

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Fraktografie hřídele turbodmychadla

Aleš Seidel

Bakalářská práce

2014

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Aleš Seidel**
Osobní číslo: **D09302**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Název tématu: **Fraktografie hřídele turbodmychadla**
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Přepřínování spalovacích motorů - obecný přehled.
Diagnostika funkce turbodmychadla.
Namáhání vybrané části turbodmychadla.
Fraktografie vybrané části turbodmychadla.


Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího diplomové práce**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran textu a přílohy**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:
Dle pokynů vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Pokorný, Ph.D.**
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **15. února 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **23. května 2013**


prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.


doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. února 2013

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

Ve Velké Poříčí dne 1.5.2014

Aleš Seidel

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Janu Pokornému, Ph.D. za cenné rady, věnovaný čas a ochotu při tvorbě práce.

Dále děkuji paní Doc.Ing. Evě Schmidové, PhD. za pomoc s kapitolou Fraktografie vybrané části turbodmychadla.

Panu Ing. Petru Tomkovi, Ph.D. děkuji za konzultace ohledně zatížení hřídele turbodmychadla.

A v neposlední řadě všem pracovníkům Dopravní fakulty Jana Pernera, kteří se jakkoli na mé práci podíleli.

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývá způsoby přeplňování pístových spalovacích motorů a stručnou historií. Jejich konstrukcí, výhodami a nevýhodami. Praktickým úkolem bylo zjistit, proč došlo u turbodmychadla k přerušení jeho hřídele. K tomu bylo nutné provést fraktografii lomu a zjistit zatížení hřídele, což se projevilo jako nejtěžší část celé práce.

Klíčová slova:

přeplňování, turbodmychadlo, fraktografie, hřídel, mechanické dmychadlo

Title:

The fractography of turbocharger shaft

ANNOTATION:

This bachelor thesis deals with the ways of supercharging internal combustion engines and brief history. Their constructions, advantages and disadvantages. The practical task was to find out why in turbocharger was broken his shaft. To do this it was necessary to do a fractography of fracture and find load of the shaft, which proved to be the hardest part of the whole work.

Keywords:

overcharging, turbocharger, fractography, shaft, mechanical charter

Obsah

Seznam ilustrací a tabulek.....	8
Úvod.....	9
1 Přepřňování spalovacích motorů.....	11
1.1 Zákklady přepřňování	11
1.2 Dělení přepřňovaných motorů	13
1.2.1 Dynamické přepřňování.....	15
1.2.2 Cizí přepřňování.....	18
1.2.3 Kombinované přepřňování	28
1.3 Chlazení stlačeného vzduchu	30
2 Diagnostika funkce turbodmychadla	32
2.1 Zásady pro práci s turbodmychadlem.....	32
2.2 Diagnostika funkce podtlakové nádoby regulace plnicího tlaku.....	34
2.3 Diagnostika systému plnicího tlaku.....	35
3 Namáhání vybrané části turbodmychadla	38
3.1 Metoda maximálního dovoleného napětí.....	39
3.2 Metoda plošná	41
3.3 Výpočet momentu z výkonu turbodmychadla.....	43
4 Fraktografie vybrané části turbodmychadla	45
4.1 Fraktografie a elektronová mikroskopie	45
4.2 Fraktografie	45
4.2.1 Princip metody	45
4.2.2 Analýza a příprava zkušebních vzorků	46
4.2.3 Zpracování a vyhodnocení analýzy.....	46
4.3 Elektronová mikroskopie	47
4.3.1 Princip metody	47
4.3.2 Zpracování a vyhodnocení dat	48
4.4 Fraktografie lomu hřídele turbodmychadla.....	49
5 Závěr.....	56
6 POUŽITÁ LITERATURA	57

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Tabulka 1 <i>Složení vzduchu</i>	11
Tabulka 2 <i>Součinitel plnění</i> [6].....	14
Obrázek 1: Variabilní sací potrubí [7]	16
Obrázek 2: Soustava rezonančních sacích potrubí [7]	16
Obrázek 3: Systém Comprex [3].....	17
Obrázek 4: Rootsovo dmychadlo [3]	19
Obrázek 5: Lysholmovo dmychadlo [8]	19
Obrázek 6: G-dmychadlo [3]	20
Obrázek 7: Princip činnosti turbodmychadla [3]	22
Obrázek 8: Obtokový ventil turbodmychadla [7]	23
Obrázek 9: Elektronická regulace plnicího tlaku [7]	24
Obrázek 10: Variable turbine geometry [7]	25
Obrázek 11: Nastavení rozváděcích lopatek [7]	26
Obrázek 12: Elektropneumatické ovládání rozváděcích lopatek [7].....	27
Obrázek 13: Regulace plnicího tlaku změnou šířky statoru turbíny [11].....	28
Obrázek 14: Kombinované přeplňování [3].....	30
Obrázek 15: Chlazení stlačeného vzduchu [3].....	31
Obrázek 16: Schéma dílů turbodmychadla [13].....	33
Obrázek 17: Diagnostika pomocí V.A.G. 1390 [13].....	34
Obrázek 18: Schéma vedení podtlakových hadiček [13]	36
Obrázek 19: Výsledek chemické energiové mikroanalýzy	39
Obrázek 20: Plocha malé lopatky... ..	42
Obrázek 21: Plocha velké lopatky.....	42
Obrázek 22: Přerušená hřídel turbodmychadla	49
Obrázek 23: Makroskopická "mapa" lomu	50
Obrázek 24: Detail pozice 4, zvětšení 3000x.....	52
Obrázek 25: Detail pozice 6, zvětšení 150x.....	52
Obrázek 26: Detail pozice 6, zvětšení 250x.....	53
Obrázek 27: Detail pozice 6, zvětšení 5000x.....	53
Obrázek 28: Detail pozice 7, zvětšení 3000x.....	54
Obrázek 29: Detail pozice 8, zvětšení 250x.....	54

Obrázky a tabulky, u nichž není uvedený zdroj, jsou dílem autora.

Úvod

Automobil i jeho samotný pístový spalovací motor toho mají za sebou již hodně. Za vynálezce dnešního pístového spalovacího motoru se považuje Gottlieb Daimler ve spolupráci s Wilhelmem Maybachem, kteří sestrojili v roce 1885 první lehký, rychloběžný spalovací motor poháněný benzínem. Gottlieb Daimler byl německý inženýr a konstruktér, který se u svých motorů zabýval také možnostmi zvýšení jejich výkonů. Použil ventil ve spodní části pístu, který sloužil k dopravě většího množství vzduchu nad píst do pracovního prostoru válce. Tím vlastně motor „přeplnil“. [1]

Desítkami let vývoje se konstrukce pístového spalovacího motoru stále zdokonalovala a zdokonaluje až na samotnou hranici možnosti motoru a použitých materiálů. Už od počátku vývoje pístového spalovacího motoru bylo cílem zvyšovat výkon, snižovat spotřebu energie a celkově tím dosáhnout lepší účinnosti. Netrvalo dlouho a konstruktéři hledali možnost, jak do válce dostat více směsi. Jelikož zvyšování objemu, kterým lze výkon také zvýšit, má určité hranice, nezbylo nic jiného, než motor „přeplnit“. Tím byl nastolen nový vývojový směr, ve kterém bylo objeveno velké množství způsobů, jak vzduch před nasáním do válce stlačit.

Největšímu vývoji přeplňování se dostalo nejspíše v období druhé světové války, kdy došlo i k prvnímu sériovému nasazení přeplňování u leteckých motorů, u kterých bylo zapotřebí získávat maximální možný výkon i ve vysokých nadmořských výškách. Tyto motory byly osazeny radiálními kompresory a střední efektivní tlaky na píst dosahovaly hodnot přes 20 barů. [2]

I v dnešní době se na vývoji přeplňování pístových spalovacích motorů stále pracuje, jelikož je jednou z nejjednodušších cest, která vede k účinnějšímu spalovacímu procesu. Přeplňování spalovacích motorů je jedna z nejčastějších metod sloužící nejen ke zvyšování jejich výkonových parametrů. Zvýšit pouze výkon spalovacích motorů pomocí přeplňování bylo snahou v minulosti především u vznětových motorů. Ty byly většinou používány jako užitkové motory v lokomotivách, lodích a nákladních automobilech, kde výkon připadající na jeden kilogram hmotnosti motoru je podstatně menší, než u zážehových motorů. Dnes je kladen požadavek především na ekologii. Postupným zpřísněním norem, které si kladou za cíl zejména omezení produkce oxidu uhličitého. Toho může být u pístových spalovacích motorů dosaženo pouze snížením spotřeby paliva a to je dosaženo zmenšením zdvihového objemu motoru při zachování stejných výkonových parametrů, tzv. downsizing. Motor o

menším zdvihovém objemu je výhodný z několika hledisek. Má menší hmotnost, menší ztráty třením, menší moment setrvačnosti atd. Stejné výkonové parametry jako u motoru o větším zdvihovém objemu jsou dosaženy právě přeplňováním. Kromě přeplňování, které zvyšuje hodnotu středního efektivního tlaku působící na píst, jak už bylo zmíněno, lze výkon motoru zvýšit už pouze zvětšením zdvihového objemu nebo zvýšením otáček motoru. Zvětšení zdvihového objemu motoru lze dosáhnout buď zvyšováním objemu jednotlivých válců, nebo zvýšením počtu válců, což vede k větším ztrátám třením, k zvýšení celkové hmotnosti spalovacího motoru a v neposlední řadě ke zvýšení jeho zástavbové velikosti. Zvyšování otáček zase negativně ovlivňuje životnost a hospodárnost, což jsou vlastnosti nevhodné pro běžný provoz. Využívá se tedy především pro závodní motory, u kterých není požadována vysoká životnost. Motory vozů formule 1 byly schopné dosahovat otáček až přes 20 000 za minutu. Jejich životnost se ovšem počítala jen na několik desítek kilometrů. [3]

Kdyby nebyla tato maximální hodnota omezena pravidly mezinárodní automobilové federace FIA, dosahovala by hodnota otáček těchto motorů ještě vyšších hodnot.

1 Přepřňování spalovacích motorů

1.1 Základy přepřňování

Ideální spalovací poměr u zážehového motoru je takový, kdy na 1 kilogram benzínu je potřeba 14,7 kilogramů vzduchu. U vznětového motoru je situace podobná, na 1 kilogram nafty je potřeba do válce dopravit 14,5 kg vzduchu. Kdybychom toto hmotnostní vyjádření převedli na objemy, bude k ideálnímu spálení 1 kg paliva potřeba přibližně 10 000 litrů vzduchu. Jak je známo, vzduch je směs plynů. Hlavními prvky obsažené ve vzduchu jsou kyslík (21%), dusík (78,9%) a ostatní plyny (0,1%). Když se tyto procentuální poměry vyjádří hmotnostně, je potom patrné, že na spálení jednoho kilogramu nafty je potřeba přibližně 3,045 kilogramů kyslíku. Vezme-li se v úvahu hustota vzduchu $\rho = 1,293 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ pak na spálení jednoho kilogramu nafty je nutné dodat $2,4 \text{ m}^3$ vzduchu. To odpovídá krychli o straně 1,3 metrů. [4]

Tabulka 1: Složení vzduchu

Plyn	Objem [%]	Hmotnost [%]
Kyslík	21	75,5
Dusík	78	23,2
Ostatní plyny	1	1,3

Uvedený ideální poměr vzduchu a paliva se označuje jako stechiometrická směs. Pro zjednodušení popisu stavu přiváděné směsi byl zaveden součinitel přebytku vzduchu λ . Jeho hodnotou lze vyjádřit, zda motor spaluje bohatou nebo chudou směs. λ udává poměr množství vzduchu skutečně do motoru přivedeného a teoreticky potřebného. Hodnota $\lambda = 1$ značí ideální směšovací poměr. Hodnota $\lambda > 1$ odpovídá chudé směsi, $\lambda < 1$ pak bohaté směsi. Režim práce dnešních atmosférických i přepřňovaných motorů se pohybuje v úzkém pásmu okolo hodnoty $\lambda = 1$, je to výhodné z hlediska spotřeby paliva a nutné pro správnou činnost katalyzátoru. Cílem přepřňování spalovacích motorů je zvýšení přivedeného množství vzduchu o tlaku větším než atmosférickém, aby byl zachován stechiometrický poměr, zvýší se i dodávka paliva do spalovacího prostoru za jednotku času. Výsledkem je zvýšení točivého momentu a výkonu u objemově srovnatelných motorů. Neboli z přepřňovaného motoru s nižším objemem lze získat výkon a točivý moment odpovídající atmosférickému motoru

s objemem větším. Současně se zavedením přeplňování klesá měrná specifická hmotnost motoru, měrná specifická spotřeba motoru a stoupá měrný výkon. [3]

Měrný výkon

Udává počet kilowat výkonu motoru připadajících na jeden litr objemu válců motoru. Vypočítá se dělením výkonu motoru a jeho objemem válců. Jednotkou je $\left[\frac{kW}{dm^3}\right]$. [5]

Měrná specifická spotřeba

Jedná se o množství paliva v gramech, připadajících na jednu kilowatu za hodinu provozu motoru. Vypočítává se jako podíl celkové spotřeby paliva za hodinu a počtu kilowat. Jednotkou je $\left[\frac{g}{kW.h}\right]$. [5]

Měrná specifická hmotnost motoru

Je to počet kilogramů hmotnosti motoru připadajících na jednu kilowatu výkonu motoru. Vypočítává se jako podíl hmotnosti motoru a jeho maximálního výkonu. Jednotkou je $\left[\frac{kg}{kW}\right]$. [5]

Uvedené vlastnosti tedy dovolují stavbu objemově menšího motoru, který má výkonové parametry většího motoru. Dále tedy dochází ke snížení hmotnosti, tím ke snížení spotřeby paliva, která má zásadní vliv na ekologii provozu pístových spalovacích motorů. Přeplňováním lze odstranit, nebo alespoň částečně eliminovat velkou nevýhodu atmosférických motorů a tou je nízký točivý moment při nízkých provozních otáčkách motoru, které jsou v běžném provozu nejčastěji používány. Proto se nejvyšší účinek přeplňování nastavuje do nejčastěji používaných otáček motoru, aby byla jeho výhoda co nejvíce využita. Tím ovšem dochází k vyššímu zatížení klikového mechanismu. Dalším limitujícím faktorem je také klepání motoru, samozápaly a v neposlední řadě vysoké teploty výfukových plynů na výstupu z motoru, které jsou řádově o několik desítek stupňů vyšší než u motorů atmosférických. Proto se při vysokých teplotách výfukových plynů obohacuje směs, která výfukové plyny zchladí. Omezení teplot je nutné s ohledem na životnost turbíny, v případě přeplňování turbodmychadlem a také pro správnou funkci katalyzátoru. Protože je

snaha dostat do motoru co možná nejvíce vzduchu, zařazuje se na straně sání chladič nasávaného vzduchu, který může být různé konstrukce. V dnešní době se čím dál častěji používají chladiče napojené na kapalinové chlazení motoru. Při stlačování vzduchu dochází k nárůstu jeho teploty a tím i objemu, proto je vhodné stlačený vzduch zchladit. Cílem je přiblížit se teplotou vzduchu na výstupu z chladiče teplotě vzduchu, který do chladiče vstupoval. Dalším omezením přeplňovaných motorů je nutnost regulace velikosti plnicího tlaku se změnou otáček motoru. Vysokými tlaky plnění by mohlo dojít k destrukci motoru. Maximální účinek přeplňování je v nízkých otáčkách a středních otáčkách. Při vysokých otáčkách motoru a velkých množstvích výfukových plynů by plnicí tlak byl nepřijatelně velký. Proto se musí plnicí tlaky regulovat a do systému přeplňování se řadí obtokový ventil nebo proměnná geometrie lopatek turbíny, případně jejich kombinace. Při nízkých otáčkách motoru k žádné regulaci nedochází, obtokový ventil je uzavřený. Se zvyšujícími se otáčkami se obtokový ventil otevírá a přepouští určité množství výfukových plynů do výfuku mimo lopatkové kolo turbíny. [4]

1.2 Dělení přeplňovaných motorů

Jak bylo uvedeno výše, přeplňováním lze zvýšit výkon motoru s minimálními změnami jeho vnějších rozměrů a celkové hmotnosti, nebo použít motor menší doplněný o přeplňování. Čtyřdobý motor je považován za přeplňovaný, jestliže je do jeho válců dopravována náplň o vyšším tlaku, než je tlak atmosférický. U dvoudobých motorů se zbytky spalín z válce vyplachují čerstvou směsí, která proudí do spalovacího prostoru pod tlakem, který vytváří pohyb pístu do dolní úvrti. Tím by se dal každý dvoudobý motor považovat za přeplňovaný, ale v odborné literatuře se dvoudobý motor považuje za přeplňovaný, když tlak náplně proudící do spalovacího prostoru je větší, než by bylo nutné k propláchnutí a naplnění válce. [6]

Výkon motoru i jeho točivý moment jsou určovány množstvím nasávaného čerstvého vzduchu, otáčkami a množstvím vstříknutého paliva. Množství nasávaného vzduchu vyjadřuje tzv. součinitel plnění. [7]

Součinitel plnění udává poměr mezi skutečnou náplní čerstvého plynu ve válci a teoreticky možnou náplní válce na jeden pracovní oběh. (7, s. 371)

Tabulka 2: Součinitel plnění [7]

Součinitel plnění u motorů bez přeplňování a s přeplňováním	
Druh motoru	Součinitel plnění
nepřeplňované motory, čtyřdobé	0,7 až 0,9
nepřeplňované motory, dvoudobé	0,5 až 0,7
přeplňované motory	1,2 až 1,6

Základní dělení přeplňování

- dynamické přeplňování; založené na využití dynamických účinků nasávaného vzduchu
- cizí přeplňování

Cizí přeplňování lze dále rozdělit takto:

- přeplňování dmychadlem s mechanickým pohonem (kompresor); energie potřebná pro jeho práci je odebírána z klikového hřídele motoru.
- přeplňování turbodmychadlem; energie potřebná pro jeho práci je odebírána z proudících výfukových plynů.
- přeplňování kombinované; zde se kombinují dva předešlé typy.

Podle hodnoty plnicího tlaku p na výstupu z dmychadla rozděluje ČSN přeplňované motory na tři skupiny:

- motory s nízkotlakým přeplňováním; $p = (1,2 \text{ až } 1,5) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$;
součinitel stlačení plnicího vzduchu do 1,5;
zvýšení výkonu až o 50%
- motory se středotlakým přeplňováním; $p = (1,5 \text{ až } 1,8) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$;
součinitel stlačení plnicího vzduchu od 1,6 – 2;
zvýšení výkonu od 50 do 75 %
- motory s vysokotlakým přeplňováním; $p > 1,8 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$;
součinitel stlačení plnicího vzduchu od 2,1 – 3,5;
zvýšení výkonu přes 75 %.

V odborné literatuře je možné najít i jiné způsoby dělení, toto rozdělení je spíše přibližné a orientační. [3, 6]

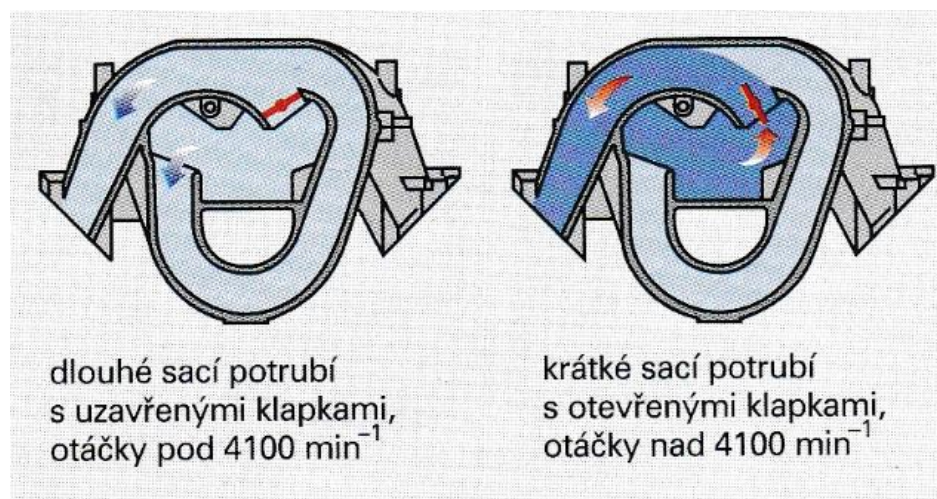
1.2.1 Dynamické přepřňování

Dynamické přepřňování využívá vlastní dynamiky výfukových i nasávaných plynů. Čerstvé plyny dopravené do sacího potrubí mají určitou pohybovou energii. Otevřením sacího nebo výfukového ventilu se vyvolává zpětná tlaková vlna, která při správné konstrukci potrubí dokáže výrazně změnit tlak u ventilu oproti okolnímu tlaku. Tlaková vlna způsobená otevřením ventilu se v potrubí šíří rychlostí zvuku než dorazí na konec potrubí, kde se setká s atmosférickým tlakem. Toto klidné prostředí tlakovou vlnu odrazí zpět do potrubí k ventilu. Pokud tato vlna o vyšším tlaku dorazí k sacímu ventilu před jeho zavřením, pomůže zlepšit naplnění válce. Na straně výfuku je situace podobná, vlna o nižším tlaku dorazí k výfukovému ventilu před jeho zavřením a při otvírajícím se sacím ventilu, tím pomůže odčerpat výfukové plyny z válce a pomoci jeho lepšímu výplachu. Frekvence vlnění je závislá na otáčkách motoru a délce potrubí. Dynamickým přepřňováním se zvyšuje kroutící moment, výkon a snižují se škodlivé emise výfukových plynů. [7]

Dynamické přepřňování lze rozdělit do dvou hlavních skupin.

- Přepřňování kmity v potrubí

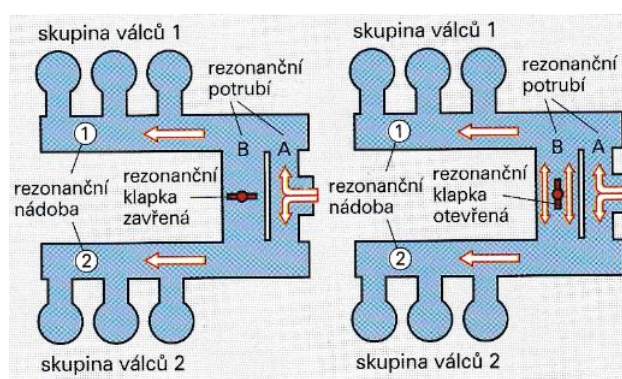
Každému válci připadá samostatné sací potrubí určité délky. Jak bylo uvedeno, rozkmitání plynu je způsobeno otevřením sacího ventilu a pohybem pístu. Vhodnou konstrukcí sacího potrubí je dosaženo toho, že tlaková vlna vstupuje k sacímu ventilu před jeho zavřením a tím pomáhá naplnění válce. Jelikož rychlost pohybu tlakových vln je konstantní a s ohledem na časování motoru je při nižších otáčkách motoru výhodnější dlouhé a úzké sací potrubí, při vyšších otáčkách krátké a široké. Toho se dosahuje systémem klapek nebo rotačních šoupátek umístěných v sacím potrubí, které jsou ovládány elektropneumatiky nebo elektronicky. Klapky jsou umístěny na vhodném místě v sacím potrubí. Při vyšších otáčkách se klapky otevřou a motor nasává do válce přes krátké sací potrubí s větším průřezem. [7]



Obrázek 1: Variabilní sací potrubí [7]

- Rezonanční přeplňování

Jestliže se frekvence kmitů tlakových vln plynu shoduje s frekvencí otevírání sacího ventilu, vzniká rezonance, která způsobuje další zvýšení tlaku plnění válce. Do sacího potrubí se umísťuje soustava rezonančních komor s různou délkou a objemem propojené s několika válci tak, aby vlastní frekvence rezonátoru odpovídala frekvenci sání. Jelikož je frekvence otevírání sacího ventilu závislá na otáčkách motoru, musí se použít několik rezonátorů o různých frekvencích, které se mohou odpojovat a reagovat tak na změny otáček motoru. [7]



Obrázek 2: Soustava rezonančních sacích potrubí [7]

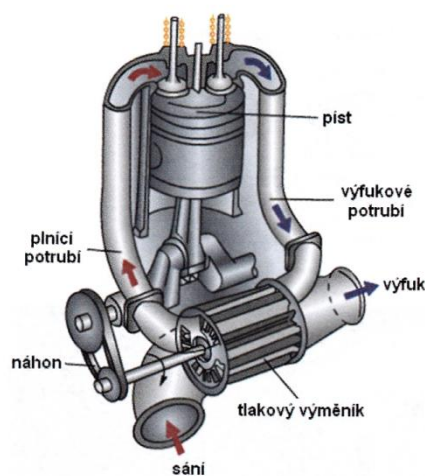
Tlakový výměník COMPREX

Tento systém funguje také na principu odrazů tlakových vln. Celá soustava je tvořena tlakovým výměníkem, ve kterém je rotor s kanálky poháněný buď od klikové hřídele, nebo elektromotorem. Na obou čelech výměníku jsou otvory pro nízkotlaký a vysokotlaký okruh sacího a výfukového potrubí.

Funkce:

Do otáčejícího se rotoru je nízkotlakým okruhem nasán plyn, který zaplní kanálek v rotoru. Dalším pootočením dojde na druhé straně výměníku k překrytí otvorů s vysokotlakým výfukovým potrubím, výfukové plyny proudí do kanálku v rotoru a vytlačují nasáté plyny do vysokotlakého sacího potrubí, které je v této pozici propojeno s otvorem v čele výměníku. Dalším pootočením dojde k uzavření vysokotlakého okruhu sání a otevření nízkotlakého okruhu výfuku, do kterého unikají spaliny.

Tento systém je výhodný především pro to, že nemá prodlevu nástupu přeplňování jako je tomu například u turbodmychadel. Nevýhodou je nucený pohon rotoru, jedná se ovšem o malé ztráty. Je potřeba překonat pouze odpor ložisek a plynů proudících kanálky. V počátcích používání tohoto systému byl rotor poháněn převodem od klikové hřídele, jelikož ovšem tlakové vlny proudí rychlostí zvuku, nejsou závislé na otáčkách motoru. Dalším faktorem ovlivňující rychlost proudění je teplota výfukových plynů. Proto byl u modernějších konstrukcí nahrazen pohon od klikové hřídele pohonem elektromotorem, který dokáže uvedené skutečnosti eliminovat.



Obrázek 3: Systém Compressex [3]

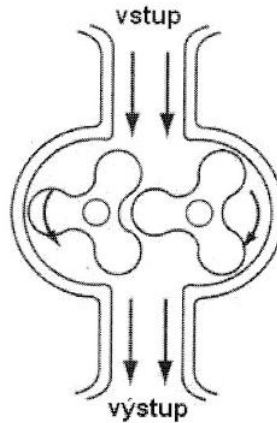
1.2.2 Cizí přepřívání

Mechanicky poháněná dmychadla

Při přepřívání motoru mechanicky poháněnými dmychadly, které se v některé odborné literatuře nazývají jako kompresory, se příkon pro jejich pohon odebírá z klikové hřídele motoru, což je hlavní rozdíl oproti turbodmychadlům, které využívají energii výfukových plynů a nezatěžují tedy motor. Jejich velkou výhodou je okamžitá reakce na změnu otáček motoru, neprojevuje se zde žádný „turboefekt“ jako u turbodmychadel, které mají oproti mechanicky poháněným dmychadlům reakci na změnu otáček motoru pomalejší. Vyznačují se lineárním přírůstkem výkonu a vysokým krouticím momentem už od velmi nízkých otáček motoru. Pohon od klikové skříně je zajištěn ozubenými koly, ozubenými řemeny, nebo u méně výkonných dmychadel pouze klínovými řemeny. Dmychadla, která pracují s vysokými otáčkami, musí být chráněna proti náhlým změnám otáček motoru zátěžovou spojkou. [3]

- **Rootsovo dmychadlo**

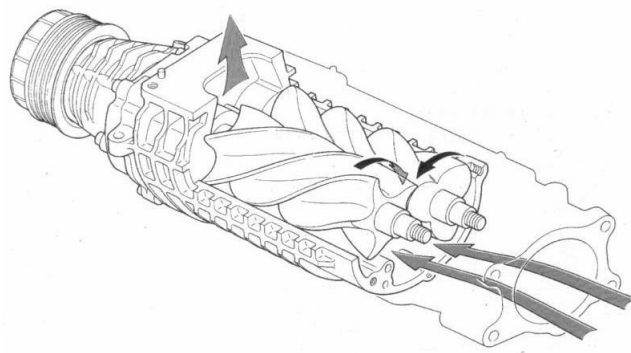
Jedná se o dva ozubené rotory, které mají protisměrný smysl otáčení. Jsou uloženy v oválném pracovním prostoru. Ke stlačování plynu dochází až za pracovním prostorem. V dnešní době se nejvíce používají trojzubé rotory vyrobené z lehkých slitin a pokryté plastovým povrchem. Pohon dmychadla je řešen přes elektromagnetickou spojku, kterou ovládá řídicí jednotka, od klikového hřídele převodem do rychla. Výhodou této konstrukce je jednoduchost, nízké výrobní náklady a vysoká životnost. Nevýhodou je značná energetická náročnost a hlučnost. [3]



Obrázek 4: Rootsovo dmychadlo [3]

- **Lysholmovo dmychadlo**

Konstrukce je podobná Rootsovu dmychadlu. Lysholmovo dmychadlo je tvořeno dvěma rotory opatřené šroubovicí, které do sebe zapadají. Plyn je oproti Rootsovu dmychadlu nasáván i vytlačován axiálně a k jeho stlačování dochází už mezi šroubovicemi rotorů, což je efektivnější pro vysokotlaké přeplňování. Pohon rotorů je synchronizován ozubenými koly. Toto dmychadlo musí být opatřeno odpojovací spojkou, jelikož u něj ani při použití obtokového ventilu neklesne jeho výkonová náročnost od klikové hřídele. Plyn je stále stlačován mezi šroubovicemi rotorů. [8]

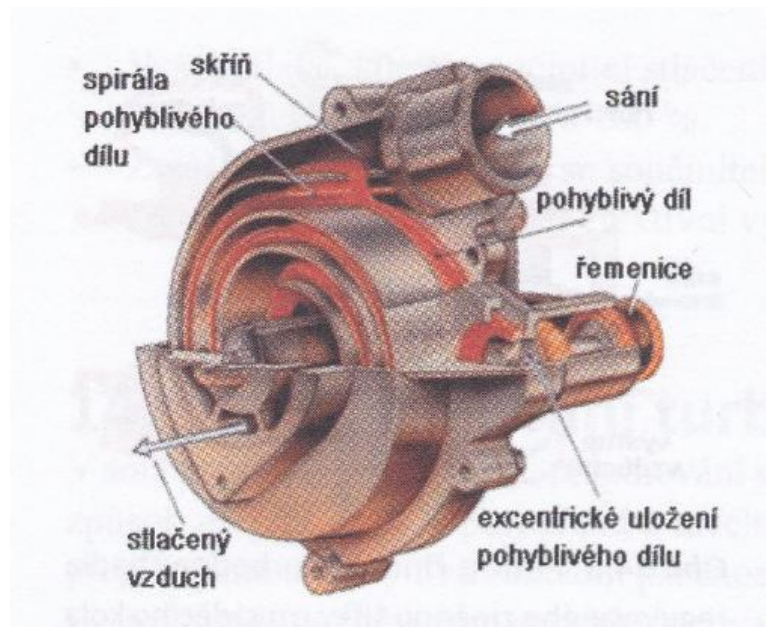


Obrázek 5: Lysholmovo dmychadlo [8]

- **Spirálové dmyhadlo (G – dmyhadlo)**

Tento kompresor byl v roce 1903 patentován v USA a v 80. letech ho používala automobilka Volkswagen pod názvem G – Charger.

Skříň dmyhadla je opatřena spirálou, do níž je vložena pohyblivá spirála, která koná excentrický krouživý pohyb, ale neotáčí se. Principem je stlačování plynu mezi dvěma spirálami. Na straně sací se plyn dostane mezi pohyblivou a pevnou spirálu. Krouživým pohybem pohyblivé spirály dochází k tlačení klínu plynu do středu dmyhadla, kde je otvor výstupní. Při částečné zátěži motoru je propojen výstup dmyhadla s jeho vstupem obtokovým ventilem, nedochází tak ke stlačování vzduchu v dmyhadle a poklesne tak odebíraný výkon z klikové hřídele. Pro svoji složitou a finančně nákladnou konstrukci se v dnešní době téměř nepoužívá. [3]



Obrázek 6: G-dmyhadlo [3]

Přepřívání turbodmychadlem

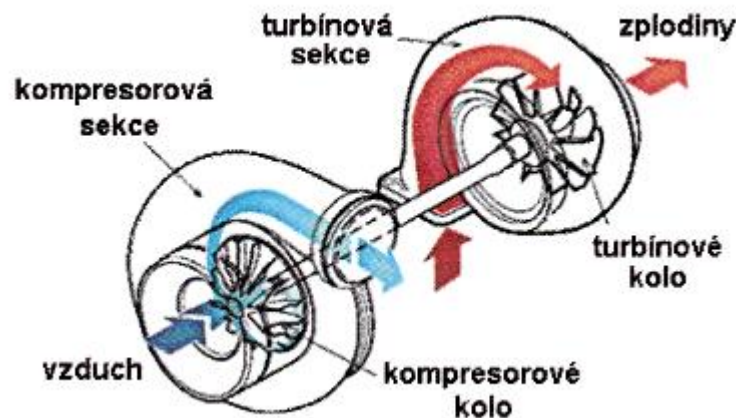
V dnešní době je přepřívání turbodmychadlem nejčastěji používaný systém přepřívání.

Oproti přepřívání mechanicky poháněným dmychadlem má tento způsob přepřívání několik výhod:

- Nižší měrná spotřeba paliva. Ztrátový výkon daný hydraulickým odporem turbodmychadla v sacím potrubí a výfukovém potrubí je menší, než ztrátový výkon daný příkonem mechanicky poháněného dmychadla.
- Při snižování otáček motoru nedochází k tak rychlému poklesu tlaku jako u mechanicky poháněného dmychadla. Tím dochází k lepšímu spalování v nižších otáčkách, což vede k dalšímu snížení měrné spotřeby paliva.
- Jednodušší konstrukce motoru a menší zástavbové rozměry. [6]

Turbodmychadlo je složeno ze dvou hlavních částí, kterými jsou kolo kompresoru a kolo turbíny, které jsou uloženy na společné hřídeli. Kolo turbíny má za úkol odebrat energii výfukovým plynům a dále ji předat přes hřídel turbodmychadla do kompresoru, kterému se říká dmychadlo. Roztočením kola kompresoru dochází ke stlačování vzduchu, roste jeho tlak a teplota. Plnicí vzduch se v kompresorové části zahřeje až na 180°C. Potom je dále dopravován do sacího potrubí a do válců motoru. U většiny přepřívovaných motorů je vzduch před nasátím do motoru ochlazován v chladiči stlačeného vzduchu. Hřídel turbodmychadla je nejčastěji uložena v kluzných ložiscích mazaných tlakovým olejem z okruhu tlakového mazání samotného motoru. Otáčky turbodmychadla jsou velmi vysoké, pohybují se až do 300 000 ot/min. Turbodmychadlo je velmi tepelně namáhané. Rozdíl teplot mezi kompresorovou a turbínovou částí je až 1000°C, to vyžaduje použití odolných materiálů a vysokou přesnost výroby. Turbínové kolo je vyráběno ze žárupevné niklové slitiny a kompresorové kolo ze slitiny lehkých kovů. Výfukové svody bývají často součástí skříně turbínového kola a jsou vyrobeny ze šedé temperované litiny. K této skříně je pomocí pevnostních šroubů upevněna skřín z lehkých slitin pro uložení hřídele turbodmychadla a kompresorového kola. Používají se dva druhy turbín. Axiální a radiální. U axiálních turbín proudí výfukové plyny k turbínovému kolu axiálně. U radiálních turbín jsou výfukové plyny

přivedeny radiálně a odvedeny axiálně. U motorů s výkonem přibližně do 1000 kW se používají pouze radiální turbíny. Tomuto výkonu odpovídá průměr turbínového kola do 160 mm. U osobních a nákladních automobilů se tedy používají radiální turbíny. Axiální turbíny se používají u velkých motorů např. v lokomotivách nebo lodích. Celková účinnost dnešních turbodmychadel se pohybuje od 60% do 75%. K dosažení vysokého tlaku v dmychadle musí být zajištěna co nejvyšší účinnost turbodmychadla, vysoká teplota a tlak výfukových plynů před turbínovým kolem, nízký tlak výfukových plynů za turbínovým kolem a nízká teplota vzduchu před kompresorovým kolem. [6, 10]



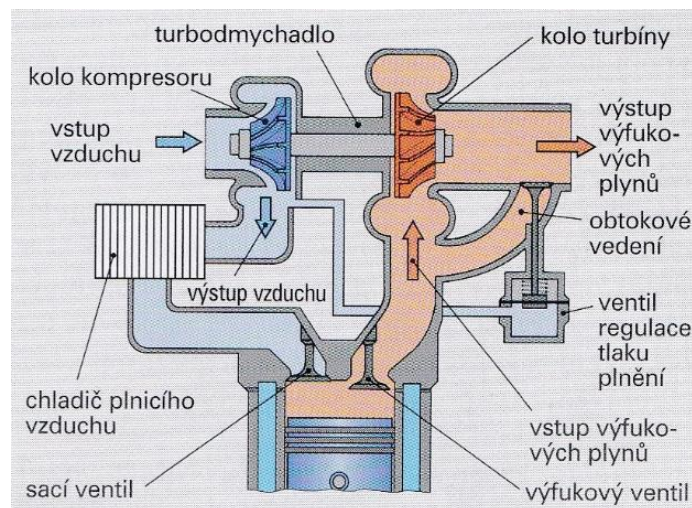
Obrázek 7: Princip činnosti turbodmychadla [3]

Regulace tlaku přeplňování

Při průchodu výfukových plynů turbínovým kolem se současně roztáčí hřídel turbodmychadla s dmychadlovým kolem. Otáčky turbodmychadla stoupají se stoupajícími otáčkami motoru, kdy dochází k průchodu většího množství výfukových plynů. Tím stoupá i tlak na kompresorové části. Tento tlak se musí držet v určitých mezích, jelikož při překročení přiměřeného plnicího tlaku by došlo k destrukci motoru. Turbodmychadla jsou konstruována tak, aby se docílilo přeplňování i při nízkých a středních otáčkách a malých rychlostech proudění výfukových plynů. Proto při vysokých otáčkách motoru hrozí nepřipustně vysoké otáčky turbodmychadla. Existuje několik způsobů pro regulaci plnicího tlaku.

- Pneumatickomechanická regulace – obtokový ventil turbodmyhadla

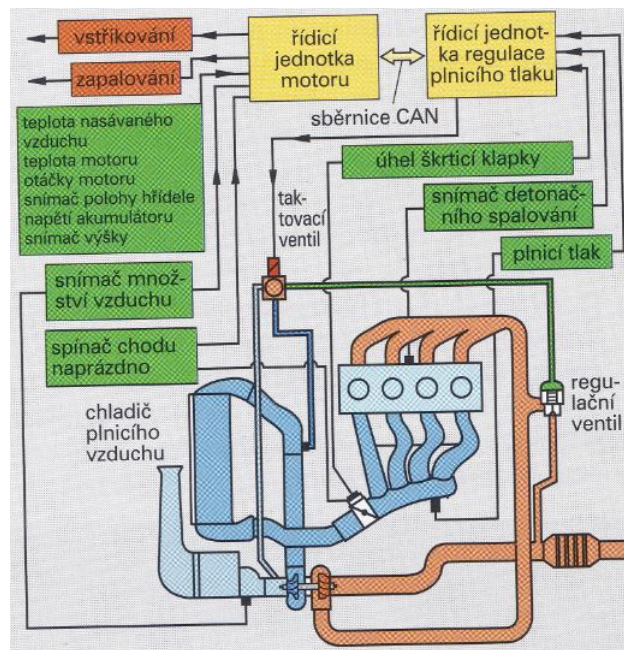
Funkce tohoto systému je patrná z obrázku. Výfukové potrubí je opatřeno kanálkem, který propojuje prostor před turbínou a za turbínou. Tento kanál je opatřen ventilem, který je řízen tlakem vzduchu, který vzniká za kompresorovým kolem. Při zvýšení otáček motoru vzniká více výfukových plynů. Turbinové kolo se roztáčí vyššími otáčkami a kompresorové kolo stlačuje vzduch na vyšší tlak. Tento tlak působí spojovacím potrubím na ventil umístěný v kanále výfukového potrubí a při zvyšujícím se plnicím tlaku se ventil začíná otvírat a propouštět tak výfukové plyny obtokovým kanálem. Tím zmenší otáčky turbíny a zároveň i kompresoru, klesá plnicí tlak a ventil v obtokovém kanále se zavírá. [7]



Obrázek 8: Obtokový ventil turbodmyhadla [7]

- Elektronická regulace plnicího tlaku

Elektronická regulace plnicího tlaku udržuje optimální plnicí tlak v celém rozsahu otáček při různém zatížení. Řídící jednotka dostává signály od snímačů, vyhodnocuje údaje a provádí zásah pomocí akčního členu, kterým je v tomto systému taktovací ventil. Jeho otevření či uzavření je závislé na poloze škrtkové klapky, na snímači klepání, na teplotě nasávaného vzduchu, na teplotě motoru a na otáčkách motoru. [7]



Obrázek 9: Elektronická regulace plnicího tlaku [7]

Funkce:

Nízký plnicí tlak:

Při nízkém plnicím tlaku vyšle řídicí jednotka signál do taktovacího ventilu. Ten otevře spojení mezi tlakovou a sací částí kompresoru. Sníží se tlak u regulačního ventilu, který se uzavře. Všechny výfukové plyny směřují k turbínovému kolu. Zvyšuje se plnicí tlak.

Vysoký plnicí tlak:

Při vysokém plnicím tlaku řídicí jednotka vyšle signál do taktovacího ventilu, ten uzavře spojení mezi tlakovou a sací částí kompresoru. Zvyšuje se tlak ve spojovacím potrubí mezi regulačním a taktovacím ventilem. Regulační ventil se otevře a výfukové plyny proudí přes obtokový kanál mimo kolo turbíny. Snižuje se plnicí tlak.

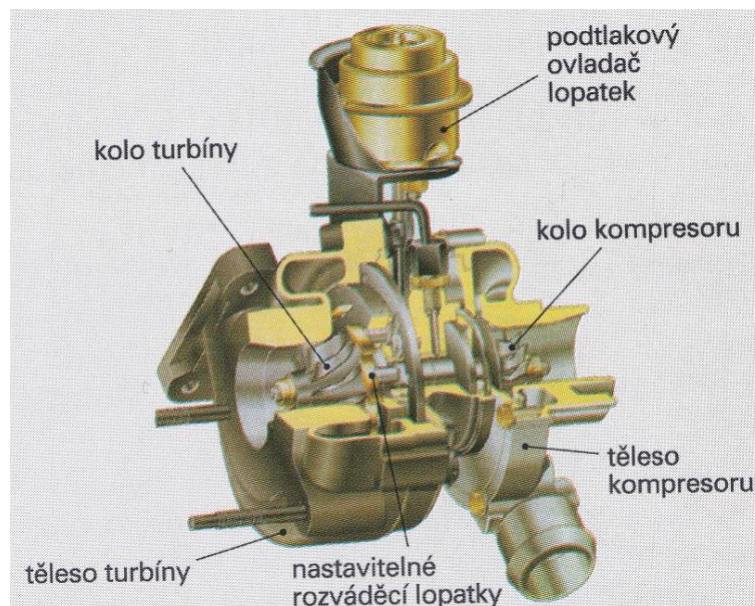
Tímto systémem lze docílit zvýšení plnicího tlaku při akceleraci. Řídicí jednotka rozpozná podle otáček motoru, polohy plynového pedálu a dalších veličin potřebu řidiče akcelarovat. Otevře taktovací ventil, regulační ventil se uzavírá a zvyšuje se

plnicí tlak. Po skončení akcelerace řídicí jednotka vyhodnotí normální stav a dál reguluje plnicí tlak tak, jak je uvedeno výše.

Výhodou tohoto systému je především velmi rychlá reakce na změnu otáček motoru a možnost zvyšovat plnicí tlak až do meze klepání. [7]

- Regulace plnicího tlaku naklápěním lopatek

VTG (Variable Turbine Geometry) je anglická zkratka pro regulaci plnicího tlaku změnou průřezu turbíny. Toho se nejčastěji dosahuje naklápěním lopatek v turbínové části, kdy při otevření lopatek dochází ke zvětšení průtočného průřezu a tím dochází ke snížení otáček turbodmychadla. Tato regulace je nezávislá na otáčkách motoru.

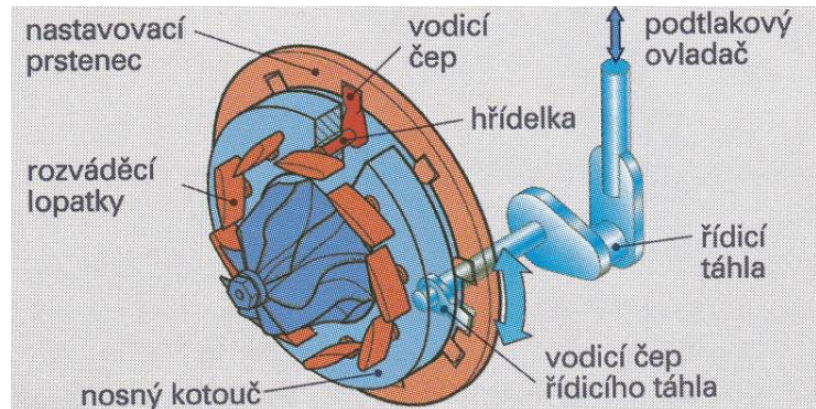


Obrázek 10: Variable turbine geometry [7]

Funkce:

Při vypnutém motoru jsou lopatky nastaveny tak, aby vstupní otvor pro výfukové plyny byl velký. Po nastartování motoru se lopatky nastaví na malý průtočný průřez. Tím se zvýší rychlost a množství výfukových plynů proudící na turbínové kolo a zvyšuje se plnicí tlak. Tím je dosaženo vysokého kroutícího momentu už od nízkých otáček motoru. Při zvyšování otáček motoru se lopatky nastavují na větší průtočný

průřez, výfukové plyny proudí otvorem o větším průměru s menší rychlostí, otáčky turbodmychadla se snižují a plnicí tlak také.

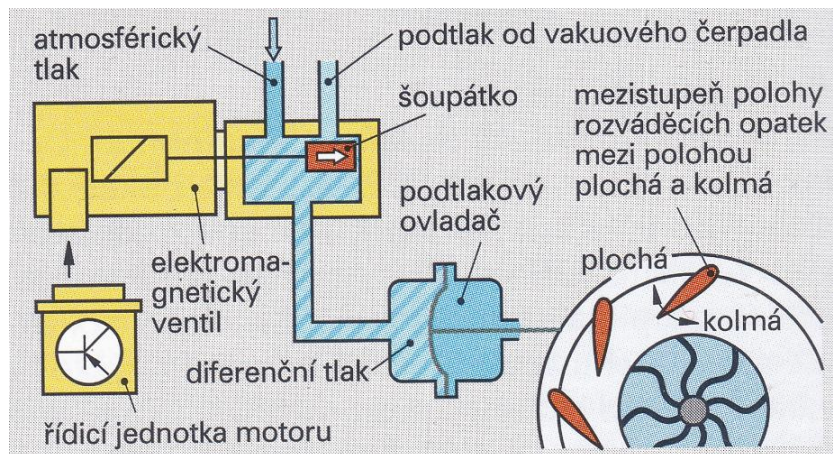


Obrázek 11: Nastavení rozváděcích lopatek [7]

Ovládání lopatek

Celý systém se skládá z řídicí jednotky motoru, elektromagnetického ventilu se šoupátkem a podtlakového ovladače.

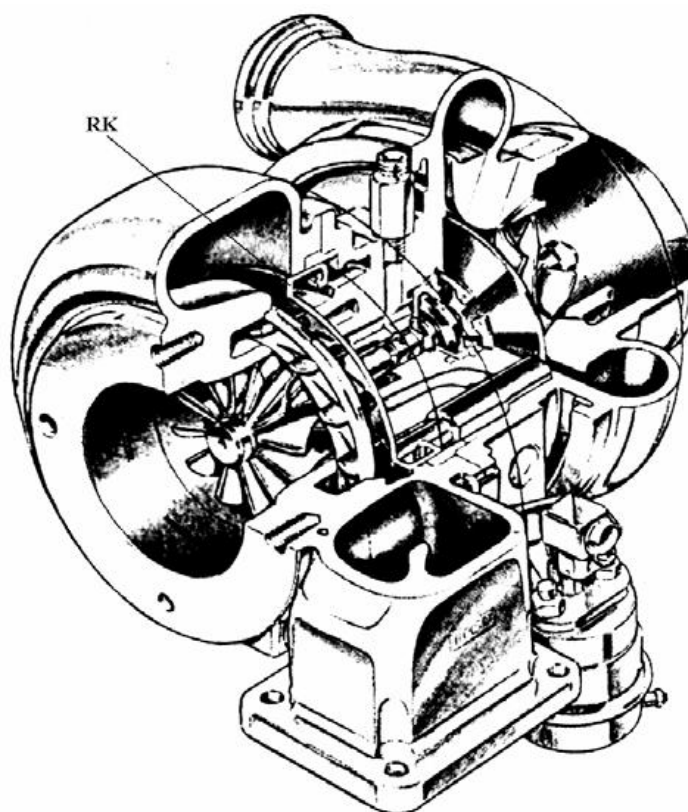
Při nízkých otáčkách řídicí jednotka vyšle signál do elektromagnetického ventilu, který propojí vedení podtlaku od vakuového čerpadla s podtlakovým ovladačem. Lopatky se uzavřou na malý průtočný průměr a dochází k zvyšování plnicího tlaku. Při požadovaném plnicím tlaku řídicí jednotka vyšle signál do elektromagnetického ventilu, jeho šoupátko se přesune do polohy, která propojí atmosférický tlak s podtlakovým ovladačem. Pružina v podtlakovém ovladači rozevře lopatky na velký průtočný průřez a plnicí tlak se zmenšuje.



Obrázek 12: Elektropneumatické ovládání rozváděcích lopatek [7]

- Regulace pnicího tlaku změnou šířky statoru turbíny

Regulace změnou šířky rozváděcího kola turbíny není často používanou regulací pnicího tlaku. V roce 1998 tento systém začala používat anglická firma Holset. Tento systém je náročný díky tomu, že se musí při vysokých teplotách axiálně posouvat celé rozváděcí kolo s lopatkami, které vstupují do prstence ve statoru turbodmyhadla. Jelikož je pro ovládání zapotřebí větších sil, není zde použito pneumatického ventilu ovládaného od vývěvy vozidla, ale tento systém využívá tlaku z brzdové soustavy. Pro indikaci regulovaného pnicího tlaku se snímají otáčky hřídele turbodmyhadla. Z hlediska parametrů se jedná o originální konstrukci, protože turbínou protéká stále stejné množství výfukových plynů při optimálním úhlu náběhu proudu výfukových plynů do oběžného kola. Tím je dána vysoká vnitřní účinnost. [11]



Obrázek 13: Regulace plnicího tlaku změnou šířky statoru turbíny [11]

1.2.3 Kombinované přeplňování

Při přeplňování především maloobjemových motorů turbodmychadlem je nevýhodou nízký točivý moment a nízký výkon při malých otáčkách motoru, kdy je produkováno malé množství výfukových plynů, které nemají dostatečnou energii na roztočení turbodmychadla. Dále je nevýhodou velký turboefekt. Odstranění této nevýhody je možné použitím kombinovaného přeplňování. Jak už název vypovídá, kombinované přeplňování je takové, kde se používá kombinace některých druhů přeplňování uvedených v této práci výše.

Kombinace dvou turbodmychadel

U tohoto systému jsou využívána dvě turbodmychadla, jedno menší a druhé větší. Za každým turbodmychadlem nebo méně často jen za prvním turbodmychadlem je chladič stlačeného

vzduchu. Menší turbína je opatřena obtokovým ventilem, který nepřepouští výfukové plyny do výfukového potrubí, ale do větší turbíny, která je také vybavena by-passem. Při nízkých otáčkách je v činnosti pouze menší turbodmychadlo, při středních otáčkách jsou v činnosti obě turbodmychadla a ve vysokých otáčkách pracuje jen větší turbodmychadlo. Tímto uspořádáním se dosáhne většího plnicího tlaku a vyšší účinnosti. Zmenšuje se turboefekt, který je menší než pouze u jedné turbíny. Tento systém přepřehování používala u svých vznětových motorů automobilka Saab.

Kombinace turbodmychadla a turbíny pro rekuperaci energie z výfukových plynů

Ve výfukovém potrubí je umístěno jedno turbodmychadlo, které pracuje tak, jak bylo popsáno výše. Jelikož za tímto turbodmychadlem mají výfukové plyny v určitém režimu ještě stále dostatek energie, je dále připojena ještě jedna turbína, která je poháněna zbylými výfukovými plyny a její hřídel je buď propojena s klikovým hřídelem pomocí spojky mechanicky, nebo je k ní připojen elektrický generátor. Důležité je u tohoto systému zjistit, kdy je ještě větší přínos z rekuperace výfukových plynů než ztráta účinnosti. Z toho vyplývá, že lze tento systém použít především u velkých motorů, pracujících s konstantními vyššími otáčkami. Využívá se např. u lodních motorů nebo u nákladních automobilů značky Scania.

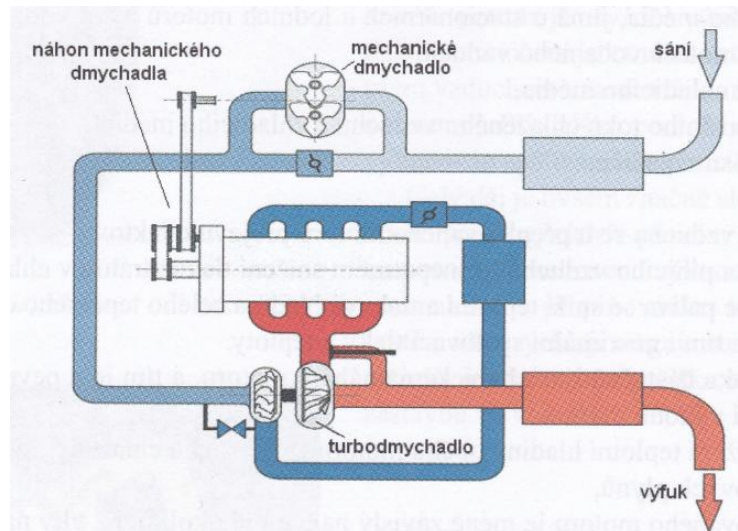
Kombinace turbodmychadla a mechanického kompresoru

Jak už název vypovídá, u tohoto typu přepřehování je použito turbodmychadlo i kompresoru. Nejčastěji jsou zapojeny do série, kdy první stlačuje vzduch turbodmychadlo a jako druhý v řadě je kompresor, který je poháněn od klikové hřídele přes spojku, kterou lze dmychadlo odpojit, aby neodebíralo výkon při vyšších otáčkách. Za výstupem z kompresoru je chladič stlačeného vzduchu. Při nízkých otáčkách, kdy není turbodmychadlo schopno stlačovat vzduch na požadovaný tlak, je v činnosti mechanické dmychadlo neboli kompresor. Ve středních otáčkách jsou v činnosti oba druhy přepřehování a ve vyšších otáčkách dochází k odpojení kompresoru a o stlačování vzduchu se stará pouze turbodmychadlo.

Automobilka Volkswagen tento systém používá u svých zážehových motorů TSI.

Tento systém přepřehování se s výhodou používá i u dvoudobých motorů. Jelikož při nízkých otáčkách vlivem výplachu ztrácí výfukové plyny svoji energii, nebyly by schopné roztáčet

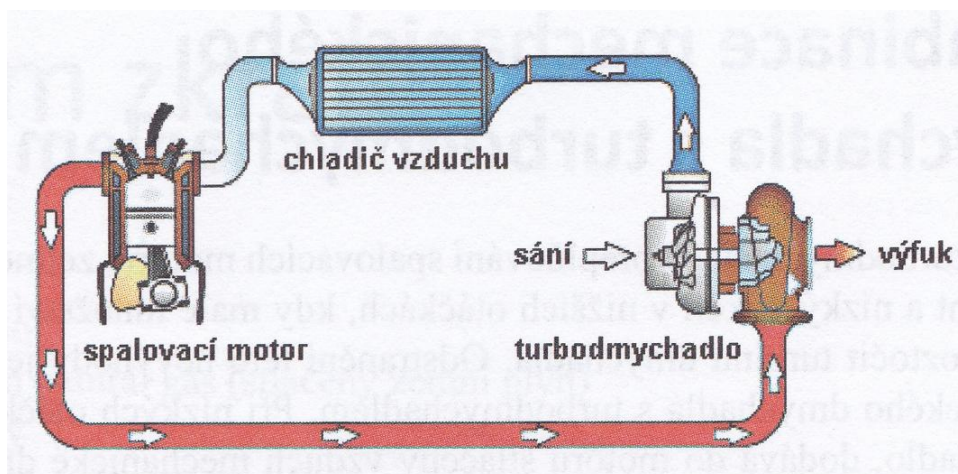
turbodmychadlo. Proto je použito i mechanického dmyhadla, které tuto nevýhodu odstraňuje. [6]



Obrázek 14: Kombinované přepínání [3]

1.3 Chlazení stlačeného vzduchu

Vzduch, který je stlačován, ať už v turbodmychadle nebo v kompresoru, se zahřívá. Tím se zvětšuje jeho objem a do válce se dostane menší hmotnostní množství vzduchu. Aby byl dodržen stechiometrický poměr, musí se úměrně snížit i dávka paliva. Tím se snižuje výkon a účinnost motoru. Proto se do systému přepínání zařazuje chladič stlačeného vzduchu, který zahřátý vzduch ochladí, zvýší jeho hustotu a do válce je možné dopravit větší hmotnostní množství vzduchu. Pro zachování ideálního spalovacího poměru se přidá i hmotnostní množství paliva. Zvýší se výkon a účinnost. Snižuje se spotřeba paliva. Chlazením stlačeného vzduchu se ochlazují i výfukové plyny což je výhodné z hlediska jejich škodlivých emisí. Používají se vzduchové i vodní chladiče. Mírou ochlazení stlačeného vzduchu je velikost chladiče, druh chladicího média, teplota chladicího média a poměr hmotnostního toku mezi stlačeným vzduchem a chladícím médiem. [3, 12]



Obrázek 15: Chlazení stlačeného vzduchu [3]

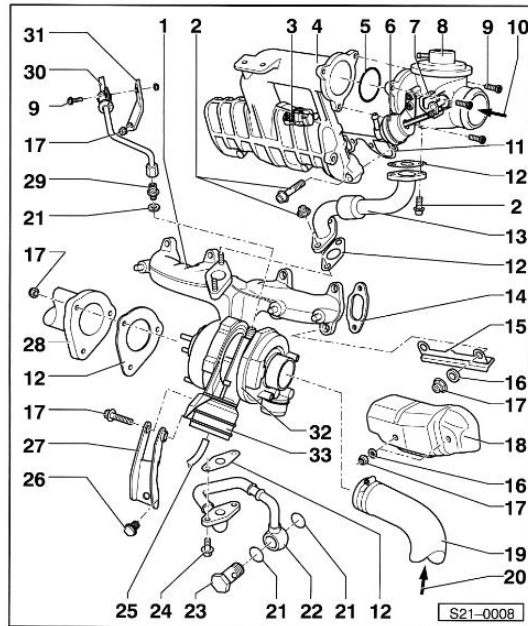
2 Diagnostika funkce turbodmychadla [13]

Diagnostikou turbodmychadla se myslí nedestruktivní, bez demontážní metoda zjišťování jeho závad. Tuto kapitolu budu vztahovat k mému porouchanému turbodmychadlu Garret GT 1749V používané ve vznětových motorech Volkswagen 1,9 TDI 81 kW typ ASV. Veškeré prováděné práce na turbodmychadle se řídí servisními pokyny výrobce vozidla, které jsou uvedeny v dílenské příručce. Nejdůležitějším parametrem turbodmychadla je plnicí tlak a jeho regulace v závislosti na otáčkách motoru a průběh plnicího tlaku v závislosti na zatížení motoru. Pokud se plnicí tlak nepohybuje v hodnotách stanovených výrobcem, řídicí jednotka přepne motor do nouzového režimu a turbodmychadlo je odpojeno. Nejjednodušší, ale ne vždy patřičnou diagnostikou je přečtení paměti závad uložené v řídicí jednotce motoru.

Diagnostiku plnicího tlaku jsem provedl u vozidla Audi A3 s motorem 1,9 TDI 81 kW typ ASV z důvodu, abych zjistil, zda nedošlo k překročení plnicího tlaku a tím k přetížení hřídele turbodmychadla.

2.1 Zásady pro práci s turbodmychadlem

- Před demontáží místa spojů vždy dokonale očistit.
- Demontované díly pokládat na čistou podložku.
- Na čištění jednotlivých dílů nepoužívat textilii, která uvolňuje vlákna.
- Všechny otvory do motoru po odmontovaném turbodmychadle ucpat.
- Na turbodmychadla montovat jen díly originálně zabalené a zakonzervované.



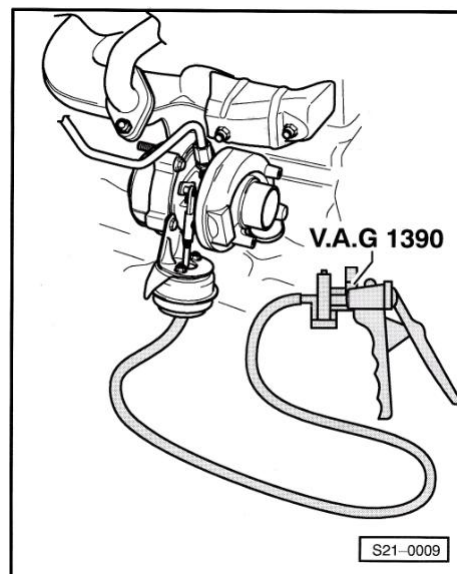
Obrázek 16: Schéma dílů turbodmychadla [13]

- 1) Výfukové sběrné potrubí
- 2) Spojovací materiál
- 3) Elektromagnetický ventil škrťací klapky N239
- 4) Trubka sání
- 5) O-kroužek
- 6) Podtlakový ovladač
- 7) Škrťací klapka
- 8) Sací hrdlo
- 9) Šroub
- 10) Přívod od chladiče nasávaného vzduchu
- 11) Těsnění
- 12) Těsnění
- 13) Zpětné vedení výfukových plynů
- 14) Těsnění
- 15) Držák stínícího plechu
- 16) Podložka
- 17) Matice
- 18) Stínící plech
- 19) Hadice nasávaného vzduchu
- 20) Přívod od čističe vzduchu
- 21) Těsnící kroužek

- 22) Vratné vedení oleje
- 23) Dutý šroub
- 24) Šroub
- 25) Podtlaková hadička
- 26) Šroub
- 27) Vzpěra turbodmychadla
- 28) Výfukové potrubí
- 29) Šroubovací hrdlo
- 30) Přívodní trubka oleje
- 31) Vzpěra přívodní trubky oleje
- 32) Turbodmychadlo
- 33) Podtlaková nádoba regulace plnicího tlaku

2.2 Diagnostika funkce podtlakové nádoby regulace plnicího tlaku

Činnost podtlakové nádoby se kontroluje přístrojem V.A.G. 1390. Jedná se o vakuovou pumpičku, jejíž hadička se napojí na podtlakovou nádobku. Při odsávání vzduchu z podtlakové nádoby se musí ovládací tyčka regulačního ventilu volně pohybovat. Není li tomu tak, nejspíš je na vině membrána uvnitř ventilu.



Obrázek 17: Diagnostika pomocí V.A.G. 1390 [13]

2.3 Diagnostika systému plnicího tlaku

Ke kontrole systému plnicího tlaku je zapotřebí diagnostický přístroj VAG 1552 nebo jiný, podporující stejné funkce.

Podmínky:

Připojí se diagnostický přístroj do diagnostické zásuvky a vymaže se paměť závad motoru. Zkontrolují se a případně odstraní netěsnosti na straně výfuku i sání. Motor se zahřeje na provozní teplotu a vyloučí se další možné závady ovlivňující plnicí tlak.

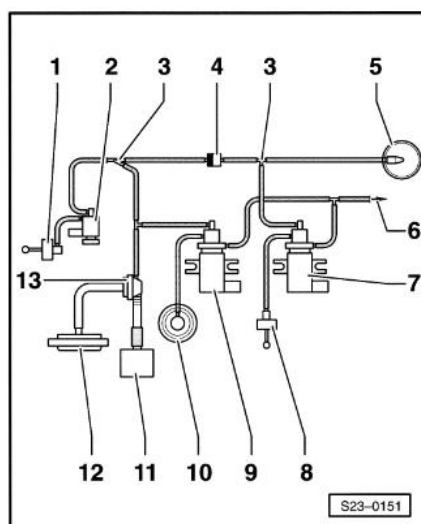
Diagnostika:

- Diagnostickým přístrojem navolit elektroniku motoru a načíst blok měřených hodnot v zobrazované skupině 011.
- Zařadit 3. rychlostní stupeň a plynule akcelarovat z 1500 ot/min na plný plyn.
- Při 3000 ot/min odečíst hodnotu z diagnostického přístroje. Požadovaná hodnota je 1850 mbar až 2250 mbar.

Při nedosažení této hodnoty je možných několik příčin:

- Podtlakové hadice regulace plnicího tlaku jsou netěsné.
- Magnetický ventil omezení plnicího tlaku je vadný.
- Podtlaková nádobka regulace plnicího tlaku se nepohybuje.
- Rozváděcí lopatky výfukových plynů jsou zadřené.
- Snímač tlaku v sacím potrubí je vadný.
- Turbodmychadlo je vadné.

Při překročení této hodnoty řídicí jednotka přepne činnost do nouzového režimu. Nejčastější příčinou této závady jsou zatuhlé rozváděcí lopatky regulace plnicího tlaku turbodmychadla VTG. Další častou závadou jsou zpuchřelé podtlakové hadičky. Pro úplnost uvádím schéma zapojení podtlakových hadiček.



Obrázek 18: Schéma vedení podtlakových hadiček [13]

- 1) Podtlakový ovladač škrtkící klapky
- 2) Elektromagnetický ventil přepínání škrtkící klapky
- 3) Rozbočka
- 4) Zpětný ventil
- 5) Podtlaková nádoba
- 6) Odvod ke vzduchovému filtru
- 7) Elektromagnetický ventil omezení plnicího tlaku
- 8) Tlaková nádoba (součást turbodmyhadla)
- 9) Elektromagnetický ventil zpětného vedení výfukových plynů
- 10) Mechanický ventil zpětného vedení výfukových plynů
- 11) Vývěva
- 12) Posilovač brzd
- 13) Zpětný ventil

Další možné příčiny nesprávné funkce turbodmyhadla:

- Magnetický ventil omezení plnicího tlaku
- Snímač teploty nasávaného vzduchu
- Snímač tlaku nasávaného vzduchu a snímač nadmořské výšky

Při diagnostice ať už jakékoliv součásti automobilu je nutné postupovat přesně podle dílenské příručky nebo podle nápovědy v diagnostickém přístroji. Předejde se tím možným chybám, které by zbytečně prodlužovaly čas potřebný k opravě a zvyšovaly tak její celkovou cenu.

Při poruše může také turbodmychadlo propouštět motorový olej do výfukového potrubí a dochází tak ke vzniku kouře z pálícího se oleje, ústícího z výfuku. Současně dochází k výraznému poklesu výkonu motoru. I tímto ukazatelem lze turbodmychadlo diagnostikovat.

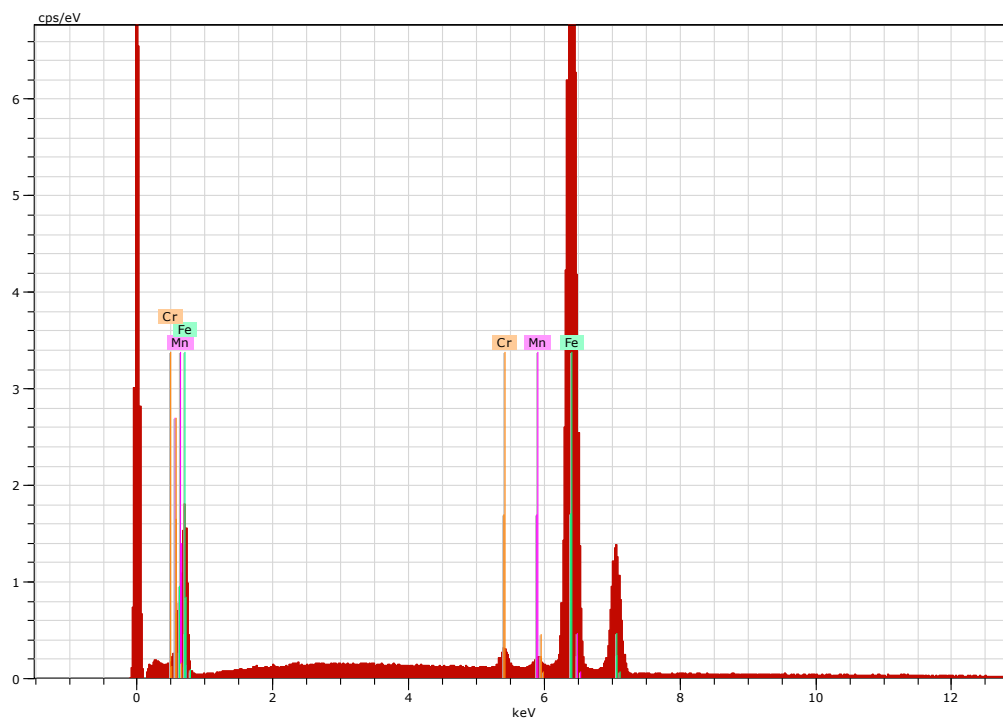
3 Namáhání vybrané části turbodmychadla

Při sestavování osnovy pro moji bakalářskou práci jsme já, ani vedoucí mé bakalářské práce netušili, jak tato část práce bude náročná. Asi bychom se shodli na tom, že to je nejnáročnější úkol celé této práce a spíše by bylo vhodné tomuto problému věnovat celou zvláštní práci. Z počátku jsme si mysleli, že problém nebude tak velký a že nám s ním bude schopný pomoci někdo z fakulty popřípadě z jiných vysokých škol. Bohužel, žádné sto procentně správné řešení jsme neobdrželi. Pustili jsme se třemi různými cestami možného řešení problému. Dvě řešení dávají alespoň přibližně stejné výsledky, třetí řešení se liší.

Hřídel turbodmychadla je zatížena krutem. Na lopatkové kolo dmychadla působí výfukové plyny o tlaku přibližně 0,2 bar, udělují turbíně otáčivý pohyb, který se přenáší přes hřídel ke kompresorovému kolu, které stlačuje vzduch v sacím potrubí na maximální tlak 2,25 bar. Tento rozdíl tlaků na obou stranách vytváří kroutící moment, který působí na hřídel turbodmychadla. Tlak plynů ovšem způsobuje i axiální síly, ty jsou ale oproti radiálním zanedbatelné.

Pro jedno z řešení bylo nutné zjistit materiál používaný na hřídel turbodmychadla. Část lomu hřídele byl podroben chemické energiové mikroanalýze v elektronovém mikroskopu.

Plocha pro analýzu byla 700x700 μm .



Obrázek 19: Výsledek chemické energiové mikroanalýzy

Mass percent (%)

Spectrum	Cr	Mn	Fe
Acquisition	1,08	1,00	95,90
Acquisition 2	-	-	-
Acquisition 1	-	-	-
Mean value:	0,36	0,33	31,97
Sigma:	0,63	0,58	55,37
Sigma mean:	0,36	0,33	31,97

Z tabulky, která je součástí grafu z chemické energiové analýzy, je patrné, že ocel, ze které je hřídel vyrobena obsahuje přibližně 1% chromu a 1% manganu. Tomuto složení odpovídá manganochromová slitinová ocel č. 14. [14]

3.1 Metoda maximálního dovoleného napětí

Tato metoda spočívá v tom, že se zjistí maximální dovolené napětí v krutu pro materiál, z kterého je hřídel vyrobena a potom se vypočítá kroutící moment působící na průřez hřídele.

Pro ocel č. 14 je maximální dovolené napětí v tahu $\sigma_{Dt} = 1150 \text{ MPa}$.

Pro střídavé zatížení je dovolené napětí v tahu $\sigma_D = 0,45 \cdot \sigma_{Dt} = 0,45 \cdot 1150 = 517,5 \text{ MPa}$

Jelikož je hřídel turbodmychadla zatěžován krutem, musí se toto dovolené napětí přepočítat na dovolené napětí v krutu. Na to lze použít následující vztah.

$$\tau_{Dk} = (0,6 - 0,65) \cdot \sigma_D = 0,6 \cdot 517,5 \cong 311 \text{ MPa}$$

Na výpočet kroutícího momentu působícího na hřídel se použije známý vztah

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} [\text{MPa}]$$

Kde:

- τ_k napětí v krutu
- M_k kroutící moment
- W_k modul průřezu v krutu

Modul průřezu v krutu pro kruhový průřez hřídele

$$W_k = \frac{\pi \cdot d^3}{16}$$

Kde:

- d průměr části zatěžované hřídele (pro náš případ $d = 5 \text{ mm}$)

Z výše uvedených údajů je možné vypočítat maximální kroutící moment, který může působit na hřídel, aniž by došlo k jejímu porušení. Do vztahu dosazují v základních jednotkách.

$$M_k = \frac{\tau_{Dk} \cdot \pi \cdot d^3}{16} = \frac{311 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 0,005^3}{16} = 7,63 \text{ N.m}$$

Maximální dovolený krouticí moment působící na hřídel turbodmychadla je podle této přibližné metody výpočtu 7,63 N.m. V tomto výpočtu není zahrnut žádný bezpečnostní koeficient. V praxi by bylo nutné určitou bezpečnost zavést.

[14, 15, 16]

3.2 Metoda plošná

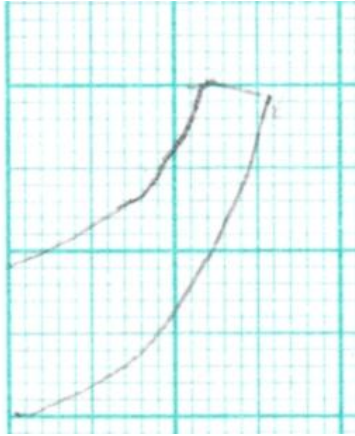
Tato metoda je velmi experimentální. Je založena na úvaze, že tlak, který vytváří kompresorové kolo, se „opírá“ do jeho lopatek silou, která působí v těžišti lopatky na rameni rovnému kolmé vzdálenosti od osy rotace k těžišti lopatky.

Kompresorové kolo má 6 malých lopatek a 6 velkých lopatek. Jejich plochu jsem zjistil tak, že jsem lopatky otiskl do modelíny. Potom jsem otisk vyrovnal na plochu a obkreslil na milimetrový papír. Na milimetrovém papíře jsem přibližně spočítal počet čtverečků a z toho určil přibližnou plochu lopatky. U každé lopatky jsem provedl čtyři otisky, abych co nejvíce eliminoval možnou chybu otisku.

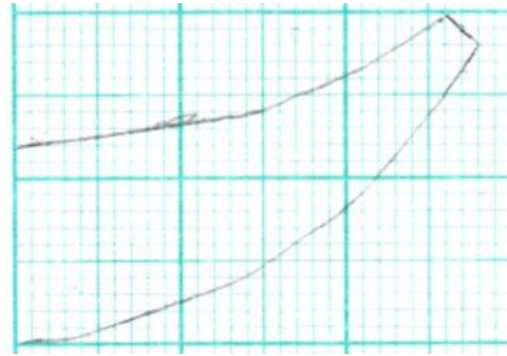
Průměrná plocha velké lopatky ze všech měření je 254 mm² a malé lopatky 152 mm².

Pro zjištění polohy těžiště byly otisky překresleny do programu Creo Elements.

Maximální plnicí tlak tohoto turbodmychadla je 2,25 bar. Po odečtení atmosférického tlaku a přičtení tlaku výfukových plynů 0,2 bar, který působí opačným směrem, budu do výpočtu používat tlak 1,45 bar.



Obrázek 20: Plocha malé lopatky



Obrázek 21: Plocha velké lopatky

Síla působící na jednu velkou lopatku

$$F_1 = p \cdot S = 145\,000 \cdot 0,000\,254 = 36,83 \text{ N}$$

Síla působící na jednu malou lopatku

$$F_2 = p \cdot S = 145\,000 \cdot 0,000\,152 = 22,04 \text{ N}$$

Síla působí v těžišti každé lopatky. Polohu těžiště známe z programu Creo Elements. Velikost ramena, na kterém působí síla u velké lopatky je $r_1 = 13,64 \text{ mm}$ a u malé lopatky $r_2 = 17,13 \text{ mm}$.

Krouticí moment od velkých lopatek

$$M_1 = 6 \cdot F_1 \cdot r_1 = 6 \cdot 36,83 \cdot 0,01364 = 3,01 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Krouticí moment od malých lopatek

$$M_2 = 6 \cdot F_2 \cdot r_2 = 6 \cdot 22,04 \cdot 0,01713 = 2,27 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Celkový krouticí moment působící na hřídel turbodmychadla bude dán součtem momentů od velkých a malých lopatek.

$$M_c = M_1 + M_2 = 3,01 + 2,27 = 5,28 \text{ N.m}$$

Podle této metody je krouticí moment menší, ale když vezmu v potaz, že u první metody nebyl zahrnut žádný bezpečnostní koeficient, tak by se dalo říct, že si tyto dva výsledky odpovídají. Jedná se ovšem o velmi přibližné určení zatížení. Nezohledňuje se zde několik faktorů jako je naklonění lopatek, proudění plynů a další. Důležité je, že tato hodnota není vyšší než hodnota, která vyšla u metody výše uvedené, protože ta by neměla být nikdy překročena. Není možné tento výsledek brát za přesný, ale pouze jako určitý orientační bod.

3.3 Výpočet momentu z výkonu turbodmychadla

Dle konzultací na Katedře vozidel a motorů na Technické univerzitě v Liberci je možné krouticí moment hřídele turbodmychadla zjistit ze známého vztahu mezi výkonem a momentem:

$$M = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

Kde:

P výkon turbodmychadla (v našem případě P=15 kW)

n otáčky turbodmychadla (v našem případě n=250 000 min⁻¹)

$$M = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{15000}{2 \cdot \pi \cdot \frac{250000}{60}} = 0,57 \text{ N.m}$$

Výkon a otáčky turbodmychadla použité u tohoto výpočtu jsou získány z Katedry vozidel a motorů na Technické univerzitě v Liberci.

Ověřit a zvolit jeden z uvedených výsledků je náročný úkol, který přesahuje rámec této práce a předpokládá větší znalosti v dané problematice. Snahou bylo oslovit i firmu Honeywell a požádat ji o pomoc se stanovením namáhání hřídele turbodmychadla. Nicméně firma nereagovala na žádnou ze zaslaných žádostí ať už elektronicky či doporučeným dopisem. Telefonický kontakt rovněž selhal.

4 Fraktografie vybrané části turbodmychadla

4.1 Fraktografie a elektronová mikroskopie

Fraktografie a elektronová mikroskopie jsou dvě úzce propojené analytické metody. Historický vývoj fraktografie se datuje od poloviny šestnáctého století, kdy byla poprvé zaznamenána písemná zmínka o zkoumání lomů. Až do dvacátého století byla fraktografie věda zabývající se výhradně houževnatostí a lomovými vlastnostmi kovů a tvořila součást metalurgie (metalografie). V současné době je stanovení lomových vlastností široce užíváno pro většinu materiálů, včetně silikátů a plastů. Zpočátku využívala fraktografie pouze vizuálního hodnocení povrchu lomu, s vynálezem mikroskopu se stala vědou propracovanější a tento prostředek poskytl nové možnosti zkoumání chování materiálů při různém typu a stupni namáhání. Hodnocení lomových charakteristik je prováděno několika metodami, z nichž nejčastější je právě použití elektronové mikroskopie. [17, 18]

4.2 Fraktografie

Fraktografie je charakterizována jako studium lomu materiálu, pomocí nějž lze modelovat iniciaci a rozvoj trhliny a definovat tak způsob nebo příčinu porušení materiálu. [17]

4.2.1 Princip metody

Fraktografická analýza spočívá v identifikaci specifických makrofraktografických a mikrofraktografických znaků pomocí příslušného technického vybavení. Na základě těchto znaků se stanoví typ lomu, který je určujícím faktorem pro charakteristiku povahy namáhání a vlastností zkoumaného materiálu. Hlavní oblastí, ve které je operováno s touto metodou analýzy, je studium chování a vlastností kovů. V tomto směru je metoda nejvíce propracovaná a dosahuje specifického postu. Uplatnění však nachází i při zkoumání mechanických vlastností dalších materiálů, jako jsou sklo, keramika, různé kompozitní materiály a plněné i neplněné plasty. Účelem fraktografické analýzy je odhalení způsobu a iniciace porušení materiálu a na tomto základě následně usuzování na původní vlastnosti nebo stupeň degradace. Její uplatnění lze spatřit při návrhu nových progresivních materiálů se specifickými charakteristikami, kde může sloužit jako doplňková analytická metoda pro

stanovení makroskopické struktury, způsobu rozložení fyzikálních komponentů, vlivu velikosti zrn, typu matrice a její kompatibility s plnivem (zejména u kompozitních materiálů), pórovitosti a dalších faktorů ovlivňujících chování materiálu při namáhání. Dále lze fraktografickou analýzu využít při studiu příčin porušení stávajících materiálů, zejména součástí stavebních nebo strojírenských konstrukcí. [17, 18]

4.2.2 Analýza a příprava zkušebních vzorků

Pro potřeby fraktografické analýzy se používá komplexní soustava metod, která zahrnuje vizuální posouzení a použití optických a elektronových mikroskopů. Analýza vždy začíná vizuálním posouzením povrchu lomu (matu nebo lesku, rozsahu makroplastické deformace). Na toto posouzení pak navazuje příprava zkoumaných vzorků, která se liší v závislosti na použitém typu zařízení. Lomová plocha je nejdříve posuzována na základě makroskopických znaků pomocí lupy nebo optického mikroskopu. V této fázi lze většinou povrch lomu posuzovat na neupravených vzorcích, v případě velikých rozměrů se upravuje délkový rozměr, popřípadě se lomová plocha zkoumá na několika oddělených místech. Analýza mikroskopických znaků je prováděna pomocí transmisního (TEM) nebo rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM). V této fázi již lze využít pouze těles předepsaných rozměrů, které je možné vložit do komory pro preparáty. Není-li zkoumán vodivý materiál, je nutné povrch vzorku povlakovat pokovením (SEM). Pro potřeby transmisní elektronové mikroskopie, ale také při hodnocení trhlin v konstrukci či možnosti poškození lomové plochy při úpravě, je využíváno tzv. replik povrchů (odliteků). Pro vytváření replik povrchů lomových ploch se uplatňuje několik různých metod, které však vždy spočívají v obtisku plochy do pro elektrony neprůchodného materiálu. Lomová plocha může být poté zkoumána jako negativ, nebo dvoustupňovou replikou vzorku (opakováním procesu na negativu) jako pozitivní replika lomové plochy. Při použití TEM se odlitek zkoumá jako soubor výskytu defektů a odchylek. [17, 18, 19]

4.2.3 Zpracování a vyhodnocení analýzy

Výstupem fraktografické analýzy je obraz povrchu lomové plochy a popis znaků v závislosti na možnostech použitého vybavení. Vyhodnocení fraktografické analýzy se provádí na základě původu analyzovaného tělesa. Je-li vzorek namáhán v laboratoři, uplatňuje se fraktografická analýza jako doplňková zkouška ke stanovení pevnostních charakteristik, životnosti materiálu exponovaného různými typy degradujícího prostředí a kombinaci nepříznivé expozice a různých typů namáhání, včetně doplnění charakteristik lomové mechaniky. V případě, že je analyzována součást porušené konstrukce, bývá hlavním

důvodem pro použití fraktografické analýzy odhalení příčiny a místa iniciace trhliny. Na tyto parametry bývá usuzováno na základě makroskopických a mikroskopických znaků, tedy typu, struktury a morfologie lomové plochy. U kovů se fraktografická analýza uplatňuje v souvislosti s odhalením příčiny a typu porušení materiálu, vzhledem ke skutečnosti, že specifické namáhání a expozice se vyznačují typickými lomovými znaky. [17, 19]

4.3 Elektronová mikroskopie

Optická i elektronová mikroskopie jsou analytické metody založené na jevech, ke kterým dochází při interakci emitovaného toku částic a zkoumané látky. Zatímco u optické dochází k interakci fotonů s materiálem, u elektronové je výsledné zvětšení dosaženo působením elektronů na povrch analyzovaného vzorku. Obě mikroskopické metody jsou určeny zejména pro studium mikrostruktury látek, ovšem zvětšení, kterého je dosaženo při použití elektronové mikroskopie, lze optickým mikroskopem dosáhnout pouze náročnou technologií, která se vyznačuje významnými omezeními. [20, 21]

4.3.1 Princip metody

Princip metod elektronové mikroskopie spočívá v interakci emitovaných elektronů a zkoumané látky. Tato interakce je prováděna několika způsoby a spojená s různými technikami elektronové mikroskopie, které se uplatňují pro dané typy materiálů. Nejčastěji se však jedná o emisi svazku (paprsku) elektronů. [23]

Techniky se standardně dělí dle typu emitoru elektronového paprsku (elektronového děla) na stacionární (TEM) a rastrovací (skenovací, SEM). *„Mezi techniky se stacionárním zdrojem elektronového paprsku se řadí transmisní techniky, které ovšem vždy vyžadují přípravu tenké fólie materiálu. Tato fólie musí být stabilní a nesmí se zničit při interakci s paprskem.“* (23, s. 5) Zobrazovací zařízení se pak nachází v protilehlé části komory pro umístění preparátů a snímá konečný paprsek elektronů pro přechodu fólií vzorku. *„Při interakci paprsku a materiálu dochází k vychýlení dráhy některých elektronů, které jsou následně odstíněny“* (21, s. 1), výslední obraz je pak výstupem paprsku o snížené intenzitě. *„Transmisní techniky jsou určeny převážně k identifikaci defektů nebo odchylek v pravidelné struktuře“* (23, s. 5). Některé lze ovšem využít také ke studiu mikroskopické struktury materiálu při vysokém rozlišení. [21, 23]

Princip elektronové rastrovací mikroskopie spočívá v emisi elektronového paprsku na plochu studovaného povrchu. „*Paprsek vytlačuje z povrchu materiálu elektrony, které jsou pomocí vhodného potenciálu přitahovány na detektor. Detektorem bývá nejčastěji scintilační krystal nebo fluorescenční látka. Tyto detektory dopadem elektronu vytvářejí fotony a zachycují povrch jako obraz ve viditelném světle*“ (21, s. 1). Detektor pak vytváří obraz povrchu preparátu v různých odstínech šedé při velkých rozlišovacích možnostech zvětšení. Tuto metodu lze využít pro studium mikrostruktury pevných i práškových materiálů. [21]

Elektronová mikroskopie nachází uplatnění v různých odvětvích průmyslu, pro studium mikrostruktury výrobních, transportních nebo užitných poruch a defektů různých typů materiálů, a rovněž rozhraní a styčných ploch zrn a elementů tvořících mikrostrukturu homogenních či kompozitních materiálů. Použití technik elektronové mikroskopie zahrnuje analýzu kovových materiálů, keramiky, skla, plastů, ale také organických preparátů (buněk, bakterií, virů) pro potřeby medicíny a farmaceutického průmyslu. Vzhledem k povaze a charakteristickým vlastnostem a také účelu studia mikrostruktury je ovšem vždy potřeba zvolit správný typ zařízení a provést žádoucí přípravu studovaného vzorku. [22, 23]

Přístroje užívané pro elektronovou mikrostrukturální analýzu v dnešní době většinou kombinují více technik. Nové progresivní přístroje umožňují i prvkovou nebo chemickou analýzu. Základní rozdělení přístrojového vybavení spočívá v hlavní technice emise a detekce elektronového paprsku. Přístroje se tedy dělí na elektronové mikroskopy transmisní (paprsek prochází preparátem, detektor je umístěn na druhé straně komory) nebo rastrovací (paprsek vyráží elektrony z povrchu, detektor je umístěn v úrovni emitoru). [21, 23]

4.3.2 Zpracování a vyhodnocení dat

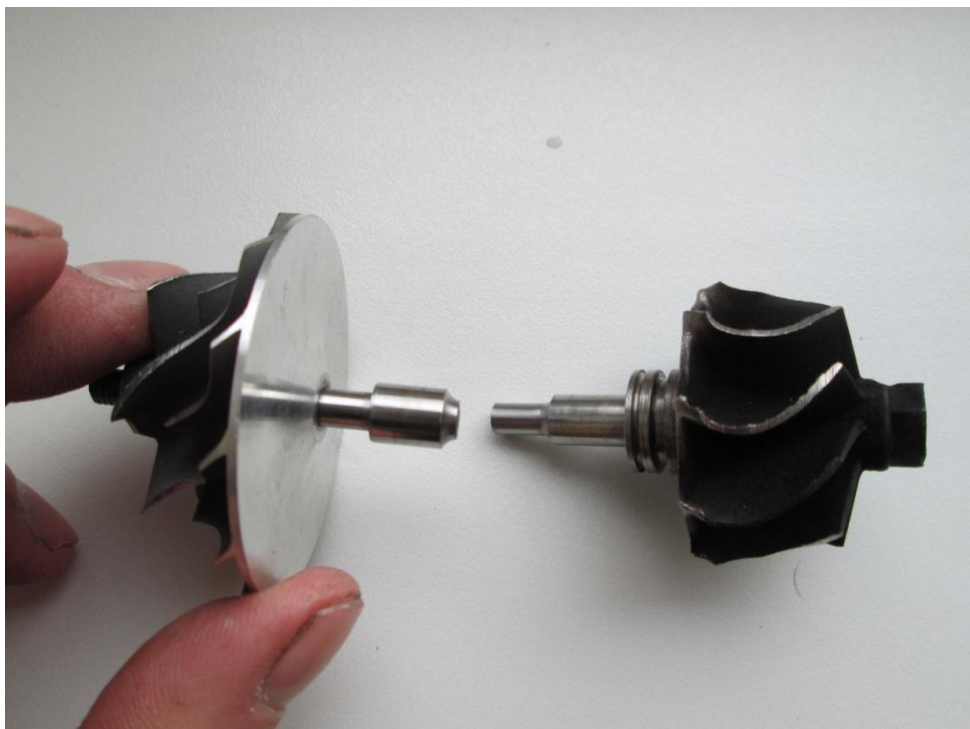
Výstupem elektronové mikroskopie je obraz s definovaným rozlišením. Zvětšení lze provádět řádově až do 10 000 násobku skutečnosti. Pro většinu materiálů nebo typů analyzovaného prvku je však stanovená přibližná hodnota zvětšení v závislosti na průměrné velikosti prvku. Například pro studium mikrostruktury krystalů se používá přibližně zvětšení v řádech stovek (200×, 500×, 1000×). Některé materiály veliká zvětšení neumožňují a dochází k jejich poškození vlivem radiace elektronového paprsku (plasty zejména při zvětšení vyšším než 1000×). Analýza struktury se provádí na základě známých charakteristik tvaru a velikosti strukturních elementů, a také jako celkové posouzení rozmístění nebo agregace prvků. Zároveň umožňuje stanovit správnost procesů výroby materiálu, zejména pak odhalit defekty a odchylky od homogenity struktury a textury látek nebo vznik krystalů požadovaného tvaru

při definovaném výrobním procesu. Své postavení si rovněž upevňuje jako nástroj pro fraktografickou analýzu lomových ploch materiálů a konstrukčních prvků. [21, 22]

4.4 Fraktografie lomu hřídele turbodmychadla

Jedním z cílů této bakalářské práce bylo zjistit, z jakého důvodu došlo u turbodmychadla Garret GT 1749V k přerušení jeho hřídele. Toto turbodmychadlo údajně prošlo zhruba 2000 km před destrukcí repasí. Po najetí uvedené vzdálenosti, při přibližně konstantní rychlosti 50 km/h, začalo vozidlo nadměrně kouřit z výfuku a citelně poklesl výkon motoru. Vozidlo bylo ihned odstaveno a i přes to ubyly $\frac{3}{4}$ motorového oleje z náplně motoru, který se z velké části dostal do chladiče stlačeného vzduchu a v menším množství do výfukového potrubí.

Na obr. 22 je přerušovaný hřídel turbodmychadla s kompresorovým kolem vlevo a turbínovým kolem vpravo. Po rozdělení se obě části axiálně posunuli směrem od středu a obě lopatková kola se tak brousila o stator turbodmychadla.

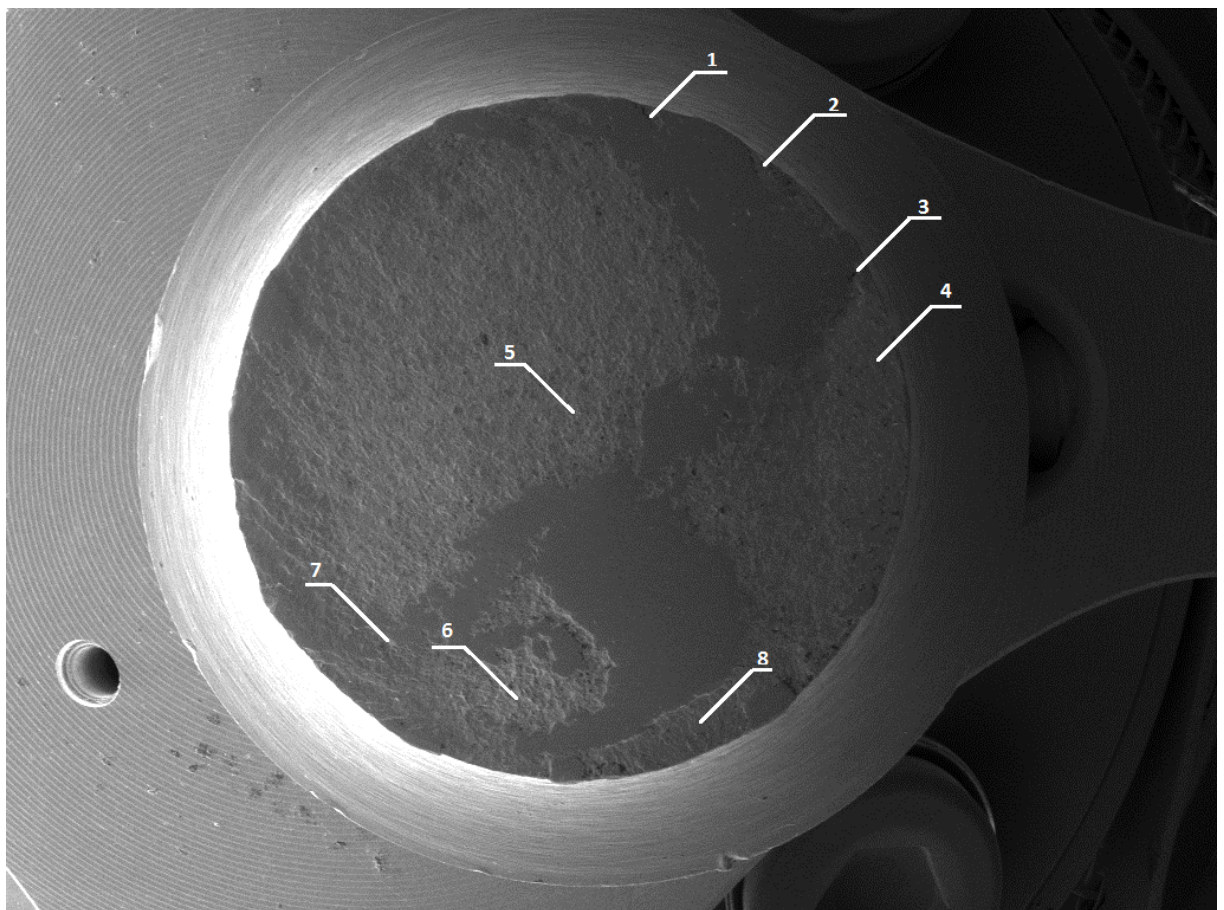


Obrázek 22: Přerušená hřídel turbodmychadla

Obě části byly prohlíženy pod mikroskopem, abych zjistil, která část bude výhodnější pro zkoumání lomu. Jelikož část hřídele u turbínového kola je velmi poničená, vybral jsem část hřídele, kde je uloženo kompresorové kolo. Aby bylo možné zkoumaný vzorek vložit do elektronového mikroskopu, musel jsem část hřídele odříznout kotoučovou pilou a vzniklý řez zabrousit.

První bližší zkoumání jsem provedl bez upnutí vzorku. Což se ovšem ukázalo jako nevhodné, jelikož nešlo mikroskop zaostřit. Abych odstranil kmitání, upevnil jsem vzorek do držáku a provedl zkoumání jednotlivých částí lomu.

Na obr. 22 je makroskopický pohled na lom hřídele turbodmychadla. Zkoumání probíhalo tak, že jsem postupně procházel po obvodu celý lom. Každé místo, které přinášelo změnu v charakteru lomu, nebo bylo jinak zajímavé, je označeno číslem.



SEM HV: 30.00 kV WD: 16.50 mm
SEM MAG: --- Det: SE Detector
Date(m/d/y): 02/25/13 Mikroskop

Digital Microscopy Imaging 

Obrázek 23: Makroskopická "mapa" lomu

Při detailnějším zkoumání této „mapy“ vidíme, že některé části lomu jsou hladké a některé hrubší. Hladký povrch vznikl třením čel přerušného hřídele o sebe. Na těchto místech bohužel není možné zjistit žádný mechanismus lomu, proto bylo naše pozorování omezeno jen na určité plošky.

Pozice 1

Od této pozice jsme postupovali po obvodu ve směru hodinových ručiček. Na této pozici je povrch hodně zničený. Nelze z něj nic zjistit.

Pozice 2

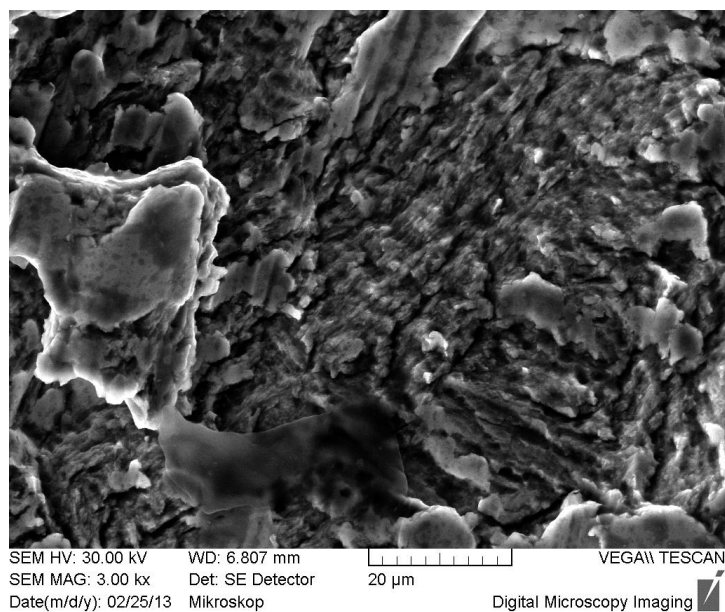
Na této pozici je povrch opět z velké části dost omačkaný. Lze předpokládat, že zde začíná etapovitý lom a že zde není dolom.

Pozice 3

Zde se již více odhaluje struktura materiálu. Povrch přestává být omačkan od druhého čela hřídele. S jistotou lze říci, že lom byl opravdu etapovitý, jak bylo předpokládáno na pozici 2.

Pozice 4

Potvrzení etapovitého lomu. Sekundáry jsou kolmé na příčný profil. V celé velké oblasti jsou v příčném průřezu známky etapovitého lomu a kolmo na příčný průřez jsou známky iniciací, které značí začínající štěpení. Lom vznikl cyklicky.



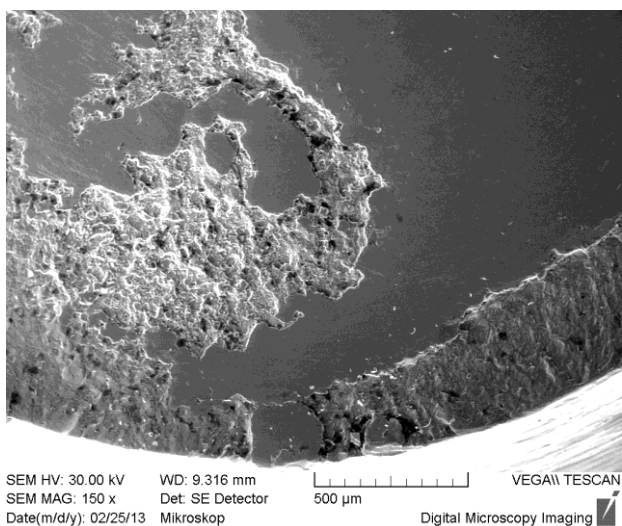
Obrázek 24: Detail pozice 4, zvětšení 3000x

Pozice 5

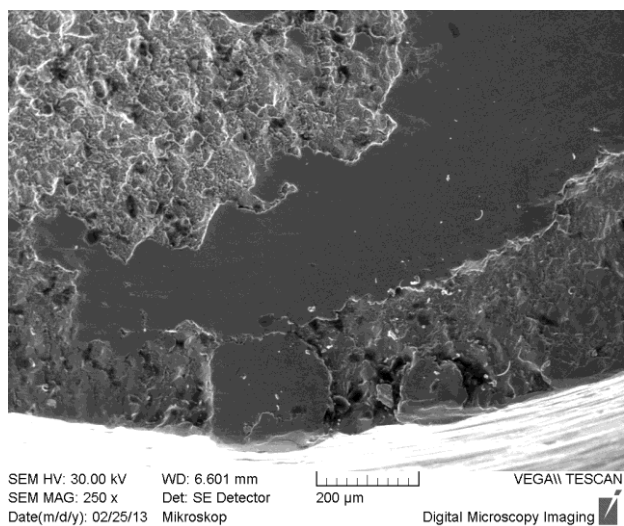
Jedná se o přibližný střed hřídele. Při zkoumání středu lze s jistotou říct, že dolom ve středu není.

Pozice 6

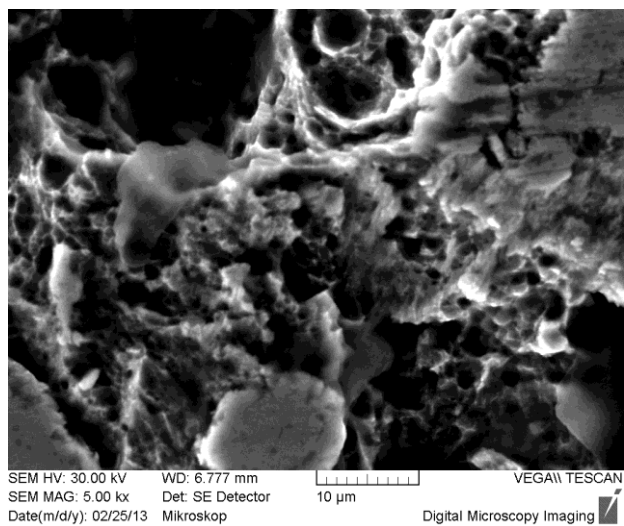
Na pozici 6 je patrné pásmo urychleného rozvoje a konečný statický dolom, který je tvárný. Nešlo o zkřehnutí materiálu. To znamená, že materiál neměl podíl na tom, že došlo k přerušení hřídele.



Obrázek 25: Detail pozice 6, zvětšení 150x



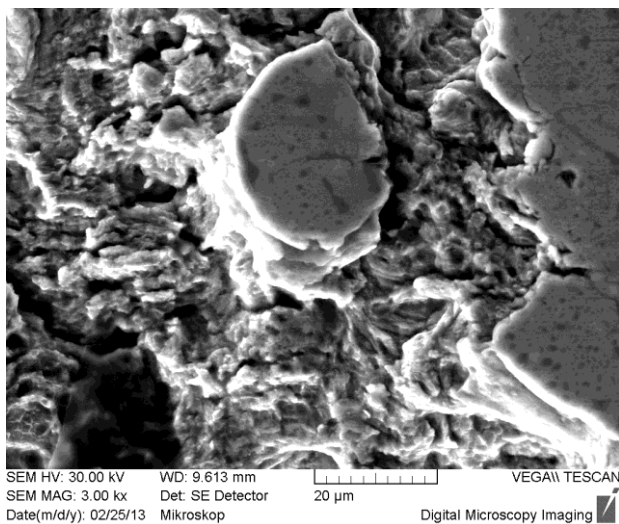
Obrázek 26: Detail pozice 6, zvětšení 250x



Obrázek 27: Detail pozice 6, zvětšení 5000x

Pozice 7

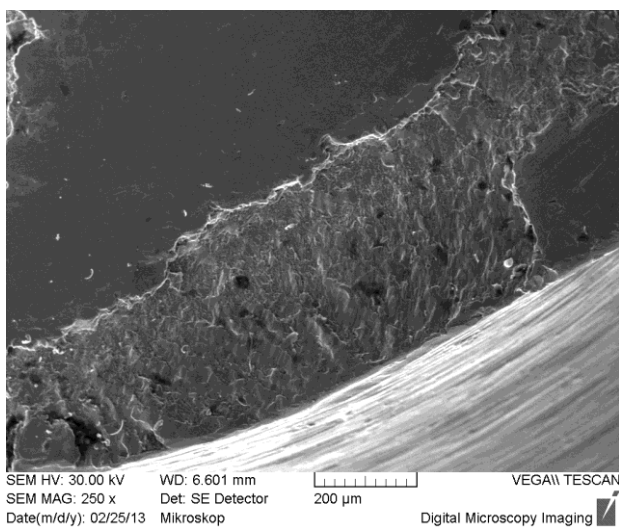
Na této pozici vyznačené na makroskopické mapě s číslem 7 jsme si potvrdili, že dolom, byl opravdu na pozici 6. Je zde totiž vidět kvazistatický typ lomu, tzn. přechod mezi únavovým a finálním dolomem.



Obrázek 28: Detail pozice 7, zvětšení 3000x

Pozice 8

Na tomto snímku je vidět část únavového lomu.



Obrázek 29: Detail pozice 8, zvětšení 250x

Závěr fraktografie

Důvodem, proč hřídel praskla, není vada materiálu. Z pozice únavové části lomu a statického dolomu lze říci, že příčinou lomu byla asymetrie zatížení. V ideálním případě je dolom uprostřed hřídele. V tomto případě tomu tak není. Dolom je na makroskopické „mapě“ na pozici 6. Materiálová jakost je naprosto v pořádku, zachovává tvárný mód lomu, proto není nutné provádět další analýzy.

„U vizuálně houževnatých lomů předchází porušení rozsáhlá plastická deformace vizuálně se projevující kontrakcí a tažností v okolí lomové plochy“ (17, s. 13). „Vznik transkrystalického nebo interkrystalického štěpení je zde podmíněn rozdílnou povahou a pevností zrn a jejich hranic“ (18, s. 5). „Houževnaté lomy bývají vlivem deformace před porušením soudržnosti matné a bez lesku“ (18, s. 6).

Z mikroskopického hlediska bývají jako tvárné lomy označovány „smykové lomy spojené s kluznými pochody“ (19, s. 7) - vláknité a důlkovité (jamkovité, kalíškovité) lomy. Důlkovité smykové lomy se vyznačují fasetkami nechávajícími za sebou jamky, které vznikají usmýknutím při namáhání materiálu ohybem v tažené části, nebo kroucením. Vlákniými lomy se vyznačují houževnaté materiály při zkouškách vrubových nebo rázových houževnatostí, rovněž se vyskytují ve středové (centrální) části materiálů namáhaných a porušených tahem.

5 Závěr

Přepřehování spalovacích motorů prošlo za dobu od svého objevení desítkami let vývoje. Dynamické i cizí přepřehování se dnes používá u většiny spalovacích motorů a do budoucna je předpokladem, že budou přepřehováním vybaveny všechny spalovací motory, jelikož je to jedna z nejjednodušších cest, jak snížit škodlivé emise výfukových plynů. Dnes nejpoužívanějším způsobem přepřehování je turbodmychadlo, které využívá energie výfukových plynů. Zdokonalováním jeho konstrukce a kombinací s jinými druhy přepřehování se bude nadále zvyšovat účinnost. V kapitole Diagnostika funkce turbodmychadla jsem uvedl základní princip diagnostiky. Samozřejmě se jedná jen o zběžný náhled do problematiky. Každý výrobce doporučuje jinou diagnostiku, ale v základním pojetí je u všech stejná. Hlavní otázkou bylo, proč hřídel vlastně praskla. K tomu bylo vhodné zjistit, jak velké síly by na onu hřídel měly působit. A porovnat je se silami, které na ní v danou chvíli opravdu působili. Diagnostiku funkce turbodmychadla jsem uvedl hlavně z toho důvodu, aby bylo možné ověřit maximální plnicí tlak, který úzce souvisí se zatížením hřídele turbodmychadla. Kdyby totiž řídicí jednotka povolila překročení plnicího tlaku, docházelo by k mnohem většímu zatížení jak motoru, tak turbodmychadla a mohlo by to vést k prasknutí hřídele. Diagnostikou bylo dokázáno, že k žádné poruše v řízení plnicího tlaku nedošlo a to vyloučilo zvýšení namáhání hřídele. Zjistit zatížení vybrané části turbodmychadla se ukázalo jako největší problém, způsoby uvedené v této práci jsou pouze orientační. Nemají žádný hlubší vědecký podklad, proto nedoporučuji jejich další šíření bez detailnějšího prozkoumání daného problému. Po prozkoumání lomu hřídele turbodmychadla, jsme dospěli k názoru, že na vině nebyla materiálová vada, ale způsob zatížení. Podle mého názoru byla asymetrie zatížení způsobena nedokonalým vyvážením lopatkových kol na hřídeli turbodmychadla. To by nasvědčovalo i tomu, že turbodmychadlo po generální opravě chvíli fungovalo. Kdyby při montáži došlo k zapomenutí nějakého předmětu ve výfukovém nebo sacím potrubí, tak, jak mi bylo zdůvodněno při reklamaci, projevílo by se to hned po prvním nastartování motoru a charakter lomu by byl také jiný. Dalším možným důvodem asymetrického zatížení by mohla být velká vůle v ložiscích, což se ovšem po destrukci turbodmychadla nedá prokázat.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Kdo byl první? - Gottlieb Daimler. *Eurooldtimers.com* [online]. [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.eurooldtimers.com/cze/historie-clanek/793-kdo-byl-prvni-gottlieb-daimler.html>
- [2] HIERETH, Hermann; PRENNINGER, Peter. *Charging the Internal Combustion Engine*. Wien : Springer-Verlag, 2007. 268 s. ISBN 978-3-211-33033-3.
- [3] HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Vladimír HÖNIG a Petr MILER. *Spalovací motory*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [4] LÁNÍK, Ondřej. *Auto.cz* [online]. 2004 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/preplnovani-1-dil-teorie-mechanicke-preplnovani-16778>
- [5] RABOCH, Václav. *Učebnice řidiče motocyklu, mopedu a skútru*. 1. vyd. Praha: Naše vojsko, 1961.
- [6] KOVAŘÍK, Ladislav. *Teorie vozidlových spalovacích motorů*. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1975.
- [7] GSCHEIDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. 2. vyd. Praha: Sobotáles, 2002. ISBN 80-85920-83-2.
- [8] ČAVOJ, Ondřej. *Přeplňování zážehových a vznětových motorů*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. RADIM DUNDÁLEK, Ph.D.
- [9] KOŠTÁL, J., SUK, B. *Pístové spalovací motory*. Praha: Nakladatelství akademie věd, 1963.
- [10] LÁNÍK, Ondřej. *Auto.cz* [online]. 2004 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/preplnovani-2-dil-turbodmyhadla-16765>
- [11] HOFMANN, Karel. *REGULOVANÉ PŘEPLŇOVÁNÍ VOZIDLOVÝCH MOTORŮ*. Brno, 2000. Učební text Ústavu dopravní techniky FSI-VUT Brno. FSI-VUT Brno.
- [12] BARTONÍČEK, Ladislav. *Přeplňování pístových spalovacích motorů*. Liberec, 2004. Vysokoškolská skripta. Technická univerzita v Liberci.

- [13] *Dílenská příručka Octavia*. Czech Republic: Škoda auto a.s., 1998.
- [14] BARTOŠ, Josef. *Strojnické tabulky*. 11. vyd. Praha: SNTL, 1977.
- [15] MIČKAL, Karel. *Technická mechanika I*. 3. vyd. Praha: Informatorium, 1997. ISBN 80-86073-06-8.
- [16] SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [17] HRIVŇÁK, Ivan: *Fraktografia (skriptá)*, Slovenská technická univerzita, Materiálovotechnologická Fakulta so sídlom v Trnave, Bratislava 2009
- [18] KOPŘIVA, Miroslav. *Fraktografie: Určeno pro posl. přírodovědecké fak. Univ. Palackého*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, 1992, 31 s. ISBN 80-706-7083-5.
- [19] KAŠOVÁ, Irena. Elektronomikroskopická analýza. *Zprávy VUHŽ*. 1962.
- [20] MICHLER, Goerg H. *Electron microscopy of polymers*. Berlin: Springer, c2008, xi, 473 s. ISBN 978-3-540-36350-7.
- [21] Elektronová mikroskopie. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: http://www.paru.cas.cz/lem/bak/1_1.htm
- [22] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [23] AMELINCKX .., Ed. by S... *Electron microscopy: principles and fundamentals*. [Online-Ausg.]. Weinheim: VCH, 1997. ISBN 3527294791.