



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

DETEKCE A ANALÝZA DETONAČNÍHO SPALOVÁNÍ

KNOCK DETECTION AND ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PATRIK MELICHÁREK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN BERAN

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Patrik Melichárek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Martin Beran**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Detekce a analýza detonačního spalování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stěžejním úkolem práce je rešerše popisující problematiku detonačního spalování a zhodnocení moderních trendů v této oblasti.

Cíle bakalářské práce:

Rozbor problematiky detonačního spalování.

Příčina vzniku a negativní vlivy detonačního spalování.

Zhodnocení vlivu paliv na spalování vzhledem k detonačnímu hoření.

Současné možnosti detekce klepání.

Možnosti, jak zabránit negativním důsledkům detonačního spalování.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3rd edition. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. 641 s. ISBN 0768004950.

SKOTSKY, Alexander A. Automotive Engines. Springer Verlag, 2009, ISBN 978-3-642-00163-5.

JAN, Zdeněk a ŽDÁNSKÝ, Bronislav. Automobily (3): Motory. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. ISBN 978-80-87143-15-5.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato práce se věnuje detonačnímu spalování. První část práce tvoří rešeršní studie problematiky, která stručně srovnává normální a detonační spalování, představuje faktory ovlivňující náchylnost k jeho vzniku a zmiňuje metody jeho detekce. Dále popisuje negativní vlivy detonačního hoření a uvádí moderní řešení tohoto problému. Druhá část práce je věnována měření pro ověření platnosti teoretických znalostí této problematiky.

Summary

This thesis focuses on knocking combustion. First part of this thesis focuses on recherche of this topic, where is a brief comparison of normal and knocking combustion, introduction of factors that have impact on occurrence of knocking and discusses methods of knocking detection. It is followed by description of negative effects of knocking combustion and modern methods of its prevention. Second part consists of measurements to prove credibility of theoretical basis of the topic.

Klíčová slova

Detonační spalování, samovznícení, klepání, oktanové číslo, detekce klepání

Keywords

Knocking combustion, auto-ignition, knocking, octane number, knocking detection

MELICHÁREK, P. *Detekce a analýza detonačního spalování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 33 s. Vedoucí Ing. Martin Beran.

Prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Berana a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně 14. května 2019

Patrik Melichárek

Obsah

Úvod	3
1 Porovnání normálního a detonačního hoření	5
1.1 Normální hoření	5
1.2 Detonační hoření	5
1.2.1 Příčiny vzniku detonačního hoření	5
1.2.2 Typy exploze	6
1.2.3 Typy klepání z hlediska velikosti změny tlaku	7
2 Faktory ovlivňující vznik detonačního hoření	9
2.1 Vysoká teplota spalovacího prostoru	9
2.1.1 Způsob chlazení	9
2.1.2 Bohatost směsi	10
2.1.3 Teplota nasávaného vzduchu	10
2.1.4 Objem válce	11
2.1.5 Použité materiály	11
2.1.6 Překrytí ventilů	11
2.2 Tvar spalovacího prostoru	12
2.2.1 Antidetonační štěrbina	13
2.2.2 Poloha zapalovací svíčky	14
2.3 Předstih zážehu	14
2.3.1 Správný od zážehu (Z_{ZR})	15
2.3.2 Příliš brzký bod zážehu (Z_{ZF})	15
2.3.3 Příliš pozdní bod zážehu (Z_{ZS})	15
2.4 Oktanové číslo benzínu	16
2.4.1 Metody zjišťování oktanového čísla	16
2.4.2 Antidetonační přísady	16
2.5 Další možné příčiny detonačního hoření	16
2.5.1 Olej ve spalovacím prostoru	16
2.5.2 Karbon ve spalovacím prostoru	17
3 Detekce klepání	19
3.1 Čidlo tlaku ve válci	19
3.2 Piezoelektrické čidlo klepání	19
3.3 Optoelektronické čidlo klepání	20
3.4 Měření velikosti ionizačního proudu	20
4 Negativní vlivy detonačního hoření	21
5 Moderní trendy eliminování detonačního hoření	23
5.1 Vstřikování vody do sání	23
5.2 Ostřík mezichladiče stlačeného vzduchu	24

OBSAH

6	Měření detonačního hoření	25
6.1	Motor	25
6.2	Dynamometr	25
6.3	Přenos dat	26
6.4	Průběh měření	26
6.5	Výsledek měření	26
	Závěr	29
	Literatura	31
	Seznam použitých zkratk a symbolů	33

Úvod

U moderních spalovacích motorů, používaných nejenom v automobilech, je čím dál tím větší požadavek na snížení spotřeby paliva a emisí při zachování, nebo i zvýšení litrového výkonu motoru. Proto bývají dnešní motory zpravidla přeplňované a v porovnání se staršími konstrukcemi motoru mívají znatelně vyšší kompresní poměr. Díky tomu jsou ovšem daleko více náchylné ke vzniku detonačního hoření, které je nežádoucí a může způsobit fatální poškození motoru. Detonační spalování výrazně přetěžuje píst a celý klikový mechanismus. Z tohoto důvodu je nutné detonační hoření včas detekovat a co nejrychleji potlačit. Ke zjištění klepání motoru bývá na bloku motoru umístěno jedno či více čidel klepání. Pokud řídicí jednotka motoru dostane informaci, že dochází k detonačnímu spalování, tak začne snižovat předstih, dokud nenastane opět normální hoření.

Detonační hoření způsobuje řada faktorů, které mohou být dány konstrukcí motoru nebo provozními podmínkami. Konstrukční faktory, které mají vliv na náchylnost ke vzniku detonačního hoření, jsou například tvar spalovacího prostoru, kompresní poměr či poloha zapalovací svíčky. Tyto faktory jsou dány konstrukcí motoru a během provozu se nemění. Naopak provozní faktory, jež mohou způsobit klepání motoru, se mění během provozu prakticky neustále. Teplota a vlhkost nasávaného vzduchu, oktanové číslo benzínu nebo zatížení motoru jsou faktory, které se mohou během provozu měnit a pokud by tyto změny řídicí jednotka motoru nebrala v potaz, mohlo by dojít ke klepání motoru.

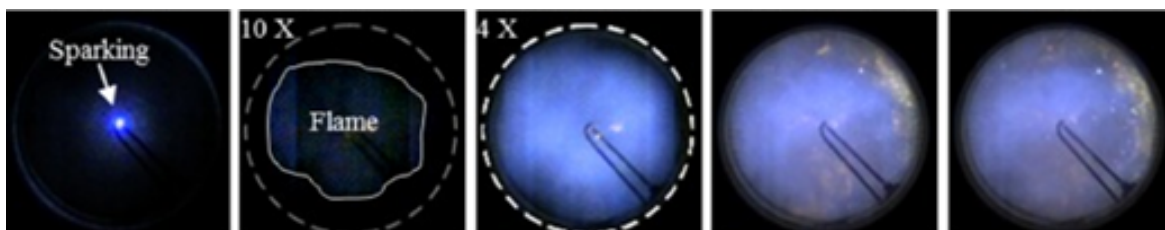
Jednotlivým faktorům ovlivňující možnost vzniku detonačního hoření se budeme věnovat v rešeršní části této práce. Vymezíme rozdíly mezi normálním a detonačním hořením. Rozebereme příčiny vzniku klepání ať už z konstrukčního hlediska, či z hlediska provozního. Stručně představíme způsoby detekce klepání a ukážeme negativní vlivy tohoto jevu. Na závěr provedeme sérii měření k ověření vlivu oktanového čísla benzínu na vznik detonačního hoření zmíněného v rešeršní části.

1. Porovnání normálního a detonačního hoření

Průběh hoření směsi by měl být kontrolovatelný, správně načasovaný a nárůst tlaku plynulý. Takové hoření nazýváme normální. Pokud se směs zažehne dříve, šíří se rychleji, nebo pokud k zažehnutí nedojde pomocí jiskry od zapalovací svíčky, mluvíme o detonačním hoření. Rozlišujeme různé příčiny vzniku detonačního hoření a typy explozí.

1.1. Normální hoření

Zažehnutím směsi od svíčky vznikne plamen, který se šíří ve spalovacím prostoru rychlostí 30-60 m/s po soustředných kulových plochách. Tlak narůstá plynule. Jakmile plamen hoření narazí na stěnu válce, cyklus spalování je u konce. Průběh cyklu normálního hoření je na obr. 1.1.



Obr. 1.1: Průběh normální hoření [1].

1.2. Detonační hoření

Rychlost hoření při detonačním hoření může být až 2000 m/s. Dochází k prudkému nárůstu a oscilaci tlaku ve válci.

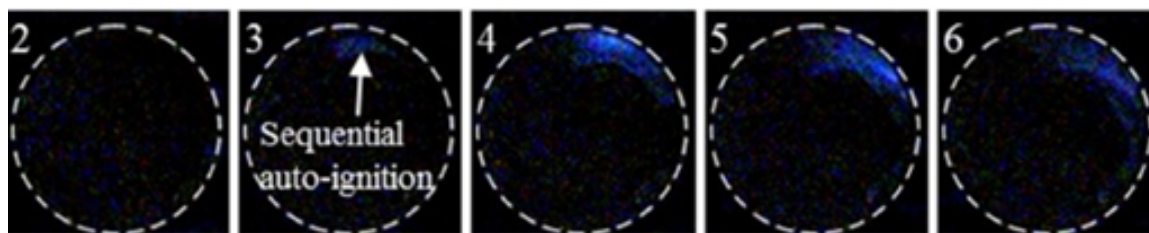
1.2.1. Příčiny vzniku detonačního hoření

Existují dvě základní příčiny vzniku detonačního hoření, předčasné vznícení a detonace způsobená ohnivou vlnou od svíčky.

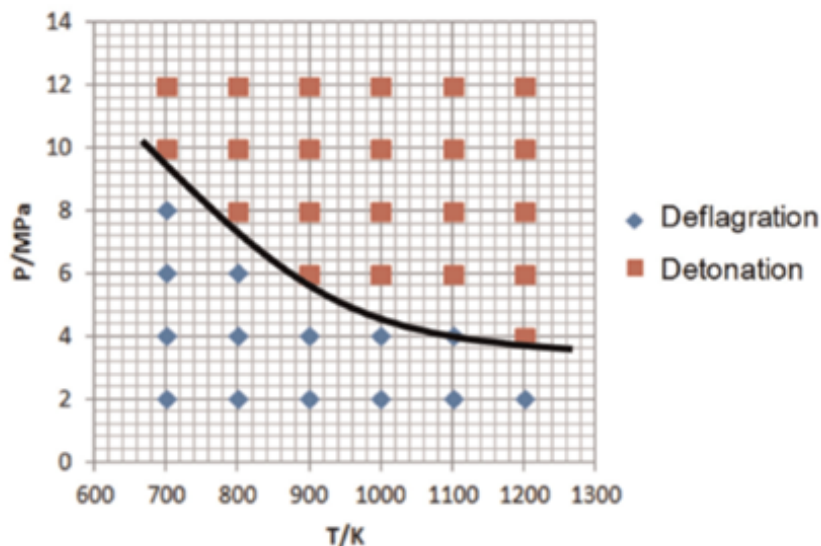
Předčasné vznícení / Pre-ignition

K tomuto jevu dochází, pokud je směs zapálena dříve, než přeskočí jiskra na svíčke (obr. 1.2). Může se tak stát z důvodu lokálního přehřátí ve spalovacím prostoru. Toto horké místo má určitou teplotu a tlak. Podle křivky rozhraní deflagrace a detonace (obr. 1.3) určíme o jaký typ exploze se jedná. Předčasné vznícení může vést i k super-klepání. O tom, jaký druh klepání nastane, rozhoduje hlavně místo a čas vzniku předčasného vznícení. Pokud vznikne v blízkém okolí zapalovací svíčky, tak následné spojení dvou ohnivých vln nemusí mít za následek pozorovatelné oscilace tlaku.

1.2. DETONAČNÍ HOŘENÍ



Obr. 1.2: Znárodnění předčasného vznícení [1].



Obr. 1.3: Křivka rozhraní deflagrace a detonace [2].

Ohnivou vlnou ze svíčky / Spark knock

Toto klepání je zapříčiněno zvýšením tlaku v dosud nevyhořelých místech spalovacího prostoru z důvodu šíření ohnivé vlny od svíčky. Tento druh klepání nebývá zpravidla tak závažný jako klepání způsobené předčasným vznícením. Plamen se šíří typem deflagrace.

1.2.2. Typy exploze

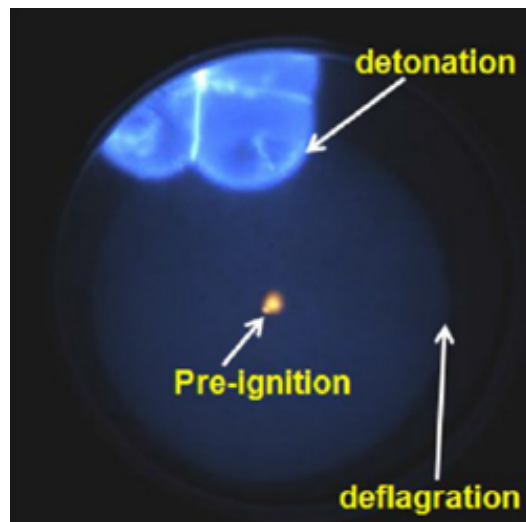
Při detonačním hoření rozeznáváme následující dva druhy explozí, jež jsou znázorněny na obr. 1.4.

Deflagrace

Jedná se o podzvukové spalování. Šíří se tepelnou vodivostí – horký materiál ohřívá chladnější, zapaluje ho.

Detonace

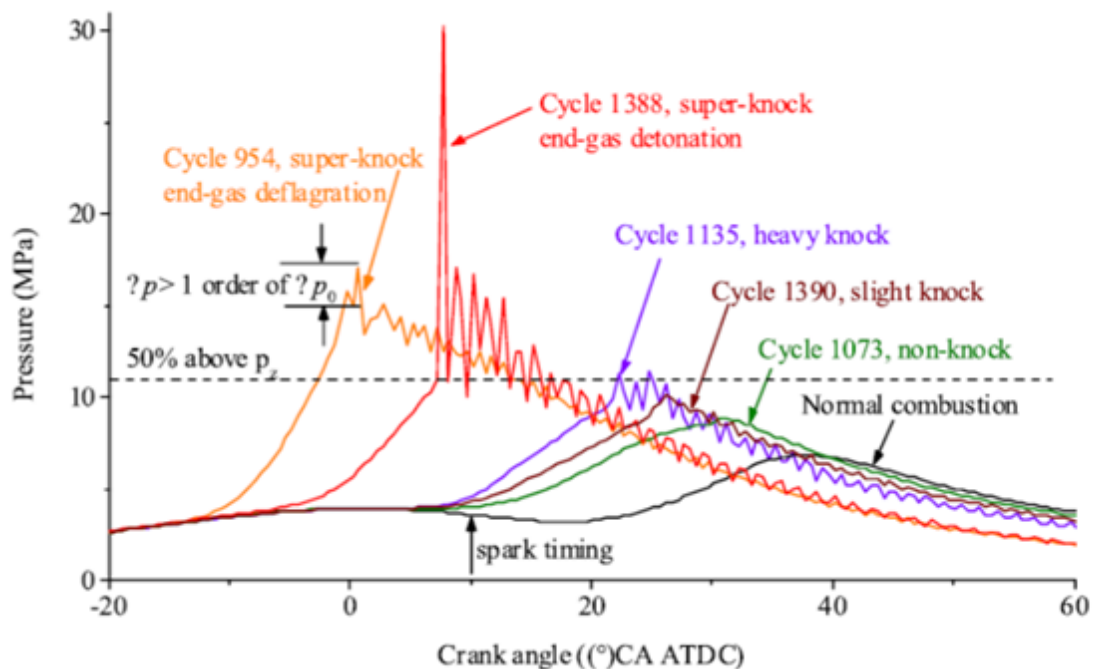
Plamen se šíří pomocí rázové (detonační) vlny. Tím stlačuje okolní materiál a jeho teplota stoupá na bod vznícení. Energie se uvolňuje pod vysokým tlakem.



Obr. 1.4: Znárodnění jednotlivých typů explozí [3].

1.2.3. Typy klepání z hlediska velikosti změny tlaku

Klepání je rozděleno do čtyř kategorií podle změny tlaku oproti normálnímu spalování, porovnání typů klepání je znázorněno na obr. 1.5. Z hlediska poškození motoru je nejnebezpečnější super klepání. Díky extrémnímu nárůstu tlaku přesahujícímu i 10 MPa a následné oscilaci se může motor poškodit i během jednoho cyklu. Super klepání je vždy způsobeno předčasným vznícením. Pokud dokážeme zabránit předčasnému vznícení, vyhneme se i super klepání, které je v dnešní době jeden z hlavních problémů dalšího vývoje přeplňovaných motorů.



Obr. 1.5: Přehled typů klepání [2].

Neklepání / Non-knocking

Pro $|\Delta p| \approx 0$ MPa.

Mírné klepání / Slight-knock

Pro $|\Delta p| > 0$ MPa \cap $|\Delta p| < 0,2$ MPa.

Silné klepání / Heavy-knocking

Pro $|\Delta p| > 0,2$ MPa \cap $|\Delta p| < 2$ MPa.

Super klepání / Super-knocking

Pro $|\Delta p| > 2$ MPa.

2. Faktory ovlivňující vznik detonačního hoření

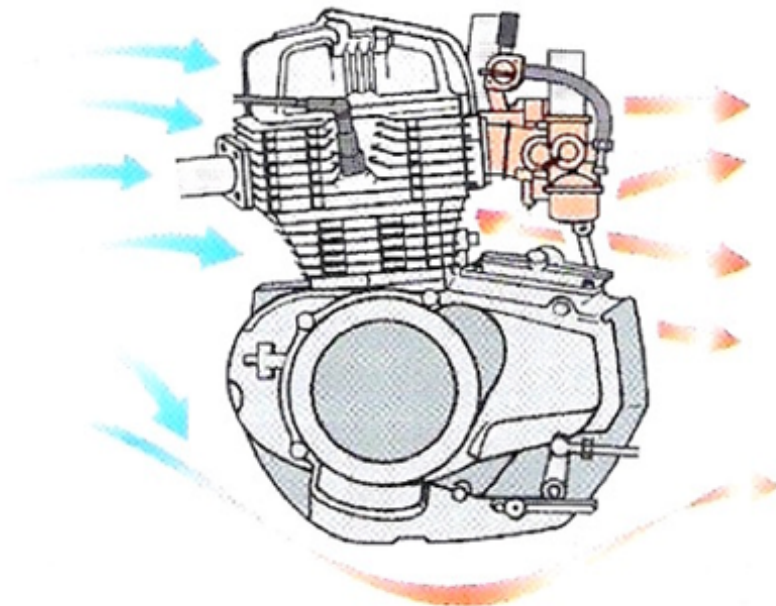
Faktory, které ovlivňují vznik detonačního hoření, mohou být buď konstrukční nebo provozní. Konstrukční faktory (tvar spalovacího prostoru, použité materiály, způsob chlazení, poloha zapalovací svíčky atd.) jsou dány konstrukcí motoru a během provozu se nemění. Naopak provozní faktory (předstih zážehu, palivo, teplota nasávaného vzduchu) se mění a řídicí jednotka musí reagovat na aktuální situaci, tak aby nenastalo detonační hoření a nedošlo k poškození motoru.

2.1. Vysoká teplota spalovacího prostoru

Pokud je teplota spalovacího prostoru příliš vysoká, hrozí vznik detonačního hoření. Teplotu spalovacího prostoru můžeme snížit lepším chlazením, obohacením spalované směsi nebo snížením teploty nasávaného vzduchu. Všechny možnosti snížení teploty spalovacího prostoru jsou popsány níže.

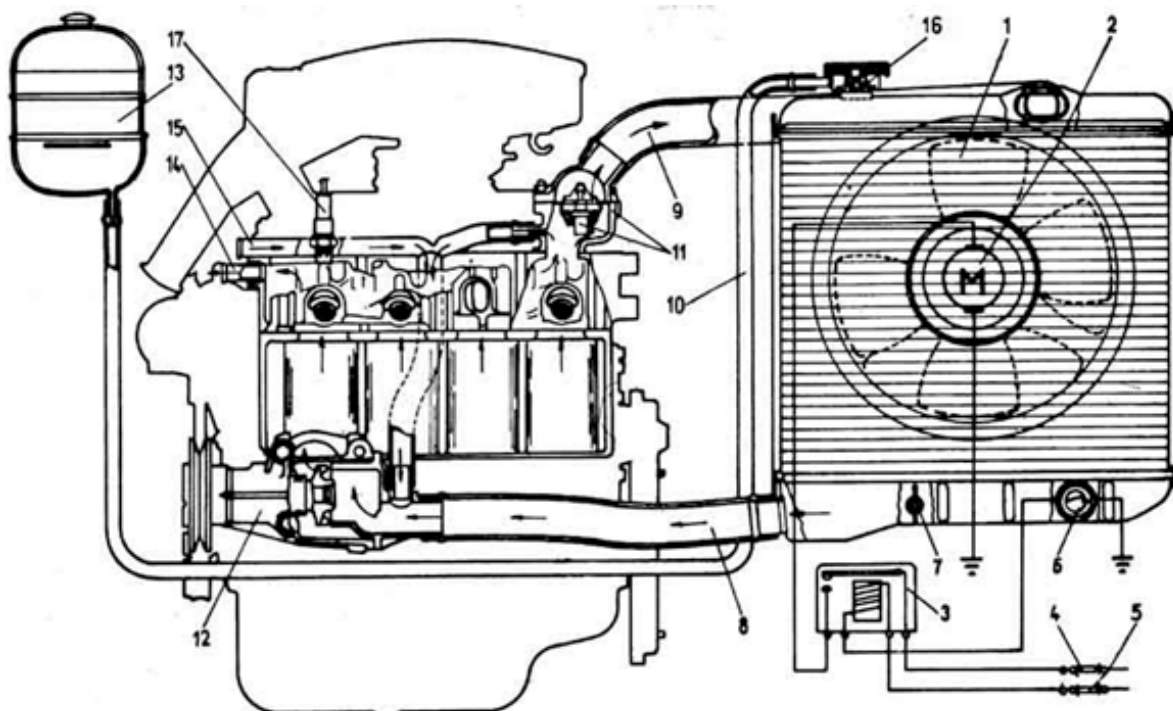
2.1.1. Způsob chlazení

Chlazení motoru bývá prováděno kapalinou nebo vzduchem. Vzduchem chlazený motor (obr. 2.1) má větší tendenci k samozápalům díky vzniku lokálních přehřátí. To je nutné kompenzovat nižším kompresním poměrem a použitím bohatší směsi. Současným trendem je proto používání kapalinou chlazených motorů (obr. 2.2). Díky lepšímu chlazení a citlivější regulaci je možno použít vyšší kompresní poměr bez rizika vzniku detonačního hoření.



Obr. 2.1: Vzduchem chlazený motor [4].

2.1. VYSOKÁ TEPLOTA SPALOVACÍHO PROSTORU



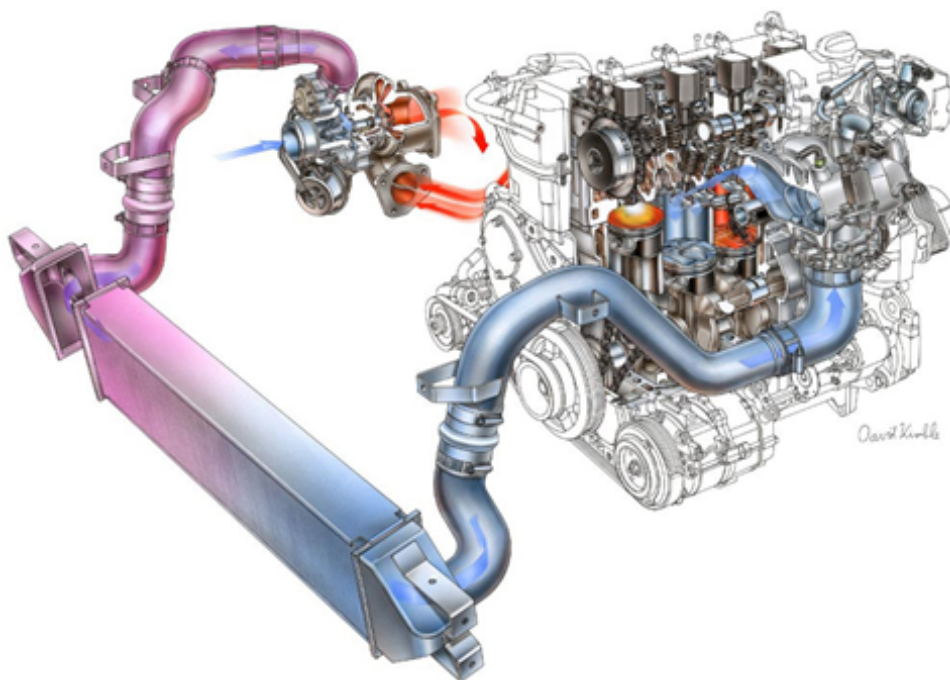
Obr. 2.2: Schéma chladicí soustavy kapalinou chlazeného motoru [5]; 1 - chladič; 2 - elektromotor větráku; 3 - relé spínače elektromotoru větráku; 4 - pojistka; 5 - pojistka; 6 - termostatický spínač větráku; 7 - výpustný kohout chladiče; 8 - pryžová hadice mezi chladičem a čerpadlem; 9 - pryžová hadice mezi chladičem a motorem; 10 - hadice mezi chladičem a vyrovnávací nádobkou; 11 - termostat; 12 - čerpadlo chladicí kapaliny; 13 - vyrovnávací nádobka; 14 - příruba hadice k topení; 15 - příruba hadice od topení; 16 - uzávěrka plnicího hrdla chladiče; 17 - snímač teploty motoru;

2.1.2. Bohatost směsi

Stechiometrická směs ($\lambda = 1$) teoreticky zabezpečuje dokonalé spálení veškerého paliva ve válci, avšak parametry jako maximální výkon, spotřeba a emise dosahují svých extrému při různých hodnotách přebytku vzduchu. Bohatá směs ($\lambda = 0,85$ až $\lambda = 0,95$) přináší větší pravděpodobnost využití veškerého množství vzduchu ve válci. Nespálené palivo se přitom odpaří, a tím ochladí spalovací prostor. Bohatá směs také hoří rychleji. Díky tomu se snižuje náchylnost motoru ke klepání. Naopak chudá směs ($\lambda = 1,1$ až $\lambda = 1,35$) zajišťuje minimální měrnou spotřebu, ale při jejím spalování dosahují teploty ve válci nejvyšších hodnot. To je z hlediska odolnosti proti detonačnímu hoření nežádoucí.

2.1.3. Teplota nasávaného vzduchu

Chladnější nasávaný vzduch díky své vyšší měrné hmotnosti naplní válec daného objemu větší hmotností vzduchu a díky své nižší teplotě snižuje riziko klepání motoru. Proto by sací potrubí mělo být vedeno nejchladnějšími místy motorového prostoru a být chráněné před horkými částmi motoru, jako je výfukové potrubí. U přeplňovaných motorů je vhodné stlačený vzduch ochladit ještě před vstupem do motoru, protože se vzduch stlačením v turbodmychadle nebo kompresoru značně zahřeje. K ochlazení stlačeného vzduchu slouží mezichladič-také nazývaný intercooler (obr. 2.3).



Obr. 2.3: Znázornění funkce chladiče stlačeného vzduchu [6].

2.1.4. Objem válce

Při zvyšujícím se objemu válce stoupá poměr jeho objemu k ploše stěn, což zmenšuje poměrný odvod tepla. To společně s delší dráhou plamene způsobuje větší náchylnost ke klepání a znemožňuje využití vysokých kompresních poměrů. Naopak relativně menší válec může mít vyšší kompresní poměr a díky menšímu a lehčímu pístu i vyšší otáčky motoru.

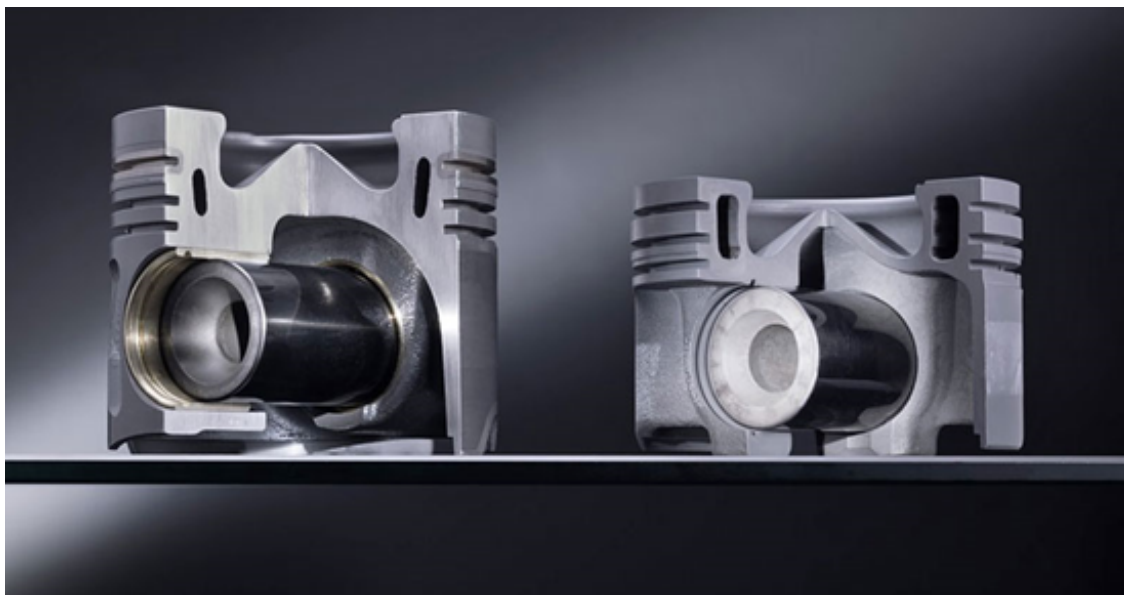
2.1.5. Použité materiály

Hlavy válců se dnes vyrábí téměř vždy z lehkých slitin. Díky lepšímu odvodu tepla je možnost využití vyššího kompresního poměru bez zvýšení vzniku detonačního hoření od přehřáté části hlavy válce. Válce bývají litinové i z lehkých slitin. Motor s litinovou konstrukcí má lepší útlum hluku a rychleji se ohřívá, ale bývá zpravidla těžší. Naopak konstrukce z lehkých slitin jsou lehčí a mají lepší vedení tepla, ale musí mít činnou plochu tvořenou speciální vrstvou vyšší tvrdostí (Alusil, Nikasil) pro zvýšení odolnosti proti opotřebení. U pístů měla převahu použití lehká slitina, a to nejen kvůli lepšímu odvodu tepla, ale i z důvodu snížení sil v klikovém mechanismu díky jeho nižší hmotnosti. Některé moderní motory ovšem používají písty ocelové. Díky menší tepelné roztažnosti může být vůle mezi pístem a válcem menší, což napomáhá ke snížení tvorby škodlivin ve výfukových plynech. Porovnání hliníkového a ocelového pístu z motoru Mercedes-Benz 350BlueTEC (OM 642) je znázorněno na obr. 2.4.

2.1.6. Překrytí ventilů

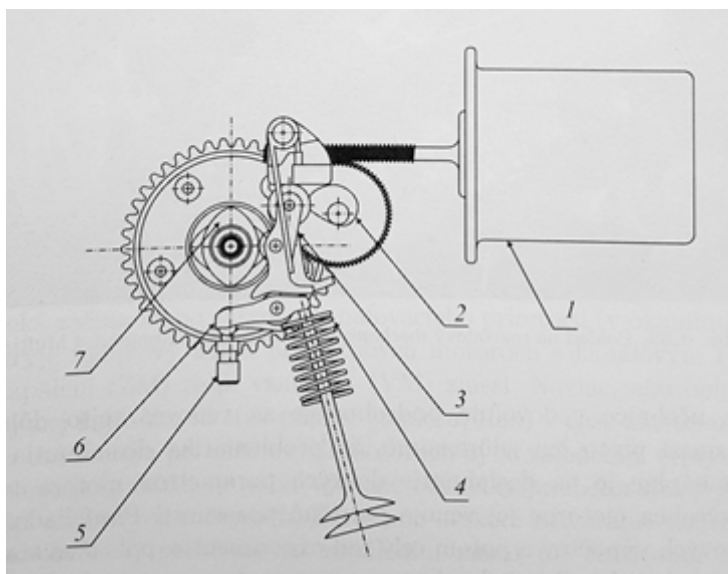
Úhel překrytí ventilů ovlivňuje kvalitu vypláchnutí spalovacího prostoru. Větší překrytí ventilů zvyšuje množství čerstvé směsi a snižuje množství spalin z předcházejícího cyklu. Díky tomu klesá teplota ve válci na začátku komprese a vzrůstá rychlost spalování, což

2.2. TVAR SPALOVACÍHO PROSTORU



Obr. 2.4: Porovnání hliníkového (vlevo) a ocelového (vpravo) pístu motoru 350BlueTEC (OM 642) před a po evoluci [7].

snižuje riziko klepání. Pro snížení rizika úniku nespáleného paliva do výfuku u motoru s vnější přípravou směsi se používá variabilní časování ventilů, které dovoluje nastavit vhodný úhel překrytí pro daný pracovní režim (obr. 2.5).



Obr. 2.5: Schéma variabilního zdvihu sacích ventilů BMW Valvetronic [8]; 1 – elektromotor; 2 – excentr; 3 – páka; 4 – ventilová pružina; 5 – čep vahadla; 6 – vahadlo; 7 – vačka;

2.2. Tvar spalovacího prostoru

Z hlediska šíření plamene a odolnosti proti klepání je vhodný co nejkompaktnější spalovací prostor. Tomu se geometricky nejvíce přibližuje polokulový spalovací prostor. Takový tvar však neumožňuje dosáhnout dostatečně vysokého stupně komprese bez použití deflektoru na dně pístu. Při použití více ventilů na válec se tvar kulového vrchlíku deformuje,

2. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VZNIK DETONAČNÍHO HOŘENÍ

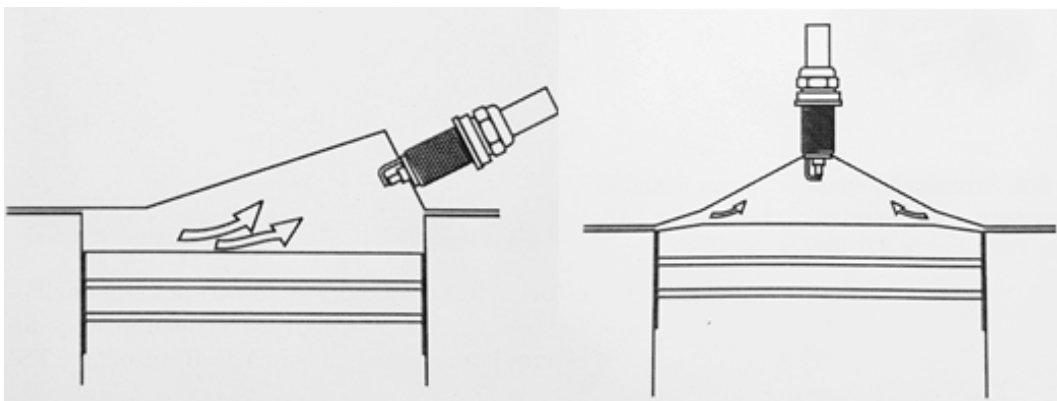
a proto se u motorů spalujících homogenní směs často používá střešovité spalovací prostor (obr. 2.6).



Obr. 2.6: Střešovité spalovací prostor [8].

2.2.1. Antidetonační štěrbinu

Pro zvýšení odolnosti proti detonačnímu hoření se může použít spalovací prostor s antide-tonační štěrbinou. Ta je umístěna do nejvzdálenějšího místa od zapalovací svíčky (obr. 2.7 vlevo). Toto řešení se již nevyužívá, protože neumožňuje maximální využití plochy hlavy pro zvětšení průtočného průřezu ventilů. Nyní se používá řešení, kdy antidetonační štěr-bina je tvořena sražením na krajích spalovacího prostoru (obr. 2.7 vpravo).

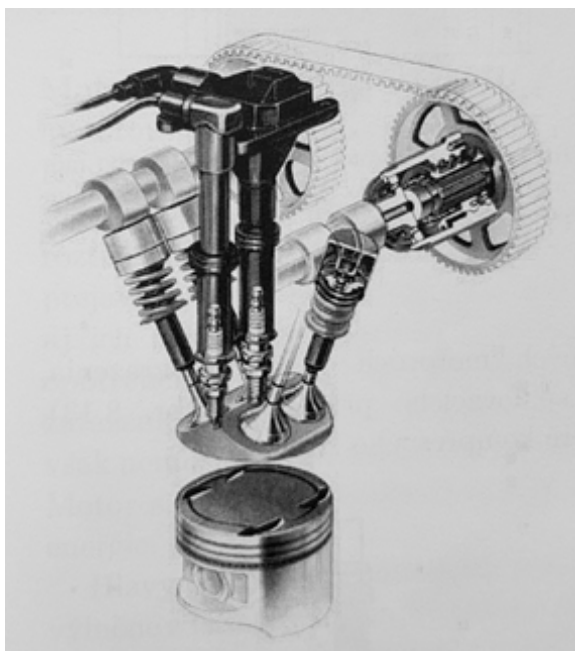


Obr. 2.7: Antidetonační štěrbinu [8].

2.3. PŘEDSTIH ZÁŽEHU

2.2.2. Poloha zapalovací svíčky

Svíčka musí být umístěna tak, aby byla dráha plamene co nejkratší. Zároveň by to mělo být i nejteplejší místo spalovacího prostoru. Víření v okolí svíčky zajišťuje přísun čerstvé směsi, ale nesmí být natolik silné, aby narušovalo stabilitu plamene. Z těchto důvodů je nejvhodnější umístit svíčku co nejbližší osy válce a středu spalovacího prostoru. Dalším možným řešením je použití dvou zapalovacích svíček (obr. 2.8). Takové řešení v minulosti používala automobilka Alfa Romeo v motorech Twin Spark. Při vhodném umístění svíček se zkrátí čas spalování, což snižuje riziko detonačního hoření.

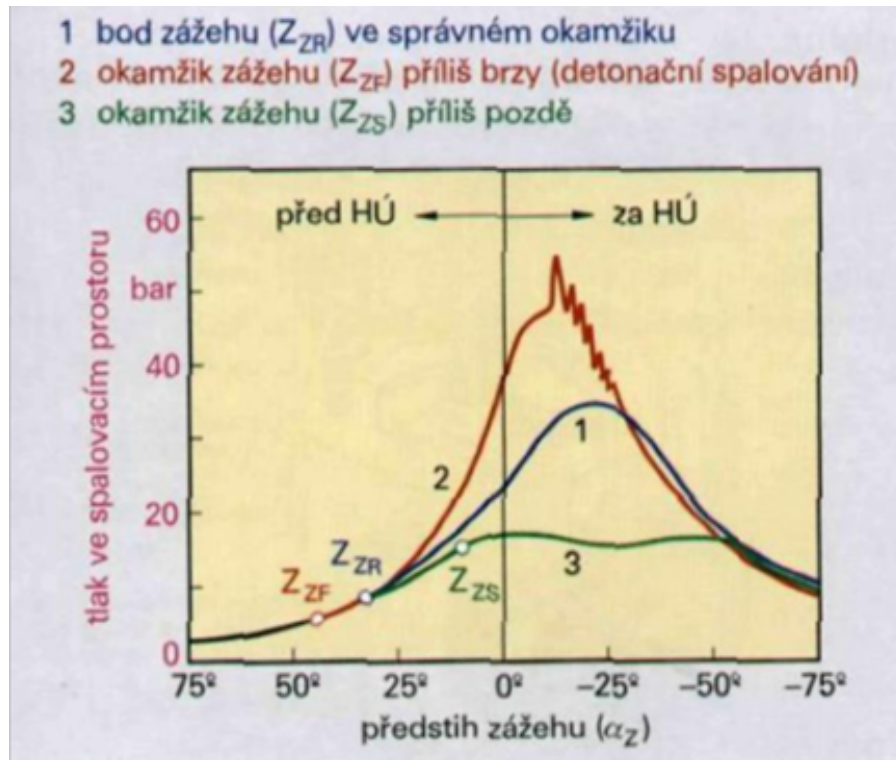


Obr. 2.8: Použití dvou zapalovacích svíček v motoru Alfa Romeo Twin Spark 2.0 16v [8].

2.3. Předstih zážehu

Předstih zážehu je okamžik, kdy dojde k zažehnutí směsi benzínu a vzduchu před dosažením horní úvrati pístu v zážehovém spalovacím motoru. Hodnota předstihu se udává v milimetrech (vzdálenost pístu před horní úvratí), nebo ve stupních (úhel, o který se musí kliková hřídel pootočit, aby píst dosáhl horní úvrati). Načasování začátku hoření je důležité nejenom z pohledu klepání, ale ovlivňuje i vlastní průběh tlaku, což ovlivňuje poměr záporné práce před horní úvratí a kladné expanzní práce získané za horní úvratí. Z hlediska účinnosti je snaha dosáhnout co největší kladné práce při co nejmenší záporné práci. Toho docílíme správně načasovaným předstihem zážehu, který se upravuje podle měnících se otáček a zatížení motoru. Se zvyšujícími se otáčkami při konstantním zatížení se předstih zvyšuje. Při konstantních otáčkách a snižujícím se zatížení se předstih zvyšuje, naopak při zvyšujícím se zatížení je vhodné směs zapálit později. Jednotlivé situace jsou zobrazeny v obr. 2.9 a probrány níže.

2. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VZNIK DETONAČNÍHO HOŘENÍ



Obr. 2.9: Vliv předstihu zážehu na průběh tlaku při spalování [4].

2.3.1. Správný od zážehu (Z_{ZR})

Pro každý provozní režim (zatížení a otáčky) existuje správný (optimální) úhel předstihu. Při tomto nastavení bude motor pracovat s ideálním poměrem mezi kladnou a zápornou prací, to znamená maximální výkon při minimální měrné spotřebě paliva (maximální efektivní účinnost).

2.3.2. Příliš brzký bod zážehu (Z_{ZF})

Při velkém předstihu jsou maximální tlaky vyšší a dosahuje se jich blíže k horní úvratí. Vyvine se více tepla v počátku hoření, díky tomu je více tepelně zatížená hlava válců a méně stěna válce. Zvyšuje se riziko detonačního spalování, které může vést k destrukci motoru. Dále se snižuje výkon a zhoršují emise výfukových plynů.

2.3.3. Příliš pozdní bod zážehu (Z_{ZS})

K úplnému spálení paliva se vzduchem dochází až za horní úvratí. Nedojde tedy ke vzniku dostatečného tlaku a tím i vytvoření potřebné kladné expanzní práce. Pro zachování potřebného výkonu musí motor pracovat s bohatší směsí. To vede ke zvýšené spotřebě paliva. Čelo plamene zasahuje větší povrch válců, tudíž se motor přehřívá a může dojít k jeho zničení.

2.4. Oktanové číslo benzínu

Oktanové číslo benzínu určuje odolnost směsi paliva se vzduchem proti samozápalům. Je vyjádřeno procentuálním obsahem 2,2,4 – trimethylpentanu (izomer uhlíku oktanu) ve směsi s n-heptanem, která je stejně odolná proti samozápalům jako zkoumané palivo. Čistý n-heptan má oktanové číslo 0 a čistý izo-oktan má oktanové číslo 100. Benzín s oktanovým číslem 95 má tedy stejnou odolnost proti samozápalům, jako směs skládající se z 95 % oktanu a 5 % heptanu. Čím vyšší je oktanové číslo benzínu, tím je vyšší odolnost proti samozápalům.

2.4.1. Metody zjišťování oktanového čísla

Existují dvě hlavní metody zjišťování oktanového čísla, metoda výzkumná a metoda motorová.

Výzkumná metoda

Zjišťování oktanového čísla na zkušebním motoru při 600 otáčkách za minutu.

Motorová metoda

Zjišťování oktanového čísla na zkušebním motoru při 900 otáčkách za minutu. Tato metoda se více blíží reálnému chování motoru. Oktanové číslo při této metodě zkoumání bývá o 10 stupňů nižší než u výzkumné metody.

2.4.2. Antidetonační přísady

Dříve se pro zlepšení vlastností benzínu přidávaly do paliva sloučeniny olova. Dnes jsou příměsi olova zakázány, protože olovo je toxické a dostávalo se výfukovými plyny do ovzduší. V současnosti se jako antidetonátory používají organokovové sloučeniny manganu a aromatické aminy či halogenidy přechodných kovů.

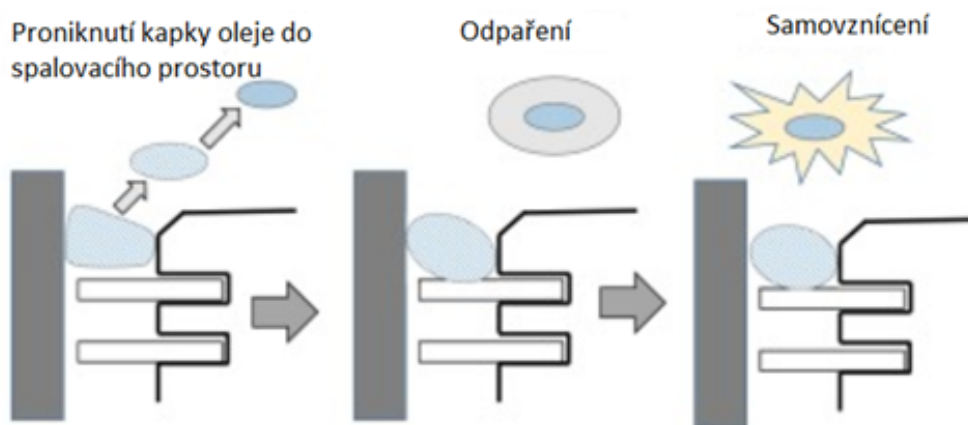
2.5. Další možné příčiny detonačního hoření

Existují i další příčiny detonačního hoření, ze kterých zmíníme vliv oleje a karbonu ve spalovacím prostoru.

2.5.1. Olej ve spalovacím prostoru

Olej používaný k mazání spalovacího motoru má zpravidla daleko menší odolnost proti samovznícení než benzín. Proto je nežádoucí, aby se olej dostal do spalovacího prostoru. Po odpaření proniklé kapky oleje do spalovacího prostoru může nastat samovznícení (obr. 2.10).

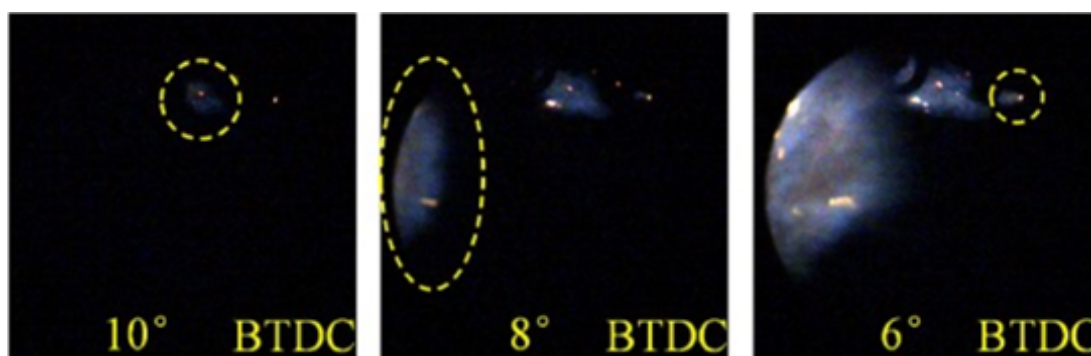
2. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VZNIK DETONAČNÍHO HOŘENÍ



Obr. 2.10: Samovznícení od kapky oleje [9].

2.5.2. Karbon ve spalovacím prostoru

Při nedokonalém spalování paliva se tvoří pevné částice karbonu, které ulpívají na stěnách válce nebo na dnu pístu. Rozžhavená část karbonu může způsobit samovznícení směsi ve spalovacím prostoru (obr. 2.11).



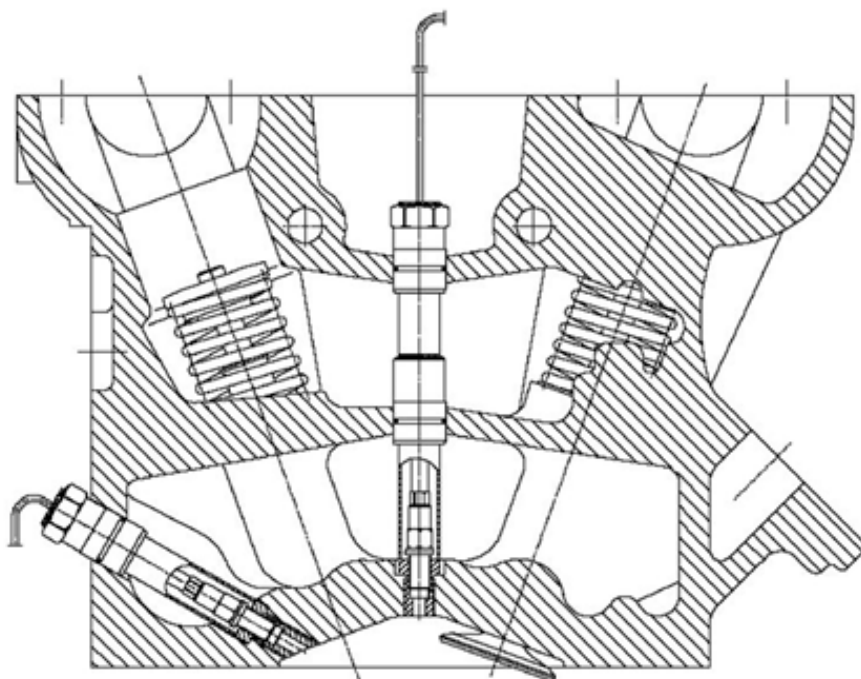
Obr. 2.11: Samovznícení od rozžhaveného karbonu [10].

3. Detekce klepání

U motoru starší konstrukce se nastavil základní předstih, který se poté měnil v závislosti na otáčkách tak, aby za normálních okolností nenastalo detonační hoření. U moderních motorů, kde požadujeme daleko vyšší litrový výkon při udržení co nejnižší spotřeby a emisí, je toto řešení nedostačující. Pro splnění těchto požadavků pracuje motor obvykle těsně pod hranicí klepání. Pokud se tato hranice překročí, klesne výkon, zhorší se emise, a dokonce hrozí poškození motoru. Proto je nutno klepání včas detekovat a zabránit mu přes řízení motoru. Způsoby detekce klepání jsou popsány níže.

3.1. Čidlo tlaku ve válci

Nejlepší způsob detekce klepání je snímač tlaku ve válci (obr. 3.1), neboť klepání je doprovázeno zvýšením tlaku. Toto řešení se ovšem používá spíše v laboratorních podmínkách z důvodu vysokých cen těchto snímačů a nutnosti použití snímače pro každý válec.

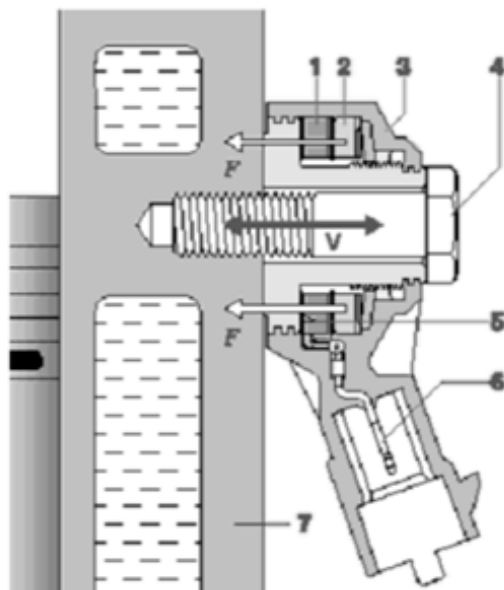


Obr. 3.1: Čidlo tlaku [11].

3.2. Piezoelektrické čidlo klepání

Je to konstrukčně jednoduchá součást (obr. 3.2), jenž funguje na piezoelektrickém jevu. Hmotnost seismické hmoty působí při vibracích svou setrvačností tlačnými silami na piezokeramický prvek. Deformací tohoto prvku dochází ke vzniku elektrického napětí mezi jeho hranami, které je snímáno pomocí kontaktních plošek a posíláno do řídicí jednotky.

3.3. OPTOELEKTRONICKÉ ČIDLO KLEPÁNÍ



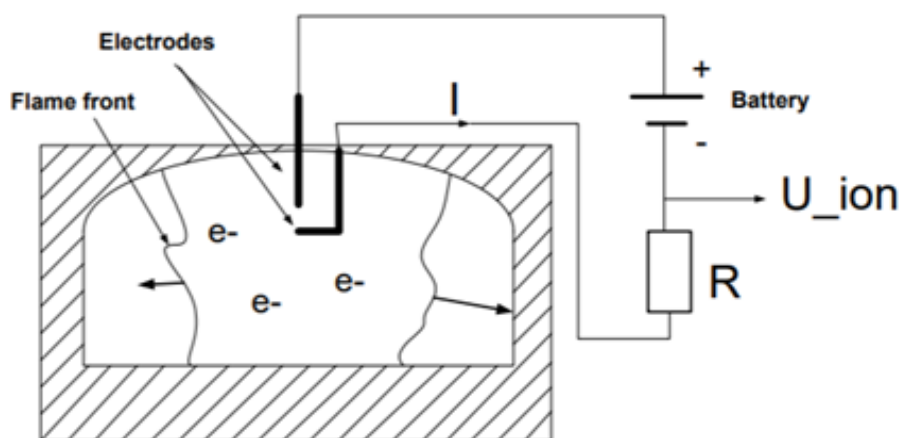
Obr. 3.2: Schéma piezoelektrického čidla klepání [12]; 1 – piezokeramický kroužek; 2 – seismická hmotnost s tlačnými silami F ; 3 – pouzdro; 4 – šroub; 5 – připojení; 6 – elektrická přípojka; 7 – blok motoru;

3.3. Optoelektronické čidlo klepání

Snímač je tvořen optickým vláknem, které je osvětlováno na jednom konci LED diodou. Vibrace od tlakových vln mění optickou průchodnost vlákna, která se měří fototranzistorem umístěným na druhé straně optického vlákna. Tyto snímače jsou umístěné v hlavě válců a pro každý válec je použit samostatný snímač [13].

3.4. Měření velikosti ionizačního proudu

Další způsob detekce klepání využívá zapalovací svíčku. Díky chemické reakci po zapálení svíčky vzniknou volné náboje, které můžeme změřit přiložením napětí na zapalovací svíčke těsně po zapálení směsi. Změřením velikosti ionizačního proudu můžeme určit kvalitu spálení směsi a tím případně detekovat klepání (obr. 3.3).

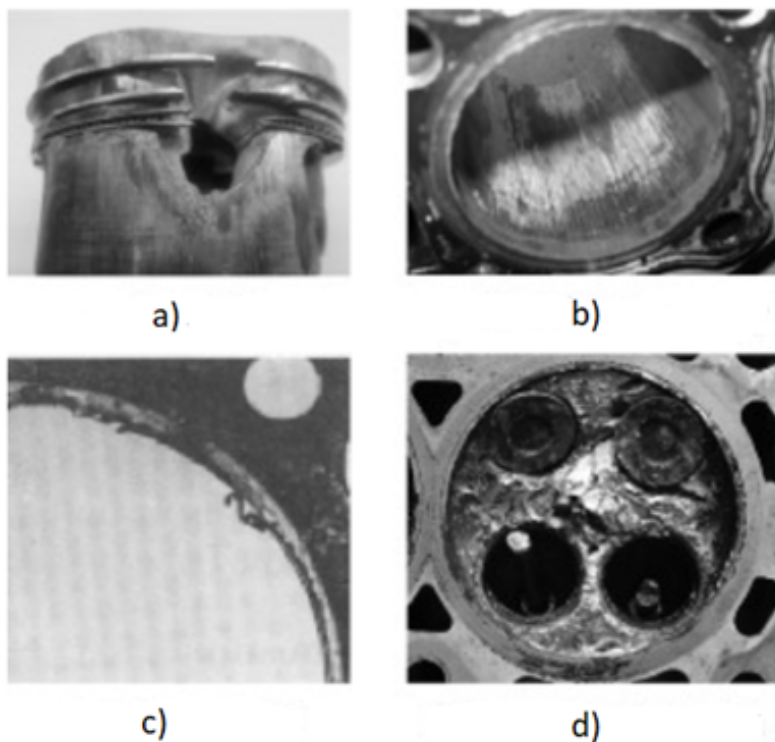


Obr. 3.3: Měření velikosti ionizačního proudu pomocí zapalovací svíčky [14].

4. Negativní vlivy detonačního hoření

Detonační hoření je doprovázeno zvýšením teploty a prudkým nárůstem a oscilací tlaku, což má za následek rozkmitání pístu. Následkem toho dochází k enormnímu opotřebení jak pístu, tak i válce. Pokud řídicí jednotka nezasáhne včas, může dojít i k destrukci motoru, jako například propálení pístu (obr. 4.1a), vydření válce (obr. 4.1b), prasknutí těsnění pod hlavou (obr. 4.1c), nebo zničení hlavy motoru (obr. 4.1d).

Vznik klepání detekuje řídicí jednotka motoru ECU (Engine Control Unit). Detekuje-li algoritmus klepání jsou dva přístupy, jak toto klepání řešit. Prvním přístupem je to řešit globálně a to tím, že provedeme zpoždění zapálení svíčky pro každý válec stejně, nezávisle u jakého válce ke klepání došlo. To samozřejmě šetří paměť a operační výkon CPU v ECU. Druhým přístupem je zasáhnout individuálně, pouze na daný válec. Toto řízení pak poskytuje motoru lepší výkon i spotřebu paliva. S nárůstem výpočetního výkonu ECU se tento přístup stává používanější [18].



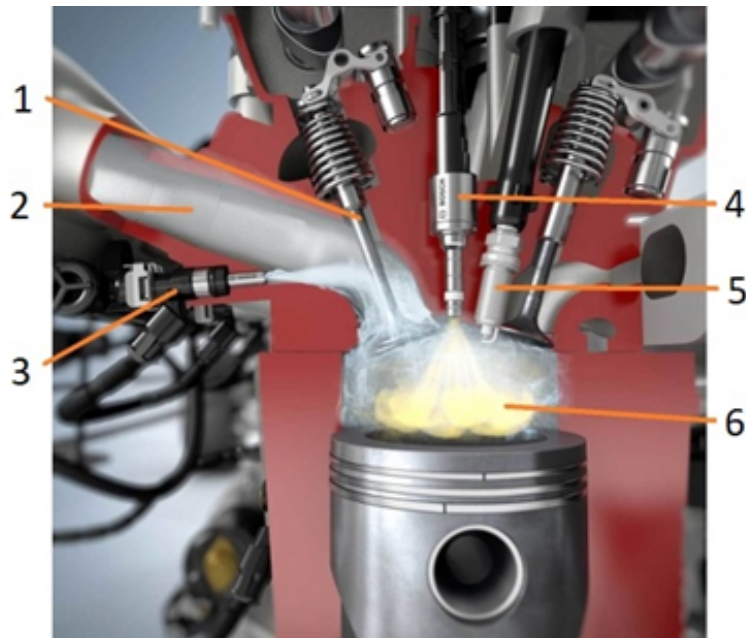
Obr. 4.1: Poškození motoru [15]; a) propálení pístu; b) vydření válce; c) prasklé těsnění pod hlavou; d) zničená hlava motoru.

5. Moderní trendy eliminování detonačního hoření

Většina dnešních moderních motorů je přeplňovaných. Díky stlačení nasávaného vzduchu se značně zvyšuje jeho teplota, což zvyšuje riziko detonačního hoření a snižuje účinnost naplnění válce. Proto je vhodné teplotu stlačeného vzduchu co nejvíce snížit.

5.1. Vstřikování vody do sání

Odpařením vstříknuté vody se ochladí spalovací směs, tím se zvýší její hustota a do válce se jí vejde více, díky tomu lze dosáhnout většího výkonu. Ochlazením spalovacího prostoru také klesá pravděpodobnost vzniku detonačního hoření. Systém vstřikování vody se používal již v období druhé světové války pro zvýšení výkonu stíhacích letounů a bombardérů. U osobních automobilů je použití tohoto systému méně časté. Kolem roku 2000 ho využíval závodní vůz šampionátu WRC Ford Focus WRC. Díky tomu vzrostl maximální výkon o 7,5 kW a celkově se zlepšil průběh výkonu a točivého momentu. Vůz při závodním tempu spotřeboval 0,2 l vody na každých 0,7 l benzínu. U osobních sériových vozů byl tento systém použit například u vozu SAAB 99 Turbo S a BMW M4 GTS. Systém vstřikování vody u vozu BMW je od výrobce Bosh (obr. 5.1), který deklaruje zvýšení výkonu o 5 %, snížení spotřeby až 13 % a je vhodný pro vozidla s litrovým výkonem nad 80 kW [16]. Častější používání tohoto systému u sériových aut se nedá předpokládat, neboť přináší i nevýhody, jako je nutnost vyhřívání celého systému v mrazech, nutnost dolévání další provozní kapaliny a díky složitosti systému i nárůst ceny vozu. Navíc výhody tohoto systému se projeví jen při plném zatížení motoru, které u silničních automobilů nenastává tak často, aby se systém vyplatilo montovat.



Obr. 5.1: Vstřikování vody do válce Bosh [16]; 1 – sací ventil; 2 – sací kanál; 3 – vstřikovač vody; 4 – vstřikovač paliva; 5 – zapalovací svíčka; 6 – spalovací prostor;

5.2. OSTŘÍK MEZICHLADIČE STLAČENÉHO VZDUCHU

5.2. Ostřík mezichladiče stlačeného vzduchu

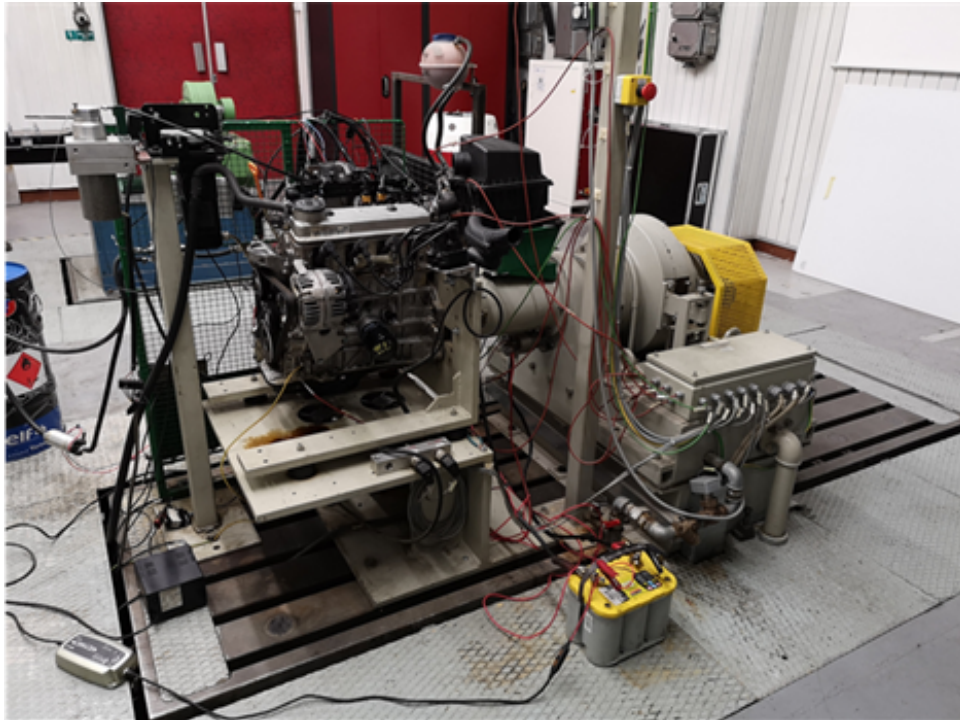
Daleko levnější, ale i méně účinný je systém ostřikování mezichladiče stlačeného vzduchu vodou. Odpaření vody z mezichladiče způsobí jeho ochlazení a tím i ochlazení stlačeného vzduchu v něm. Tento systém používají některé modely značky Subaru (obr. 5.2).



Obr. 5.2: Ostřík mezichladiče stlačeného vzduchu [17].

6. Měření detonačního hoření

Cílem měření bylo ověřit reálný vliv použití benzínu s vyšším oktanovým číslem na náchylnost ke vzniku detonačního hoření. Měření probíhalo na zkušebním stanovišti V125 (obr. 6.1), které se skládá z motoru 1.0 MPI, dynamometru V125 a řídicí elektroniky. Zkušebna motorů je oddělena od měřicího pracoviště protihlukovou stěnou, která poskytuje i ochranu osob v případě nehody během měření.



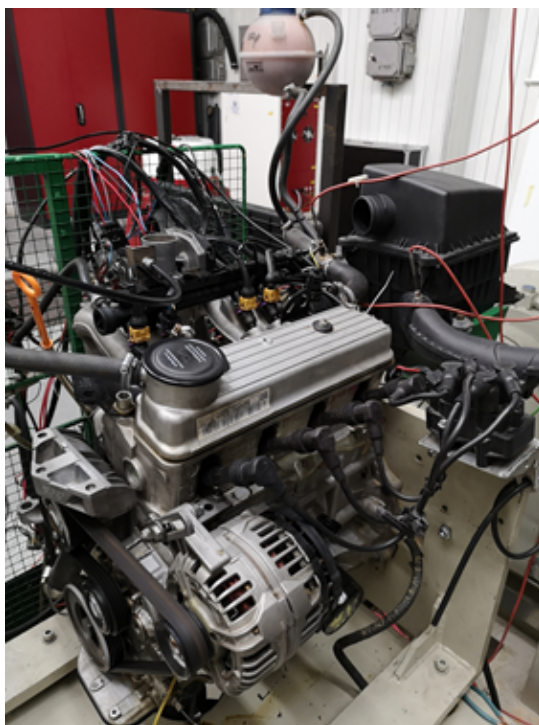
Obr. 6.1: Zkušební stanoviště V125.

6.1. Motor

Pro měření byl použit zážehový, kapalinou chlazený řadový čtyřválec o objemu 997 cm^3 (vrtání $72,0 \text{ mm}$, zdvih $61,2 \text{ mm}$) se vstřikováním MPI a rozvodem OHV (obr. 6.2). Tento atmosféricky plněný motor dosahuje maximálního výkonu 37 kW při 5000 ot/min a točivého momentu 84 Nm při 2750 ot/min . Montoval se například do Škoda Fabia Junior, Volkswagen Polo nebo Seat Ibiza.

6.2. Dynamometr

Pro přesné měření kroutícího momentu a otáček je zkušebna vybavena vířivým dynamometrem řady V125, který je vybaven tenzometrickým snímačem momentu s převodníkem a inkrementálním snímačem otáčivé rychlosti.



Obr. 6.2: Motor 1.0 MPI.

6.3. Přenos dat

Regulaci otáček a momentu zajišťují digitální regulační obvody měniče SIEMENS 6RA70, které komunikují s programovatelným automatem SIMATIC S7-300 pomocí komunikační linky PROFIBUS DP. Díky tomuto spojení můžeme zobrazovat naměřená data v počítači v programu CMSW (Computer Managment System Work).

6.4. Průběh měření

Po zahřátí motoru na provozní teplotu se v řídicí jednotce nastavil směšovací poměr $\lambda = 1$ a otáčky motoru $n=2000 \text{ min}^{-1}$. Na motorové brzdě bylo nastaveno zatížení 50 %. Teplota prostředí během měření byla 23 °C. Postupnou změnou předstihu se měřily hodnoty výkonu a kroutícího momentu motoru. A to až do počátku detonačního hoření, které se odhalilo pomocí čidla klepání a poslechem typického zvonivého zvuku. Měření probíhalo nejprve při použití benzínu Verva 100 (tabulka 6.1) a následně pro porovnání při použití benzínu Ba95 (tabulka 6.2). Úhel předstihu zážehu, při kterém začalo docházet k detonačnímu hoření, je v tabulce označen červeně.

6.5. Výsledek měření

Naměřením hodnot jsme získali závislost předstihu zážehu na výkonové parametry motoru pro palivo Verva 100 (obr. 6.3) a Ba95 (obr. 6.4). Dále jsme ověřili vliv vyššího oktanového čísla benzínu na náchylnost k detonačnímu hoření. Při použití benzínu Verva (Ba 98) nastalo klepání motoru při předstihu 24°, oproti tomu při použití paliva Ba95 docházelo ke klepání již při předstihu 21°. Úhel předstihu zážehu, při kterém začalo docházet k detonač-

6. MĚŘENÍ DETONAČNÍHO HOŘENÍ

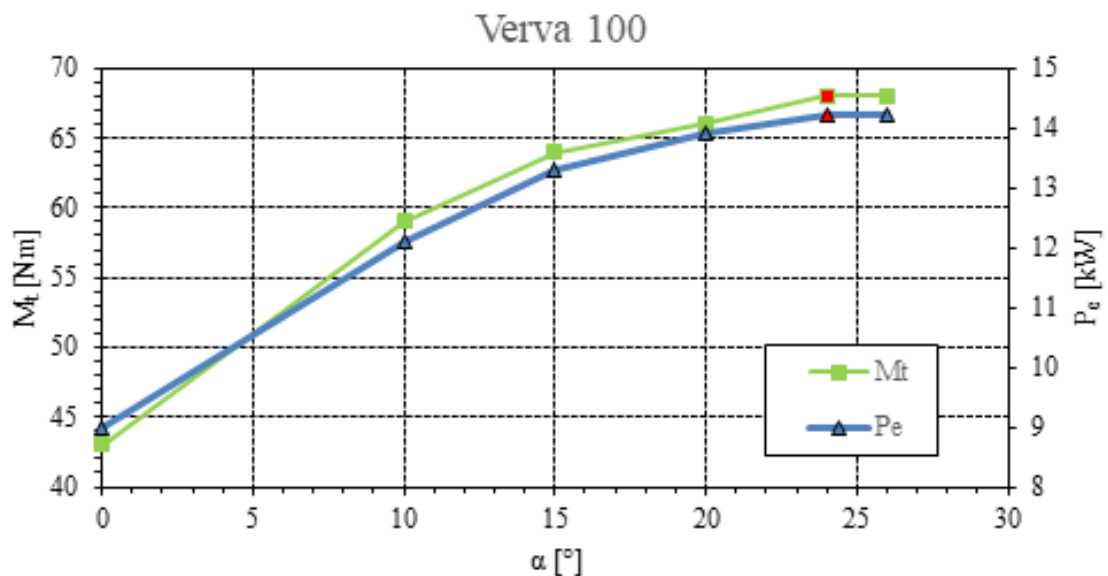
Tabulka 6.1: Naměřené hodnoty pro palivo Verva 100

α °	M_t Nm	P_e kW
0	43	9
10	59	12,1
15	64	13,3
20	66	13,9
24	68	14,2
26	68	14,2

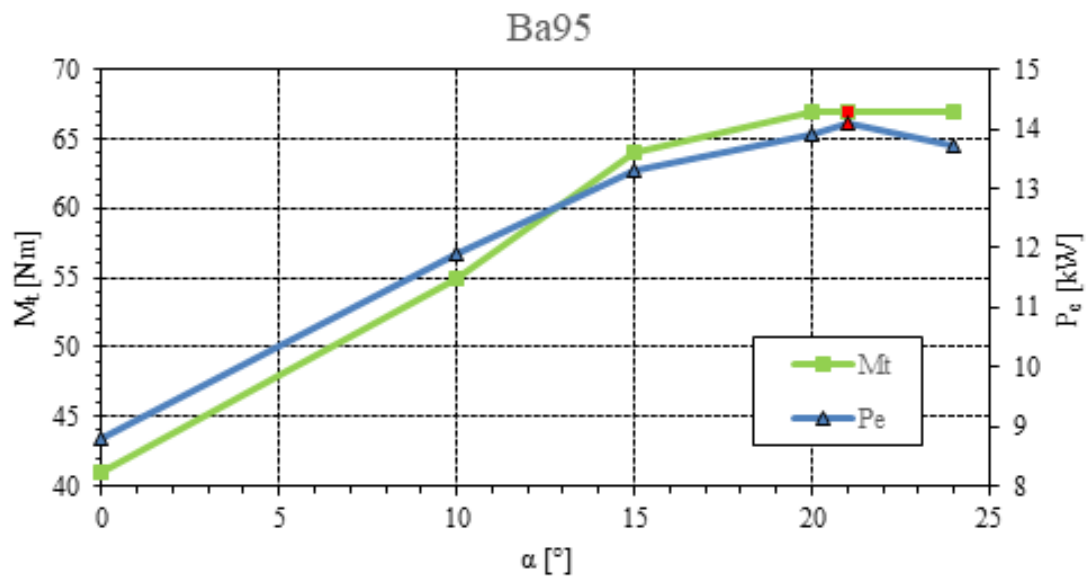
Tabulka 6.2: Naměřené hodnoty pro palivo Ba95

α °	M_t Nm	P_e kW
0	41	8,8
10	55	11,9
15	64	13,3
20	67	13,9
21	67	14,1
24	67	13,7

nímu hoření, je v grafu označen červeně. Při spalování paliva Ba95 měl motor nižší výkon i kroutící moment. Z těchto výsledků se dá říci, že použití paliva s vyšším oktanovým číslem má smysl i u motoru s malým litrovým výkonem. U motoru s vyšším výkonem, jenž by byl i přepřňovaný, se dá předpokládat větší rozdíl výkonových parametrů ve prospěch paliva s vyšším oktanovým číslem.



Obr. 6.3: Závislost předstihu zážehu na výkonové parametry motoru pro palivo Verva 100.



Obr. 6.4: Závislost předstihu zážehu na výkonové parametry motoru pro palivo Ba95.

Závěr

Cílem této práce bylo popsat problematiku detonačního spalování. V rešeršní části práce jsme vymezili rozdíly mezi normálním a detonačním spalováním a vyjmenovali konstrukční i provozní faktory, jež mají vliv na vznik detonačního hoření. Následně byly popsány možnosti detekce klepání a ukázka negativních vlivů tohoto jevu. Na závěr rešeršní části byly uvedeny možné moderní řešení problematiky detonačního spalování.

V druhé části práce následovalo měření detonačního spalování pro ověření vlivu použitého paliva na náchylnost ke klepání motoru. Měření probíhalo na zkušebním stanovišti V125, které se skládá z motoru 1.0 MPI, dynamometru V125 a řídicí elektroniky. Měření bylo provedeno s palivy o různém oktanovém čísle, aby se ověřil vliv paliva s vyšším oktanovým číslem. Naměřené výsledky ukázaly, že při použití paliva s vyšším oktanovým číslem je odolnost motoru proti klepání vyšší. Mimo to měl motor při spalování benzínu s vyšší oktanovým číslem i mírně vyšší výkon a větší kroutící moment. Díky naměřeným výsledkům lze doporučit použití paliva s vyšším oktanovým číslem i u takového atmosférického motoru s relativně malým kompresním poměrem.

Literatura

- [1] QI, Yunliang, Zhi WANG, Jianxin WANG a Xin HE. Effects of thermodynamic conditions on the end gas combustion mode associated with engine knock. *Combustion and Flame* [online]. Elsevier, 2015, **162**(11), 4119-4128 [cit. 2019-5-14]. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.08.016. ISSN 0010-2180.
- [2] WANG, Zhi, Hui LIU a Tao SONG. Relationship between super-knock and pre-ignition. *International Journal of Engine Research* [online]. 2014, **16**(2), 166-180 [cit. 2019-5-14]. DOI: 10.1177/1468087414530388.
- [3] WANG, Zhi, Yunliang QI, Xin HE, Jianxin WANG, Shijing SHUAI a Chung k. LAW. Analysis of pre-ignition to super-knock: Hotspot-induced deflagration to detonation. *Fuel* [online]. Elsevier, 2015, **144**, 222-227 [cit. 2019-5-14]. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.12.061. ISSN 0016-2361.
- [4] GSCHEIDLE, Rolf, Iva MICHŇOVÁ, Zdeněk MICHŇA a Jiří HANDLÍŘ. *Příručka pro automechanika*. Praha: Europa - Sobotáles, 2007, 685 s. : barev. il. ISBN 978-80-86706-17-7.
- [5] Chladicí soustava. In: <http://kotamuda.humlak.cz> [online]. [cit. 2019-5-14]. Dostupné z:
http://kotamuda.humlak.cz/navody_manualy/127/HTM/HTM2/motor/chladici.htm
- [6] Intercooler. In: <http://turbosym.e-monsite.com> [online]. [cit. 2019-5-14]. Dostupné z:
<http://turbosym.e-monsite.com/medias/album/alfa-romeo-4-cylindres-jtd.jpg>
- [7] Ocelové písky. In: <https://www.auto.cz> [online]. [cit. 2019-5-14]. Dostupné z:
<https://www.auto.cz/ocelove-pisky-motoru-zacinaji-vytlacovat-hlinikove-v-cem-jsou-lepsi-120385>
- [8] POLÓNI, Marián, Peter PETRÁK a Tomáš NEUSCHL. *Základy piestových spaľovacích motorov*. 2. prepracované vydanie. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2017, 236 stran : ilustrace (některé barevné). ISBN 978-80-227-4715-8.
- [9] TAKEUCHI, Kazuo, Kosuke FUJIMOTO, Satoshi HIRANO a Minoru YAMASHITA. Investigation of Engine Oil Effect on Abnormal Combustion in Turbocharged Direct Injection - Spark Ignition Engines. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* [online]. SAE International, 2012, **5**(3), 1017-1024 [cit. 2019-5-14]. DOI: 10.4271/2012-01-1615. ISSN 1946-3960.
- [10] KUBOYAMA, Tatsuya, Yasuo MORIYOSHI a Koji MORIKAWA. Visualization and Analysis of LSPI Mechanism Caused by Oil Droplet, Particle and Deposit in Highly Boosted SI Combustion in Low Speed Range. *SAE International Journal of Engines* [online]. SAE International, 2015, **8**(2), 529-537 [cit. 2019-5-14]. DOI: 10.4271/2015-01-0761. ISSN 1946-3944.
- [11] Čidlo tlaku. In: [Slideplayer.cz](http://slideplayer.cz) [online]. 2011 [cit. 2019-5-14]. Dostupné z:
<http://slideplayer.cz/slide/12327760/>

- [12] BOSCH. *Bosch Diesel Fuel-Injection Systems Unit Injector System and Unit Pump System*. Robert Bosch GmbH, 2007. ISBN 978-0-8376-1550-9.
- [13] PECKA, Luboš. *Přehled a princip činnosti senzorů a akčních mechanismů vozidel* [online]. Brno, 2008 [cit. 2019-5-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/2053>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Marián Laurinec.
- [14] ANDERSSON, Ingemar. *Cylinder Pressure and Ionization Current Modeling for Spark Ignited Engines*. Linköping, 2002. ISBN 91-7373-379-2.
- [15] HEYWOOD, John B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw - Hill, 1988, xxix, 930 s. : il. ISBN 0-07-100499-8.
- [16] BEDNÁŘ, Marek. Vstřikování vody. In: *Autoforum.cz* [online]. 2016 [cit. 2019-5-14]. Dostupné z:
<http://www.autoforum.cz/technika/vstrikovani-vody-z-bmw-m4-gts-se-dostane-i-do-beznych-vyvinul-ho-totiz-bosch/>
- [17] Water injection. In: *4x4community.co.za* [online]. [cit. 2019-5-14]. Dostupné z:
<https://www.4x4community.co.za/forum/showthread.php/145418-Water-Meth-injection>
- [18] KUBÍČEK, Miroslav. *Poradní systém pro detekci klepání motoru*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Pavel Sovka.

Seznam použitých zkratek a symbolů

ATDC	<i>After Top Dead Center</i> - Za horní úvratí
BTDC	<i>Before top dead center</i> - Před horní úvratí
CA	<i>Crank angle</i> - Úhel natočení klikové hřídele
CMSW	<i>Computer managment system work</i>
ECU	<i>Engine Control Unit</i> - Řídící jednotka motoru
HU	Horní úvrať
MPI	<i>Multi Point Injection</i> - Vícebodové vstřikování
M_t	[Nm] Kroutící moment
n	[min^{-1}] Otáčky motoru
OHV	<i>OverHead valves</i> - Typ rozvodu
p	[Pa] Tlak
P	[kW] Výkon
T	[K] Teplota
Z_{ZF}	Příliš brzký bod zážehu
Z_{ZR}	Správný bod zážehu
Z_{ZS}	Příliš pozdní bod zážehu
α	Předstih zážehu
Δp	[Pa] Nárůst tlaku
λ	Směšovací poměr