

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta
Katedra vozidel a pozemní dopravy



Bakalářská práce
Historický vývoj a konstrukce turbodmychadel

Jiří Drázský

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Drázký

Technika a technologie v dopravě a spojích
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Historický vývoj a konstrukce turbodmychadel

Název anglicky

Historical evolution and construction of turbochargers

Cíle práce

Cílem práce je literární rešerše zabývající se historickým vývojem a konstrukcí turbodmychadel.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Přehled řešené problematiky
4. Závěr
5. Seznam použitých zdrojů
6. Přílohy

Doporučený rozsah práce

30-40 str. včetně obrázků, tabulek a grafů

Klíčová slova

přepřehování, motor,

Doporučené zdroje informací

HROMÁDKO, J. Spalovací motory : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.

MACEK, J. – ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STROJNÍ FAKULTA. Spalovací motory. I. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03618-1.

VLK, F. Vozidlové spalovací motory. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-8756-4.

Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Jakub Mařík, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 19. 1. 2022

doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 05. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Historický vývoj a konstrukce turbodmychadel" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 28.3.2024

Poděkování

Rád(a) bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Ing. Jakubu Maříkovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, důležité rady a poznatky během jejího vypracovávání. Dále bych při této příležitosti velmi rád poděkoval své rodině za velikou podporu během celé doby studia.

Historický vývoj a konstrukce turbodmychadel

Abstrakt

Tato bakalářská práce se v první části zabývá historií přeplňování turbodmychadlem v chronologickém pořadí. Detailně se zaměřuje na klíčové etapy vývoje, od raných koncepcí až po konec druhé poloviny minulého století.

Druhá část práce se nejprve věnuje obecným principům přeplňování a konstrukčním specifikům turbodmychadla. Následně je podrobně rozdělena do sekcí věnovaných turbíně, kompresoru, ložiskové části a systémům regulace. U každé jednotlivé části jsou detailně popsány všechny části, ze kterých se skládá, včetně faktorů ovlivňující konstrukční řešení a popisu funkčnosti. Ke konci práce je prezentován je příklad moderního motoru používajícího přeplňování turbodmychadlem a je provedeno stručné srovnání s přeplňováním kompresorem.

Klíčová slova: turbodmychadlo; historie; konstrukce; přeplňování

Historical development and design of turbochargers

Abstract

This bachelor's thesis deals with the history of turbocharging in chronological order in its first part. It focuses in detail on the key stages of development, from early concepts to the end of the second half of the last century.

The second part of the thesis first deals with the general principles of turbocharging and the design specifics of turbochargers. It is then divided into detailed sections dedicated to the turbine, compressor, bearing system and control systems. Each individual section describes in detail all the components it comprises, including the factors influencing the design and the functionality of each component. Towards the end of the thesis, an example of a modern engine using turbocharging is presented and a brief comparison with compressor supercharging is made.

Keywords: turbocharger; history; design; turbocharging

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce a metodika	2
2.1	Cíl práce	2
2.2	Metodika	2
3	Přehled řešené problematiky	3
3.1	Historie	3
3.1.1	Prvopočátky	3
3.1.2	Průlom turbodmychadla General Electric na počátku 20. století	3
3.1.3	První letecké aplikace 20. léta 20. století	4
3.1.4	Druhá světová válka	5
3.1.5	1936 zrození firmy Garrett	6
3.1.6	Oldsmobile Jetfire 1962	6
3.1.7	Ropná krize a vzestup turbodmychadel v 70. a 80. letech	8
3.1.8	Mercedes Benz 300SD 1978	9
3.1.9	80. léta až současnost	10
3.2	Základní principy přeplňování	11
3.3	Základní princip přeplňování turbodmychadlem	11
3.4	Základy konstrukce turbodmychadla	12
3.5	Turbínová část	14
3.5.1	Turbínová skříň	15
3.5.2	Twin-scroll provedení turbínové skříně	18
3.5.3	Kolo turbíny	21
3.6	Kompresorová část	24
3.6.1	Kompresorová skříň	25
3.6.2	Kompresorové kolo	28
3.7	Ložisková část	32
3.7.1	Ložisková skříň	32
3.7.2	Kluzná ložiska	33
3.7.3	Valivá ložiska	34
3.8	Regulace turbodmychadla	35
3.8.1	Obtokový ventil	35
3.8.2	Proměnná geometrie rozváděcích lopatek turbíny (VNT)	36
3.8.3	Proměnná šířka statoru turbíny (VGT)	37
3.8.4	Regulační systémy a jejich ovládací prvky (aktuátory)	38
3.9	Příklad moderního turbomotoru VW 1.0 TSI	40
3.10	Kompresor v porovnání s turbodmychadlem	41
4	Závěr	43

5	Seznam použitých zdrojů.....	45
6	Seznam obrázků.....	48

1 Úvod

V moderní době se automobilový průmysl neustále vyvíjí, a to jak z hlediska efektivity, spolehlivosti, tak i z hlediska snižování emisí a spotřeby paliva. Jedním z klíčových prvků, který v tomto procesu sehrává zásadní roli, jsou turbodmychadla. Tyto zařízení, původně vyvíjená pro letecké motory během 20. století, se stala nedílnou součástí moderních spalovacích motorů, zejména v automobilovém průmyslu.

Tato práce se bude zabývat historickým vývojem a konstrukcí turbodmychadel, přičemž si klade za cíl prostřednictvím literární rešerše podrobněji prozkoumat jejich evoluci od prvopočátků až po současnost. V rámci této části budou podrobně popsány klíčové osoby a momenty historie během existence turbodmychadel, které vedly k jejich postupnému hojnému rozšíření v dnešní době. Dále také širší kontext, ve kterém se tyto momenty historie odehrávaly, včetně ekonomických, sociálních a environmentálních faktorů. Při zkoumání historického vývoje turbodmychadel bude klíčové porozumět, jaké faktory vedly k jejich vzniku a jakým způsobem se jejich konstrukce a funkčnost měnila v závislosti na potřebách a požadavcích doby.

Druhá část se bude zabývat nejdříve základními principy přepřívání a poté detailní analýzou konstrukčních prvků turbodmychadel. Zahrnovat bude studium jednotlivých konstrukčních celků, jako jsou kompresorová část a turbínová část ložisková část a systémy regulace. Tato část bude také zkoumat důvody výběru materiálů, výrobních technik a provozních podmínek na výkonnost a konstrukci jednotlivých částí turbodmychadel.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem práce je literární rešerše zabývající se historickým vývojem a konstrukcí turbodmychadel.

2.2 Metodika

Bakalářská práce je psána s využitím dostupných zdrojů a podpůrné literatury. Na základě shromážděných informací, výsledku analýz odborné literatury a názorů odborníků jsou popsány klíčové momenty a celková historie turbodmychadla a následně popsána konstrukce jednotlivých částí.

3 Přehled řešené problematiky

3.1 Historie

Historie přeplňování obecně je stará skoro jako spalovací motor sám, a sahá do konce 19. století. V tomto období se přeplňováním začali zabývat vizionáři jako Rudolf Diesel a Gottlieb Daimler.

3.1.1 Prvopočátky

Nejdůležitější osobou v historii turbodmychadla je bezpochyby Švýcarský strojní inženýr a vynálezce Alfred Büchi. Již v roce 1896 si díky své vynalézavosti a průkopnickému duchu nechal patentovat první patent na praktické turbodmychadlo. To znamenalo revoluční milník ve vývoji technologie motoru. Pokud se ponoříme do kořenů přeplňování turbodmychadlem, najdeme spletitou souhru velmi chytrých lidí, jejich nápadů, které vedly k vývoji spousty experimentálních motorů, které položily základy výkonných a účinných turbodmychadel, tak, jak je známe dnes. [30]



Obrázek 1 Švýcarský inženýr a vynálezce Alfred Büchi

3.1.2 Průlom turbodmychadla General Electric na počátku 20. století

Začátek sériově vyráběných turbodmychadel se objevil v továrně General Electric na počátku 20. století a znamenal klíčový okamžik ve vývoji technologie motoru a turbodmychadel. Zásadním člověkem se stal hlavní inženýr a vizionář společnosti General Electric - Sanford Moss. Moss dokázal objevit a využít potenciál přeplňování pro aplikace

v letectví a provedl v této oblasti řadu průlomových testů. Cílem těchto testů bylo vytvořit a udržet větší plnicí tlak ve výškách přesahujících bezmála 4300 metrů. Místem pro testování motorů v takové výšce bylo možné pouze na dobře dostupném místě s vysokou nadmořskou výškou, a tak testování probíhalo na vrcholku hory Pike's Peak v Coloradu. Mossovy experimenty a výzkum položilo základ pro široké využití turbodmychadel v leteckých motorech. Sanford Moss se svým průkopnickým duchem sehrál klíčovou roli při utváření budoucnosti létání a výroby energie a dokázal, že nebe již není limitem pro výkon motoru. [31] [30]

3.1.3 První letecké aplikace 20. léta 20. století

Letecká společnost byla součástí klíčového momentu historie když v roce 1920 proběhlo úspěšné testování prvního letadla s turbodmychadlem. Dvouplošník LaPerre osazený 12válcovým motorem Liberty osazeným turbínou propojenou s kompresorem. To umožnilo rychle rotujícím lopatkám kompresorového kola stlačit řídký vzduch ve vysokých výškách, a tudíž přivést do motoru stejné množství vzduchu jako v nízkých výškách blíže hladině moře. Díky tomu mohlo letadlo létat ve vysokých výškách kde není tolik vzduchu a tudíž i kyslíku, takže směs mohla zůstat stejně bohatá na palivo. Celkově pak dvouplošník LaPerre s touto konfigurací dosáhl na tu dobu nevídaných výkonů kdy během testů dosáhl výšky 10 000m, různé test pokračovaly i v roce následujícím kdy se hranice dosažené výšky ještě posunula na tehdy nevídaných bezmála 12 200 m.

Turbodmychadla zazářila v letectví a brzy se prosadila i v dalších odvětvích. V polovině 20. století se přeplňování turbodmychadly etablovalo i v lodní a železniční dopravě, čímž se tato technologie stala dostupnější pro širší spektrum aplikací. Úspěch turbodmychadel v letectví vedl k jejich rychlému rozšíření do dalších oblastí, jako je lodní a železniční doprava. [30] [31]



Obrázek 2 Sanford Moss, který zkontruoval první praktický "tubokompresor" [31]



Obrázek 3 zážehový motor Liberty V12 osazený tubopřeplňováním [32]

3.1.4 Druhá světová válka

Zdokonalování turbodmychadel nezůstalo pouze u leteckých aplikací, ale technologie pokračovala v rychlém vývoji a neustálém zlepšování. S příchodem druhé světové války se turbokompresory staly strategicky důležitou technologií a začaly se rychle montovat do návrhů stíhacích a bombardovacích letadel. Díky tomu mohla letadla nejen létat rychleji a výš než kdy před tím, ale také se výrazně zlepšila jejich spotřeba paliva, což jim poskytlo rozhodující výhodu v leteckých soubojích a na dlouhých operačních letech. V tomto válečném období nebylo ani zdaleka uvažováno o potenciálu turbodmychadla v aplikaci pro osobní dopravu

automobilem, která v této době ještě prakticky neexistovala. Dvacátá léta minulého století byla svědkem nástupu přeplňování, což byla technologická revoluce, která doslova katapultovala letectví a dopravu do nové éry, definované bezprecedentní rychlostí, hospodárností a technologickým náskokem. [30] [31]

3.1.5 1936 zrození firmy Garrett

Její vznik sahá až do roku 1936, kdy vizionář J. C. "Cliff" Garrett položil základy firmy. Jejich prvním počinem nebylo přímo turbodmychadlo, ale mezichladič stlačovaného vzduchu pro legendární bombardér B-17. Právě díky tomuto projektu se společnost Garrett vydala na cestu v oblasti přeplňování spalovacích motorů.

V raných fázích se Garrett soustředil především na vývoj a výrobu malých plynových turbín. Avšak zásadní zlom nastal v roce 1954. Cliff Garrett rozpoznal obrovský potenciál turbodmychadel pro zlepšení výkonu spalovacích motorů. Toto uvědomění ho vedlo k významnému rozhodnutí oddělit oddělení turbodmychadel od divize plynových turbín. Tento krok se ukázal jako klíčový a znamenal zrod nového subjektu plně zaměřeného na vývoj a výrobu turbodmychadel. Později byla tato společnost pojmenována Garrett Automotive.

Z průkopníků v oblasti leteckých aplikací přeplňování se Garrett Automotive postupně vypracoval na průmyslového titána ve svém oboru. Jejich práce zásadně ovlivnila celý obor turbodmychadel a zanechala nesmazatelnou stopu na výkonu moderních automobilů. Díky společnosti Garrett Automotive se turbodmychadla stala běžnou součástí vysokovýkonných vozů a zásadně ovlivnila automobilový průmysl směrem k vyššímu výkonu a lepší hospodárnosti. [30] [13]

3.1.6 Oldsmobile Jetfire 1962

První pokusy o přeplňování turbodmychadlem v automobilovém průmyslu nedopadly příliš dobře. Píše se začátek 60. let minulého století v USA. V této době je totiž znát postupný pokles zájmu o obří automobily s velkoobjemovými motory, které zrovna neoplývaly nízkou spotřebou paliva. I tak se automobilka Oldsmobile v té době rozhodla začít experimentovat s přeplánováním turbodmychadlem v zájmu nabídnout zákazníkům nejen něco netradičního, ale i například nižší spotřebu paliva, čímž by se odlišila od konkurence. Automobilka se tedy spojila s firmou Garrett, která do té doby dělala systémy přeplňování pouze pro průmyslová vozidla. Výsledkem byl 3,5 litrový osmiválec interní přezdívkou označovaný jako Turbo-Rocket. Motor byl osazen do modelu Oldsmobile Cutlass (F85), který byl s touto motorizací

označený jako Jetfire. Tato pohonná jednotka pak nabídla zákazníkovi v tu dobu největší výkon z celého portfolia motorů, které byly na výběr. Výkon činil 160 kW (218 HP) a 408 Nm kroutícího momentu. Celkově si tento automobil mohl připsat titul prvního produkčního automobilu vybaveného přeplňováním turbodmychadlem a díky tomu tak značně předběhl dobu.

Tehdejší technologie ale pochopitelně postrádala elektronické zapalování používalo se pevně nastaveného předstihu. K tomu, aby nedocházelo k předčasnému (detonačnímu) splování se pro snížení bodu zápalu dostříkoval mix metanolu a vody v poměru 50:50. Tato "turbo-raketová" kapalina, jak byla nazvána marketingovým oddělením, se musela pravidelně doplňovat. Pokud tato směs byla vypotřebována, byl motor vybaven ventilem, který turbodmychadlu velmi snížil plnicí tlak, což vedlo k tomu, že motor nepodával plný výkon. To se ukázalo jako nepraktické a frustrující pro majitele, kteří často jezdili do servisu. Nejednalo se však o poruchu nýbrž o ochrannou funkci motoru v případě, že došla tato kapalina.

Kromě nutnosti doplňovat "turbo-raketovou" kapalinu trpěl Jetfire i dalšími problémy se spolehlivostí. Jeho motor nepatřil mezi nejspolehlivější a v kombinaci s tučnou cenovkou (o 300 dolarů dražší než standardní Cutlass) se stal neprodejný. Nízký zájem a technické problémy vedly k rychlému stažení Jetfiru z trhu v roce 1963. I přes facelift v roce 1963 se prodalo pouze 3765 kusů turbo varianty. Jetfire tak, i přes svůj inovativní charakter, zůstal jen krátkou epizodou v historii automobilů. Ačkoliv byl průkopníkem v oblasti přeplňovaných motorů, nedokázal překonat technické a praktické překážky své doby. Jeho krátký životní cyklus ale poukázal na potenciál turbodmychadel a inspiroval další vývoj v automobilovém průmyslu.

[11] [30]



Obrázek 4 Oldsmobile Jetfire [Wikipedia - Greg Gjerdingen]



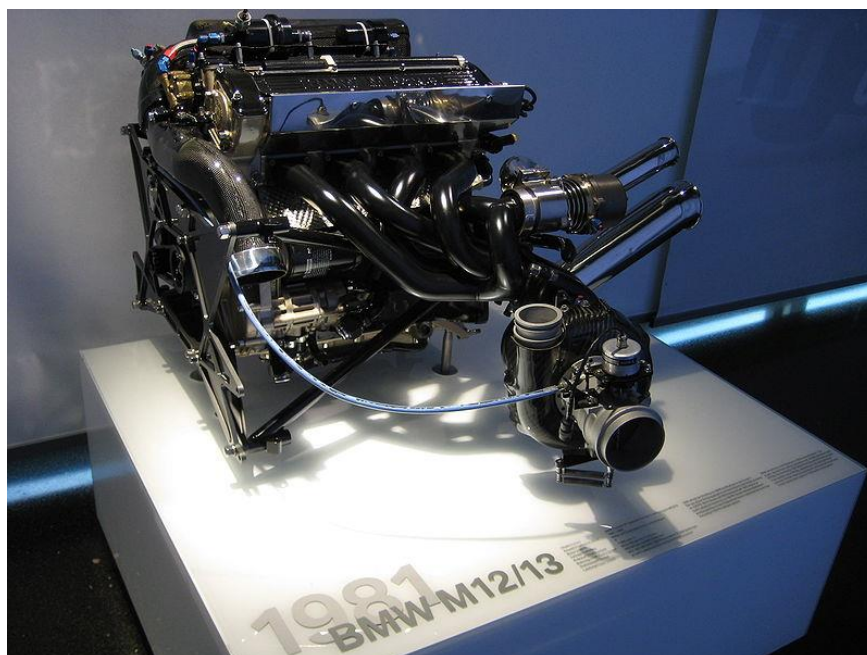
Obrázek 5 nádobka s "tubo-raketovou kapalinou" [Wikipedia - Greg Gjerdingen]

3.1.7 Ropná krize a vzestup turbodmychadel v 70. a 80. letech

Vlivem ropné krize v roce 1973 dosáhla technologie přepřínování motorů turbodmychadlem takové úrovně, že se začala uplatňovat v užitkových vozidlech s naftovými motory. S přísnějšími emisními normami nabývalo turbodmychadlo na významu a koncem 80. let se stalo v podstatě standardem v odvětví dopravy. V 70. letech došlo k zásadnímu bodu zavedením turbodmychadel do motoristického sportu, zejména ve Formuli 1.

Motoristický sport jakožto udavač trendů v automobilových inovacích sehrál významnou roli v popularizaci turbodmychadel. Formule 1 zažila v letech 1977 až 1989 období dominance turbodmychadel, někdy nazývané také jako "Turbo Era". Během této éry dosahovaly motory neuvěřitelných výkonů. Za nejvýkonnějšího z nich je považovaný motor BMW M12/13/1 o objemu 1,5 litru, který produkoval díky svému turbodmychadlu KKK v kvalifikační konfiguraci až 1400 koní při plnicím tlaku přes 5 barů. Pionýrem v tomto směru byl Renault, který do své formule R01 v roce 1977 nasadil turbodmychadlový motor Renault-Gordini RE20. I přes vysoké náklady na vývoj se tato technologie vyplatila výkonem a ostatní výrobci se rychle přidali. Turbodmychadla postupně ovládla Formuli 1 a v polovině 80. let ukončila éru motorů Ford Cosworth DFV. Kvůli extrémnímu nárůstu výkonu a rychlosti, které turbodmychadla přinášela a které začaly být považovány za nebezpečné, se však FIA rozhodla zasáhnout. V roce 1987 omezením maximálního plnicího tlaku a posléze v roce 1989 úplným zákazem turbodmychadel v F1.

Do konce desetiletí se turbodmychadlo dostalo z původního omezeného použití a pro širokou veřejnost se stal tento pojem běžným. Tato transformativní éra zavedla turbodmychadlo jako základní kámen užitkových vozidel a zaznamenala jeho vítězný vstup do světa motoristického sportu, čímž si definitivně zajistilo místo v automobilové historii. [30] [33]



Obrázek 6 motor BMW M12/13 z vozů F1 [Wikipedia – Buschtrömmeler]

3.1.8 Mercedes Benz 300SD 1978

Konec roku 1978 znamenal pro továrnu Daimler-Benz v Sindelfingenu v západním Německu zásadní krok. Kvůli ropné krizi musely automobilky přehodnotit velikost nabízených modelů a začít klást nároky na hospodárnost a efektivitu. Zásadní novinkou byl pětiválcový dieselový motor o objemu 3,0 litru, přepínaný turbodmychadlem. Díky tomuto motoru se tak stal prvním sériově vyráběným osobním vozem s přepínaným naftovým motorem na světě. Blok a hlava motoru byly z litiny a motor poskytoval výkon 121 koní při 4350 otáčkách a točivý moment 230 Nm při 2400 otáčkách. Standardní převodovkou byla čtyřstupňová automatická. S touto motorizací byl však dostupný pouze v USA. I přes to se stal větším prodejním hitem, než si sám Mercedes dokázal představit a už v roce 1982 tvořily skoro 80% prodejů turbo diesely.

Mercedes-Benz 300SD odstartoval novou éru a zcela změnil pohled na naftové motory. Díky nízkým emisím, vysoké účinnosti a jízdním vlastnostem srovnatelným s benzínovými vozy se stal Mercedes-Benz 300SD průkopnickým. Od této doby se začaly turbodieselové motory objevovat stále hojněji v osobních automobilech. [30] [34]



Obrázek 7 Mercedes Benz 300SD první sériově vyráběný turbodiesel [35]

3.1.9 80. léta až současnost

Turbodmychadla se v motoristickém sportu používají od 70. let 20. století a dramaticky ovlivnila vývoj nejen závodních motorů. V sériích jako Formule 1 vedly k nárůstu výkonu a rychlosti, čímž se změnila dynamika závodů a posunula hranice technologií, které byly v následujících dekádách postupně adaptovány pro použití v osobních vozech. Nelze taky zapomenout na legendární skupinu B v rallye, ke které přeplňování turbodmychadlem bezpochyby neodmyslitelně patří, závodní speciály zde dosahovaly úctyhodných výkonů až 500 koní, příkladem takového automobilu je Audi Sport S1 Quattro. Turbodmychadla prošla od roku 1980 značným vývojem a stala se klíčovou technologií v automobilovém průmyslu. Díky neustálému zdokonalování a inovacím budou turbodmychadla i nadále hrát důležitou roli v automobilové budoucnosti, a to jak v oblasti osobních automobilů, tak i motoristického sportu. [30]

3.2 Základní principy přeplňování

Přeplňování motorů je nejpoužívanější metoda, která slouží k efektivnímu nárůstu výkonnostních parametrů spalovacího motoru. Díky přeplňování se zvětšuje objem vzduchu nasávaný do motoru, stejně tak se musí úměrně zvýšit množství paliva, a to vede ke zvýšení výkonu při stejném objemu spalovací komory. Už v minulosti byla vyvíjena snaha o zvýšení výkonu spalovacího motoru přeplňováním zejména pak vznětových motorů. U vznětového motoru je menší výkon při stejném objemu nežli u motoru zážehového. V podstatě máme dvě možnosti, jak potenciál přeplňování využijeme. Můžeme zmenšit objem motoru, který budeme přeplňovat, tím dosáhneme nízké spotřeby a rozumného výkonu pro použití pro běžné automobily. Druhou variantou je využít maximální technický potenciál všech součástí a objemu motoru k maximálnímu výkonu, toho je většinou využíváno v motorsportu. [1]

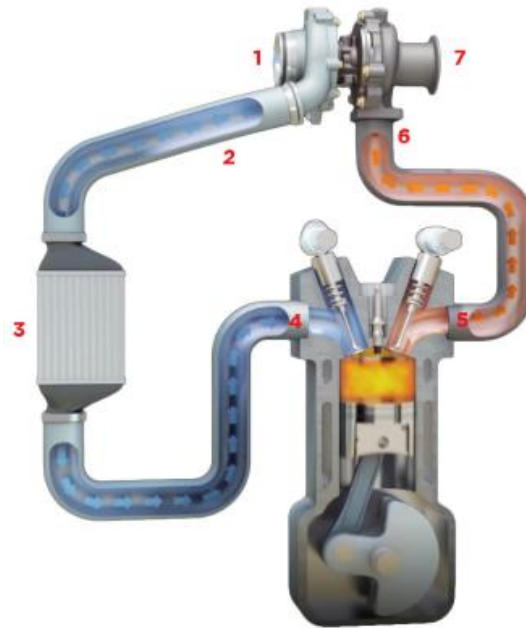
3.3 Základní princip přeplňování turbodmychadlem

Turbodmychadlo je kompresor, který využívá kinetické energie spalin vycházejících ze spalovacího prostoru motoru. Spaliny by jinak bez využití unikly výfukem ven. Spaliny přenášejí svoji kinetickou energii na turbínu, kde je tato energie převedena v rotační pohyb turbíny, která je na stejné hřídeli jako kolo kompresoru. Kompresor skrze vzduchový filtr nasává proudící vzduch a ten stlačuje, čímž dostáváme do motoru vzduch o větším tlaku a hustotě. Tím pádem se do stejného objemu válce dostane více vzduchu, tudíž se spálí i více paliva, a tak se zvyšuje výkon i kroutící moment. Stlačený vzduch se zahřívá, a to až na 130°C. Velice vysoká teplota spalovací směsi paliva a vzduchu by mohla vést k samovznícení, zároveň aby se zlepšilo plnění válce zvýšením hustoty, vzduch od kompresorového kola putuje přes mezichladič, kde se ochladí na 70°C. Účinnost turbodmychadel bývá kolem 80%. Zážehové motory užívají turbodmychadel, která zvyšují plnicí tlak o 80 - 100kPa, vznětové motory pak plnicí tlaky zvyšují o něco více okolo 150 - 200kPa. [12] [4]

Přeplňované motory můžeme dělit podle plnicího tlaku a nárůstu točivého momentu na:

- motory s nízkotlakým přeplňováním – přetlak 20kPa až 50kPa se zvýšením točivého momentu do 25%
- motory se středotlakým přeplňováním – přetlak 50kPa až 100kPa se zvýšením točivého momentu o víc jak 25%

- motory s vysokotlakým přeplňováním – přetlak více než 100kPa se zvýšením točivého momentu o víc jak 50% [3]



Obrázek 8 schéma přeplňování turbodmychadlem [13]

- 1) vstup do kompresoru
- 2) Stlačený vzduch
- 3) Mezichladič stlačeného vzduchu
- 4) Sací ventil
- 5) Výfukový ventil
- 6) Vstup turbíny
- 7) Výstup výfukových plynů z turbíny

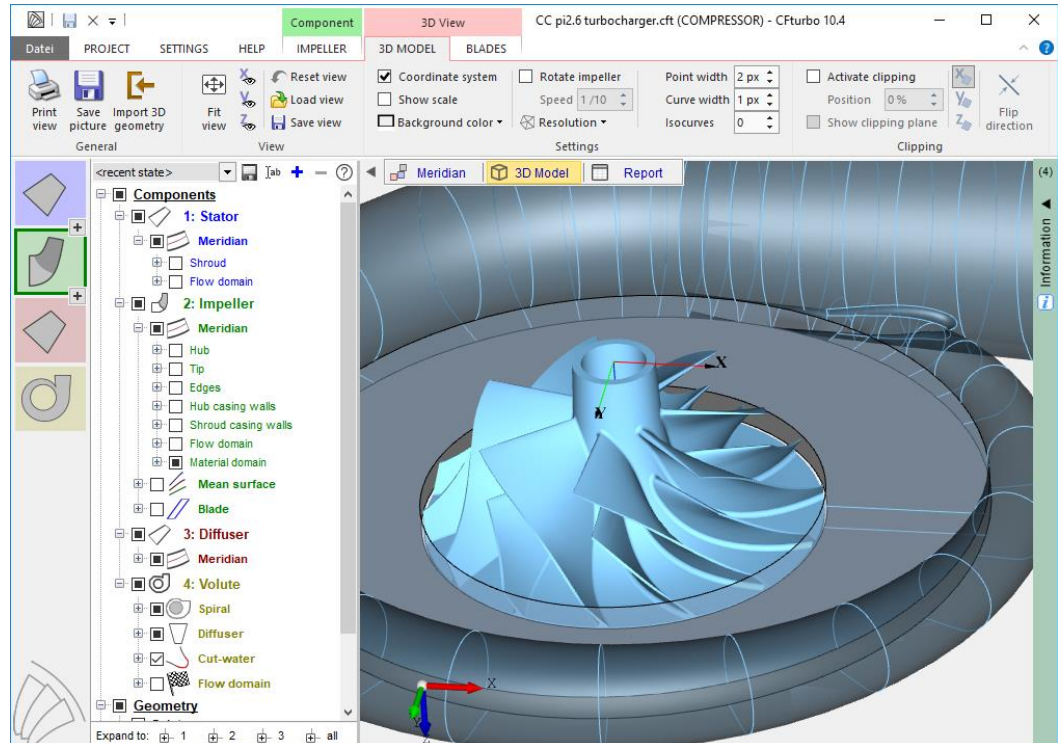
3.4 Základy konstrukce turbodmychadla

I přesto že konstrukce turbodmychadla se liší od výrobce k výrobcí, základní principy, funkce a design však zůstávají stejné už desítky let tak, jak je na začátku století navrhl švýcarský vynálezce Alfred Büchi. První turbodmychadla však byla velická a postrádala efektivitu.

Tehdejší výrobní a technologické procesy značně omezovaly efektivitu turbodmychadla. Tehdy turbodmychadla dosahovala pouze 10000 – 30000 otáček za minutu, což nebylo dostačující, a proto bylo využíváno vícestupňového přepřínování. [1] [4] [6]

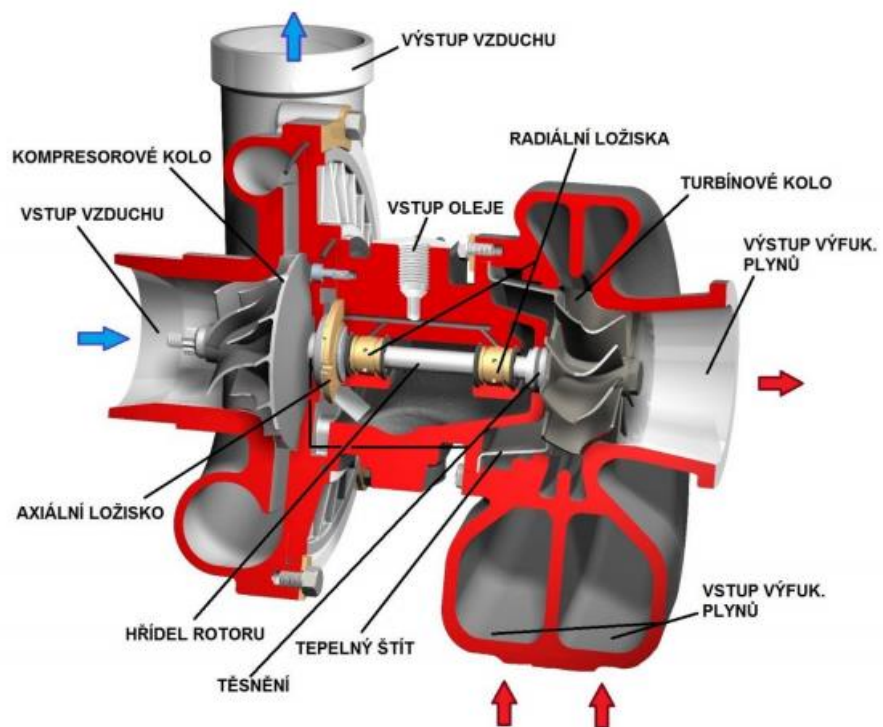
V současnosti moderní turbodmychadla dosahují 200000 – 300000 otáček za minutu. Dnes je při vývoji každé součásti turbodmychadla užíváno moderní výpočetní techniky a mnoha softwarových programů umožňujících simulaci a výpočty při návrhu a vývoji dané součásti. V dnešní době je totiž kladen veliký důraz na spoustu faktorů, jako jsou například: aerodynamika, geometrické tolerance, povrchové tolerance, vyvážení a celková efektivita celé součásti. [1] [4] [6]

K takovým programům patří například software CFturbo používaný mnoha společnostmi pro vývoj a návrh turbodmychadel, kompresorů, turbín a čerpadel. Společnost CFturbo úzce spolupracuje se společnostmi proslulými v oblasti designu a 3D a CAD – CAM softwarů. Za příklad bych uvedl společnosti jako Solidworks, Siemens, Autodesk nebo například PTC Creo Parametric. Mezi společnostmi přímo používající software CFturbo patří například Porsche nebo Volkswagen Motorsport, Karcher, anebo také společnost Aerojet Rocketdyne pro vývoj turbočerpadel raketových motorů NASA. [1]



Obrázek 9 Software CFturbo [14]

Turbodmychadlo je složeno z rotorové a statorové části. Rotor je tvořený hřídelí, kompresorovým a turbínovým kolem. Hřídel bývá uložena ve středu statorové části v ložiskové skříni, pomocí kluzných radiálních ložisek s plovoucími volnými kroužky a plochého axiálního ložiska. K protilehlé straně ložiskové skříně je připojena skříň turbíny a kompresoru. Těsnění je provedeno tak, aby mazací olej nepronikl do sání a výfuku a aby nedošlo k proniknutí pracovních plynů do ložiskové skříně. Nejčastěji je užíváno labyrintového těsnění. K redukci tepelného namáhání ložiskové skříně slouží tepelný štít. [1] [4] [6]



Obrázek 10 Základní prvky turbodmychadla [15]

3.5 Turbínová část

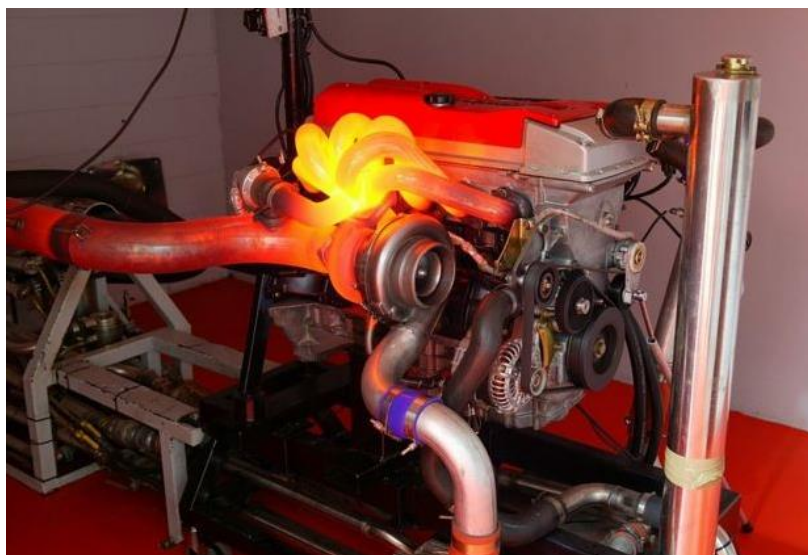
Turbínová část turbodmychadla je podobně jako kompresorová část složena ze statorové a rotorové části. Stator je tvořený kompresorovou skříní, která může být klasického provedení s jedním velkým průřezem, a nebo s rozděleným twin-scroll pro zlepšení průtoku spalin. Celá turbínová část musí snášet velice veliké pracovní teploty pohybující se okolo 900°C, zároveň při této teplotě musí udržet maximální pevnost, protože otáčky se pohybují ve statisících za minutu. [1] [2]

3.5.1 Turbínová skříň

Turbínová někdy také vstupní skříň, je část turbodmychadla kde horké výfukové spaliny z motoru proudí přes turbínové kolo. Rotací turbínového kola získává motor energii pro práci ve své kompresorové části. V turbínové komoře díky vysoké teplotě výfukových plynů vzniká velmi vysoká teplota, proto musí být komora dostatečně žáruvzdorná. Požadované žáruvzdornosti se dosáhne vhodným materiálem. [3]

Základním materiálem používaným k výrobě turbínové komory, který vyhovuje všem požadavkům je tvárná litina například GGG 40 (EN-GSJ400- 15). Tento materiál je také hojně využíván kvůli svým schopnostem dobře tlumit vibrace, kromě toho je taky otěruvzdorný a dobře odolný vůči korozi. K dalším přednostem tohoto materiálu také patří jeho nízká výrobní cena a možnost vyrábět ho i v malých odlitkách. Pokud jsou pracovní podmínky ještě více ztíženy, je zapotřebí i jiných materiálů. Je tomu tak například u motorů plynových, kde provozní teplota vyšší než u vznětových nebo zážehových (až 700°C). Potom jsou turbínové komory odlévané z materiálů jako tvárné legované slitiny s příměsí křemíku a molibdenu SiMo, nebo příměsí niklu a chromu NiCr. [1] [2]

Pro turbodmychadla do vysoce výkonných závodních motorů, kde teplota výfukových spalin dosahuje i 1100°C jsou pro výrobu odlitků používány speciální vysokoteplotní slitiny titanu a hliníku TiAl, které jsou velice pevné avšak velice lehké. Nevýhodou těchto slitin bývají vysoké náklady ať už pořizovací nebo náklady spojené s výrobní technologií zpracování těchto materiálů například speciálními nástroji potřebnými k obrábění těchto materiálů. Na druhou stranu se nejedná o sériovou výrobu nýbrž o výrobu v řádech desítek kusů pro závodní speciály.[1] [2]



Obrázek 11 Příklad vysokého tepelného namáhání turbínové části turbodmychadla [20]

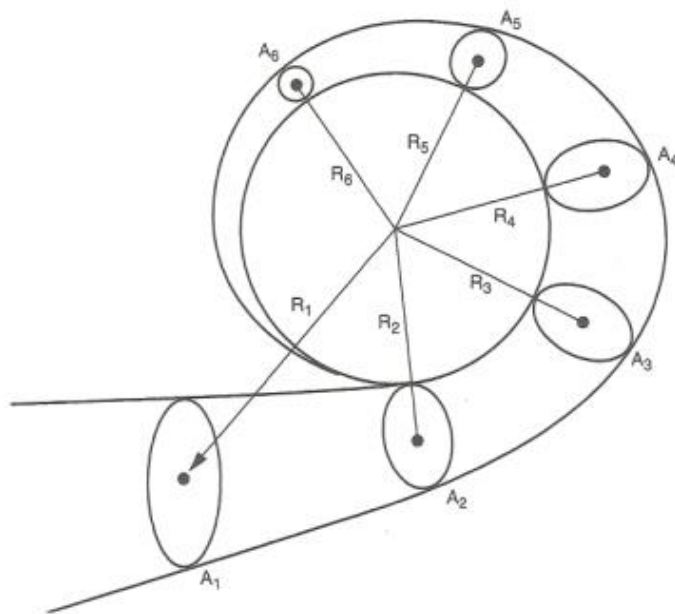
Na vstupní části turbínové skříně je výstupek ve tvaru hrdla. Funkcí tohoto hrdla je dosednout na plochu výfuku, a pomocí sevření utěsnit. Úkolem je utěsnit spoj mezi výfukem a hrdlem turbínové skříně, aby nedocházelo k úniku výfukových zplodin, což by zapříčiňovalo ztrátu tlaku výfukových plynů působících na kolo turbíny, tudíž ke snížení účinnosti přeplňování. Tvar turbínové skříně je spirálovitého tvaru. Směrem ke středu se ve směru toku výfukových spalin zmenšuje průřez kanálu, kterým proudí plyny směrem do středu na turbínu. Touto geometrií je zajištěn stálý tlak působící na turbínu, přes kterou odchází úměrně k tomuto množství výfukových spalin. Tvar a velikost turbínové komory závisí na tvaru a velikosti turbíny. Tvar a velikost turbínové komory jsou velice důležité pro zajištění správného fungování turbodmychadla a jeho ideálních otáček. [1] [2]

Při návrhu turbínové skříně se řídíme podle takzvaného A/R poměru. A/R vyjadřuje poměr mezi plochou spirálovitého průřezu a vzdálenost středu této plochy od pomyslného středu turbínové skříně. Pokud zmenšíme plochu průřezu A (z anglického slova area), výfukové plyny budou proudit rychleji. Pokud zvětšíme poloměr vzdálenosti středu průřezu od středu turbínové skříně R (z anglického slova radius), bude síla výfukových plynů působit na větším rameni lopatek turbíny a tím pádem bude turbínovému kolu udělen větší točivý moment. V praxi však poloměr vzdálenosti středu průřezu zůstává stejný a mění se jenom plocha průřezu. Výfukové plyny opouští turbínu v axiálním směru, tedy u určitém smyslu vzduch proudí opačně než u kompresoru. Je tedy zřetelné, že uvedený vztah má veliký vliv na charakteristiku parametrů celého turbodmychadla. Velikost A/R poměru můžeme zpravidla najít na odlitku turbínové komory u vstupu výfukových spalin.[1] [2]

A/R poměr můžeme vyjádřit podle následujícího vztahu:

[2] [3]

$$\frac{A_1}{R_1} = \frac{A_2}{R_2} = \frac{A_3}{R_3} = \frac{A_4}{R_4} = \frac{A_5}{R_5} = \frac{A_6}{R_6}$$



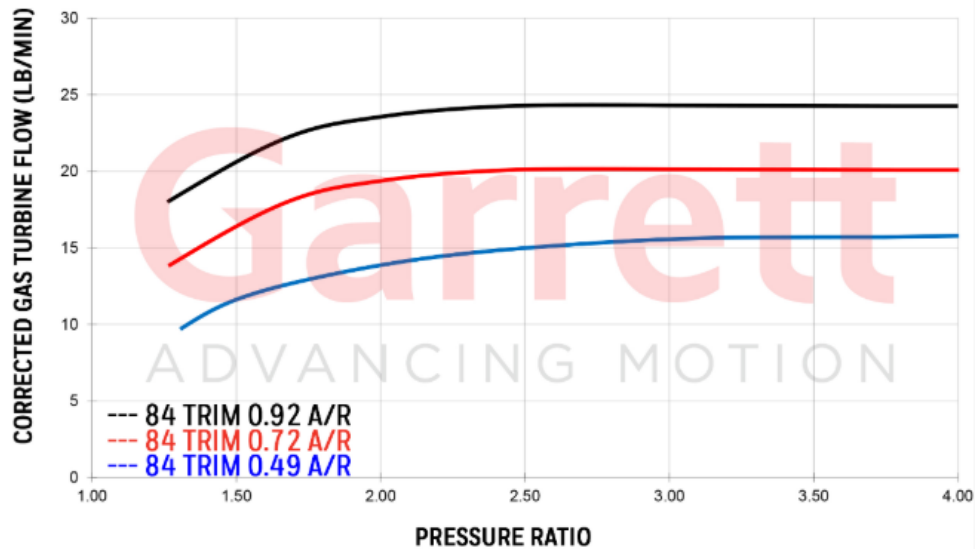
Obrázek 12 Znáornění A/R poměru [2]



Obrázek 13 A/R poměr na vstupu výfukových plynů turbínové skříně [1]

na obrázku dole vidíme příklad turbínových map turbodmychadla GARRETT G25-660. Při testování zůstává velikost turbínového kola stejná, měnily se pouze turbínové skříně

s různým A/R poměrem. Křivky v grafu, jak vidíme, mají vesměs stejný průběh, liší se pouze objemem průtoku výfukových spalin. Turbínová skříň s A/R poměrem 0.92 má největší průtok výfukových spalin turbínou. Při poměru tlaku 2.25 po 2.50 dochází k přehlcení turbínových skříní. [1] [13]



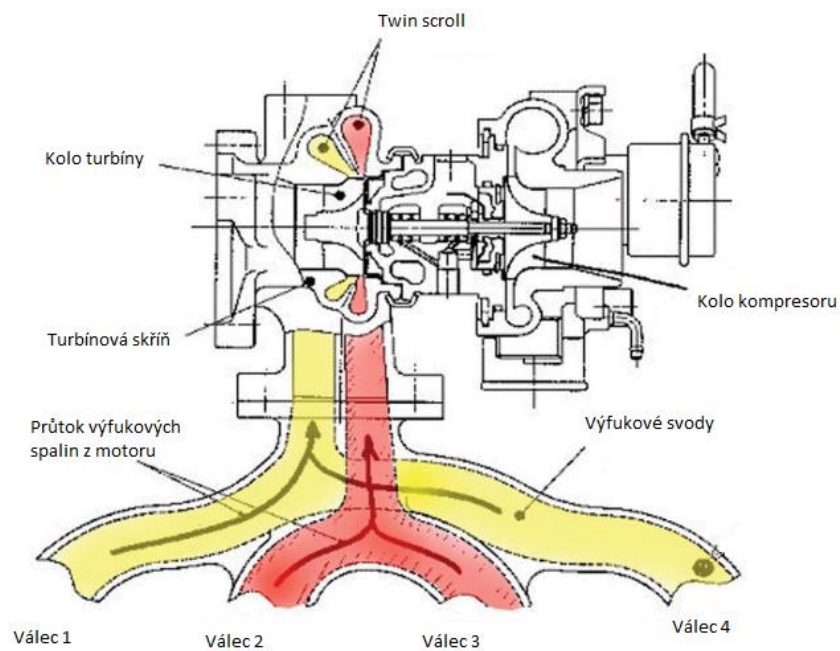
Obrázek 14 Graf průtoku výfukových spalin turbínových skříní [13]

3.5.2 Twin-scroll provedení turbínové skříně

Twin scroll systém je v podstatě přepážka po obvodu turbínové komory, která odděluje dráhu spalin od výfukového kanálu až ke hranám lopatek. Každý pulz výfukových spalin se dostane ke hraně lopatek turbínového kola a tím se maximálně využije energie výfukových plynů. Tato drážka však zvětšuje plochu, což způsobuje ztráty třením plynu o stěny skříně při vysokých otáčkách motoru. Twin scroll systém eliminuje nedostatky otevřené turbínové skříně a společných svodů. Tyto nedostatky vznikají vzájemným ovlivňováním pulzů výfukových plynů vycházejících z pracovního prostoru válce motoru v nepravidelných intervalech. Nepravidelné pulzy jsou způsobeny pracovním cyklem motoru. [1] [5]

například: čtyřválcový čtyřdobý motor má sekvenci zážehu směsí v pořadí válců 1 – 3 – 4 – 2, což znamená, že první válec je na konci expanze a otevírá se výfukový ventil zatím co druhý válec má výfukový ventil pořád otevřený (v době, kdy jsou sací a výfukový ventil částečně otevřené), a to způsobuje ve výfukových svodech bez rozdělení, že pulz výfukových spalin z prvního válce neguje vypouštění spalin druhého válce. [1] [12]

Twin-scroll systém turbínové komory umožňuje předejít těmto nežádoucím jevům tím, že výfukové svody rozdělí do páru po válcích 1 – 4 a 2 – 3 a přepážkou pro každý pár válců v turbínové skříni. Tímto je docíleno toho, že se pulzy výfukových spalin po otevření ventilu navzájem neruší a dochází tak k lepšímu rozložení tlaků v kanálech, které vedou výfukové spaliny, tím pádem dochází k efektivnějšímu přenosu energie výfukových spalin k turbínovému kolu. To se potom projevuje lepší odezvou na plynový pedál než u klasické nedělené turbínové komory. Twin-scroll systém, také zvyšuje rozsah otáček, kde turbodmychadlo pracuje s vysokou účinností. Nevýhodou pak může být větší pořizovací cena, či větší náklady na údržbu. [1] [5]



Obrázek 15 Schéma provedení systému Twin scroll) [16]

Na obrázku 16 je vidět test automobilu s turbodmychadlem přepřínovaným motorem o výkonu 700 koní na motorové brzdě. Oba testy probíhaly tak, že jediný komponent, který se změnil, byla turbínová komora se stejným A/R poměrem. Jediný rozdíl mezi turbínovými komorami byl systém jejich provedení, tedy jedna turbínová komora v provedení twin-scroll a druhá klasická bez tohoto provedení (na obrázku označeno jako single-scroll). Test probíhal ze třetího rychlostního stupně. V tabulce pod grafem jsou rozepsané hodnoty, jak dlouho trvalo dostat se na danou hodnotu plnicího tlaku s provedením twin-scroll i bez něj. Tato tabulka názorně vypovídá o tom, že twin-scroll systém zmenšuje odezvu turbodmychadla. [8]



Obrázek 16 Porovnání křivek točivého momentu se systémem twin-scroll a bez něj [8]

Z obrázku je patrné, že systém twin-scroll si vedl lépe podle očekávání. V celém spektru výkonostních křivek je vidět nárůst točivého momentu. K největšímu nárůstu dochází mezi 3500 až 6000 ot/min. Od 5000 do 6900 ot/min byl výkon pořád větší než u klasického provedení turbínové skříně, ale tento výkonostní nárůstek se postupně snižoval s narůstajícími otáčkami. Systém twin-scroll tedy přidal celkově 61.7 koní na kola. [8]

Plnicí tlak (bar)	Twin scroll	Single scroll	rozdíl
0.14	start	start	
0.35	1.436s	1.965s	0.529s
0.69	2.617	3.228	0.611s
1.03	2.985	3.671	0.686s
1.38	3.194	3.868	0.674s
1.72	3.458	4.060	0.602s
2.07	3.700	4.370	0.670s

na obrázku dole je vidět dopad použití twin-scroll systému na akceleraci testovaného automobilu. Testovanému automobilu s klasickým provedením turbínové komory trvalo zrychlit ze 100km/h (na obrázku 60 mil za hodinu) na 160 km/h (na obrázku 100 mil za hodinu) za 1.98 vteřiny. S provedením turbínové komory twin-scroll to automobil zvládl za 1.75 vteřiny. Z obrázku 17 je vidět, že to dělá délku jednoho automobilu. Takový rozdíl je důležitý obzvláště u závodních automobilů na drag, nebo v motorsportu obecně. [8]



Obrázek 17 Akcelerace testovaného automobilu ze 100 km/h [8]

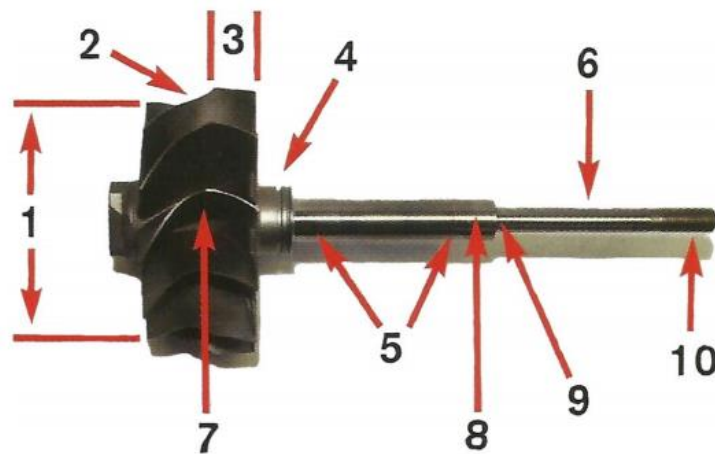
..

3.5.3 Kolo turbíny

Kolo turbíny patří společně s jejím uložením (turbínovou komorou či skříní) k nejdůležitějším, a zároveň nejdražším částem turbodmychadla. Součástí kola turbíny je také hřídel, na jejímž koci je připevněné kolo kompresoru. Na rozdíl od kola kompresoru, které je k hřídeli připevněné pomocí matice je turbínové kolo pevně spojeno s hřídelí. Za turbínové kolo je označováno kolo turbíny společně s hřídelí rotoru. Pevný spoj mezi kolem turbíny a hřídelí bývá řešený pomocí pevného nerozebíratelného spoje například metodou svařování elektronovým paprskem, nebo odporového svařování. Většina dnešních turbodmychadel má spoj turbínového kola a hřídele řešený pomocí metody odporového svařování z důvodu časové

úspory. Hřídel turbíny často bývá tepelně zpracována, aby byla tvrdší a lépe odolávala mechanickému opotřebování. Hřídel je vyráběna s velikou přesností až sedmi mikronů (0.007mm). Na konci hřídele je závit pro upevnění kompresorového kola. [1] [2]

Tyto závity jsou ve většině turbodmychadel válcované nikoli vyřezávané. Válcované závity na konci hřídele zlepšují celkovou tuhost hřídele, přes kterou je přenášen točivý moment od výfukových plynů působících na lopatky turbíny. Důvodem použití válcovaných závitů namísto vyřezávaných je taky ten, že při vyřezávání závitů je narušena struktura materiálu turbínové hřídele, což také narušuje celkovou tuhost a vlastnosti použitého materiálu. Pokud se blíže podíváme na závity na konci turbínové hřídele uvidíme, že závity mají krásný hladký a lesklý povrch naproti závitům vyřezávaným, kde kvalita povrchu a drsnosti zdaleka nebude taková. [1]



Obrázek 18 schéma turbínového kola [1]

- 1) průměr exduceru
- 2) kontura oběžného kola
- 3) šířka induceru
- 4) drážka pro těsnění
- 5) dosedací plocha pro ložiska
- 6) čep hřídele
- 7) turbínové kolo
- 8) hřídel
- 9) osazení hřídele
- 10) válcované závity pro upnutí kompresorového kola na hřídel

Zaměříme-li se na kvalitu, dnes můžeme narazit v obchodech na cokoli, výjimkou nejsou ani turbodmychadla. Na trhu tedy můžeme narazit na Turbodmychadla s pochybnou kvalitou nebo dokonce na padělky ať už částí nebo dokonce celých turbodmychadel. Může se jednat o padělky tradičních výrobců, jako jsou například: Garrett, PBS turbo, Holset, ABB a další. Rozdíly mohou být ve výběru materiálů, způsoby výroby, nebo jen jemné konstrukční rozdíly. A právě u turbínového kola jsou tyto vlastnosti klíčové, protože se jedná o součásti, které mohou dosahovat v některých případech tolika otáček, že se točí až rychlostí zvuku. Často by si měli dávat pozor lidé, kteří objednávají tuningové díly a soupravy pro zvýšení výkonu na eBay.com a podobných internetových obchodech. V České republice bych doporučil například firmu APR.cz, která se již dlouhou dobu zaměřuje na tuningové kity pro zvýšení výkonu turbomotorů koncernových značek, Turbocar.cz a nebo autorizovaného prodejce turbodmychadel od firmy Garrett specialturbo.cz.

Turbínové kolo se vyrábí procesem velmi přesného odlévání. Kvůli vysokému tepelnému namáhání turbínového kola je zapotřebí použití materiálů s adekvátními vlastnostmi. Použitými materiály jsou tedy, superslitiny na bázi niklu a kobaltu například: [1]

- Inconel 713C
- Inconel 713LC
- GMR 235
- MarM247

Všechny tyto materiály jsou superslitiny na bázi niklu, kobaltu, chromu, wolframu a jiných prvků. Liší se v převážné většině obsahem jednotlivých prvků. Například superslitiny Inconel mají obsah 1.7% molibdenu, ale superslitina MarM247 neobsahuje žádný. Tyto superslitiny mají vynikající odolnost vůči tepelné námaze a výbornou slévatelnost, a zároveň nabízí výjimečnou pevnost v tahu při teplotách až 950°C. Tyto vlastnosti jsou vhodné nejen jako materiál pro turbínové kolo turbodmychadla, ale i jako materiál vhodný k výrobě lopatek turbín tryskových motorů.

Nejpoužívanějšími pro výrobu turbínových kol z výše uvedených materiálů je Inconel 713C a GMR 235. Inconel 713C bývá často preferovaným kvůli své větší tepelné odolnosti.

Superslitina GMR 235 je však vhodná pro použití ve většině diesellových motorů. V zážehových motorech o vyšším výkonu má vhodnější využití Inconel 713 °C kvůli své, již zmíněné, větší tepelné odolnosti. Obecně platí, že pokud předpokládaná teplota turbínové komory, či teplota výfukových svodů poblíž turbínové komory dosáhne 760 °C, použije se superslitina typu Inconel. [1] [2] [17]

3.6 Kompresorová část

Kompresorová část turbodmyhadla se skládá ze dvou hlavních částí a to z kompresorové komory a kola kompresoru. Turbínová část turbodmyhadla je ve zjednodušeném slova smyslu poháněná turbínovou částí, přičemž hřídel turbínového kola zasahuje až do kompresorové části turbodmyhadla. Základními principy turbínové části je práce se vzduchem. Velice důležitý je tedy zákon o ideálním plynu. Zákon o ideálním plynu definuje vztah mezi objemem (V), tlakem (p) a teplotou plynu (T). Pokud bude objem konstantní, bude mít zvýšení teploty za následek úměrné zvýšení tlaku. Pokud bude tlak konstantní, zvýšení teploty bude mít za následek úměrné zvýšení objemu. Naopak pokud se objem sníží, a tlak zůstane konstantní, teplota se bude snižovat. Tlak a objem přímo ovlivňují teplotu stlačeného vzduchu a jsou si navzájem nepřímo úměrné. Vztahy vlastností plynů jsou velice důležité v oblasti spalovacích motorů. Při aplikaci zákona o ideálním plynu na kompresor turbodmyhadla je velice důležité, protože konstrukce jednotlivých částí turbodmyhadla je uzpůsobena vlastnostem plynů, ať už hnacích turbodmyhadlo, nebo plynů turbodmyhadly stlačovaným. [1] []

Kompresory turbodmychadel mají konstrukční limity ve vztahu k tomu, jak dobře fungují při účinném stlačování nasávaného vzduchu. Každý kompresor turbodmyhadla má svojí optimální účinnost proudění, maximální průtokovou kapacitu (bod přesycení), nad kterou turbodmyhadlo ztrácí účinnost. Každý kompresor má také bod minimální průtokové kapacity, pod kterým se kompresor začne zastavovat a ztrácet efektivitu. Když kompresor pracuje ve své maximální účinnosti v rámci svého maximálního průtokového rozsahu, je tato účinnost vyjádřena, jako procento toho, jak blízko kompresor stlačuje plyn, do podoby pro splnění matematických požadavků ideálního plynu. Pokud by byl kompresor s účinností 100 %, mohla by se výstupní hodnota plynu vypočítat pouze na základě znalosti vstupní teploty stlačovaného plynu a tlaku plynu po stlačení kompresorem turbodmyhadla. Takový kompresor by se nazýval Adiabatický. Termín Adiabatický znamená bez zisku nebo ztráty tepla.[1] [18]

Když se tedy uvádí, že kompresor má úroveň účinnosti 76% znamená to tedy, že stlačuje vzduch se 76 procentní adiabatickou účinností. Účinnosti 100% však nikdy nelze dosáhnout, protože existuje spousta faktorů, které přidávají nežádoucí, ale nevyhnutelné teplo. Dalším faktorem je tření, které způsobují molekuly vzduchu, které se třou o vnitřní část komory kompresoru a lopatky kompresorového kola. Kompresor turbodmyhadla musí být navržen tak, aby splňoval rozsah objemového průtoku vzduchu, vyžadovaný motorem. Obecně platí, že rozsah objemového průtoku vzduchu se pohybuje nad 65%. Pokud je rozsah objemového průtoku vzduchu pod 65%, vzniká přebytek tepla ve stlačovaném vzduchu, což způsobuje hodně dalších problémů. [1] [4] [18]

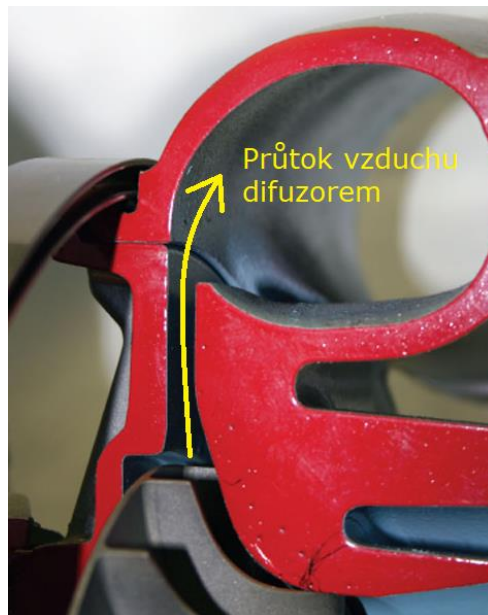
3.6.1 Kompresorová skříň

Kompresorová skříň bývá vyrobená ze slitin hliníku. Takzvaná difuzorová část je velmi důležitou součástí celkové konstrukce kompresorové skříně. Samostatný difuzor není součástí, ale spíše kanál optimalizovaný pro průtok vzduchu, který opouští kolo kompresoru na cestě k výstupu kompresorové skříně. Hlavní funkcí difuzoru je přeměnit rychle stlačený vzduch o vysoké rychlosti, na vzduch se statickým tlakem. Většina difuzorů používaných v turbodmychadlech v automobilovém průmyslu, je typ tvořený rovnoběžnými stěnami mezi krytem kompresoru a čelem ložiska skříně. Difuzor musí mít hodnotu minimálního průměru, aby bylo docíleno vlivu na vysoce turbulentní vzduch, který opouští kolo kompresoru. Toto je důvod, proč je vnější velikost kompresorové skříně mnohem větší než průměr samostatného kompresorového kola. Kompresorová skříň musí mít dostatečný prostor pro difuzor. [1]

Rozlišujeme dva druhy difuzorů, a to bezlopatkový a s lopatkami. Většina difuzorů používaných v automobilovém průmyslu je bezlopatkových. Difuzor bezlopatkového typu je tvořený paralelními stěnami mezi kompresorovou skříní a čelem pouzdra ložiska, nebo těsnicí deskou, v závislosti na typu konstrukce turbodmyhadla. Difuzory s lopatkami se nepoužívají v aplikacích pro kompresorové skříně turbodmyhadla automobilu, z důvodu omezeného rozsahu průtoku vzduchu. Výběr typu difuzoru se liší požadavkem průtoku vzduchu. Lopatkové difuzory jsou velice efektivní, pouze však pro specifický průtok vzduchu. Jakmile je hranice optimálního průtoku vzduchu překročena, lopatkový difuzor velice rychle ztrácí účinnost. Pokud se kompresorové kolo točí velice rychle, dochází ke změnám úhlů, v jakých vzduch opouští lopatky kompresorového kola, tudíž se mění i úhel, pod kterým vzduch dopadá na lopatky difuzoru. Lopatky pak tedy blokují průtok vzduchu, což způsobuje předčasné přesycení kompresoru. [1] [2]



Obrázek 19 příklad lopatkového difuzoru [1]

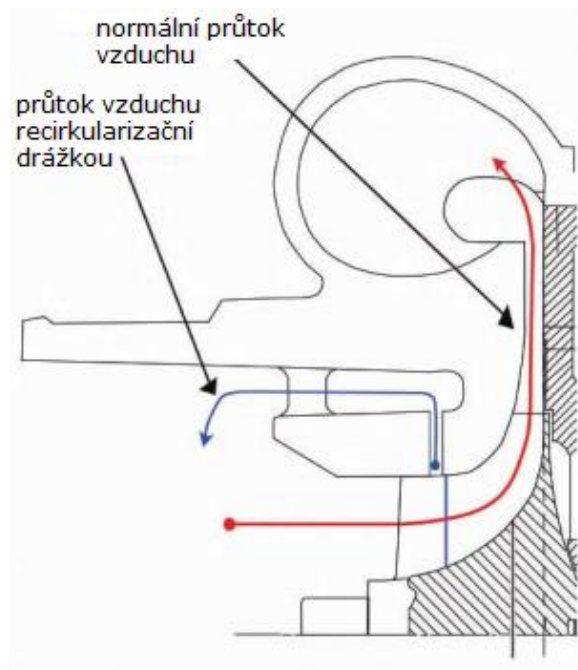


Obrázek 20 Bezlopatkový difuzor [1]

Kompresorová skříň, stejně jako kompresorová komora má určitou hodnotu A/R poměru. U kompresorové skříně tato hodnota naproti kompresorové komoře není tolik důležitá, protože kompresorová skříň není tolik náchylná na změnu A/R poměru. [1]

Důležitou součástí kompresorové skříně, je také takzvaná recirkulační drážka vyříznutá po celém obvodu kolem kompresorového oka (přívodu vzduchu ke kolu kompresoru). Tato drážka odvádí vzduch přímo od lopatek kompresoru, a tím pomáhá stabilizovat proudění vzduchu, když kompresor pracuje v blízkosti bodu minimálního průtoku vzduchu, nebo minimálního poměru plicního tlaku. Proud vzduchu může být v těchto podmínkách

nepravidelný až trhaný, může také docházet k jeho nadměrnému zahřívání, což může způsobovat špatný chod motoru. Recirkularizační drážka pomáhá těmto jevům předejít a tím i vylepšit plynulost chodu motoru. Princip funkce recirkularizační drážky spočívá v tom, že vzduch je odváděn drážkou přímo od lopatek kompresorového kola, a je vracen kanálkem zpátky ke vstupu nasávaného vzduchu do kompresoru. Takto recirkulovaný vzduch stlačený více, než jedenkrát se zahřívá, což snižuje celkovou účinnost kompresoru. Tento jev je však kompenzován tím, že recirkularizační drážka posouvá hranici minimálního průtoku vzduchu níže, tím pádem se zlepšuje celková charakteristika celého kompresoru. Recirkularizační drážka může také být zdrojem nežádoucích vysokofrekvenčních zvuků, které jsou tvořené tokem vzduchu recirkularizační drážkou. Tomuto nežádoucímu jevu je možné předejít navýšením počtu lopatek kompresoru procházejících kolem recirkularizační drážky, což posune frekvenci nežádoucích zvuků nad slyšitelnou úroveň. [1] [3]



Obrázek 21 schéma průtoku vzduchu recirkularizační drážkou [19]

Tvar kontury skříně kompresoru je stejný jako tvar kontury kola kompresoru. Vůle mezi kolem kompresoru a kompresorovou skříní se pohybuje mezi 0.2 až 0.3mm. [1] Tato vůle je velmi důležitá, protože velká vůle může způsobit ztrátu efektivity stlačování vzduchu, tedy ve ztrátu tlaku. Naopak velmi malá vůle může způsobit kontakt mezi kolem kompresoru a kompresorovou skříní, i během operace turbodmyhadla při plných otáčkách. Tento kontakt by mohl způsobit explozi celé kompresorové části turbodmyhadla. Pokud však zatočíme kolem

kompresoru rukou nebo prstem je možné ucítit jemný kontakt mezi kompresorovou skříní a kolem kompresoru. Není to však z důvodu špatné konstrukce turbínové skříně, či turbínového kola. Tlak oleje v ložiskové části turbodmychadla vycentruje rotující hřídel, tak že nedojde ke kontaktu kompresorové skříně a kompresorového kola pokud je jejich tolerance správná. [3]

3.6.2 Kompresorové kolo

Kolo kompresoru turbodmychadla bývá velmi snadno pochopitelné, protože se jedná v podstatě o vzduchovou pumpu. Kolo kompresoru je radiální kompresor, protože nasávaný vzduch je po stlačení otočen o 90 stupňů. Naproti axiálnímu kompresoru, který nasávaný vzduch stlačuje a vyfukuje ve stejném směru, ve kterém vzduch do kompresoru proudí. Axiálních kompresorů je například využíváno v proudových motorech. [1]

Kolo kompresoru má několik velice důležitých oblastí, které se od sebe různě liší, což umožňuje správný výběr kompresoru podle průtoku vzduchu k parametrům motoru. Tyto změny jsou prováděny výrobcem, a proto se prodává více turbodmychadel jednoho typu provedení s jiným kompresorem. Většina kol kompresorů je vyrobena ze slitin hliníku. Životnost kola kompresoru je odvislá od velikosti otáček, protože vysoké otáčky namáhají materiály, ze kterých je kolo kompresoru vyrobeno. Výdrž kola kompresoru tedy záleží na stylu jízdy (ostatně jako celého turbodmychadla). Celkově součástky v turbodmychadlu bývají dimenzované na průměrný nájezd 150 000km. Tento problém nebývá tak častý v motorsportu kde je kolo kompresoru dimenzované na vyšší námahu, a nemá mnohakilometrové nájezdy. Velké opotřebenění kola kompresoru může vést i k jeho roztržení. V kompresorových kolech pro závodní turbodmychadla bývají používány kompresorová kola vyrobená z titanu, obráběná na strojích s 5. osým obráběním. Taková kola bývají velice drahá oproti kompresorovým kolům pro komerční užití, ale vyřeší problémy s opotřebením.[1]

Kvůli velice velikým otáčkám musí být kolo kompresoru velice dobře vyváženo. Vyvážení kola kompresoru turbodmychadla se provádí ve dvou rovinách: přední a zadní základna. Měření probíhá pomocí speciálních měřících přístrojů, kde jsou definovány tyto 2 roviny. Toto vyvážení bývá definováno výrobcem, který na základě provozních specifikací turbodmychadla určí maximální hodnoty momentu způsobeného nevyvážeností mezi přední stranou a zadní stěnou kompresorového kola. Vyvážení kola kompresoru musí být velice přesné, a většinou se udává s tolerancí kolem 0.071 Nmm (newton-milimetrů). Samotné vyvážení probíhá odebráním materiálu z přední strany a ze zadní stěny jak je vidět na obrázku 23 [1]



Obrázek 22 Kompresorové kolo na speciálním vyvažovacím přístroji [20]



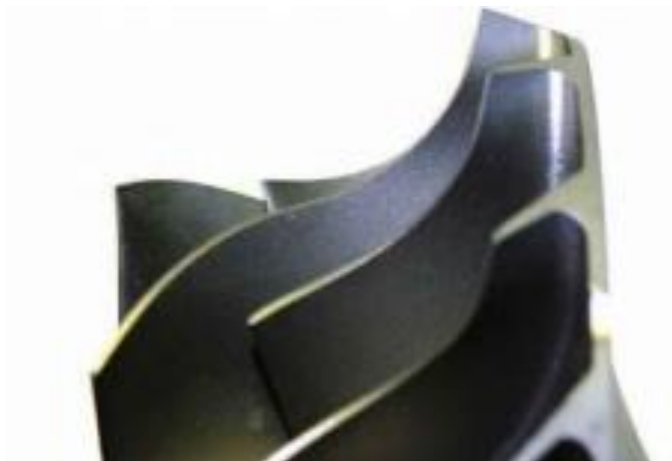
Obrázek 23 Vyvážené kompresorové kolo [1]

Kompresorových kol je mnoho druhů, každý typ je vhodný do jiného motoru podle otáček plnicích tlaků a spoustě jiných faktorů. Přímé radiální konstrukce kompresorového kola však dnes již není používána. Tento typ kompresorového kola byl schopen vytvořit velice vysoký tlak, ale postrádal účinnost. Pokud byl použit v kombinaci s lopatkovým difuzorem účinnost byla účinnost velmi vysoká, avšak za cenu velmi úzkého rozsahu průtoku vzduchu, což jej vyřazuje z použití v automobilu. Nejběžnějším provedením kompresorového kola je kolo s dozadu zakřivenými lopatkami. Tímto zakřivením je dosaženo větší účinnosti kompresoru, protože vzduch se zpomaluje a zvyšuje tlak na lopatkách kompresorového kola, ještě před vstupem do difuzoru kompresorové skříně. Dalším typem jsou kompresorová kola s plnými lopatkami (lopatky jsou všechny stejného tvaru a velikosti). Kompresorová kola

s plnými lopatkami nejsou vhodné pro použití, kde je velmi vysoký výkon, tudíž i plnicí tlaky, kterých dosáhneme vysokými otáčkami turbodmyhadla. Kompresorové kolo s plnými lopatkami je tedy vhodné do turbodmychadel s nižšími otáčkami, ačkoliv je schopné vyvinout o něco větší plnicí tlak s, malinko větší efektivitou než kompresorové kolo s dělenými lopatkami. Konstrukce kompresorového kola s dělenými lopatkami využívá kratší lopatky mezi každou velkou lopatku. Větší mezera mezi lopatkami umožňuje stlačovat více vzduchu při větších rychlostech. Kompresorové kolo s dělenými lopatkami je dnes hojně využíváno v turbodmychadlech pro automobilový průmysl. [2]

Zadní stěna kompresoru může být ve dvou provedeních úplná anebo jen částečná. Úplná stěna kompresorového kola dosahuje na konci stejného průměru jako celkový průměr kompresorového kola. Použití částečné zadní stěny odlehčuje celé kompresorové kolo, což jej dělá lépe reagujícím. Problémem částečné stěny kola kompresoru je ten že nedosahuje dostatečné pevnosti na to, aby mohla být použita konstrukce s dozadu zakřivenými lopatkami kola kompresoru. [1] [2]

Další technologií používanou při konstrukci kola kompresoru turbodmyhadla bývá prodloužení špičky lopatek kompresoru. Jedná se v podstatě o obrobení (seříznutí) spodní části lopatek od zadní stěny kompresorového kola. Toto seříznutí zvětší úhel mezi zadní stěnou kola kompresoru a spodní částí lopatek na hodnotu více než 90 stupňů, to vytváří o něco větší tlak vzduchu na větším průměru, což snižuje váhu na vnějším průměru. Moment setrvačnosti je velice citlivý na změny, pokud je dál od středu rotace. [2]

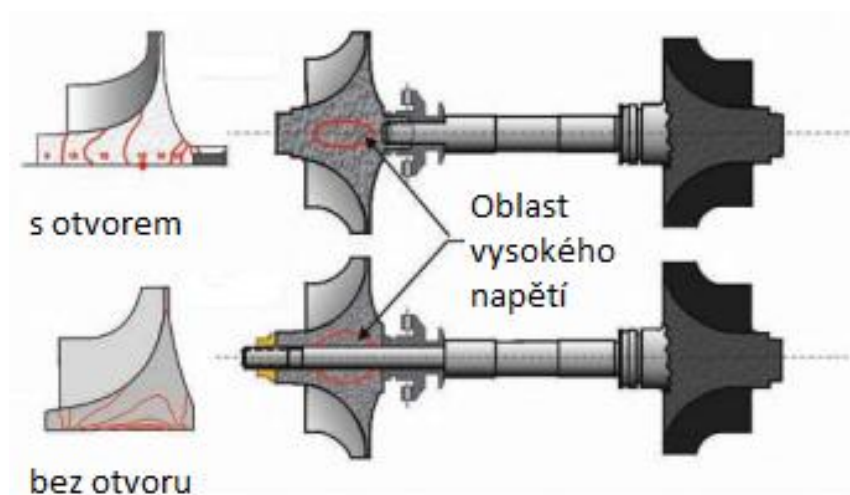


Obrázek 24 kompresorové kolo s prodlouženou špičkou lopatek [1]

Dalším konstrukčním problémem kola kompresoru turbodmyhadla, bývá díra nevyhnutelně vedoucí skrz celé kompresorové kolo. Díra slouží k upevnění kola kompresoru

na hřídel kola turbíny, kde je kompresorové kolo na konci připevněno matkou pomocí závitů na konci hřídele. Tato díra významně narušuje celkovou konstrukční pevnost kola kompresoru, protože prochází bodem s největším napětím, to způsobuje problémy při vysokých otáčkách turbodmychadla. Hliníkové slitiny, ze kterých je kolo kompresoru vyrobeno mají specifický počet cyklů, než se začnou vytvářet trhliny vlivem opakovaného namáhání. [1]

Nižší frekvence každého namáhacího cyklu snižuje celkový počet cyklů, který je kompresorové kolo schopno vykonat. Například kompresorové kolo pracující v rozmezí 40000 až 80000 otáček za minutu vydrží celkově více namáhacích cyklů než kompresorové kolo pracující v rozmezí 6000 až 110000 otáček za minutu. Tento problém se tolik netýká turbodmychadel u automobilu, jako turbodmychadel ve vznětových motorech používaných v užitkových a nákladních vozech. Tento problém lze vyřešit použitím jiného materiálu například titanu, to ale zvětšuje výrobní náklady na neúnosné hodnoty pro sériovou výrobu. Firma Garrett vyřešila tento problém tak, že si nechala patentovat kompresorové kolo bez díry, což nejen vyřeší již zmíněný problém, ale zároveň se tímto výrazně prodlouží životnost kola kompresoru a to až pětinasobně oproti klasické koncepci. Toto konstrukční řešení sebou nese nevýhodu v podobě zvýšení výrobních nákladů, kvůli nutnému použití složitější technologie připevnění kompresorového kola ke hřídeli kola turbíny. [1] [13]



Obrázek 25 zobrazení rozložení sil působících v oblasti vysokého napětí [1]

3.7 Ložisková část

Ložisková část turbodmychadla musí být konstrukčně velmi dobře vyřešena, protože musí velice dobře fungovat v rychlostech přesahujících 100000 otáček za minutu. Ložisková část je také vystavena mnoha silám působícím v radiálním i axiálním směru a vysokým teplotám. Další hrozbou pro celou ložiskovou část může být znečištění oleje, které může mít za následek permanentní poškození celého turbodmychadla vlivem velikého opotřebení. Znečištění oleje bývá nejčastější příčinou poškození turbodmychadla, proto je nezbytně nutné pravidelná výměna oleje turbodmychadla. [2]

3.7.1 Ložisková skříň

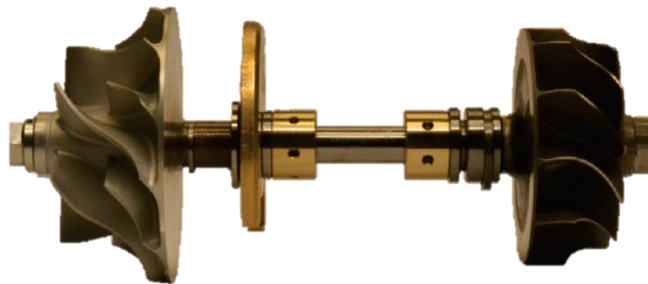
Ložisková skříň drží všechny součásti, jako jsou ložiska a těsnění pohromadě, a také přivádí olej k ložiskům. Ložisková skříň je vyrobená ze železné litiny. Ložisková skříň je chlazená vzduchem nebo přímo olejem, existují také provedení s vyvrtanými kanály pro chlazení vodou. Ložisková skříň také drží pohromadě mechanismy pro kontrolu oleje, a různé konstrukční řešení pro odvod tepla z oleje, aby se nezačal pálit po zastavení motoru. Dalším problémem může být nahromadění oleje na jednom místě po zastavení motoru, což může mít za následek nežádoucí průnik oleje do motoru, nebo do prostoru výfuku, výsledkem je nežádoucí kouř vycházející z výfuku. Řešením tohoto problému je umístění centra vypouštění oleje 20 stupňů od vertikální pozice. [1]



Obrázek 26 ložisková skříň turbodmychadla [21]

3.7.2 Kluzná ložiska

Sestava kluzných ložisek je nejčastěji tvořena třemi bronzovými díly a to dvěma radiálními ložisky a jedním plochým axiálním ložiskem. Radiální ložiska bývají plovoucí kluzná s vůlí mezi hřídelí kola turbíny, průměrem ložiska a uložením v ložiskové skříni. Ložiska rotují vůči ložiskové skříni a vůči hřídelí kola turbíny, to rozděluje tření mezi součástmi na vnější a vnitřní část ložiska, čímž se chytře sníží opotřebení všech rotujících součástí středového složení turbodmychadla. Ložiska mají asi třetinovou rychlost otáček než hřídel kola turbíny. Radiální ložiska jsou ve své pozici zajištěna pomocí distančního kroužku, ve kterém jsou zároveň otvory pro mazání. Dalším typem zajištění můžou být pojistné kroužky na ložisku, to je levnější řešení, zároveň ale neumožňuje tak dobrý přívod oleje přímo do oblasti tření. Dalším dílem je axiální ložisko uložené v kapsovém prostoru ložiskové skříně. [1] [2]



Obrázek 27 Uložení hřídele turbodmychadla ve valivých ložiskách [22]

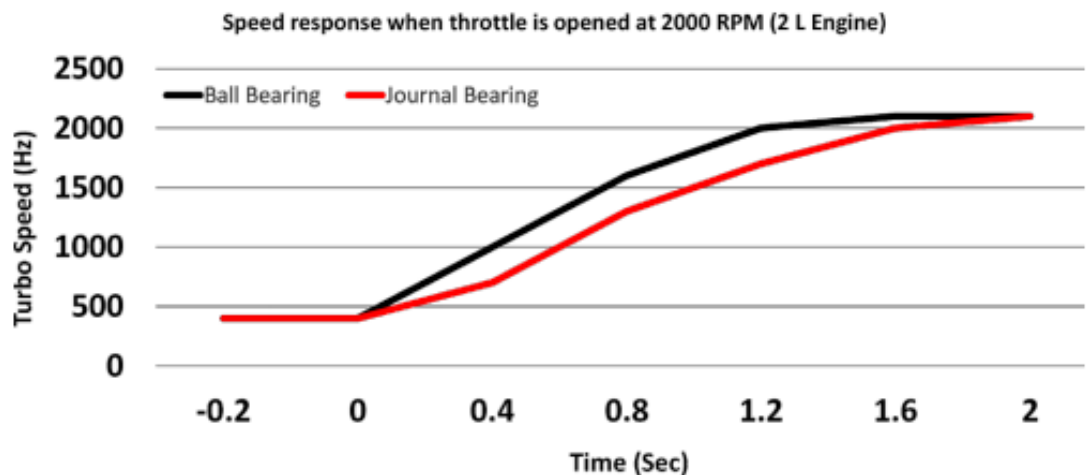


Obrázek 28 Sestava kluzných ložisek [1]

3.7.3 Valivá ložiska

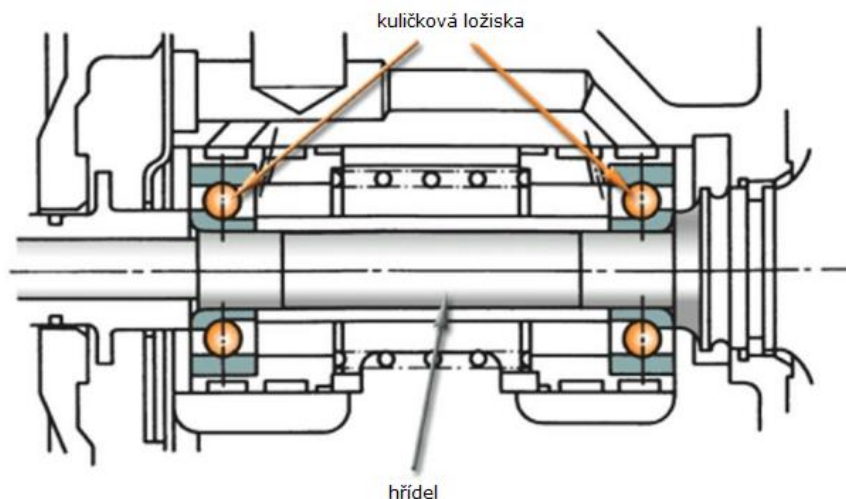
Kluzná ložiska jsou dnes nejrozšířenější v turbodmychadlech především kvůli své výrobní ceně, jejich alternativou jsou stále, užívanější kuličková ložiska. Předností valivých ložisek je větší odolnost vůči horším provozním podmínkám. Další nepřehlédnutelnou výhodou valivých ložisek je snížení tření o 40%. Toto tření působí na celou rotující část, a snižuje efektivitu celého turbodmychadla. Použitím valivého ložiska také snižujeme tzv. viskózní tření o olej, kterého není u kuličkového ložiska potřeba tolik. Snížením tření o olej umožníme rychlejší reakci turbodmychadla o 15% oproti kluznému ložisku. [1]

Rozdíly mezi typy použitých ložisek můžeme také vidět na uvedeném obrázku dole, kde je vidět test rychlosti náběhu otáček u identického turbodmychadla, jediným rozdílem byl typ použitého ložiska. Test probíhal náhlým sešlápnutím plynového pedálu při 2000 otáčkách za minutu u zážehového motoru o objemu 2 litrů. Podíváme-li se na graf uvidíme, že rozdíl je patrný už 0,4 vteřiny po sešlápnutí plynu, kdy otáčky při použití kluzných ložisek jsou 42000 ot/min, při použití kluzných jsou ve stejnou dobu otáčky už na hodnotě 72000 ot/min. Rozdíly mezi ložisky se vyrovnají až ve druhé vteřině. [23]



Obrázek 29 Graf odezvy turbodmychadla při použití kluzných a valivých ložisek [23]

Nevýhodou valivých ložisek bývá jejich složitá konstrukce a vysoká cena. Valivá ložiska však snesou až desetkrát větší zatížení než klasická kluzná ložiska, a mají mnohem menší nároky na mazání, což nejen zvyšuje efektivitu zmenšením tření o olej, ale zároveň zvyšuje celkovou efektivitu, protože je možné použít menší olejové čerpadlo. [2] [1] [23]



Obrázek 30 Uložení hřídele turbodmychadla v kuličkových ložiskách [25]



Obrázek 31 Sestava valivých ložisek turbodmychadla [24]

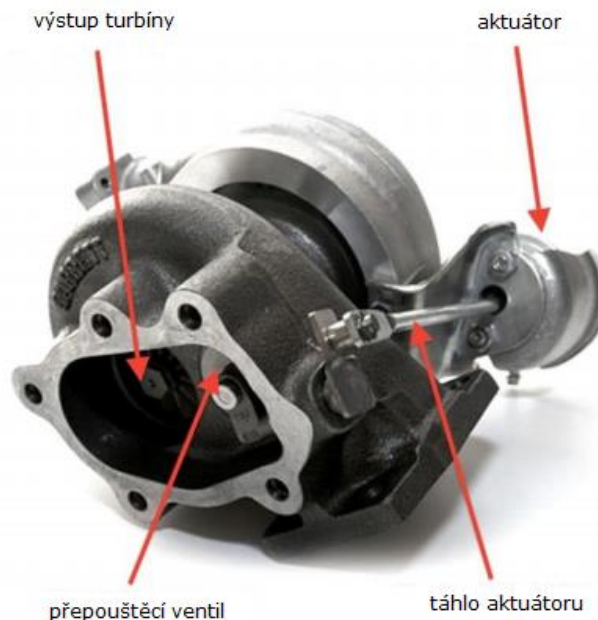
3.8 Regulace turbodmychadla

Úkolem regulace turbodmychadla je ovlivnit jakým způsobem spaliny prochází turbínovou částí turbodmychadla. Regulace turbodmychadla zlepšuje celkovou charakteristiku a reakci turbodmychadla na sešlápnutí plynu tím pádem minimalizuje turbo efekt (turbo lag). Regulace turbodmychadla také navyšuje výkon v návaznosti s točivým momentem a má dokonce vliv na spotřebu paliva. Regulací turbodmychadla se zlepšuje schopnost reakce na změnu zatížení při zachování vysokého výkonu. [4]

3.8.1 Obtokový ventil

Obtokový ventil turbodmychadla je druh pasivní regulace turbodmychadla a plní velmi důležitou funkci. Obtokový ventil turbodmychadla je v podstatě ventil, který uvolňuje

přebytečný tlak výfukových plynů na kole kompresoru. Při použití obtokového ventilu je konstrukce turbíny navržena tak aby se co nejvíce vzduchu dostalo do motoru už při nízkých otáčkách. Optimalizace pro co největší průtok vzduchu při nízkých otáčkách však způsobuje přehlcení turbodmyhadla ve vyšších otáčkách, v tomto momentě začne plnit svou funkci obtokový ventil, jakmile tlak stlačeného vzduchu v plnicím potrubí překročí určitou hodnotu, otevře se klapka regulačního ventilu, která je ovládaná pomocí aktuátoru a část výfukových plynů je místo na kompresorové kolo odvedena pryč do výfuku. Tímto můžeme dosáhnout požadovaný průběh točivého momentu motoru kontrolou tlaku stlačeného vzduchu za kompresorem. Konstrukce obtokového ventilu je vesměs jednoduchá. Většinou bývá obtokový ventil integrovaný přímo v turbínové skříni. Obtokový ventil je však ztrátový mechanismus, protože část výfukových plynů není využita a neprochází přes turbínové kolo. [1] [6]



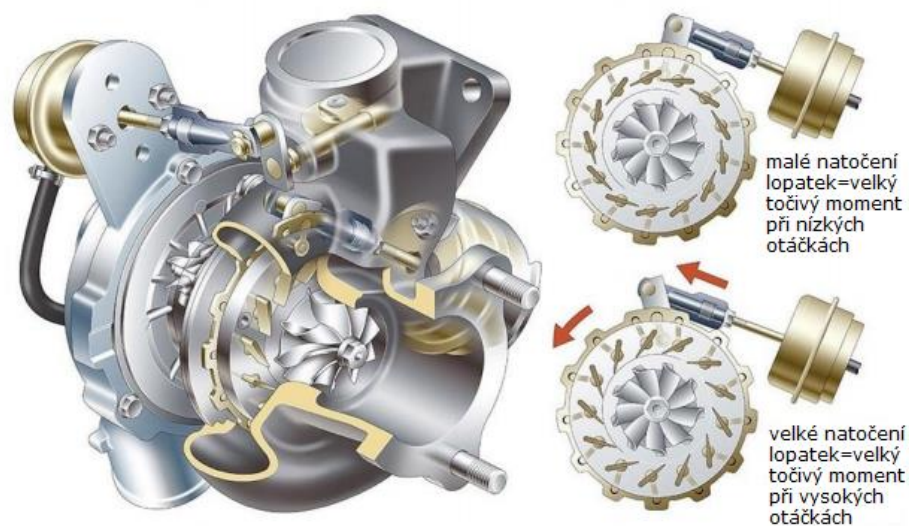
Obrázek 32 Turbodmyhadlo s integrovaným obtokovým ventilem [garett.com]

3.8.2 Proměnná geometrie rozváděcích lopatek turbíny (VNT)

Proměnná geometrie rozváděcích lopatek turbíny (z ang. Variable Nozzle Turbine) je alternativou obtokového ventilu, v případě VNT se jedná o aktivní regulaci plnicího tlaku. Dalším rozdílem mezi regulací obtokovým ventilem a VNT je, že při použití VNT turbínou stále protéká maximální průtok výfukových plynů. Natočením lopatek se změní plocha, přes kterou se spaliny dostávají na kolo turbíny. [1]

Při malém natočení rozváděcích lopatek je malý průřez, kterým plyny proudí úzký, což zvyšuje tlak před lopatkami. Toto zvýšení tlaku výfukových plynů zvýší rychlost, jakou dopadají na lopatky turbíny, tím pádem zvyšují otáčky celého turbodmyhadla, což umožní dosáhnout potřebného plnicího tlaku, při nízkých otáčkách motoru. Tímto získáme vysoký točivý moment již v nízkých otáčkách motoru.[1]

K velkému natočení lopatek dochází při velkém množství výfukových plynů ve větších otáčkách motoru, kdy je zapotřebí snížit tlak výfukových spalin tím i jejich rychlost se kterou vstupují na lopatky kola turbíny. Při velké rychlosti výfukových spalin vstupujících na lopatky kola turbíny ve vysokých otáčkách by mohlo dojít k přetočení celé rotující části turbodmyhadla. Velkým natočením rozváděcích lopatek dosáhneme vysokého točivého momentu i ve vysokých otáčkách motoru. VNT mechanismus tedy využívá toho, že pokud změníme rychlost spalin, se kterou spaliny vstupují na lopatky turbínového kola, můžeme zvýšit nebo snížit otáčky turbodmyhadla, tím pádem snížit nebo zvýšit plnicí tlak. [1] [4]



Obrázek 33 VNT mechanismus turbodmyhadla [8]

3.8.3 Proměnná šířka statoru turbíny (VGT)

Dalším typem regulace turbodmyhadla je proměnná šířka statoru turbíny (z ang. Variable Geometry Turbine). Systém VGT podobně jako VNT pracuje s rovnoměrně rozmístěnými rozváděcími lopatkami, ty se však u systému VGT nenatáčejí, ale jsou s posuvným kroužkem zasouvány do prstence, který má stejný tvar jako zasouvané lopatky. Tímto zasouváním a vysouváním je docíleno změny A/R poměru turbíny, čímž měníme, jakou

rychlostí výfukové spaliny proudí na lopatky kola turbíny. Otáčky turbodmyhadla mají vliv na plnicí tlak a jsou monitorovány snímačem umístěným buď na vstupním hrdle, nebo uprostřed rotoru turbodmyhadla v ložiskové skříni. Podle otáček se určuje jak moc zasunuté, nebo vysunuté lopatky na posuvném kroužku budou do prstence. [1]



Obrázek 34 Turbodmyhadlo od fy. Holset s mechanismem VGT [37]

3.8.4 Regulační systémy a jejich ovládací prvky (aktuátory)

Podtlakové a přetlakové aktuátory byly prvními a základními prvky používanými pro regulaci. Jejich hlavní funkcí je polohování regulace. Fungují na základě principu lineárního pohybu táhla, jehož délku lze upravit pomocí aretační matice a otočením druhé části táhla. Jedna strana táhla je připevněna na raménko, které je na druhém konci opatřeno čepem. Tento čep je umístěn přímo v turbíně a ovládá prsteneц u VNT regulace, který mění směrování lopatek otáčivým pohybem, nebo u WG regulace zvedá obtokový ventil. Přetlakové aktuátory jsou méně náchylné na netěsnosti než podtlakové. Na tyto aktuátory se často instalují snímače polohy. Co se týče přesnosti ovládní, nejsou tak přesné jako elektrické aktuátory.

Elektrické aktuátory představují významný přínos pro řízení regulace. Tento ovládací prvek se osvědčil u nových automobilů s přeplňovaným spalovacím motorem. Díky jejich vysoké přesnosti se hojně využívají. Elektrický krokový motor ovládá táhlo. [27]



Obrázek 35 přetlakový aktuátor [26]



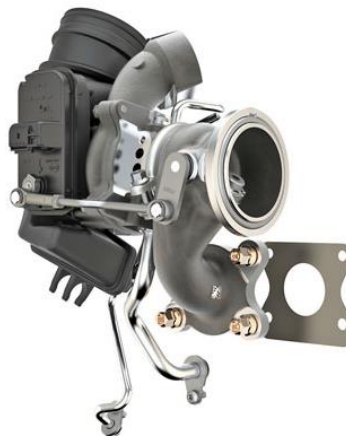
Obrázek 36 turbodmychadlo s elektrickým aktuátorem [28]

3.9 Příklad moderního turbomotoru VW 1.0 TSI

Na obrázcích dole vidíme v zástupce přesně takového motoru. Jedná se o hojně využívaný motor 1.0 TSI s výkonem 85kw a kroutícím momentem 200Nm, tento agregát můžeme najít pod kapotou řady modelů značek Audi, Volkswagen, Škoda auto a Seat. Motor je navržen tak aby pomocí turbodmychadla s proměnnou geometrií dosahoval vysokého točivého momentu už od nízkých otáček. Motor je dodáván ve třech výkonnostních variantách 70, 81 a 85kw. Maximální plnicí tlak činí 160kPa. Všechny varianty tohoto motoru s výkonem větším než 70kw mají turbodmychadlo s turbínovou skříní vyrobenou teple odolnější austenitické ocelolitiny, která vydrží teplotu výfukových plynů až 1050 °C. Obtokový ventil je zde elektronicky regulovaný a turbodmychadlo je vodou chlazené. Celková hmotnost celého motoru bez dvoumotového setrvačníku činí pouhých 78 kg. [9]



Obrázek 37 tříválcový zážehový motor VW Group 1.0 TSI [9]



Obrázek 38 Turbodmychadlo od firmy BorgWarner z motoru 1.0 TSI [9]

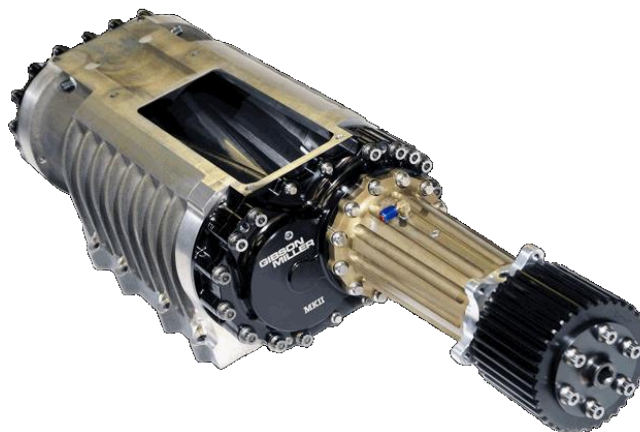
3.10 Kompresor v porovnání s turbodmychadlem

Jak již bylo zmíněno, úkolem přeplňování obecně je zvětšit objem vzduchu který se dostává do spalovacího prostoru motoru. Kromě přeplňování užitím přeměny energie výfukových spalin na otáčivý pohyb pomocí turbodmychadla, o kterém projednává tato práce, také existuje alternativa v podobě mechanického kompresoru. Tyto kompresory jsou poháněny přes řemen od klikové hřídele, jedná se tedy o mechanismus ztrátový, který odebírá na rozdíl od turbodmychadla část výkonu motoru na pohon kompresoru.

Nejčastěji používanými druhy mechanicky poháněných kompresorů jsou:

- Rootsova dmychadla
- Lysholmova dmychadla
- Spirálová dmychadla
- Radiální dmychadla

Regulace plnicího tlaku kompresoru je prováděna buď obtokovým ventilem, nebo odpojením náhonu kompresoru přes spojku. Výhradnou oblastí využití mechanického kompresoru jsou zážehové motory, kde někdy bývá užití turbodmychadel komplikované, kvůli velké tepelné zátěži turbodmychadla, díky užívání energie horkých výfukových spalin.



Obrázek 39 Příklad mechanicky poháněného Rootsova kompresoru [29]

Výhody a nevýhody mechanického kompresoru oproti turbodmychadlu:

Výhody:

- funguje rovnoměrně v celém spektru otáček
- na rozdíl od turbodmychadla dosahuje skoro rovnoměrnou křivku výkonu
- kompresor reaguje okamžitě (bez časové prodlevy)
- menší nároky na údržbu

Nevýhody:

- výkonnostní ztráty motoru (odebírání jeho výkonu)
- vyšší spotřeba paliva
- vyšší cena
- nižší plnicí tlak

[29] [1] [27]

4 Závěr

Celkovým cílem této bakalářské práce bylo poskytnout podrobný pohled na zásadní milníky v oblasti historického vývoje turbodmychadla a dále konstrukční řešení jednotlivých prvků turbodmychadel.

První část naší práce se zaměřila na sledování historického vývoje turbodmychadel, který přinesl zásadní inovace a revoluce v oblasti automobilového průmyslu. Studium historických trendů a klíčových milníků nám poskytlo důležité poznatky o evoluci turbodmychadel od jejich počátků přes první objevy až po současnost.

Druhá část naší práce se zaměřila na podrobnou analýzu konstrukcí jednotlivých částí turbodmychadel. Skrze studium dostupných informací z odborné literatury a článků byly zkoumány prvky a součásti turbodmychadel, včetně nejdůležitějších částí jako jsou kompresory, turbíny, ložiska a regulační mechanismy. Tato analýza nám umožnila porozumět složitosti konstrukce turbodmychadel a identifikovat klíčové faktory ovlivňující provozní podmínky, volby výběru materiálů a jednotlivých konstrukčních řešení.

Na základě provedené analýzy bylo dosaženo k řadě důležitých závěrů. Bylo možno identifikovat specifické vlastnosti jednotlivých částí turbodmychadel a jejich vzájemné interakce, což poskytlo hlubší porozumění fungování těchto zařízení a případné možnosti jejich optimalizace například v praxi.

V závěru by bylo vhodné doplnit, že téma turbodmychadla lze i v současné době velice snahy o elektrifikaci v oblasti automobilového průmyslu považovat za velmi důležité. V aktuální době nekompromisních emisních limitů a nařízení nutí tyto okolnosti výrobce navrhnout motor s nízkou spotřebou paliva a nízkými emisemi oxidu uhličitého. Toho výrobci dosáhnou motorem s malým zdvihovým objemem, který si zachovává veškeré výkonnostní parametry a požadovanou dynamiku.

Motor s menším zdvihovým objemem má menší tření, setrvačnost a je lehčí než motor o vyšším objemu, a to má za následek nižší spotřebu paliva. Tento pojem se nazývá downsizing. Těchto vlastností lze dosáhnout pouze s motorem opatřeným turbodmychadlem. Zmíněné vlastnosti jsou klíčové pro to, aby automobil splnil veškeré nároky na emisní předpisy a díky tomu uspěl na dnešním náročném trhu.

Ačkoliv je již daný zákaz prodeje aut se spalovacími motory po roce 2035 v EU, v jiných částech světa dle mého soudu budou i po tomto datu tvořit turbodmychadla nedílnou součást automobilového průmyslu, protože zde existuje řada sociálně-technologických faktorů, které v jiných zemích světa elektrifikaci neumožňují a dlouhou dobu umožňovat nebudou, která i jako

taková nikdy nebude dle mého plně schopna nahradit spalovací motory. Domnívám se, že vylepšování a vývoj turbodmychadel bude v menší míře pokračovat i nadále, díky mnohaletému know-how, které se postupem času v západním světě na toto téma vybudovalo.

5 Seznam použitých zdrojů

- [1] MILLER, Jay K. Turbo: real world high-performance turbocharger systems. NorthBranch, MN: CarTech, c2008, 160 p. ISBN 19-324-9429-4
- [2] BELL, Corky. Maximum boost: designing, testing, and installing turbocharger systems. Cambridge, MA: Robert Bentley Automotive Publishers, 1997, vi, 250 p. ISBN 08-376-0160-6
- [3] MACEK J., KLIMENT V., 2001: Spalovací turbíny, turbodmychadla a ventilátory. Vyd. 3. Praha: ČVUT. 206 s. ISBN 80-01-02275-7
- [4] HROMÁDKO, Jan. Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0
- [5] A Look At Twin Scroll Turbo System Design - Divide And Conquer? [online]. 2009 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <http://www.superstreetonline.com/howto/engine/modp-0906-twin-scroll-turbo-system-design/>
- [6] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. Automobily: Motory. 7. vyd. Brno: AVID, 2012, 179 s. ISBN 978-80-87143-21-6
- [7] <https://www.treadstoneperformance.com/blog/compressor-wheel-aerodynamics-and-benefits-of-the-efr/>
- [8] <https://dsportmag.com/the-tech/twin-scroll-vs-single-scroll-turbo-test-the-great-divide>
- [9] https://www.automobilrevue.cz/rubriky/clanky/technika/trivalec-volkswagen-group-1-0-tsi-karierni-postup_45572.html
- [10] https://library.e.abb.com/public/90afc44dee46dde9c12572ff002fc62c/85-90%202M750_ENG72dpi.pdf
- [11] FUGLEVIČ, Daniel. Oldsmobile Jetfire měl V8 turbo už v 60. letech. Sliboval zázraky, dopadl zle [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/oldsmobile-jetfire-v8-turbo-wiki-historie>

- [12] MACEK, J. – ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STROJNÍ FAKULTA. Spalovací motory. I. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03618-1
- [13] Turbo Tech 101: Basic: Understanding the Parts of the Turbocharger. PDF. 1. Garrett Motion, 2019.
- [14] <https://www.rtcadcam.in/>
- [15] <https://www.autonorma.cz/blog/post/26-jaky-je-rozdil-mezi-mechanickym-kompresorem-a-turbodmychadlem>
- [16] <https://www.auto.cz/velky-prehled-vsech-typu-turbodmychadel-v-cem-se-lisi-98365>
- [17] <http://fountainheadalloys.com/>
- [18] NEUBERGER, Pavel; ADAMOVSKEÝ, Daniel a ADAMOVSKEÝ, Radomír. Termomechanika. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007. ISBN 978-80-213-1634-8.
- [19] <https://www.ijert.org/research/industrial-centrifugal-compressors-design-validation-using-rapid-method-evolutionary-algorithms-to-predict-map-characteristics-evaluation-IJERTV8IS010027.pdf>
- [20] <https://hypergearturbos.com/product/compressor-wheel-and-turbine-shaft-balancing/>
- [21] <https://turbocentras.com/en/bearing-housings/1757-bearing-housing-bw-01-0047>
- [22] <https://www.mdpi.com/2075-4442/6/1/21>
- [23] <https://brturbo.ru/novosti/podshipniki-skolzheniya-protiv-sharikopodshipnikov.html>
- [24] <https://www.amazon.co.uk/Bearing-Bearings-Turbocharger-turbine-Industrial/dp/B0C8526JW6>
- [25] <https://blog.edgeautosport.com/how-to-choose-the-right-turbo-part-1>
- [26] <https://bofiracing.co.uk/forced-induction/turbocharging/wastegate-actuators/aftermarket-td04-turbocharger-actuator-8-psi/>

- [27] Přepřínování vozidlových motorů. Online, Bakalářská práce, vedoucí Ing. Vojtěch Kumbár, Ph. D. Brno: MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ AGRONOMICKÁ FAKULTA, 2016. Dostupné z: https://theses.cz/id/x6c403/zaverecna_prace.pdf. [cit. 2024-03-17].
- [28] <https://www.amazon.com/GELUOXI-Electric-Actuator-Replacement-BK3Q6K682AB/dp/B09QKM3LQF>
- [29] <https://www.mini-blowers.com/roots-blower-history.php>
- [30] HISTORY OF TURBOCHARGING. Online. Turbosmart. 2011. Dostupné z: <https://www.turbosmart.com/news/history-of-turbocharging/>. [cit. 2024-03-26].
- [31] How Sanford Moss's Turbosupercharger Saved GE's Fledging Aviation Business. Online. GE Aerospace. 2021. Dostupné z: <https://www.geaerospace.com/news/articles/people-product/how-sanford-moss-turbosupercharger-saved-ge-s-fledging-aviation-business>. [cit. 2024-03-26].
- [32] https://airandspace.si.edu/collection-objects/liberty-12-model-packard-moss-turbosupercharged-v-12-engine/nasm_A19660043000
- [33] Turbocharger. Online. Technical F1 dictionary. B.r. Dostupné z: <https://www.formula1-dictionary.net/turbocharger.html>. [cit. 2024-03-24].
- [34] MERCEDES-BENZ. Leading the way with diesel. Online. Mercedes-Benz media newsroom USA. 2013. Dostupné z: <https://media.mbusa.com/releases/leading-the-way-with-diesel>. [cit. 2024-03-24].
- [35] <https://readcars.co/2018/01/15/terrific-turbocharging-pioneers/attachment/11444/>
- [36] <https://www.autonorma.cz/blog/post/26-jaky-je-rozdil-mez-mechanickym-kompresorem-a-turbodmychadlem>
- [37] <https://www.cummins.com/heavy-duty-truck/must-have-class-8-heavy-duty-truck-engine-features>
- [38] <https://www.cruservis.cz/clanky.php?id=143>

6 Seznam obrázků

Obrázek 1 Švýcarský inženýr a vynálezce Alfred Büchi	3
Obrázek 2 Sanford Moss, který zkontruoval první praktický "tubokompresor" [31].....	5
Obrázek 3 zážehový motor Liberty V12 osazený tubopřeplyňováním [32].....	5
Obrázek 4 Oldsmobile Jetfire [Wikipedia - Greg Gjerdingen].....	7
Obrázek 5 nádobka s "tubo-raketovou kapalinou" [Wikipedia - Greg Gjerdingen].....	8
Obrázek 6 motor BMW M12/13 z vozů F1 [Wikipedia – Buschtrömmel].....	9
Obrázek 7 Mercedes Benz 300SD první sériově vyráběný turbodiesel [35].....	10
Obrázek 9 schéma přeplyňování turbodmychadlem [13]	12
Obrázek 10 Software CFturbo [14]	13
Obrázek 11 Základní prvky turbodmychadla [15].....	14
Obrázek 12 Příklad vysokého tepelného namáhání turbínové části turbodmychadla [20].....	16
Obrázek 13 Znázornění A/R poměru [2]	17
Obrázek 14 A/R poměr na vstupu výfukových plynů turbínové skříně [1].....	17
Obrázek 15 Graf průtoku výfukových spalin turbínových skříní [13]	18
Obrázek 16 Schéma provedení systému Twin scroll) [16].....	19
Obrázek 17 Porovnání křivek točivého momentu se systémem twin-scroll a bez něj [8]	20
Obrázek 18 Akcelerace testovaného automobilu ze 100 km/h [8]	21
Obrázek 19 schéma turbínového kola [1]	22
Obrázek 20 příklad lopatkového difuzoru [1].....	26
Obrázek 21 Bezlopatkový difuzor [1]	26
Obrázek 22 schéma průtoku vzduchu recirkularizační drážkou [19]	27
Obrázek 23 Kompresorové kolo na speciálním vyvažovacím přístroji [20]	29
Obrázek 24 Vyvážené kompresorové kolo [1]	29
Obrázek 25 kompresorové kolo s prodlouženou špičkou lopatek [1]	30
Obrázek 26 zobrazení rozložení sil působících v oblasti vysokého napětí [1].....	31

Obrázek 27 ložisková skříň turbodmyhadla [21].....	32
Obrázek 28 Uložení hřídele turbodmyhadla v kluzných ložiskách [22].....	33
Obrázek 29 Sestava kluzných ložisek [1]	33
Obrázek 30 Graf odezvy turbodmyhadla při použití kluzných a valivých ložisek [23]	34
Obrázek 31 Uložení hřídele turbodmyhadla v kuličkových ložiskách [25].....	35
Obrázek 32 Sestava valivých ložisek turbodmyhadla [24].....	35
Obrázek 33 Turbodmyhadlo s integrovaným obtokovým ventilem [garett.com].....	36
Obrázek 34 VNT mechanismus turbodmyhadla [3]	37
Obrázek 35 Turbodmyhadlo od fy. Holset s mechanismem VGT [holset.com].....	38
Obrázek 36 přetlakový aktuátor [26]	39
Obrázek 37 turbodmyhadlo s elektrickým aktuátorem [28]	39
Obrázek 38 tříválcový zážehový motor VW Group 1.0 TSI [9]	40
Obrázek 39 Turbodmyhadlo od firmy BorgWarner z motoru 1.0 TSI [9]	40
Obrázek 40 Příklad mechanicky poháněného Rootsova kompresoru [29].....	41