s časem stráveným na teplotách mezi 600 a 900°C. Bude-li tedy materiál vystaven těmto teplotám po delší dobu, **může se s velkou pravděpodobností objevit po nějakém čase praskání součásti**.

Na základě těchto poznatků se **doporučuje počítat s možnými komplikacemi v budoucnu**. Bylo by dobré **provést další zátěžové testy**, kdy bude součást vystavena vysokým teplotám po delší dobu a bude možno zjistit, jestli je domněnka o výskytu praskání součásti pravdivá. Zároveň by byla lepší možnost odhadnout budoucí chování povrchových prasklin v místě rádiusu boční stěny štítu.

11 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provést funkční analýzu konstrukce a vhodnosti použitého materiálu tepelného štítu turbodmychadla. Analýzy a testy byly provedeny pro tepelné štíty používané u nové aplikace motorů na CNG palivo u těžkých nákladních vozidel.

Úvod teoretické části práce se věnuje ekologickým normám a jejich tlaku na výrobce automobilů z hlediska emisních limit – zejména co se týká nejnovější Evropské ekologické normy EURO VI pro těžké nákladní automobily.

Je vysvětlen princip a popsána konstrukce turbodmychadla, pro lepší pochopení proč vzniká daný problém. Zároveň je popsán tepelný štít, který je předmětem analýz a vysvětlen řešený problém.

Analýzy zahrnuté v práci byly:

- Analýza deformačních charakteristik
- Zátěžové testy teplotního cyklování
- Kvalitativní analýzy (5 Proč, Ishikawa, FTA a FMEA)
- Materiálové analýzy

Princip všech kvalitativních analýz použitých v této práci byl také popsán v teoretické části práce.

V praktické části práce jsou popsány všechny kroky, které byly podniknuty při řešení problému s tepelným štítem. Jako první jsou popsána opatření, která byla přijata jako rychlé řešení problému na základě úvah o možné příčině. Po těchto změnách byly provedeny zátěžové testy, které prokázali, že byť tato opatření (zejména změna materiálu) zmírnili rozsah problému, nevyřešili jej.

V další části práce jsou vytvořeny čtyři kvalitativní analýzy pro zjištění kořenové příčiny problému. Z těchto analýz vyplynulo, že problém bude s největší pravděpodobností v materiálu součásti, jejím designu, zhoršených provozních podmínkách nebo uložení součásti. Dalším krokem bylo provedení analýzy deformačních charakteristik u stávajícího designu s původním i novým materiálem. Z těchto analýz vyplynulo, že součást s materiálem B je odolnější proti deformaci, ale stále je plastická deformace příliš vysoká na to, aby součást spolehlivě vykonávala svůj účel. Byl navržen nový design, který byl dále analyzován a testován a všechny testy dopadly dobře.

Posledním krokem v hledání příčin a možného budoucího chování součásti byly materiálové analýzy součástí s původním designem i materiálem, původním designem a novým materiálem a dvě součásti s novým materiálem i designem – jedna nová a jedna po zátěžovém testu. Z těchto materiálových analýz vyplynulo, že materiál B precipituje sigma fázi, která způsobuje křehnutí materiálu. Bylo doporučeno provést další zátěžové testy, aby bylo možno pozorovat vývoj chování součásti po vyprecipitování většího množství této fáze. Zároveň byly při analýzách objeveny praskliny v rádiusu stěny štítu, které by mohli po delší době také působit jako slabé místo součásti.

12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Nařízení, směrnice a další právní akty. *Evropská unie* [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://europa.eu/european-union/eu-law/legal-acts_cs
- [2] Swaminathan, Nedunchezian Bray, K. N. C.. (2011). *Turbulent Premixed Flames – 4.1.1.3 Vehicle Emissions*. Cambridge University Press. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008MEA72/turbulent-premixed-flames/vehicle-emissions>
- [3] Revving Up Heavy-Duty Vehicle Efficiency. In: *ALLIANCE to safe energy [US]* [online]. Washington DC: Alliance to safe energy, 2014 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://www.ase.org/sites/ase.org/files/styles/featured_blog/public/heavy_duty_truck.jpg?itok=tUZy2iA6
- [4] The 7 Best Light-Duty Vehicles for Towing. In: *Web2carz* [online]. Illinois: Web2Carz.com [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://www.web2carz.com/images/articles/201611/towing_lead_1478101467_944x450.jpg
- [5] A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards. In: *The international council on clean transport* [online]. Washington DC: icct, 2016 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf
- [6] How Turbochargers Work. *Howstuffworks* [online]. Atlanta: HowStuffWorks, 2012 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/turbo.htm>
- [7] Koupit teď auto na CNG? Máme sedm argumentů pro a stejný počet proti. *Autorevue* [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER, 2017 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/koupit-ted-auto-na-cng-mame-sedm-argumentu-pro-a-stejny-pocet-proti#articleStart>
- [8] WEINTRIT, Adam a Tomasz NEUMANN. *Transport Systems and Processes: Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* [online]. Gdynia Maritime University, Gdynia, Poland: CRC Press, 2011 [cit. 2019-05-23]. ISBN 13:978-0-203-15700-8. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=WafNBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [9] Number of Turbocharged vehicles to Soar Thanks To CAFE Mileage Rules. In: *Greencarreports* [online]. Chicago: MH Sub I, 2010 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://images.hgmsites.net/lrg/turbocharger_100328676_1.jpg
- [10] Turbocharger designed by Leander Düsterloh. Automation Siemens [online]. 2016 [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: http://plmsource.industrysoftware.automation.siemens.com/wpcontent/uploads/2014/03/duesterloh_turbocharger_resize.jpg

- [11] How does a Turbocharger work?. In: *TURBO DYNAMICS* [online]. Dorset, United Kingdom: Turbo Dynamics, 2013 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.turbodynamics.co.uk/files/5315/0469/6146/how-a-turbo-works.gif>
- [12] DUNCAN, William L. *Total quality: key terms and concepts*. New York: AMACOM, c1995. ISBN 978-0-8144-7876-9.
- [13] STAMATIS, D. H. *The ASQ pocket guide to failure mode and effect analysis (FMEA)*. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press, [2014]. ISBN 978-0-87389-888-1.
- [14] ANDERSEN, Bjørn a Tom FAGERHAUG. *Analýza kořenových příčin: zjednodušené nástroje a metody*. 2. vyd. [i.e. 1. české]. Praha: Česká společnost pro jakost, 2011. ISBN 978-80-02-02356-2
- [15] WILSON, Paul F., Larry D. DELL a Gaylord F. ANDERSON. *Root cause analysis: a tool for total quality management*. Milwaukee, Wis.: ASQC Quality Press, c1993. ISBN 08-738-9163-5.
- [16] BLECHARZ, Pavel. *Základy moderního řízení kvality*. Praha: Ekopress, 2011. ISBN 978-80-86929-75-0.
- [17] ČSN EN 61025. *Analýza stromu poruchových stavů (FTA)*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 48 s. Třídící znak 01 0676.
- [18] ČSN EN 60812. *Techniky analýzy bezporuchovosti systémů - Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 44 s. Třídící znak 01 0675.
- [19] ČSN EN 62740. *Analýza kořenových příčin (RCA)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. 68 s. Třídící znak 01 0676.
- [20] What are Turbochargers?. *Melett: Precision engineered turbochargers & parts* [online]. Barnsley, England: Melett, 2018 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.melett.com/technical/what-are-turbochargers/>
- [21] Turbocharger Fundamentals. *Dieselnets* [online]. Indianapolis, Indiana: Ecopoint, 2017 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://www.dieselnets.com/tech/air_turbocharger.php
- [22] How turbochargers work. *EXPLAINTHATSTUFF* [online]. United Kingdom: Chris Woodford 2010, 2018 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/how-turbochargers-work.html>
- [23] Garrett T3 Turbocharger Heat Shield Turbo Shroud. In: *Turbo Rebuild Limited* [online]. 2018 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://sites.create-cdn.net/siteimages/34/5/9/345934/93/7/8/9378180/500x395.jpg?1417363634>

- [24] Heat shields. In: *Turbo Parts specialist* [online]. 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://www.worldturbocharger.com/Product/Heat-Shields.html>
- [25] *Performance Management by Causal Mapping: An Application Field of Knowledge Management* [online]. 2017, , 19 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/knowledge-management-strategies-and-applications/performance-management-by-causal-mapping-an-application-field-of-knowledge-management>

13 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

13.1 Seznam zkratek

HDV	Heavy Duty Vehicles – Těžké nákladní vozy
LDV	Light Duty Vehicles – Lehké osobní vozy
FTA	Fault Tree Analysis – Analýza stromu poruchových stavů
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis – Analýza příčin a důsledků poruch
RCA	Root Cause Analysis – Analýza kořenových příčin
CNG	Compressed Natural Gas – Stlačený zemní plyn
SEM	Scanning Electron Microscope – Skenovací elektronový mikroskop
EDAX	Energy Dispersive Analysis X – Analýza rozptylu energie X
RPN(UPR)	Risk Priority Number (Ukazatel Priority rizika)

13.2 Seznam tabulek

TAB 1) LIMITNÍ HODNOTY ŠKODLIVIN U BENZÍNU A NAFTY, OBSAŽENÉ V EURO VI [5]	19
TAB 2) MNOŽSTVÍ EMISÍ CNG V POROVNÁNÍ S BENZÍNEM A NAFTOU [7]	20
TAB 3) ZÁVAŽNOST ZPŮSOBU PORUCHY – AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL [18]	35
TAB 4) SEZNAM TESTŮ PROVEDENÝCH PO SELHÁNÍ TESTU NA MOTORU U ZÁKAZNÍKA	40
TAB 5) FMEA ANALÝZA PŘÍČIN A DŮSLEDKŮ PORUCH TEPELNÉHO ŠTÍTU TURBODMYCHADLA	55
TAB 6) PŘEHLED SOUČÁSTÍ TESTOVANÝCH V MATERIÁLOVÉ LABORATOŘI	59
TAB 7) PŘÍSTROJE POUŽITÉ PŘI PROVÁDĚNÍ MATERIÁLOVÝCH ANALÝZ	60

13.3 Seznam obrázků

OBR. 1) PŘÍKLAD HDV – KAMION [3]	17
OBR. 2) PŘÍKLAD LDV – PICKUP [4]	17
OBR. 3) KONSTRUKCE TURBODMYCHADLA – VNĚJŠÍ POHLED [9]	22
OBR. 4) KONSTRUKCE TURBODMYCHADLA – POHLED V ŘEZU	

NA VNITŘNÍ SOUČÁSTI [10].....	23
OBR. 5) SCHÉMA POHYBU PRACOVNÍCH PLYNŮ	
TURBODMYCHADLA [11]	23
OBR. 6) PŘÍKLAD TEPELNÝCH ŠTÍTŮ ,.....	24
OBR. 7) PŘÍKLAD TEPELNÝCH ŠTÍTŮ ,.....	24
OBR. 8) PŘÍKLAD DIAGRAMU RYBÍ KOST	31
OBR. 9) ČASTO POUŽÍVANÉ ZNAČKY PRO DIAGRAM FTA	32
OBR. 10) PŘÍKLAD KAUZÁLNÍ MAPY [25]	37
OBR. 11) CIZÍ MATERIÁL NALEZENÝ V TESTU NA MOTORU	
U ZÁKAZNÍKA [FOTO AUTOR]	39
OBR. 12) DETAIL LOPATEK TURBÍNOVÉHO KOLA POŠKOZENÉHO	
CIZÍM MATERIÁLEM VE VOLUTĚ [FOTO AUTOR]	39
OBR. 13) TURBÍNOVÁ SKŘÍŇ PO ZAVAŘENÍ JEDNÉ Z VOLUT	
[FOTO AUTOR]	40
OBR. 14) BLOKOVÝ DIAGRAM I. STUPNĚ	43
OBR. 15) BLOKOVÝ DIAGRAM II. STUPNĚ	43
OBR. 16) BOUNDARY DIAGRAM TURBODMYCHADLA S	
VYZNAČENOU SOUČÁSTÍ, JEŽ JE PŘEDMĚTEM ANALÝZ	45
OBR. 17) BOUNDARY DIAGRAM S DETAILEM NA TEPELNÝ ŠTÍT A	
JEHO NEJBLIŽŠÍ FUNKČNÍ OKOLÍ.....	46
OBR. 18) ISHIKAWA DIAGRAM – NEROVNOMĚRNÁ	
DEFORMACE TEPELNÉHO ŠTÍTU	49
OBR. 19) DIAGRAM 5 PROČ – LOKÁLNÍ OPOTŘEBENÍ	
KONTAKTEM S TURBÍNOVÝM KOLEM	51
OBR. 20) ANALÝZA STROMU PORUCHOVÝCH STAVŮ	53
OBR. 21) 59 SOUČÁST 1 [FOTO AUTOR]	59
OBR. 22) SOUČÁST 2 [FOTO AUTOR]	59
OBR. 23) SOUČÁST 3 [FOTO AUTOR]	59
OBR. 24) SOUČÁST 4 [FOTO AUTOR]	59
OBR. 25) MIKROTVRDOMĚR [FOTO AUTOR]	60
OBR. 26) STEREOMIKROSKOP [FOTO AUTOR]	60
OBR. 27) SEM [FOTO AUTOR]	60
OBR. 28) MAKROTVRDOMĚR [FOTO AUTOR]	61
OBR. 29) SVĚTELNÝ MIKROSKOP [FOTO AUTOR]	61
OBR. 30) SOUČÁST 1: A) ČELNÍ POHLED S VYZNAČENÝMI	

	OBLASTMI (X,Y,Z); B) POHLED Z BOČNÍ STRANY; C) POHLED	
	ZESPODNÍ STRANY ŠTÍTU.	[FOTO
	AUTOR]	62
OBR. 31) DETAIL NA OBLAST X		62
OBR. 32) DETAIL NA OBLAST Y		62
OBR. 33) DETAIL NA OBLAST Z.....		62
OBR. 34) DETAIL OBLASTI ZKOUMANÉ POD SEM		63
OBR. 35) DETAIL NA OBLAST L1 [FOTO AUTOR]		63
OBR. 36) DETAIL NA OBLAST L2 [FOTO AUTOR]		63
OBR. 37) DETAIL NA OBLAST K [FOTO AUTOR].....		63
OBR. 38) DETAIL NA OBLAST M [FOTO AUTOR]		63
OBR. 39) DETAIL NA OBLAST N [FOTO AUTOR]		63
OBR. 40) SEM-EDAX ANALÝZA ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU		
SOUČÁSTI 1.....		63
OBR. 41) DETAIL OXIDICKÝCH INTRUZÍ A OXIDAČNÍ VRSTVY V		
OKOLÍ OPOTŘEBENÍ.....		64
OBR. 42) DETAIL OXIDICKÝCH INTRUZÍ A OXIDAČNÍ VRSTVY V		
OKOLÍ OPOTŘEBENÍ 2		64
OBR. 43) NAZNAČENÍ ŘEZU PRO VYTVOŘENÍ		
METALOGRAFICKÉHO VZORKU [FOTO AUTOR].....		64
OBR. 44) METALOGRAFICKÝ VZOREK.....		64
OBR. 45) MIKROSTRUKTURA V OBLASTI G: A – SE ZVĚTŠENÍM 20.0X,		
B – SE ZVĚTŠENÍM 50.0X [FOTO AUTOR]		65
OBR. 46) MIKROSTRUKTURA V OBLASTI H: A – TRHLINA		
VZNIKLÁ OXIDICKOU INTRUZÍ, B – DETAIL		
SEKUNDÁRNÍCH KARBIDŮ [FOTO AUTOR]		65
OBR. 47) DETAIL NA OBLAST X [FOTO AUTOR]		66
OBR. 48) DETAIL NA OBLAST Y [FOTO AUTOR]		66
OBR. 49) DETAIL NA OBLAST Z [FOTO AUTOR]		66
OBR. 50) SOUČÁST 2: A) ČELNÍ POHLED S VYZNAČENÝMI		
OBLASTMI (X,Y,Z); B) POHLED Z BOČNÍ STRANY; C) POHLED		
ZE SPODNÍ STRANY ŠTÍTU. [FOTO AUTOR]		66
OBR. 51) DETAIL OBLASTI ZKOUMANÉ POD SEM [FOTO AUTOR].....		67
OBR. 52) DETAIL NA OBLAST K		67
OBR. 53) DETAIL NA OBLAST L [FOTO AUTOR]		67

OBR. 54)DETAIL NA OBLAST M	67
OBR. 55)OTEVŘENÁ TRHLINA Z OBLASTI L [FOTO AUTOR]	67
OBR. 56)DETAIL TRHLINY – OXIDACE, VÝSKYT KARBIDŮ [FOTO AUTOR]	67
OBR. 57)NAZNAČENÍ ŘEZŮ PRO VYTVOŘENÍ METALOGRAFICKÝCH VZORKŮ [FOTO AUTOR]	68
OBR. 58)METALOGRAFICKÝ VZOREK 1 [FOTO AUTOR]	68
OBR. 59)METALOGRAFICKÝ VZOREK 2 [FOTO AUTOR]	68
OBR. 60)SEM-EDAX ANALÝZA ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU SOUČÁSTI 2	68
OBR. 61) TRHLINA V OBLASTI L [FOTO AUTOR]	69
OBR. 62) TRHLINA V OBLASTI L PO NALEPTÁNÍ [FOTO AUTOR].....	69
OBR. 63)PŘÍTOMNOST FÁZE SIGMA V DOLNÍ OBLASTI TEPELNÉHO ŠTÍTU [FOTO AUTOR].....	69
OBR. 64)DETAIL OBLASTI K NA SVĚTELNÉM MIKROSKOPU [FOTO AUTOR]	69
OBR. 65)SOUČÁST 3: A) ČELNÍ POHLED, B) POHLED Z BOČNÍ STRANY, C) POHLED ZE SPODNÍ STRANY ŠTÍTU [FOTO AUTOR]	70
OBR. 66)SOUČÁST 4: A) ČELNÍ POHLED, B) POHLED Z BOČNÍ STRANY, C) POHLED ZE SPODNÍ STRANY ŠTÍTU [FOTO AUTOR]	70
OBR. 67)POVRCHOVÉ PRASKLINY NA VNĚJŠÍ STRANĚ RÁDIUSU BOČNÍ STĚNY: A - SOUČÁST PO TESTU, B - NOVÁ SOUČÁST [FOTO AUTOR]	71
OBR. 68)KUS CIZÍHO MATERIÁLU NA VNITŘNÍ STRANĚ ŠTÍTU [FOTO AUTOR]	71
OBR. 69)LOŽISKOVÁ SKŘÍŇ PO TESTU S ODLOUPANOU POVRCHOVOU OXIDACÍ.....	71
OBR. 70)DETAIL OBLASTI VZORKU PO TESTU S VÝSKYTEM FÁZE SIGMA (BÍLÉ ČÁSTICE) [FOTO AUTOR]	72
OBR. 71)MIKROSTRUKTURA SOUČÁSTI Č. 4 NA SEM [FOTO AUTOR].....	72
OBR. 72)SEM-EDAX ANALÝZA ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU SOUČÁSTÍ 3	72
OBR. 73)SEM-EDAX ANALÝZA ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU SOUČÁSTÍ 4	72
OBR. 74)MAPPING SLOŽENÍ PRVKŮ V MATERIÁLU VE	

**ZVOLENÉ OBLASTI: A – ZVOLENÁ OBLAST, B – UHLÍK,
C – CHROM, D – ŽELEZO, E – MANGAN, F – KŘEMÍK, G – NIKL,
H – VÁPŇÍK73**

OBR. 75) METALOGRAFICKÝ VZOREK SOUČÁSTI Č. 3 [FOTO AUTOR] ...73

OBR. 76) CIZÍ MATERIÁL NA VZORKU SOUČÁSTI Č. 3 [FOTO AUTOR]73

OBR. 77) MIKROSTRUKTURA VZORKU SOUČÁSTI Č. 4 [FOTO AUTOR]...74

OBR. 78) MIKROSTRUKTURA VZORKU SOUČÁSTI Č. 3 V MÍSTĚ

BOČNÍ STĚNY – SIGMA FÁZE [FOTO AUTOR]74