



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

**FILTRY PEVNÝCH ČÁSTIC PRO ZÁŽEHOVÉ
POHONNÉ JEDNOTKY**

GASOLINE PARTICULATE FILTERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Vyhnálek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **David Vyhnálek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radim Dundálek, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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

Filtry pevných částic pro zážehové pohonné jednotky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Uvedení přehledu filtrů pevných částic pro benzínové motory, popis jejich konstrukčního řešení. Výhody a nevýhody s ohledem na plnění emisních limitů. Specifické součásti – keramika, katalytická vrstva. Příklady řešení systému u konkrétních pohonných jednotek.

Cíle bakalářské práce:

Osvojení základních pojmů zadané problematiky. Vysvětlení principu činnosti filtru pevných částic pro benzínové motory. Zamyšlení nad perspektivou budoucího vývoje přeplňovaných benzínových motorů s ohledem na snižování škodlivin ve výfukových plynech.

Seznam doporučené literatury:

REIF, Konrad. Gasoline Engine Management: Systems and Components. Imprint: Springer Vieweg, 2015. Bosch Professional Automotive Information. ISBN 9783658039646.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o filtrech pevných částic pro zážehové pohonné jednotky a klade si za cíl shrnout současný stav poznání a budoucí prospekt této problematiky. V první části se práce zabývá technologií přímého vstřikování benzínu, neboť tato technologie zodpovídá za zvýšenou tvorbu pevných částic, kterým je také věnována pozornost, stejně tak i ostatním škodlivinám. Dále se zde rozebírá důvod nutnosti využívání a dalšího vývoje filtrů, princip fungování a možnosti konstrukčního řešení včetně popisu jednotlivých součástí. Práce se také věnuje možným perspektivám budoucího vývoje přepřínovaných benzínových motorů s ohledem na splňování emisních norem.

KLÍČOVÁ SLOVA

filtr pevných částic, pevné částice, emise, Euro 7, GPF

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with gasoline particulate filters for spark ignition power trains and aims to summarize the current state of knowledge and prospects of this issue. The first part of the thesis focuses on gasoline direct injection technology as it is directly responsible for the increased formation of particulate matter, which is also subject of attention, including other pollutants. It also addresses the reason for the need of usage and further development of filters, the principle of operation and design options, including a description of the individual components. The thesis also discusses possible perspectives for the future development of turbocharged petrol engines with regards to meeting emission standards.

KEYWORDS

gasoline particulate filter, particulate matter, emissions, Euro7, GPF

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VYHNÁLEK, David. *Filtry pevných částic pro zážehové pohonné jednotky* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149840>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Radim Dundálek.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Radima Dundálka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 25. května 2023

.....

David Vyhnálek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Radimu Dundálkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a vstřícnost při konzultacích v průběhu vypracovávání této závěrečné práce. Děkuji také rodičům za podporu během studia.

OBSAH

Úvod	10
1 Zážehové motory s přímým vstřikováním.....	11
1.1 Rozdíly mezi GDI a PFI	11
2 Emisní normy	13
2.1 Způsoby měření	13
3 Pevné částice.....	15
3.1 Poměr paliva a vzduchu	15
3.2 Vznik a složení pevných částic v GDI.....	15
3.3 Nevýfukové PM	17
3.4 Škodlivost	18
4 Princip fungování filtrů pevných částic.....	19
4.1 Specifické součásti.....	20
4.1.1 Filtr bez katalytického potahu	22
4.1.2 Trojcestný katalyzátor a přeměna škodlivých látek	23
4.1.3 Kordieritová keramika s katalytickou vrstvou.....	24
4.2 Umístění.....	26
4.2.1 Příklady řešení u konkrétních pohonných jednotek	27
4.3 Regenerace	29
5 Budoucnost benzínových motorů s ohledem na snižování škodlivin	31
5.1 Hybridní pohony	32
Závěr	33
Použité informační zdroje.....	34
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	42

ÚVOD

Automobilový průmysl stojí na prahu transformační éry, jež v posledních letech výrazně nabrala na obrátkách. Dochází totiž k přechodu na tzv. udržitelnou mobilitu, která nutí konstruktéry hledat uspokojující řešení. Vzhledem k obavám o lidské zdraví a životní prostředí se v průběhu let celosvětově zpřísnují předpisy týkající se redukování množství škodlivých výfukových plynů vzniklých dopravou. Tyto normy proto neustále snižují například povolené množství emitovaného oxidu uhličitého, který vzniká jako primární produkt spalování, což vede k nutnosti zvyšování termodynamické účinnosti spalovacích motorů. Zážehové pohonné jednotky s přímým vstřikováním benzínu se prokázaly jako vhodné řešení tohoto problému. Jedna z nevýhod ale spočívá v nadměrné produkci pevných částic, což byla donedávna komplikace asociovaná převážně se vznětovými agregáty. Nutností se tudíž stala dodatečná úprava spalin, k čemuž napomáhá zavedení filtru pevných částic.

1 ZÁŽEHOVÉ MOTORY S PŘÍMÝM VSTŘIKOVÁNÍM

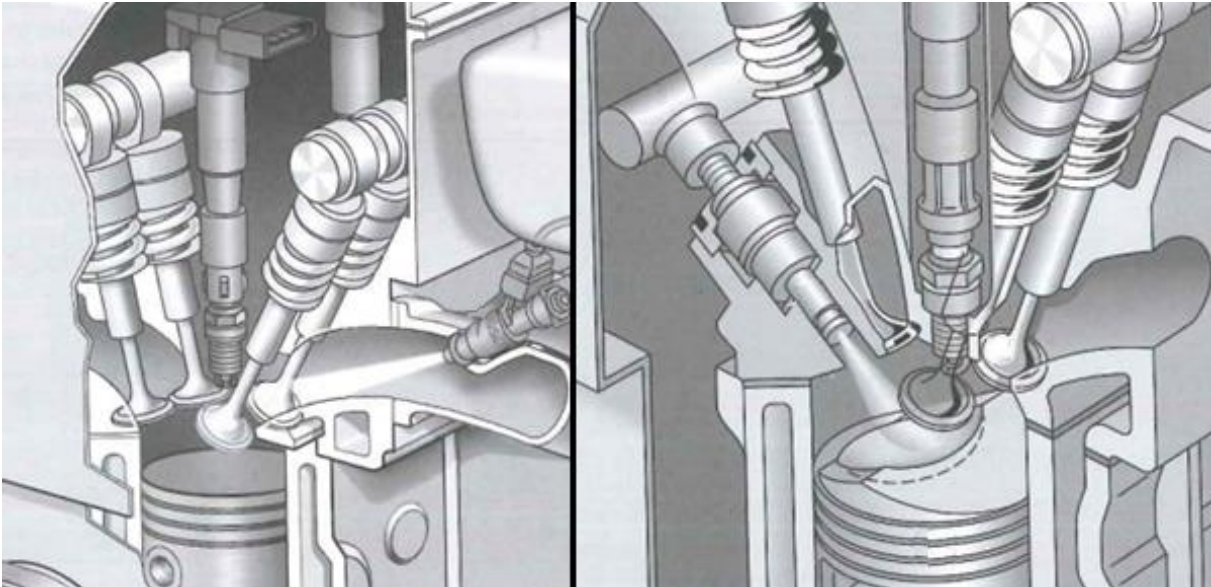
Automobilové společnosti ve snaze adaptovat se na stále se zpřísnující emisní normy a poptávku po vozidlech s ekonomickým provozem mění dlouhodobé strategie, což způsobuje úbytek výroby klasických, převážně vznětových spalovacích motorů. Investice směřují v současnosti do vývoje elektrických či hybridních vozidel a do inovací spalovacích motorů (ICE). Nejdůležitější faktor ovlivňující evoluci pohonných jednotek používaných v silničních vozidlech představují v dnešní době tvorba škodlivých výfukových látek a způsoby, jak tyto emise snížit. V posledních letech proto díky zvýšené efektivitě a snazšímu plnění emisních norem výrazně vzrostl podíl nově vyrobených vozidel s přímým vstřikováním benzínu, přičemž koncern Volkswagen používá pro tuto technologii zkratku TSI, popřípadě FSI nebo TFSI a vědecké články využívají převážně označení GDI. Předpokládá se, že nahrazování konvenčních motorů s nepřímým vstřikováním, v zahraniční literatuře označováno jako PFI a v tuzemsku převážně jako MPI, bude v budoucnu zrychlovat.

1.1 ROZDÍLY MEZI GDI A PFI

Hlavní rozdíl spočívá ve způsobu přípravy směsi vzduchu a paliva před spalováním. GDI vstříkne palivo přímo do válce, kde se ve velmi krátkém časovém úseku spojí se vzduchem při kompresi, což vede ke snížené homogenitě, narozdíl od dobře promíchané směsi vytvořené v PFI v sacím ventilu [1]. Ve spojení s elektronickým řízením lze množství a časování paliva vstříkovaného do komory v průběhu cyklu motoru přesněji řídit, což pomáhá zejména při studeném startu, kdy podstatná část paliva zůstává neodpařená v sacím potrubí a také se díky tomu může zvýšit efektivita spalování [2].

Zvyšování účinnosti umožňuje i omezení čerpacích ztrát, které u motorů PFI vznikají při nízkém zatížení, kdy motor vykonává dodatečnou práci při škrcení přívodu vzduchu, aby se vpustilo pouze množství potřebné pro úplné stechiometrické spalování [3]. Technologie GDI těmto ztrátám předchází díky stratifikované nehomogenní směsi, která se může zapálit v kombinaci s vhodně umístěným vstřikovačem u svíčky podle typu vstřikování, což ovšem násobně zvyšuje produkci pevných částic [3], podrobněji popsáno v sekci 3.1.

Dodatečné navyšování termodynamické účinnosti zážehových motorů, například zavedením turbodmychadla, bylo u PFI historicky limitováno rizikem vzniku detonačního spalování (spontánního samovznícení), způsobeného vysokou teplotou před zažehnutím. Tento nekalý fenomén, tzv. klepání motoru, s sebou nese celou řadu negativních jevů, mimo jiné i zvýšenou produkci pevných částic, a může vést k trvalému poškození motoru. Chladicí efekt vypařujícího se paliva vstříknutého přímo do spalovací komory u GDI motorů tento jev značně minimalizuje a zároveň zvyšuje množství paliva, které lze vstříknout ve srovnání s motorem stejné velikosti s PFI [1; 4].



Obr. č. 1 Schéma vstřikování paliva u PFI (vlevo) ve srovnání s GDI (vpravo) [1]

Na budoucnosti sériově vyráběných automobilů s ICE tedy bude mít pravděpodobně největší podíl technologie GDI [5], neboť umožňuje nižší spotřebu až o 20 % oproti PFI se stejnou hmotností, stejný výkon při menším rozměru válce a celkových rozměrech motoru a zároveň vylučuje menší množství CO_2 [6; 7]. Nevýhoda ovšem spočívá ve zvýšené produkci nežádoucích pevných částic (PM), což vyžaduje následné úpravy výfukových plynů použitím filtrů pevných částic (GPF), popřípadě úpravu strategie vstřikování a konstrukci vstřikovačů [8]. Měření vedené Salibou [9] porovnávalo četnost emitovaných PM podle typu motoru a emisních norem a potvrdilo nárůst v GDI oproti zanedbatelnému množství vzniklému v PFI [7]. V porovnání se vznětovými pohonnými jednotkami, známými jako výrazný producent PM, vytváří GDI méně celkového množství částic, i co se týče hmotnosti, ovšem vyšší kvantitu částic s průměrem do 100 nm [10].

2 EMISNÍ NORMY

V souvislosti s filtry pevných je nutné získat přehled o tématu emisních norem a k tomu příslušných měřicích cyklů. Kvůli obavám o dopad provozu vozidel se spalovacími motory na životní prostředí a lidské zdraví se ve vyspělých státech zavádí regulace emisí výfukových plynů ve formě tzv. emisních norem, jež musí nově vyrobená auta naplnit (homologace).

V Evropské unii platí od roku 1992 emisní normy Euro, jež se od té doby pravidelně revidují a zpřísňují. Normy se zaměřují na snížení škodlivých znečišťujících látek ve formě oxidů dusíku (NO_x), oxidu uhelnatého (CO), plynných uhlovodíků (HC) a pevných částic (PM), ale neupravují emisivitu oxidu uhličitého (CO₂). Jak lze vidět v Tab. 1, pevné částice se začaly zahrnovat v emisních normách až v roce 2009, kvůli stále se zvětšujícímu počtu nově homologovaných zážehových pohonných jednotek s technologií přímého vstřikování. Norma Euro 6 začala brát v potaz nově i početní koncentraci pevných částic (PN). Zavedení normy Euro 7 bude na polovinu snižovat povolené množství emitování CO a pokrokově zahrne i pevné částice vzniklé opotřebením brzd [11].

Tab. 1 Zjednodušená tabulka s evropskými emisními normami pro osobní vozidla se zážehovými pohonnými jednotkami [12]

	Rok zavedení	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM	PM ₁₀ z brzd	PN
		mg/km						
EURO 1	1992	2720	-	970	-	-	-	-
EURO 2	1996	2200	-	500	-	-	-	-
EURO 3	2000	2300	200	-	150	-	-	-
EURO 4	2005	1000	100	-	80	-	-	-
EURO 5	2009	1000	100	-	60	5	-	-
EURO 6	2014	1000	100	-	60	4,5	-	6·10 ¹¹
EURO 7	2025	500	100	-	60	4,5	7	6·10 ¹¹

2.1 ZPŮSOBY MĚŘENÍ

Kromě dovoleného množství emisí se v průběhu let také zásadním způsobem zpřísňují i měřicí cykly, přičemž do roku 2017 se pro nově homologovaná vozidla v Evropské unii několik desetiletí používal tzv. nový evropský jízdní cyklus (NEDC). Skládal se z laboratorního testu navrženého tak, aby simuloval městské a mimoměstské jízdní podmínky. NEDC byl ovšem při používání hodně kritizován za to, že přesně neodrážel scénáře jízdy v reálném světě a že nezohledňoval vyšší rychlosti, agresivní zrychlení ani používání moderních technologií vozidel. [13]

Nástupcem cyklu NEDC se stala celosvětově harmonizovaná procedura WLTP, jež používá dynamičtější a komplexnější cyklus a zahrnuje širší rozsah jízdních podmínek, jako jsou vyšší rychlosti, zrychlení a zpomalení. Bere také v potaz různé konfigurace vozidla a volitelnou výbavu, které mohou mít vliv na emise. Ačkoliv WLTP poskytuje přesnější informace o emitování znečišťujících látek a CO₂ a spotřebě paliva, stále se jedná o laboratorní test, který nemusí plně vystihovat skutečné emise vozidla při reálné jízdě. [13]

Jako doplněk k testu WLTP a zajištění toho, aby vozidla splňovala emisní limity v každodenních podmínkách, byl zaveden test reálných jízdních emisí (RDE), jež zahrnuje testování vozidel na silnici v různých jízdních podmínkách a situacích. Přenosné systémy měření emisí (PEMS) se používají k měření emisí výfukových plynů přímo z vozidla během jízdy na veřejných komunikacích. Tento přístup poskytuje přesnější údaje o emisích vozidla během reálné jízdy, včetně faktorů, jako je teplota, nadmořská výška, stav vozovky a provoz. Vozidla tak v současnosti musí splňovat stanovené emisní limity jak v laboratorních (WLTP), tak v reálných podmínkách (RDE) a pokud vozidlo při testování překročí stanovené limity, může být sankcionováno nebo mít problémy s nedodržením předpisů. Po zavedení normy Euro 7 se také předpokládá, že se testy RDE i WLTP dodatečně upraví na maximální zpřesnění měřicích výsledků. [14; 15]

3 PEVNÉ ČÁSTICE

Porozumění povahy a vzniku pevných částic během spalování přispívá k uzpůsobení technologie vstřikování a úpravy spalín pomocí GPF k naplnění specifických emisních norem. Pevné částice by se mohly definovat jako heterogenní suspenze jemných kapalných nebo pevných partikulí v plynu [16] nebo jednoduše jako saze a prach. Měří se na emisních kontrolách jednak podle celkové hmotnosti (PM), jednak podle početní koncentrace (PN). Indexové označení za PM určuje přibližný průměr v mikrometrech. Většinové hmotnostní zastoupení u GDI motorů se skládá z částic PM₁ [17].

Vznikají převážně antropogenní činností, konkrétně průmyslem, výrobou energie, dopravou a mimo jiné také zemědělstvím [18], dále rozličnými přírodními procesy, například sopečnými erupcemi, lesními požáry nebo větrnými turbulencemi [19]. Do výsledné podoby se PM zformují primárně při emitování do atmosféry, popřípadě sekundárně reagováním v atmosféře, načež oba druhy procházejí dále chemickými a fyzikálními přeměnami, než dojde k jejich odstranění z atmosféry [20]. Tato práce se ovšem bude zabývat PM vzniklými spalováním paliva u moderních zážehových automobilů a také kvůli předpokládané normě Euro 7 i jinými faktory, neboť složení a vznik PM představuje klíčový faktor při vývoji spalovacích motorů schopných dodržet emisní normy.

3.1 POMĚR PALIVA A VZDUCHU

V souvislosti s emitováním škodlivých látek včetně pevných částic a spotřebou palivo hraje důležitou roli poměr λ , který Reif popisuje ve své knize [1] a který se bude v práci dále často vyskytovat. Úplné spalování směsi vzduchu a paliva závisí na stechiometrickém poměru směsi, přičemž tento poměr je definován jako 14,7 kg vzduchu na 1 kg paliva ($\lambda = 1$). Poměr lambda udává, do jaké míry se okamžitý poměr vzduchu a paliva odchyluje od teoretického ideálu stechiometrické směsi neboli určuje poměr skutečné směsi vzduchu a paliva ke stechiometrickému poměru vzduchu a paliva. Tento poměr tak udává, zda probíhá spalování chudé ($\lambda > 1$) či bohaté ($\lambda < 1$) směsi paliva a vzduchu.

3.2 VZNIK A SLOŽENÍ PEVNÝCH ČÁSTIC V GDI

Park a kol. [17] uvádí, že tvorba PM je komplexní funkcí načasování vstřiku při stratifikovaném spalování. Pokud by probíhalo dokonalé spalování stechiometrické homogenní směsi ($\lambda = 1$) složené pouze z uhlíku, vodíku a kyslíku bez úniku oleje do spalovací komory a za předpokladu 100% účinnosti trojcestného katalyzátoru (TWC), vznikly by výfukové plyny pouze ve formě vodní páry a oxidu uhličitého podle následující chemické rovnice [1]:



kde:

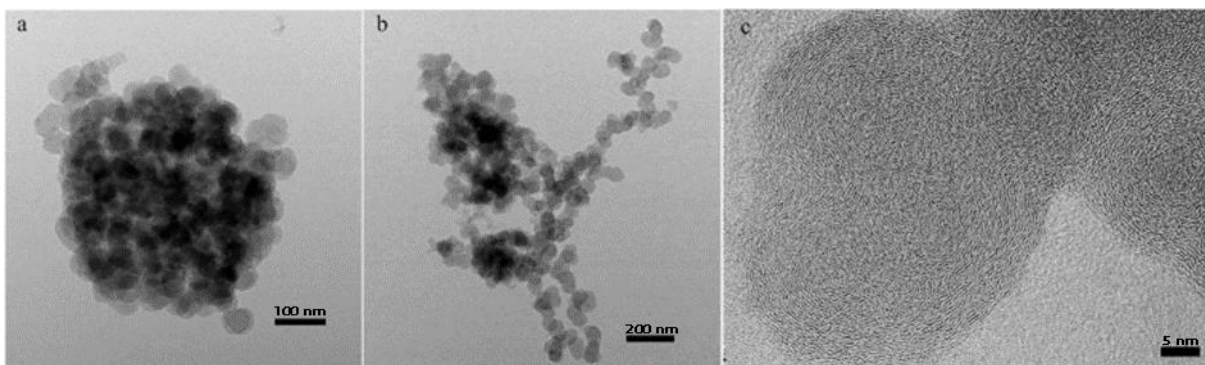
n_1, n_2, m_1 a m_2 určují počet jednotlivých složek chemické rovnice

x a y představují počet atomů uhlíku a vodíku.

V reálném stavu ovšem objemové složení neošetřených spalin pro motor se stechiometrickou směsí představuje ze 71 % N₂, který nehraje žádnou roli při spalování, z 14 % CO₂, ze 13 % vodní páry, z 1 % různé neškodlivé látky (vzácné plyny, O₂, H₂) a z 1 % znečišťující látky (CO, HC, NO_x), z čehož PM v řádu tisícín procenta [1].

Tvorba pevných částic v motorech s přímým vstřikováním paliva se obecně připisuje nedostatečnému promíchávání paliva se vzduchem po vstříknutí paliva, které probíhá buď rozstříkem do válce (SGDI), nebo přes stěnu válce (WGDI) [21]. Způsob vstřikování ovlivňuje, jak velká část paliva se přichytí na povrchu stěn válce, na spodním povrchu hlavy válce a na horní ploše pístu, čímž nevyhnutelně vytváří palivové filmy, silnější u WGDI [21]. Kromě toho také vzhledem k relativně nízkému vstřikovacímu tlaku (50-350 barů) oproti vznětovým motorům a krátké době míchání směsi paliva se vzduchem ve spojení s existencí těžkých složek v benzínovém palivu není možné, aby se veškeré palivo před zapálením zcela odpařilo a vytvořilo homogenní směs [7; 22]. Tyto faktory vedou ke vzniku lokálních zón bohatých na palivo ($\lambda < 1$), následkem čehož vzniká nedokonalé spalování. Mazací olej představuje další spalovanou příměs, a ačkoliv moderní GDI ho spotřebují kolem 0,1 % za výměnný cyklus [23], podílejí se zásadním způsobem na tvorbě a složení PM podle typu a vlastností používaného oleje [24].

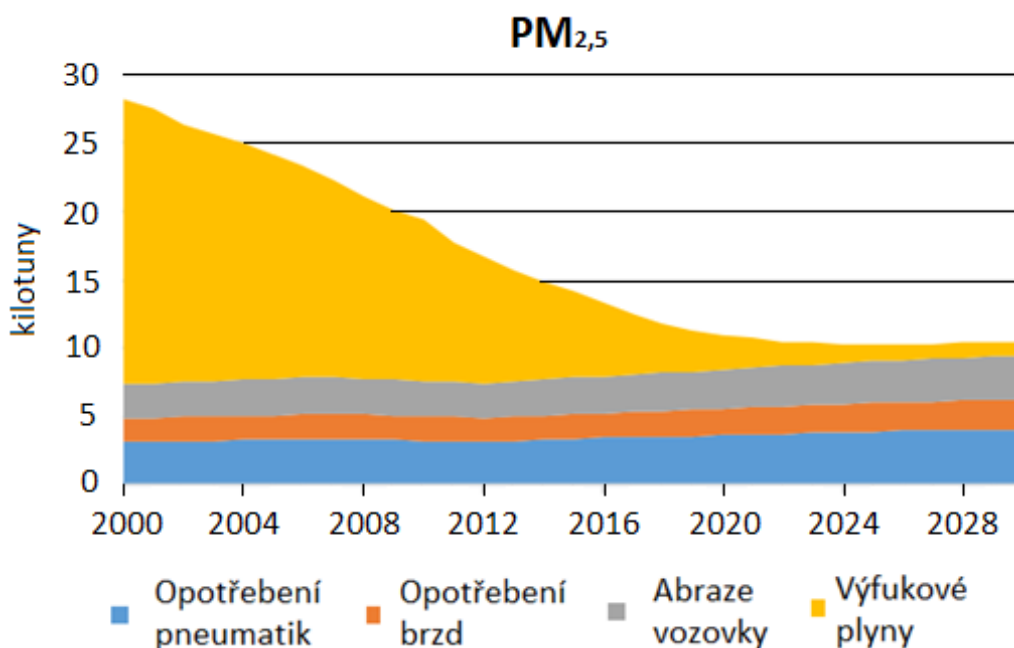
Při těchto podmínkách dochází k tepelnému rozkladu paliva (pyrolýze) a většina částic se dále oxiduje na různé meziprodukty a oxid uhličitý, zatímco ze zbytku vznikají nenasycené nanočástice o velikosti primárně 7-60 nm [25] ve formě uhlovodíků, jejichž povrch na sebe váže jiné uhlovodíky a další prvky (Fe, S, Mn, Ca...), které se následně formují do kulového tvaru a spojují se do tzv. aglomerátů (Obr. č. 2), přičemž ještě většina těchto částic může zoxidovat, takže se pouze malá část dostane z motoru [22; 26]. Výsledné složení pevných částic závisí tedy na mnoha faktorech, například na vlastnostech paliva a maziva a různých provozních podmínkách (teplota chladicí kapaliny, zatížení motoru a jeho otáčky), tudíž se skládá z tisíců odlišných látek, z nichž hlavní hmotnostní zastoupení tvoří z přibližně 90 % uhlík ve formě sazí [27].



Obr. č. 2 TEM (Transmisní elektronový mikroskop) snímky částic sazí emitovaných benzínovými motory (a) shluk sazí, (b) řetězově uspořádané saze, (c) primární částice sazí [28]

3.3 NEVÝFUKOVÉ PM

Emise PM z motorových vozidel se v minulosti spojovala vždy v souvislosti s výfukovými plyny, zavedení normy Euro 7 ovšem počítá i s kontrolou nevýfukových pevných částic (NEE) vzniklých opotřebením brzd. Tento faktor se bude muset pravděpodobně brát v potaz při vývoji nových automobilů v blízké budoucnosti. Lewis a kol. [29] se ve své publikaci zabývali touto problematikou na základě měření a projekcí emisí PM₁₀ a PM_{2,5} ve Velké Británii z celkového transportu (Obr. č. 3). V roce 2000 byly za původ těchto částic zodpovědné výfukové plyny přibližně ze 75 %, v současné době se ovšem tento trend důsledkem regulačního tlaku, mimo jiné i díky filtrům pevných částic, obrátil a majoritní většinu obstarává z více než 90 % opotřebením brzd a pneumatik a také abraze vozovky včetně resuspendovaného prachu.



Obr. č. 3 Vývoj množství emitovaných pevných částic PM_{2,5} a hlavních producentů [29]

Hlavní důvod vzniku NEE představuje jednoduše otěr, v případě brzd spadají zbytky z opotřebením do rozmezí 0,5-10 μm a v případě pneumatik mohou dosáhnout průměru více než 100 μm. Za náročných jízdních podmínek, kdy se teplota brzd a pneumatik extrémně zvýší, může dojít k situaci, že se organické složky z brzdových obložení a pneumatik odpaří a pyrolyzují za vzniku částic o velikosti 10-500 nm. Chemické složení NEE se shoduje s výchozími materiály, od kterých byly vytvořeny, tedy brzdových destiček, rotorů nebo pneumatik. Vzhledem ke složitosti vzniku těchto částic mezi podvozkem vozidla a povrchem vozovky a závislostí na povětrnostních podmínkách také není zřejmé, jak budou probíhat měřicí cykly. [8]

Společnost MANN+HUMMEL [30] vyvinula k řešení tohoto problému filtry na pevné částice vzniklých opotřebením brzd (Obr. č. 4), jež zachytávají PM díky struktuře ve formě kovových vláken a mohly se teoreticky podílet i na emisních kontrolách po zavedení emisní normy Euro 7. Tento filtr může být po uzpůsobení umístěn přímo do stávajících montážních prostorů brzdového ústrojí a může podle nutnosti fungovat pasivně bez dodatečné spotřeby, popřípadě

aktivně za pomoci vakuové pumpy. V budoucnu by se tudíž podobný koncept díky snadné údržbě a schopnosti redukovat NEE přímo u zdroje mohl stát nutností u každého nově vyrobeného automobilu.



Obr. č. 4 Filtr na pevné částice vzniklé opotřebením brzd od firmy MANN+HUMMEL [30]

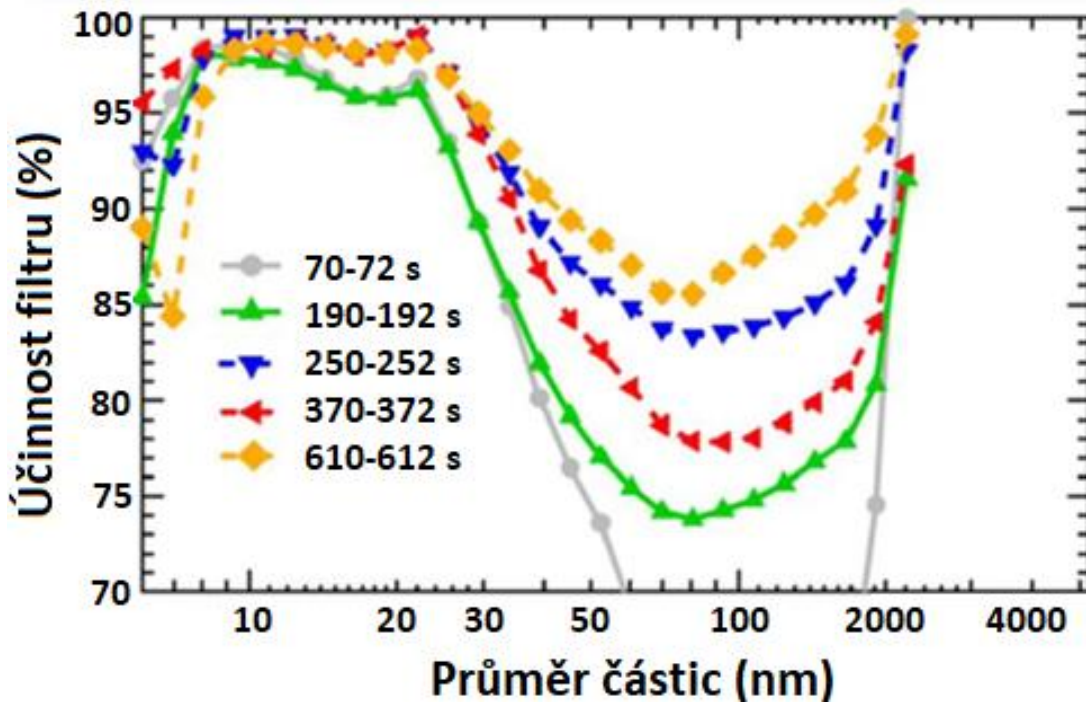
3.4 ŠKODLIVOST

Pevné částice negativně ovlivňují regionální kvalitu vzduchu, lidské zdraví, viditelnost a většina složek PM se také podílí na globálním oteplování [31]. Velikost a koncentrace částic ve výfukových plynech motorů přímo určuje dobu setrvávání částic v atmosféře a tím pádem jejich škodlivost, přičemž částice s průměrem kolem 10 nm se v atmosféře udrží pouze zhruba 15 minut, zatímco PM₁₀ může trvat více než týden, než se usadí [32]. Obecně také platí, že čím menší je částice, tím větší vzniká šance k proniknutí a setrvání v plicích. Světová zdravotnická organizace proto klasifikovala PM jako karcinogen skupiny 1 a vzhledem ke schopnosti usadit se v plicích či proniknout do krevního oběhu představuje častý důvod vzniku neinfekčních nemocí, kterým lze předcházet, zkracuje průměrnou délku života a mnohdy způsobuje předčasné úmrtí [33]. Kromě znečištění ovzduší také přispívá ke kontaminaci vody, a to především kvůli přítomnosti mědi a jiných kovů z brzd [34] a mikroplastů z abraze pneumatik [35].

4 PRINCIP FUNGOVÁNÍ FILTRŮ PEVNÝCH ČÁSTIC

Bakalářské práce v minulých letech [36; 37] se již touto problematikou zabývaly. Filtr pevných částic uplatňuje konstrukci střídavě uzavřených axiálně umístěných kanálků se čtvercovým průřezem, skrz jejichž stěny pronikají výfukové plyny (Obr. č. 6). Filtr funguje srovnatelně s roky používaným DPF (filtr pevných částic pro vznětové motory) s rozdílem regenerace usazenin, neboť GPF pracuje v prostředí s relativně vyšší teplotou, nižším tokem sazí a zároveň s nižší koncentrací kyslíku [8]. Filtrace probíhá zachytáváním částic při srážce s pevnou strukturou stěny díky třem hlavním mechanismům podle velikosti částic. Nejmenší částice (menší než 30 nm) se filtrují převážně Brownovou difuzí, což představuje proces charakteristický náhodným kmitavým pohybem malých částic ve vzduchu, který je výsledkem neustálého bombardování okolními molekulami plynu [38], díky čemuž se částice uchytí na filtru. Další způsob, tzv. intercepce využívá menší průměr pórů, kde částice s větším průměrem při průchodu jednoduše uvíznou. Relativně větší částice se filtrují díky setrvačnosti, již navzdory změně směru proudění vzduchu podléhají [39], což způsobí, že si nečistoty zachovají přímočarý směr pohybu a dopravují se do sběrného kanálu [2]. Gravitační a elektrostatický efekt se také částečně podílí na sběru částic [40].

Účinnost filtrace tedy závisí na velikosti zachytávaných částic a době proudění částic přes filtr (Obr. č. 5), čímž saze usazené na filtru vytvářejí vlastní filtrační vrstvu a pomáhají tak se zachytáváním, což měřením prokázal Chan [41]. Na Obr. č. 5 lze také zpozorovat nekonzistentní zachytávání především relativně malých částic v čase, což je způsobeno regenerací filtru. Dominantní zachytávací mechanismus představuje převážně Brownova difuze, jejíž účinnost se zvyšuje s menším průměrem částic a intercepce, která naopak funguje nejlépe pro větší částice, přičemž platí, že částice okolo 200 nm se zachytávají nejméně [42]. Jiná studie [43] také potvrdila zvýšení účinnosti filtru za pomoci naakumulovaných sazí na stěnách z 60 % na 90 % oproti úplně čistému filtru, což ovšem není řízený proces a některé filtry proto využívají umělé zanesení filtru ke zvýšení počáteční účinnosti. Zachycené saze poté reagují s O_2 a NO_2 a obecně platí, že čím větší je koncentrace těchto látek, tím rychleji se filtr regeneruje [40], výsledkem čehož vznikají přijatelné výfukové plyny ve formě N_2 a CO_2 . Ideální regenerační stav (ekvilibrium stage) nastává, když se množství usazených sazí rovná množství zoxidovaných částic, čímž se nemění tlak výfukových plynů [44].



Obr. č. 5 Ukázka účinnosti čistého GPF v závislosti na průměru částic a době proudění od nastartování [41]

Průměrná teplota představuje další charakteristiku GPF, která přímo ovlivňuje účinnost zachycování a také oxidaci PM, přičemž platí, že v prostředí s vysokou teplotou se PM pohybují intenzivněji, například Brownovým pohybem, což vede ke zvýšení efektivity zachycování stěnou GPF, a kromě toho se také výrazně zvyšuje rychlost oxidace zachycených sazí [45].

Přítomnost GPF také způsobuje tlumení a změnu hluku vycházející z výfuku, což někteří automobiloví nadšenci mohou považovat za negativní vedlejší efekt [46].

4.1 SPECIFICKÉ SOUČÁSTI

Základní vlastnosti, které musí materiály GPF splňovat, spočívají vzhledem ke skokovým rozdílům teplot v dobré odolnosti vůči teplotním šokům a také v nízkém koeficientu teplotní roztažnosti. Návrh základních parametrů filtru, konkrétně hustota porozity, tloušťka stěny, délka, průměr a propustnost, se musí optimalizovat tak, aby bylo dosaženo maximální účinnosti filtrace a zároveň aby se předcházelo poklesu tlaku výfukových spalin. To by postupně vedlo ke zvyšování protitlaku ve výfukovém potrubí, a tím by se negativně ovlivnil výkon motoru, spotřeba paliva a emise [47]. Při návrhu je třeba také brát v potaz, že v průběhu používání GPF se porozita postupně snižuje, neboť se na stěnách akumulují nehořlavé oxidy kovů vzniklé spalováním oleje, opotřebením součástí motoru a korozi výfukového potrubí [2]. Akumulace spalin také způsobuje pokles tlaku. Jeden ze způsobů, jak určit tlakovou ztrátu ve filtrech, využívá upravený Darcyho-Weisbachův zákon, jenž definuje rychlost průtoku kapaliny skrz porézní těleso podle následující rovnice [48]:

$$\Delta p = \Delta p_s + \Delta p_\xi + \Delta p_l + \Delta p_t = \quad (2)$$

$$\frac{\mu_1 \cdot v_s}{k_s} \cdot w_s + \frac{\mu_1 \cdot v_\xi}{k_\xi} \cdot w_\xi + \xi \cdot \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \xi \cdot \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + F \cdot \gamma \cdot \frac{\mu_1 \cdot v_1}{D^2} \cdot L + F \cdot \gamma \cdot \frac{\mu_2 \cdot v_2}{D^2} \cdot L$$

kde:

index 1 se vztahuje k vstupu a index 2 k výstupu plynu

index *s* se vztahuje na stěnu a index *č* na vrstvu sazí

Δp [Pa] – celková tlaková ztráta

Δp_s [Pa] – tlaková ztráta způsobená průchodem skrze stěnu

Δp_ξ [Pa] – tlaková ztráta způsobená průchodem skrz vrstvu sazí

Δp_l [Pa] – lokální tlaková ztráta

Δp_t [Pa] – třecí tlaková ztráta

μ [Pa · s] – dynamická viskozita výfukového plynu

v [m · s⁻¹] – rychlost

k [m²] – permeabilita

w [m] – šířka

ξ [-] – součet koeficientů místní ztráty, pro GPF obvykle $\xi=0,82$

ρ [kg · m⁻³] – hustota spalin

F [-] – koeficient přenosu hybnosti, pro tlakovou ztrátu způsobenou třením ve čtvercových porézních kanálech, $F=28,454$

γ [-] – korekční faktor, $\gamma=1/3$

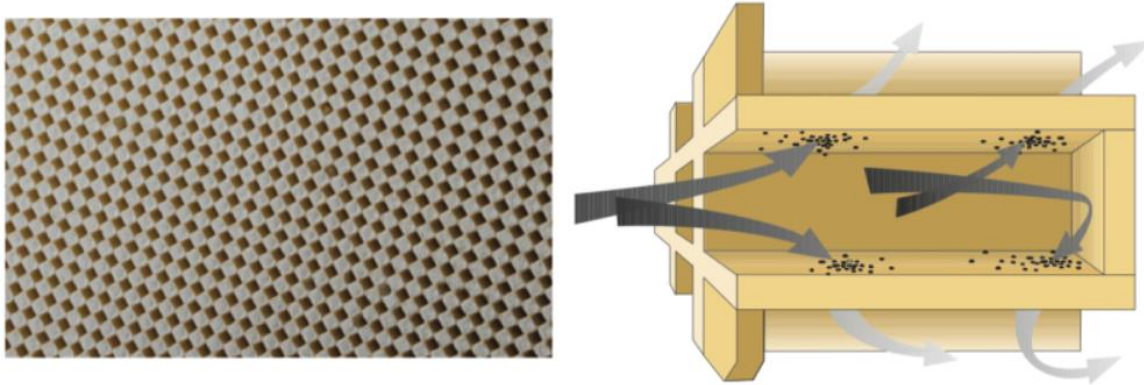
D [m] – průměr GPF

L [m] – délka GPF.

Další faktor ovlivňující chování filtru představuje celková filtrační plocha, která by měla mít co největší obsah ke snižování rychlosti spalin, což zlepšuje účinnost filtrace [2]. Studie [45] prokázala, že na průměrnou teplotu má největší vliv délka a průměr GPF, protože se tím jednoduše zvětší objem, čímž se musí absorbovat více tepla. Na poklesu tlaku nese nejvýznamnější podíl zodpovědnosti hustota pórů, neboť zvyšuje tření mezi spalinami a stěnou.

Vznětové pohonné jednotky využívají již řadu let filtry ve formě aluminiumtitanátu (Al₂TiO₅) nebo karbidu křemíku (SiC), vhodné specificky díky vysoké hustotě a tepelné kapacitě, ale vzhledem k relativně menšímu zatížení sazemi u GDI se ukázala jako nejvhodnější materiál

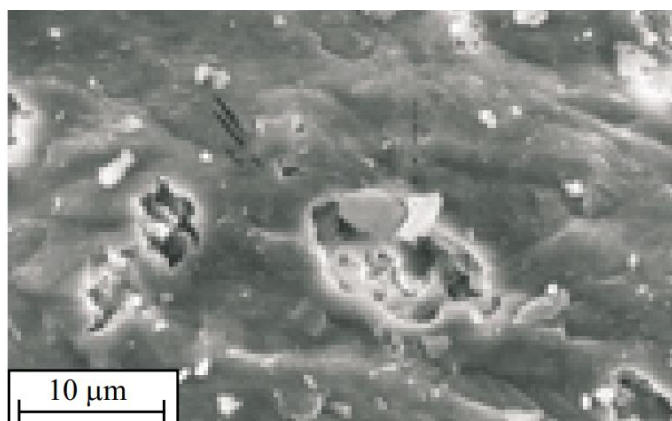
díky efektivnější regeneraci kordieritová keramika (Obr. č. 6) [49]. Alternativní filtrační média, například kovová vlákna nebo kovová pěna, by sice mohly teoreticky využívat přijatelnější poměr mezi účinností a protitlakem, v praxi se ovšem v současnosti vzhledem ke složitosti balení a menší filtrační ploše nepoužívá [50].



Obr. č. 6 Vnější struktura kordieritové keramiky DuraTrap GC od firmy Corning (vlevo) a proudění spalin (vpravo) [51]

4.1.1 FILTR BEZ KATALYTICKÉHO POTAHU

Kordieritová keramika ($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$) splňuje výše uvedené požadavky a díky nízké pořizovací ceně, vhodné porézní mikrostruktuře, vysoké tepelné vodivosti a chemické odolnosti [52] se také používá prakticky ve všech případech (Obr. č. 7). Pórovitost se optimalizuje přidáním různých aditiv k zajištění vhodné propustnosti stěny, podle toho, zda GPF zahrnují i katalytickou vrstvu, aby se zamezilo tlakovým ztrátám. Zároveň se musí zohlednit póry s menším průměrem k zajištění vysoké účinnosti filtrace. Filtr pevných částic obsahující pouze kordieritovou keramiku se označuje jako GPF, popřípadě PPF nebo OPF, přičemž se prokázalo, že ideální pórovitost by se měla pohybovat v rozmezí okolo 45-55 % a střední průměr pórů mezi 13-15 μm [2].

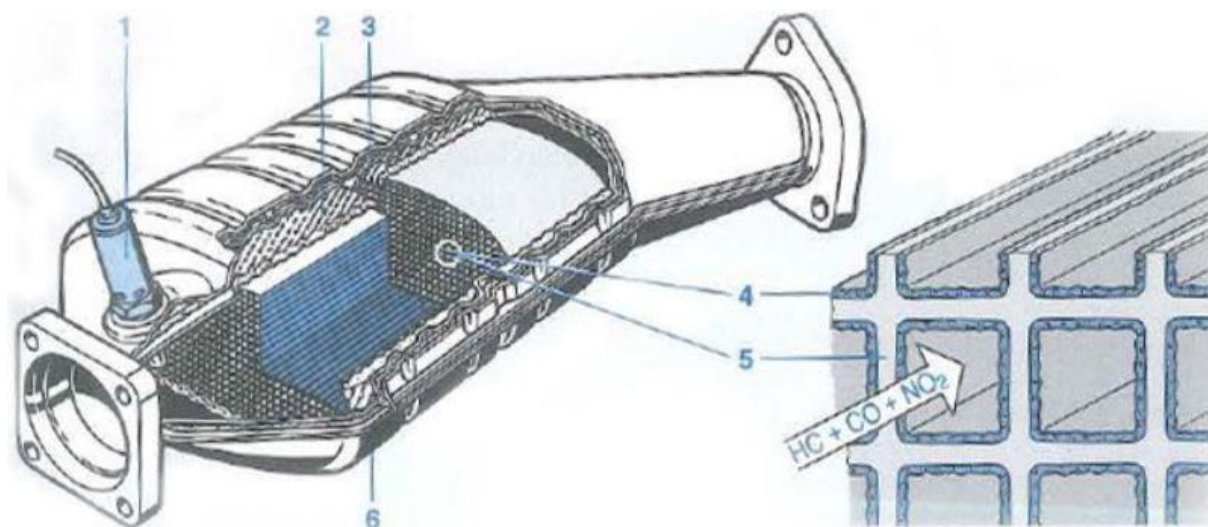


Obr. č. 7 Mikrostruktura kordieritové keramiky [52]

Hlavní výhoda GPF spočívá v jednoduchosti a díky menším velikostem pórů oproti cGPF může být dosaženo vyšší účinnosti filtrace PM bez tlakové ztráty a zároveň není třeba při správném umístění upravovat stávající TWC [2]. Po zavedení normy Euro 7 ovšem nemusí takto jednoduché umístění stačit na přeměnu škodlivých oxidů a nanesení katalytického povlaku na GPF bude nutné.

4.1.2 TROJCESTNÝ KATALYZÁTOR A PŘEMĚNA ŠKODLIVÝCH LÁTEK

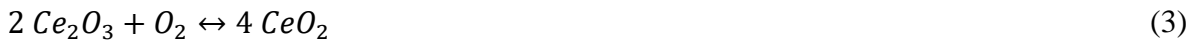
Pochopení principu fungování TWC představuje důležitý aspekt při vývoji GPF, neboť musí být zahrnut v systému na úpravu spalin a stejné zásady navíc využívá filtr s katalytickým povlakem (cGPF). Reif ve své publikaci [1] popisuje význam a činnost trojcestných katalyzátorů. Funkce TWC tkví podle názvu v oxidování či redukování tří nechtěných znečišťujících složek výfukových plynů v podobě oxidu uhelnatého (CO), oxidů dusíku (NO_x) a uhlovodíků (HC) na neškodné produkty ve formě vodní páry (H_2O), oxidu uhličitého (CO_2) a dusíku (N_2). Uplatňuje se zde struktura srovnatelná s GPF (Obr. č. 8), ovšem s rozdílem, že jednotlivé kanálky, jimiž jsou zplodiny nuceny proniknout, nejsou střídavě uzavřené a přeměna spalin probíhá za pomoci povlaku s oxidem hliníku (Al_2O_3), který zvyšuje efektivní povrch, oxidem ceričitým (CeO_2) a vzácnými kovy (Pt, Rh, Pd) na monolitické struktúře vyrobené převážně z keramiky, popřípadě z kovu.



Obr. č. 8 Trojcestný katalyzátor, 1 – Lambda sonda, 2 – Fixační podložka-po zahřátí se rozšíří a udržuje monolit ve stálé pozici, 3 – Tepelně izolovaný plášť, 4 – Katalytický povlak, 5 – Monolit, 6 – Pouzdro [1]

Hlavní faktor účinnosti přeměny spočívá v poměru λ , přičemž platí, že při spalování bohaté směsi ($\lambda < 1$) se vytváří relativně více CO a HC, protože kvůli absenci kyslíku nedostatečně reagují převážně s NO_x , který se díky tomu z většiny redukuje na N_2 . Naopak při pálení chudé směsi ($\lambda > 1$) se HC a CO díky dostatku kyslíku přeměňují z většiny na přijatelné sloučeniny a NO_x opouští TWC redukované z menší části. Při spalování stechiometrické směsi ($\lambda = 1$) vzniká rovnováha mezi redukováním NO_x a oxidováním HC a CO, čímž bývá dosaženo nejvyšší možné účinnosti konverze. K tomu přispívá vrstva povlaku vzácných prvků na

monolitu, přičemž rhodium napomáhá redukováním a platina s palladiem oxidováním. Oxid ceričitý má vlastnost akumulovat a uvolňovat kyslík, což umožňuje balancovat výkyvy v přísunu kyslíku podle následující rovnice [1]:



Liu a kol. [53] zkoumali účinek přítomnosti TWC s ohledem na filtraci pevných částic. Katalyzátor se sám o sobě může s menší účinností podílet na odstraňování PM, přičemž funguje stejně jako GPF. Není ovšem tak efektivní při zachytávání částic, které v tomto případě funguje převážně díky Brownově difuzi s účinností podle následující rovnice [16]:

$$P = 1 - 5,5\mu_d^{2/3} + 3,77\mu_d \text{ pro } \mu_d < 0,009 \quad (4)$$

$$P = 0,819e^{-11,5\mu_d} + 0,0975e^{-70,1\mu_d} \mu_d \text{ pro } \mu_d \geq 0,009 \quad (5)$$

kde:

P [%] – účinnost filtrace

μ_d [-] – bezrozměrný depoziční parametr, $\mu_d = \frac{D_i L}{Q}$, závisí na:

D_i [$m^2 \cdot s^{-1}$] – difúzní konstanta

L [m] – délka filtru

Q [$m^3 \cdot s^{-1}$] – objemový průtok.

V závislosti na zatížení sazemi dosahuje celková účinnost filtrace PM 20-35 %. Dominantní zachytávací mechanismus představuje Brownova difuze, a proto se částice s průměrem do 10 nm filtrují u TWC s účinností až 96 %.

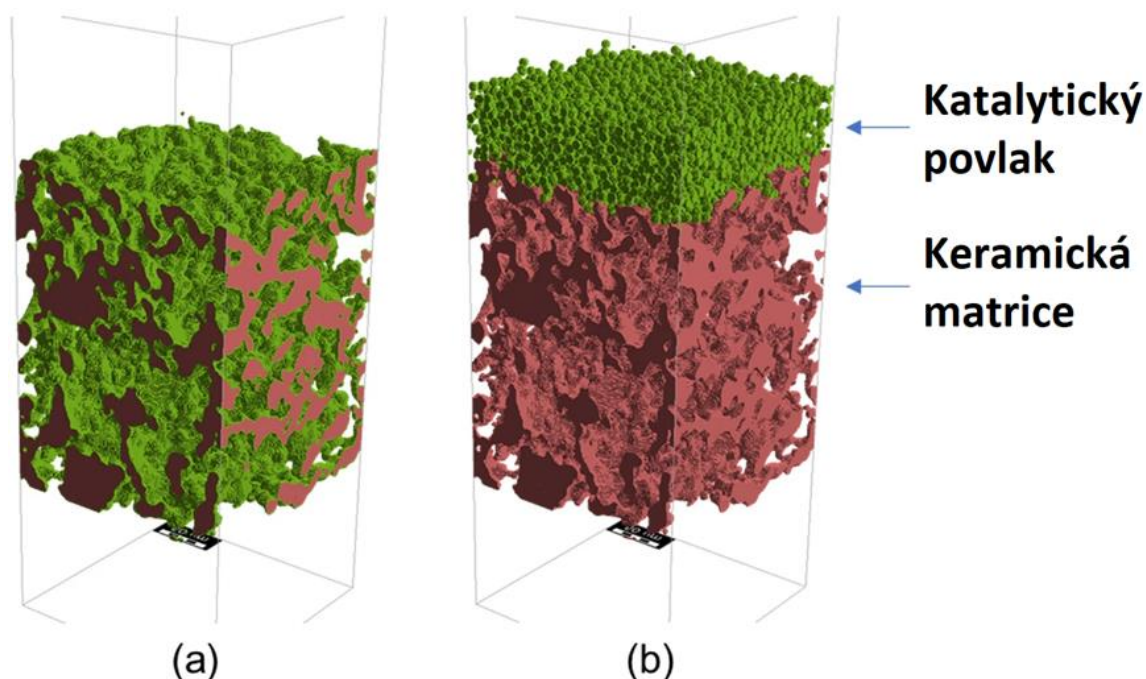
K zachování co nejúčinnější katalytické konverze se běžně používá lambda sonda umístěná běžně před a za TWC, jež kontroluje zbytkové množství kyslíku, díky čemuž lze odhalit fluktuace požadovaného poměru λ při spalování. Řídící jednotka poté vyhodnotí takto získané informace a může upravit množství vstříkovaného paliva k zachování požadovaného poměru λ . [1]

Oxidování plynných uhlovodíků schopných následně se kondenzovat na PM také snižuje celkovou hmotnost emitovaných PM [8]. Poměr Pd a Rh představuje důležitý faktor pro účinnost a životnost TWC, protože vzhledem k vysokým teplotám a přítomnosti reaktivních plynů mohou tyto látky difundovat a vytvořit slitinu, která by negativně ovlivnila katalytické vlastnosti, přičemž experimenty prokázaly, že poměr Pd:Rh 3:2 funguje nejefektivněji [54].

4.1.3 KORDIERITOVÁ KERAMIKA S KATALYTICKOU VRSTVOU

Norma Euro 7 navrhuje nižší emisní limit CO pro benzínová vozidla, s čímž by se samostatný TWC pravděpodobně nebyl schopný vypořádat, dodatečná katalytická vrstva na GPF se tudíž stane nutností. Integrace trojcestných katalyzátorů a filtrů pevných částic do jednoho kompaktního a levnějšího tzv. čtyřcestného katalyzátoru (cGPF) umožňuje kombinovat

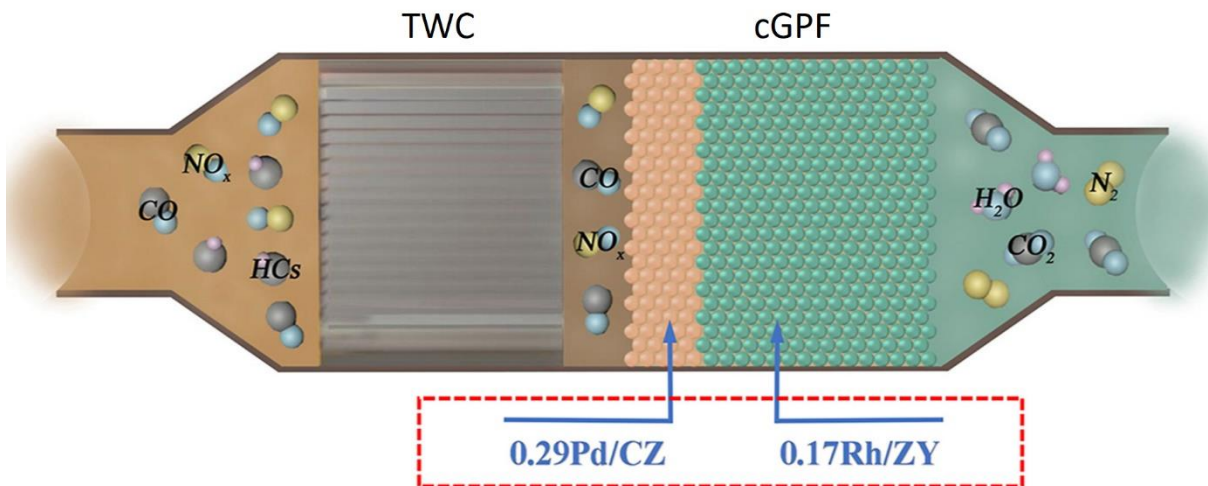
katalytickou konverzi TWC a filtrační funkci GPF, což může usnadnit spalování sazí, snížit celkovou tlakovou ztrátu a také usnadnit zahřívání filtru při studeném startu vozidla [55]. Ukázalo se, že pro cGPF by se mělo dimenzování pórovitosti pohybovat mezi 60-65 % a střední průměr pórů v intervalu 15-20 μm [2]. Takeshi a kol. [56] se věnovali srovnání konvenčního cGPF a inovativnímu filtru od společnosti Mitsui Kinzoku s unikátně naneseným katalytickým povlakem. Katalytickou vrstvu lze nanést buď přímo do keramické matrice včetně pórů (a), nebo pouze na povrch kordieritu (b), přičemž tato vrstva se také podílí na zachytávání částic (Obr. č. 9).



Obr. č. 9 Srovnání konvenčního cGPF (a) s filtrem od společnosti Mitsui Kinzoku (b) [56]

Katalytický povlak cGPF se v obou případech skládal z palladia (Pd) a rhodia (Rh) s hustotou 0,35 g/l a oxidů hlinitého, ceričitého a zirkoničitého (Al_2O_3 , CeO_2 , ZrO_2). Použitím softwaru byla simulována účinnost filtrace pro oba typy za podmínek napodobujících skutečný režim RDE a potvrdilo se, že typ cGPF s katalytickým substrátem naneseným na stěně dosahuje lepších výsledku jak pro PM a PN (> 96 %), tak i pro funkci TWC.

Xin a kol. [57] se zabývali návrhem cGPF schopným vyhovět všem požadavkům normy Euro 7 s nízkou pořizovací cenou (Obr. č. 10). K zamezení možné difúze Pd a Rh využili dva odlišné katalytické povlaky oddělené vrstvou tenké křemíkové vaty s poměrem 1:4. Povlak s Pd byl zkombinován s CeO_2 a Yttriem (Y), přičemž obsah Pd byl omezen na 0,29 hm. %, což umožňuje vysokou kapacitu pro ukládání kyslíku. Povlak s Rh byl sdružen s ZeO_2 a Yttriem, kde obsah Rh zabíral 0,17 hm. %.



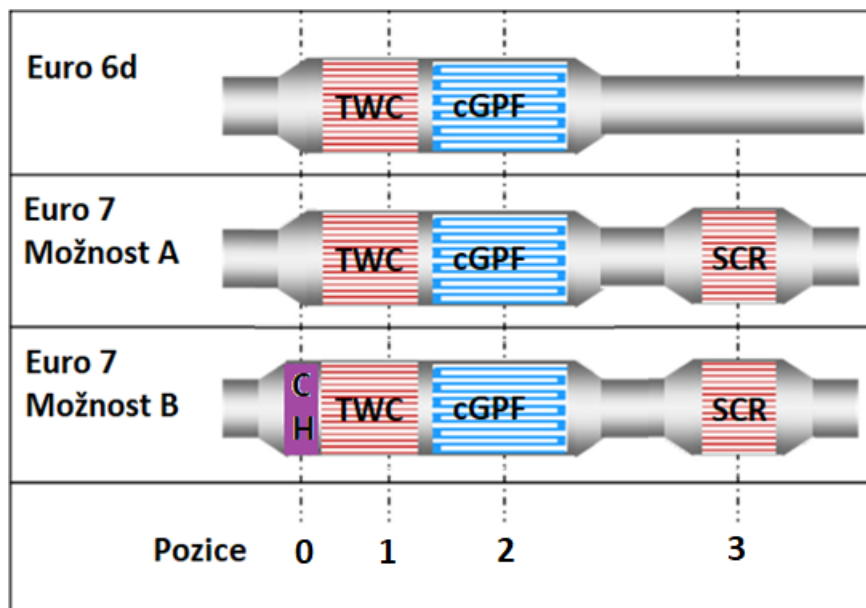
Obr. č. 10 cGPF schopný vyhovět normě Euro 7 v navazujícím (CC) umístění s TWC [57]

4.2 UMÍSTĚNÍ

Vytvoření sestavy na úpravu výfukových plynů kombinováním komponentů TWC s GPF nebo cGPF musí splňovat několik požadavků, konkrétně snížení emisí CO, NO_x a HC, vysokou efektivitu filtrace PM, nízký protitlak, přijatelnou pevnost, vysokou kapacitu pro ukládání kyslíku, malé rozměry a nízkou pořizovací cenu [58]. Vzdálenost mezi jednotlivými součástmi představuje klíčovou charakteristiku, která ovlivňuje chování GPF, přičemž pro součásti napojené přímo na sebe se používá označení CC (close-coupled), zatímco ostatní umístění mající mezi sebou mezeru se nazývají UF (underfloor) [2].

Spieß a kol. [59] a Jang a kol. [60] zkoumali účinnost filtrace v závislosti na vzdálenosti mezi komponenty v UF umístění. Měření prokázalo, že zvyšování vzdálenosti pomáhá filtraci navzdory nižší teplotě spalin, protože se také sníží rychlost proudění spalin, což prodlužuje dobu setrvání plynu ve stěně filtru a tím pádem se naskytne více příležitostí pro PM se zachytit. Autoři rovněž předpokládají, že nerovnoměrnější proudění v CC brání vytvoření rovnoměrné vrstvy sazí, čímž se pravděpodobně snižuje účinnost filtrace. Ačkoliv UF funguje lépe pro zachytávání PM, potřeba vyšší teploty pro oxidování sazí k dosažení efektivnějšího katalyzování škodlivin převládá, a proto se v současnosti na naplnění emisních norem používá převážně TWC a cGPF v seskupení CC [61].

Boger a kol. [62] se zabývali možnými uspořádáními jednotlivých komponent s ohledem na zavedení normy Euro 7 (Obr. č. 11). K současným systémům, jež budou muset projít optimalizací, bude pravděpodobně nutné zavedení dalších komponentů v UF pozici se schopností přeměňovat NH₃ a NO_x (pozice 3), které se v současnosti používají výhradně u vznětových agregátů. Tato dodatečná součást, pravděpodobně ve formě pasivního SCR (selektivní katalytická redukce) katalyzátoru, by zvýšila celkový objem katalyzátoru a dobu setrvání při konverzi. Nově by se také před CC v sestavě mohl zavést elektricky poháněný ohřívač katalyzátoru (CH), který by umožnil predehřev před startem a usnadnil by snižování emisí zejména při nejkritičtějších časových úseku, tedy při studeném startu vozidla (pozice 0).



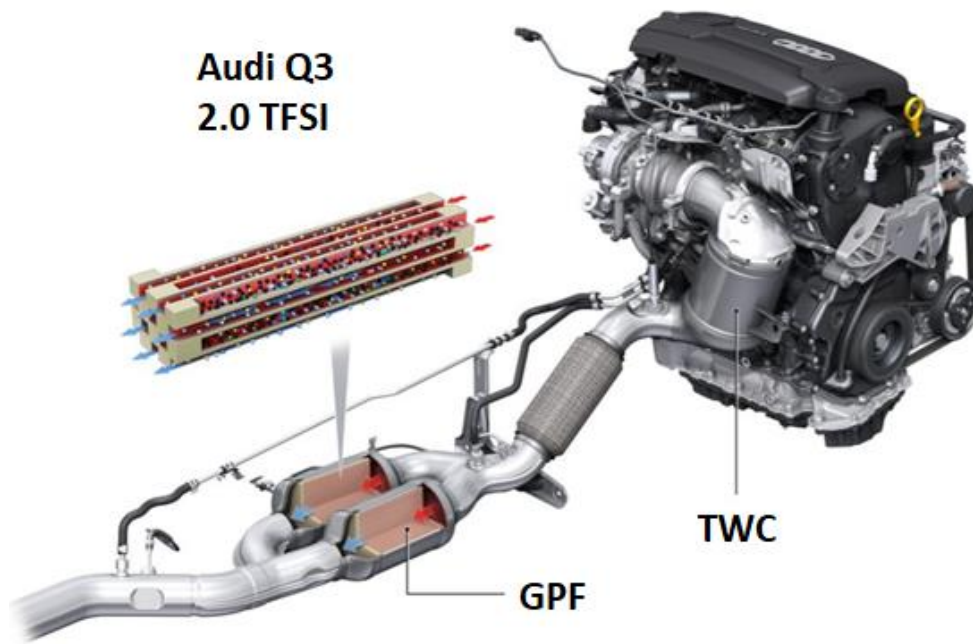
Obr. č. 11 V nejnovějších vozidlech nejpoužívanější soustava a návrh alternativních soustav k naplnění emisní normy Euro 7 [62]

4.2.1 PŘÍKLADY ŘEŠENÍ U KONKRÉTNÍCH POHONNÝCH JEDNOTEK

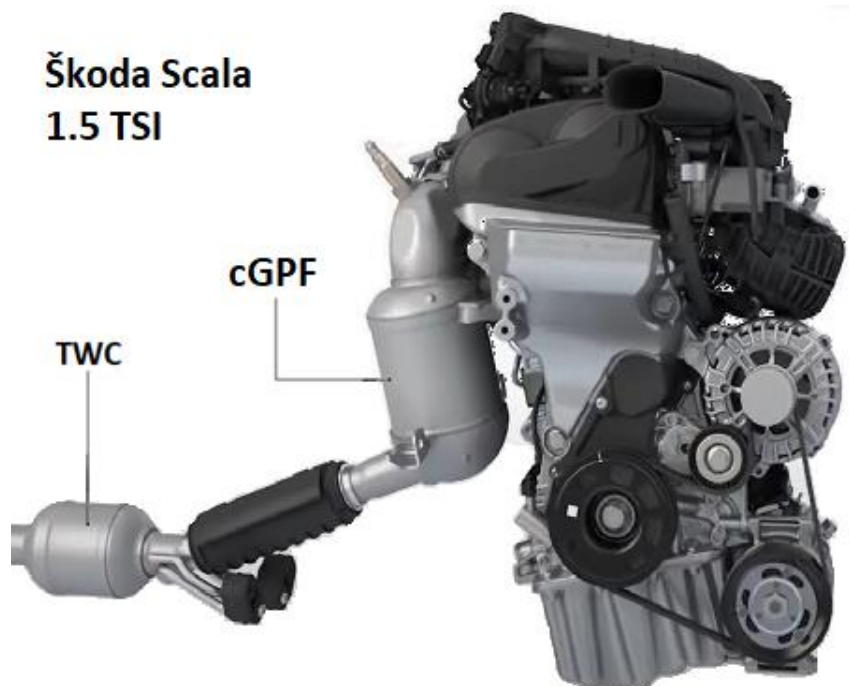
Konstruktéři pro úpravu výfukových plynů u modelu Audi Q3 s motorem 2.0 TFSI zvolili TWC jako první umístěnou komponentu následovanou dvěma paralelně situovanými GPF v UF pozici (Obr. č. 12). Alternativní umístění pro tento model představuje cGPF následovaný TWC v UF pozici, což využívá i Ford Focus kombi 1.5 ecoboost st-line (Obr. č. 12). [46]

Identická rozmístění jako na Obr. č. 11 byla uplatněna ve vozidlech Škoda Superb III, Kodiaq a Karoq vyráběnými od roku 2018 s motorem 2.0 TSI. Pro tento Superb existuje ještě konfigurace pouze s jedním GPF. Škoda Scala s motory 1.0 TSI a 1.5 TSI využívá předřazený cGPF následovaný TWC v UF pozici (Obr. č. 13). [63]

V současnosti se kvůli převládající potřebě přeměny spalin namísto filtrace částic v naprosté většině nových modelů využívá TWC následovaný cGPF (Obr. č. 11) [62].



Obr. č. 12 Umístění komponentů na úpravu výfukových spalin u vozidla Audi Q3 [46]

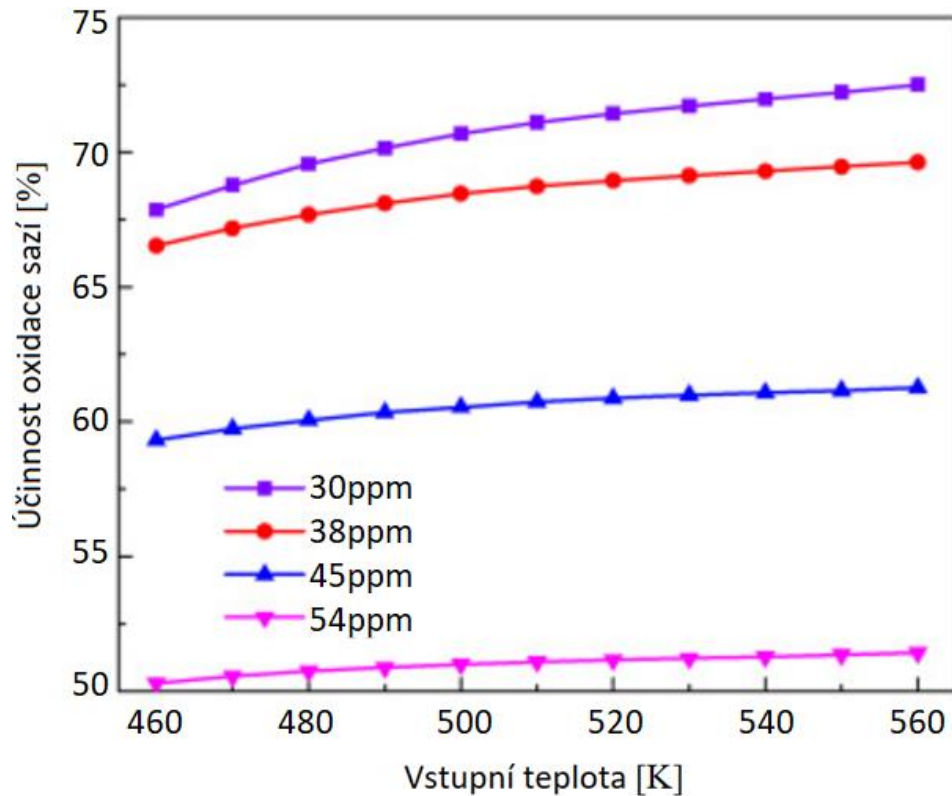


Obr. č. 13 Umístění komponentů na úpravu výfukových spalin u vozidla Škoda Scala 1.5 TSI [63]

4.3 REGENERACE

Jak již bylo zmíněno, ačkoliv nashromážděné saze v GPF napomáhají filtraci, musí být odstraněny oxidací, aby se zabránilo případnému ucpání filtru a protitlaku spalin. Výfukové plyny benzínového motoru obvykle obsahují kvůli předsazenému TWC příliš málo NO_2 a kvůli stechiometrickému provozu také nedostatek O_2 , než aby mohla probíhat dostatečná oxidace sazí v GPF, přestože výfukové plyny dosahují vhodné teploty. Podmínky s dostatečným množstvím kyslíku se však periodicky vyskytují v přechodném provozu, např. při přerušení dodávky paliva při zpomalování vozidla, kdy je oxidace sazí možná díky nespálenému kyslíku. Tento režim se označuje jako pasivní regenerace sazí. Studie prokázaly, že za normálních okolností (jízda na dálničních, venkovských a městských trasách) dokáže pasivní regenerace zajistit dostatečnou míru oxidace. Při krátkých jízdách se studeným motorem ovšem musí být teploty spalin uměle navýšeny, přičemž se ukázalo, že jediný 30sekundový kyslíkový puls při $700\text{ }^\circ\text{C}$ může oxidovat 50-90 % nahromaděných PM neboli aktivní regenerace. Ke stanovení nutnosti spuštění aktivní regenerace slouží snímače teploty a senzory diferenčních tlaků určující tlakovou ztrátu, které předávají informace řídicí jednotce. Pasivní regeneraci lze v případě potřeby (rozsvícení kontrolky) uměle vyvolat uvolněním plynového pedálu na několik sekund při svižnější jízdě. Pokud by opakování tohoto postupu nemělo účinek, znamená to pravděpodobně nadměrné zanesení filtru nespalitelnými oxidy kovů, čímž se výměna filtru stává nutností. [2; 8; 64]

Zhu a kol. [65] se věnovali optimalizaci parametrů výfukových plynů ke zlepšení regeneračního výkonu GPF, snížení zavedeného koeficientu nerovnoměrnosti teploty (C_{TU}), který bere v potaz odlišnosti v procesu hoření sazí v různých částech tělesa a minimalizaci tlakového poklesu. K optimálnímu fungování regenerace by mělo hoření sazí probíhat nejvíce rovnoměrně. Analýza ukázala, že zvýšení usazeného množství PM na keramice má nejvíce negativní vliv na účinnost oxidování (Obr. č. 14) a C_{TU} a zvýšení hmotnostního průtoku je většinou zodpovědné za tlakovou ztrátu. K dosažení nejvyšší účinnosti regenerace by přispělo snížení hmotnostního průtoku výfukových plynů, množství usazených sazí a hmotnostního poměru NO_2 a NO a zvýšení koncentrace kyslíku.



Obr. č. 14 Ukázka vlivu množství usazených PM na účinnosti filtrace, kde ppm udává počet PM na jeden milion všech ostatních částic [65]

Cílem GPF ovšem není oxidování s co největší účinností, nýbrž maximální možná efektivita filtrování PM, k čemuž vrstva usazená na keramice přispívá. Výzvou pro konstruktéry tudíž zůstává vyhledávání rovnováhy mezi všemi parametry ke splnění emisních limitů a zároveň zabránění tlakových ztrát, které by mohly vést k trvalému poškození motoru.

5 BUDOUCNOST BENZÍNOVÝCH MOTORŮ S OHLEDEM NA SNIŽOVÁNÍ ŠKODLIVIN

Existuje mnoho studií zabývajících se možnostmi omezení vlivu emisí ze zážehových pohonných jednotek na klima a ovzduší [8; 15; 62; 66; 67]. Značná část současné politické a veřejné debaty v Evropě, rozdmýchávaná maniackými akcemi ekologických aktivistů, se zaměřuje na stanovování stále ambicióznějších cílů pro přechod na bezuhlíkovou automobilitu, kterou mnoho lidí vnímá pouze jako bateriová elektrická vozidla (BEV). Evropská unie proto schválila troufalý plán Fit for 55, jenž mimo jiné chystá 100% omezení emisí CO₂ pro osobní automobily i užitkové vozy do roku 2035. Vzhledem k mnoha komplikacím souvisejícím s BEV, k jejichž řešení stále zbývá dlouhá cesta, například dostupnost a distribuce bezuhlíkové elektřiny, nedostatek surovin pro výrobu baterií, chybějící infrastruktura nabíjení ve městech nebo otázka ekologické recyklace, lze ovšem předpokládat, že vozidla využívající nějakou formu ICE zůstanou v příštím minimálně desetiletí dominantně vyráběnými automobily.

Kromě omezení měrných emisí CO₂ bude nutné, aby měla budoucí vozidla s ICE také dále snížené ostatní emise výfukových plynů. Dodatečného snižování emisí CO, HC, NO_x a PM lze obecně dosáhnout spalováním co nejvíce stechiometrické směsi a dalším vývojem soustavy k úpravě výfukových plynů. Klíčové je především omezení vzniku těchto škodlivin při startu vozidla za nízkých okolních teplot použitím elektrického ohřívače, neboť za těchto podmínek trvá až 2 minuty od startu vozidla k dosažení optimálního výkonu TWC.

Dalšími možnostmi, na které se výrobci automobilů mohou zaměřit, jsou jednoduše snižování spotřeby a hmotnosti vozidla, třeba použitím lehčích materiálů, a také zmenšení aerodynamického odporu. Systém start-stop, který vypíná motor při volnoběhu, může také snížit emise, ačkoliv prokazatelně snižuje životnost automobilu. Jak již bylo zmíněno v sekci 3.2, pevné částice (PM_{2,5} a PM₁₀) vzniklé spalováním zabírají pouze zlomek z celkového množství emisí způsobených dopravou. Paradoxně tudíž automobily s ICE, BEV a hybridní vozidla (HEV) emitují srovnatelné množství těchto částic. Pokud se bude účinnost GPF dále zlepšovat, bude snižování PM probíhat pro všechny pohony stejně, totiž optimalizováním brzd a pneumatik. Co se týče ostatních škodlivin, benzínová vozidla se ovšem nemohou s BEV rovnat a evoluce bude muset proběhnout.

V současné době tudíž probíhají snahy o maximální snížení skleníkových a jiných škodlivých plynů způsobených provozem benzínových automobilů částečnou elektrifikací. Další možnost představuje výroba syntetických paliv z CO₂, čímž by se provoz současných zážehových motorů stal ve výsledku uhlíkově neutrálním. Výroba je ovšem energeticky velmi náročná a problém s ostatními škodlivinami by setrval. Za zmínku stojí také možná kombinace benzínu a vodíku jako paliva.

Předmětem zkoumání v souvislosti se snížením emisí benzínových motorů se v posledních letech stalo možné využívání vodíku jako aditiva do spalovacího procesu [68; 69; 70]. Vodík lze v automobilitě aplikovat různými způsoby, přičemž teoretické použití jako přídatný zdroj energie v zážehových pohonných jednotkách představuje jeden nich. Z alternativních paliv je vodík nejšetrnější k životnímu prostředí, neboť spalováním přímo vzniká voda namísto CO₂ a lze jej teoreticky vyrábět ekologickými a snadno dostupnými způsoby, ačkoliv neekonomičtěji se syntetizuje ze zemního plynu, protože výroba elektrolýzou vody by byla finančně náročná. Jeden z nedostatků s ohledem na emise při možném integrování vodíku do benzínových motorů, kromě vysoké hořlavosti a otázky skladování, představuje vyšší teplota

spalování, což klade nejen vyšší nároky na materiály součástí, ale také vede ke zvýšeným emisím NO_x , což je jediná kontrolovaná škodlivá látka, vznikající čistě spalováním vodíku. Podrobný popis tohoto konceptu ovšem přesahuje rámec této práce, která se bude dále zabývat reálnější vizí budoucnosti benzinových motorů, konkrétně hybridními pohony.

5.1 HYBRIDNÍ POHONY

Hybridní vozidla obecně uchovávají energii k pohonu ve dvou či více podobách, přičemž v naprosté většině případů ve formě benzínu a elektrické energie. HEV tak představují mezistupeň mezi automobily poháněnými benzínem a plně elektrickými vozidly a střídání mezi těmito druhy pohonů může zásadním způsobem omezit emise, převážně díky snížené spotřebě, k čemuž může docházet několika způsoby. Podle stupně a typu hybridizace lze elektrickou energii k pohonu použít namísto klasického spalování při určitých jízdních režimech, ze kterých by se normálně emitovalo zvýšené množství škodlivin, typicky přerušovaná jízda ve městě. HEV také umožňují vypnout spalovací motor při zpomalování či volnoběhu. Technologie rekuperačního brzdění také pomáhá snížit spotřebu, neboť značnou částí energie, která by jinak disipovala při brzdění, lze opětovně využít nabitím akumulátoru. [71; 72]

Hybridizace zážehových pohonných jednotek tedy pravděpodobně představuje nejekonomičtější a nejrychlejší cestu ke snížení emisí oxidu uhličitého a potažmo i ostatních škodlivin.

ZÁVĚR

V současnosti poskytují pokroky v technologii filtrů pevných částic, jako zdokonalování kordieritové matrice, optimalizování vnějších rozměrů a kalibrování vnitřních struktur filtru, dostatečnou účinnost filtrace pevných částic na splnění i zatím nejprísnějších RDE testovacích cyklů na měření emisních norem. Kvůli ostatním kontrolovaným škodlivinám ve výfukových plynech se stává běžnou praxí nanášení dodatečné katalytické vrstvy na povrch filtru, jež pomáhá trojcestnému katalyzátoru s přeměnou těchto zplodin a která se po zavedení normy Euro 7 stane nezbytnou.

Konstrukční řešení se také odvíjí od nutnosti zamezení emitování těchto polutantů, k čemuž napomáhá vyšší teplota spalin, což v praxi znamená umístění komponent na úpravu spalin co nejbližší motoru. Tyto úpravy ovšem vedou ke snížené účinnosti filtru, a konstruktéři proto musí hledat kompromis mezi efektivitou zachytávání částic, katalyzováním škodlivin a předcházením potenciálně nežádoucích efektů ve formě protitlaku spalin a potažmo negativních dopadů na termodynamickou účinnost, či dokonce životnost motoru. Řešením pro nadcházející normu Euro 7 by mohl být filtr pevných částic přímo napojený na trojcestný katalyzátor a elektrický ohřívač spalin s katalytickou vrstvou nanesenou přímo na stěnu filtru ve formě vzájemně oddělených oxidačních (palladium) a redukčních (rhodium) činidel.

Navzdory všem snahám o zamezení tvorby emisí u zážehových pohonných jednotek lze předpokládat, že částečná elektrifikace bude kvůli emisním normám časem nevyhnutelná. Budoucí vyhlídky přeplňovaných benzínových vozidel závisí na jejich schopnosti dosáhnout minimálních emisí znečišťujících látek a skleníkových plynů. Ve srovnání s bateriovými elektrickými vozidly, jež dosáhla v posledních letech obdivuhodných zlepšení, se za stávajících podmínek nemohou s ohledem na emise rovnat.

U všech pohonů ovšem existuje prostor k inovacím, benzín se například může vyrábět synteticky z CO₂, a namísto jednostranných dotací by se mohly nastavit dlouhodobější ekologické cíle a nechat trh, ať se postupně sám vyvine. Ve správně nastaveném regulačním rámci zahrnujícím ekologický dopad nejen provozu, ale i výroby a likvidaci vozidel, by totiž mohla kombinace všech zdokonalených pohonů vést k lepší ekologické budoucnosti než každý z nich samostatně. Jedním z těchto pohonů by mohl být i částečně elektrifikovaný přeplňovaný benzínový motor s vhodně optimalizovaným filtrem pevných částic.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] REIF, Konrad. *Gasoline engine management: systems and components*. Ilustrované vydání. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. Bosch professional automotive information. ISBN 978-3-658-03963-9.
- [2] JOSHI, Ameya a Timothy JOHNSON. Gasoline Particulate Filters—a Review. *Emission Control Science and Technology*. 2018, **4**(4), 219-239. ISSN 2199-3629. Dostupné z: doi:10.1007/s40825-018-0101-y
- [3] ALKIDAS, Alex C. Combustion advancements in gasoline engines. *Energy Conversion and Management* [online]. 2007, **48**(11), 2751-2761 [cit. 2023-04-16]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2007.07.027
- [4] WANG, Zhi, Hui LIU a Rolf REITZ. Knocking combustion in spark-ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2017, **61**, 78-112 [cit. 2023-03-11]. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2017.03.004
- [5] M, Gunjan a Sonia M. *Gasoline Direct Injection (GDI) System Market by Component (Fuel Injectors, Fuel Pumps, Electronic Control Units, Others), by Engine Type (4 cylinder, 6 cylinder, 8 cylinder, Others), by Vehicle Type (Passenger Cars, Commercial Vehicles), by Sales Channel (Original Equipment Manufacturer, Aftermarket): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2020-2030* [online]. 5320 SW Macadam Avenue, Suite 100, Portland, Oregon, 97239, United States of America (USA): Allied Market Research, 2022 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://www.alliedmarketresearch.com/gasoline-direct-injection-system-gdi-market>
- [6] POTENZA, Marco, Marco MILANESE a Arturo DE RISI. Effect of injection strategies on particulate matter structures of a turbocharged GDI engine. *Fuel* [online]. 2019, **237**, 413-428 [cit. 2023-02-17]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2018.09.130
- [7] LIATI, Anthi, Daniel SCHREIBER, Panayotis DIMOPOULOS EGGENSCHWILER, Yadira ARROYO ROJAS DASILVA a Alexander SPITERI. Electron microscopic characterization of soot particulate matter emitted by modern direct injection gasoline engines. *Combustion and Flame* [online]. 2016, **166**, 307-315 [cit. 2023-03-10]. ISSN 00102180. Dostupné z: doi:10.1016/j.combustflame.2016.01.031
- [8] MARICQ, M. Matti. Engine, aftertreatment, fuel quality and non-tailpipe achievements to lower gasoline vehicle PM emissions: Literature review and future prospects. *Science of The Total Environment* [online]. 2023, **866** [cit. 2023-04-12]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.161225
- [9] SALIBA, Georges, Rawad SALEH, Yunliang ZHAO et al. Comparison of Gasoline Direct-Injection (GDI) and Port Fuel Injection (PFI) Vehicle Emissions: Emission Certification Standards, Cold-Start, Secondary Organic Aerosol Formation Potential, and

- Potential Climate Impacts. *Environmental Science & Technology* [online]. 2017, **51**(11), 6542-6552 [cit. 2023-03-10]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.6b06509
- [10] FATOURAIE, Mohammad, Margaret WOOLDRIDGE, Benjamin PETERSEN a Steven WOOLDRIDGE. Effects of Ethanol on In-Cylinder and Exhaust Gas Particulate Emissions of a Gasoline Direct Injection Spark Ignition Engine. *Energy & Fuels* [online]. 2015, **29**(5), 3399-3412 [cit. 2023-04-01]. ISSN 0887-0624. Dostupné z: doi:10.1021/ef502758y
- [11] *Komise navrhuje nové normy Euro 7 ke snížení emisí znečišťujících látek z vozidel a zlepšení kvality ovzduší* [online]. In: . Brusel: Evropská komise, 2022 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: https://czechia.representation.ec.europa.eu/komise-navrhuje-nove-normy-euro-7-ke-snizeni-emisi-znecestujicich-latek-z-vozidel-zlepseni-kvality-2022-11-10_cs
- [12] European emission standarts. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards#cite_note-20
- [13] LAŽANSKÝ, Milan. WLTP: Noční měra výrobců aut je tady. Co znamená pro nové motory?. *Autorevue* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/wltp-wiki-cyklus-rozdil-nedc>
- [14] CLABEN, Johannes, Sascha KRYSMON, Frank DORSCHIEDT, Stefan STERLEPPER a Stefan PISCHINGER. Real Driving Emission Calibration—Review of Current Validation Methods against the Background of Future Emission Legislation. *Applied Sciences* [online]. 2021, **11**(12) [cit. 2023-05-24]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app11125429
- [15] MAURER, Robert, Theodoros KOSSIORIS, Stefan STERLEPPER, Marco GÜNTHER a Stefan PISCHINGER. Achieving Zero-Impact Emissions with a Gasoline Passenger Car. *Atmosphere* [online]. 2023, **14**(2) [cit. 2023-04-28]. ISSN 2073-4433. Dostupné z: doi:10.3390/atmos14020313
- [16] HINDS, William C. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. A Wiley-Interscience publication. ISBN 0-471-19410-7.
- [17] PARK, Cheolwoong, Sungdae KIM, Hongsuk KIM a Yasuo MORIYOSHI. Stratified lean combustion characteristics of a spray-guided combustion system in a gasoline direct injection engine. *Energy* [online]. 2012, **41**(1), 401-407 [cit. 2023-04-19]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2012.02.060
- [18] J. OGWUEGBU, ,, M. OGWUEGBU a J. EGWURUGWU. Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of physical sciences*. 2007, **2**(5), 7.
- [19] SORIANO, A., S. PALLARÉS, F. PARDO, A.B. VICENTE, T. SANFELIU a J. BECH. Deposition of heavy metals from particulate settleable matter in soils of an industrialised

- area. *Journal of Geochemical Exploration* [online]. 2012, **113**, 36-44 [cit. 2023-03-18]. ISSN 03756742. Dostupné z: doi:10.1016/j.gexplo.2011.03.006
- [20] ZHANG, Renyi, Alexei KHALIZOV, Lin WANG, Min HU a Wen XU. Nucleation and Growth of Nanoparticles in the Atmosphere. *Chemical Reviews* [online]. 2012, **112**(3), 1957-2011 [cit. 2023-04-17]. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:10.1021/cr2001756
- [21] PRICE, Philip, Richard STONE, Tony COLLIER a Marcus DAVIES. *Particulate Matter and Hydrocarbon Emissions Measurements: Comparing First and Second Generation DISI with PFI in Single Cylinder Optical Engines* [online]. In: . s. - [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: doi:10.4271/2006-01-1263
- [22] QIAN, Yong, Zilong LI, Liang YU, Xiaole WANG a Xingcai LU. Review of the state-of-the-art of particulate matter emissions from modern gasoline fueled engines. *Applied Energy* [online]. 2019, **238**, 1269-1298 [cit. 2023-02-19]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.179
- [23] AMIRANTE, Riccardo, Elia DISTASO, Michele NAPOLITANO, Paolo TAMBURRANO, Silvana IORIO, Paolo SEMENTA, Bianca VAGLIECO a Rolf REITZ. Effects of lubricant oil on particulate emissions from port-fuel and direct-injection spark-ignition engines. *International Journal of Engine Research* [online]. 2017, **18**(5-6), 606-620 [cit. 2023-03-02]. ISSN 1468-0874. Dostupné z: doi:10.1177/1468087417706602
- [24] PIRJOLA, Liisa, Panu KARJALAINEN, Juha HEIKKILÄ et al. Effects of Fresh Lubricant Oils on Particle Emissions Emitted by a Modern Gasoline Direct Injection Passenger Car. *Environmental Science & Technology* [online]. 2015, **49**(6), 3644-3652 [cit. 2023-03-19]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es505109u
- [25] BARONE, Teresa, John STOREY, Adam YOUNGQUIST a James SZYBIST. An analysis of direct-injection spark-ignition (DISI) soot morphology. *Atmospheric Environment* [online]. 2012, **49**, 268-274 [cit. 2023-03-19]. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2011.11.047
- [26] HAYNES, B.S. a H.Gg. WAGNER. Soot formation. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1981, **7**(4), 229-273. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/0360-1285(81)90001-0
- [27] FUSHIMI, Akihiro, Yoshinori KONDO, Shinji KOBAYASHI, Yuji FUJITANI, Katsumi SAITOH, Akinori TAKAMI a Kiyoshi TANABE. Chemical composition and source of fine and nanoparticles from recent direct injection gasoline passenger cars: Effects of fuel and ambient temperature. *Atmospheric Environment* [online]. 2016, **124**, 77-84 [cit. 2023-03-19]. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2015.11.017
- [28] XING, Jiaoping. Individual particles emitted from gasoline engines: Impact of engine types, engine loads and fuel components. *Journal of Cleaner Production*. 2017, **149**(461-471), 11.

- [29] CARSLAW, David a Alastair LEWIS. *Non-Exhaust Emissions from Road Traffic* [online]. The University of York, 2019, 94 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://eprints.whiterose.ac.uk/156628/>
- [30] Brake dust particle filter. *MANN+HUMMEL* [online]. Schwieberdinger Straße 126 71636 Ludwigsburg, 2021 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://oem.mann-hummel.com/en/oem-products/fine-dust-filters/brake-dust-particle-filter.html>
- [31] HARRISON, Roy M. Airborne particulate matter. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2020, **378**(2183) [cit. 2023-04-16]. ISSN 1364-503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2019.0319
- [32] QIAN, Yong, Zilong LI, Liang YU, Xiaole WANG a Xingcai LU. Review of the state-of-the-art of particulate matter emissions from modern gasoline fueled engines. *Applied Energy* [online]. 2019, **238**, 1269-1298 [cit. 2023-04-01]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.179
- [33] POPE, C., Nathan COLEMAN, Zachari POND a Richard BURNETT. Fine particulate air pollution and human mortality: 25+ years of cohort studies. *Environmental Research* [online]. 2020, **183** [cit. 2023-04-02]. ISSN 00139351. Dostupné z: doi:10.1016/j.envres.2019.108924
- [34] HULSKOTTE, J.H.J., H.A.C. DENIER VAN DER GON, A.J.H. VISSCHEDIJK a M. SCHAAP. Brake wear from vehicles as an important source of diffuse copper pollution. *Water Science and Technology* [online]. 2007, **56**(1), 223-231 [cit. 2023-04-21]. ISSN 0273-1223. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2007.456
- [35] SOMMER, Frank, Volker DIETZE, Anja BAUM, Jan SAUER, Stefan GILGE, Christoph MASCHOWSKI a Reto GIERÉ. Tire Abrasion as a Major Source of Microplastics in the Environment. *Aerosol and Air Quality Research* [online]. 2018, **18**(8), 2014-2028 [cit. 2023-04-21]. ISSN 16808584. Dostupné z: doi:10.4209/aaqr.2018.03.0099
- [36] KADLČEK, F. *Filtry pevných částic pro zážehové pohonné jednotky*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Radim Dundálek.
- [37] POHLUDKOVÁ, Lenka. *Filtry pevných částic pro zážehové motory*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124256>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Radim Dundálek.
- [38] *Developments in Surface Contamination and Cleaning* [online]. Elsevier, 2010 [cit. 2023-03-27]. ISBN 9781437778304. Dostupné z: doi:10.1016/C2009-0-61579-8
- [39] Inertial Filters. In: *Filtrotecnica* [online]. Zona Artigianale di Sariano 29025: Filtrotecnica Italiana Srl [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.filtrotecnica.com/en/inertial-filters/>

- [40] E, Jiaqiang, Wei ZUO, Junxu GAO, Qingguo PENG, Zhiqing ZHANG a Pham HIEU. Effect analysis on pressure drop of the continuous regeneration-diesel particulate filter based on NO₂ assisted regeneration. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2016, **100**, 356-366 [cit. 2023-04-01]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.02.031
- [41] CHAN, Tak, David LAX, Garry GUNTER, Jill HENDREN, Joseph KUBSH a Rasto BREZNY. Assessment of the Fuel Composition Impact on Black Carbon Mass, Particle Number Size Distributions, Solid Particle Number, Organic Materials, and Regulated Gaseous Emissions from a Light-Duty Gasoline Direct Injection Truck and Passenger Car. *Energy & Fuels* [online]. 2017, **31**(10), 10452-10466 [cit. 2023-02-15]. ISSN 0887-0624. Dostupné z: doi:10.1021/acs.energyfuels.7b01345
- [42] NAKAMURA, Kazuki, Yuta SUGAYA, Kyohei YAMAGUCHI, Jin KUSAKA, Michael ARNDT a Christos DARDIOTIS. Characterization of Soot Loading and Filtration Efficiency of a Gasoline Particulate Filter with Photoacoustic Sensor and Particle Number Counting Systems. *Atmosphere* [online]. 2023, **14**(3) [cit. 2023-05-03]. ISSN 2073-4433. Dostupné z: doi:10.3390/atmos14030476
- [43] LAMBERT, Christine, Timothy CHANKO, Douglas DOBSON, Xin LIU a James PAKKO. Gasoline Particle Filter Development. *Emission Control Science and Technology* [online]. 2017, **3**(1), 105-111 [cit. 2023-03-31]. ISSN 2199-3629. Dostupné z: doi:10.1007/s40825-016-0055-x
- [44] ZUO, Qingsong, Xinning ZHU, Jianping ZHANG et al. Effects of exhaust parameters on temperature and pressure drop of the gasoline particulate filter in the regeneration equilibrium state. *Fuel* [online]. 2019, **257** [cit. 2023-03-01]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2019.116019
- [45] ZUO, Qingsong, Xiaomei YANG, Xinning ZHU, Qingwu GUAN, Kexiang WEI, Zhuang SHEN, Guohui ZHU a Bin ZHANG. Effects of structural optimization design of gasoline particulate filter on soot emission and performance of GDI engine. *International Journal of Environmental Science and Technology* [online]. 2022, **19**(11), 11199-11216 [cit. 2023-04-01]. ISSN 1735-1472. Dostupné z: doi:10.1007/s13762-021-03861-7
- [46] ROBINSON, Matt. What Are Petrol Particulate Filters, And Why Do They Make Cars Sound Worse?. *Carthrottle* [online]. 2021 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.carthrottle.com/post/what-are-petrol-particulate-filters-and-why-do-they-make-cars-sound-worse/>
- [47] SHIMODA, Takehide, Yoshitaka ITO, Chika SAITO et al. *Potential of a Low Pressure Drop Filter Concept for Direct Injection Gasoline Engines to Reduce Particulate Number Emission* [online]. In: . s. - [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: doi:10.4271/2012-01-1241
- [48] E, Jiaqiang, Wei ZUO, Junxu GAO, Qingguo PENG, Zhiqing ZHANG a Pham HIEU. Effect analysis on pressure drop of the continuous regeneration-diesel particulate filter based on NO₂ assisted regeneration. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2016, **100**,

356-366 [cit. 2023-04-29]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.02.031

- [49] BOGER, Thorsten, Dominik ROSE, Per NICOLIN, N. GUNASEKARAN a Thomas GLASSON. Oxidation of Soot (Printex® U) in Particulate Filters Operated on Gasoline Engines. *Emission Control Science and Technology* [online]. 2015, **1**(1), 49-63 [cit. 2023-04-01]. ISSN 2199-3629. Dostupné z: doi:10.1007/s40825-015-0011-1
- [50] OU, Qisheng, M. MARICQ, James PAKKO, Timothy CHANKO a David PUI. Design and evaluation of a sintered metal fiber filter for gasoline direct injection engine exhaust aftertreatment. *Journal of Aerosol Science* [online]. 2019, **133**, 12-23 [cit. 2023-04-19]. ISSN 00218502. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaerosci.2019.04.003
- [51] Corning hits 1-million-unit milestone with gasoline particulate filter production. In: *Greencarcongress* [online]. 2018 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2018/06/20180626-corning.html>
- [52] GUSEV, A., E. AVVAKUMOV, O. VINOKUROVA a V. SALOSTII. The Effect of Transition Metal Oxides on the Strength, Phase Composition, and Microstructure of Cordierite Ceramics. *Glass and Ceramics* [online]. 2001, **58**(12), 24-26 [cit. 2023-03-27]. ISSN 03617610. Dostupné z: doi:10.1023/A:1010976810405
- [53] LIU, Haoye, Ziyang LI, Mengzhu ZHANG, Hongming XU, Xiao MA a Shijin SHUAI. Exhaust non-volatile particle filtration characteristics of three-way catalyst and influencing factors in a gasoline direct injection engine compared to gasoline particulate filter. *Fuel* [online]. 2021, **290** [cit. 2023-04-26]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2020.120065
- [54] VEDYAGIN, Aleksey, Vladimir STOYANOVSKII, Pavel PLYUSNIN, Yury SHUBIN, Elena SLAVINSKAYA a Ilya MISHAKOV. Effect of metal ratio in alumina-supported Pd-Rh nanoalloys on its performance in three way catalysis. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2018, **749**, 155-162 [cit. 2023-04-22]. ISSN 09258388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2018.03.250
- [55] BELOT, Igor, David VIDAL, Robert GREINER, Martin VOTSMEIER, Robert HAYES a François BERTRAND. Impact of washcoat distribution on the catalytic performance of gasoline particulate filters as predicted by lattice Boltzmann simulations. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2021, **406** [cit. 2023-03-31]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2020.127040
- [56] UEDA, Takeshi, Hiroki KURIHARA, Shingo AKITA, Yuusuke NAGAI, Rikiya MYOCHI, Katsumasa HORII, Naoki MUNAKATA a Takashi WAKABAYASHI. High Particulates Filtration Efficiency with On-wall Coated Gasoline Particulate Filter Catalyst. *Topics in Catalysis* [online]. [cit. 2023-04-21]. ISSN 1022-5528. Dostupné z: doi:10.1007/s11244-023-01805-8
- [57] XIN, Ying, Hanxue ZHANG, Pan LI et al. Low-content and highly effective zoned Rh and Pd three-way catalysts for gasoline particulate filter potentially meeting Euro 7.

- Journal of Rare Earths* [online]. 2023 [cit. 2023-04-22]. ISSN 10020721. Dostupné z: doi:10.1016/j.jre.2023.03.009
- [58] LAMBERT, Christine, Timothy CHANKO, Douglas DOBSON, Xin LIU a James PAKKO. Gasoline Particle Filter Development. *Emission Control Science and Technology* [online]. 2017, **3**(1), 105-111 [cit. 2023-02-10]. ISSN 2199-3629. Dostupné z: doi:10.1007/s40825-016-0055-x
- [59] SPIESS, Stephanie, Ka-Fai WONG, Joerg-Michael RICHTER a Raoul KLINGMANN. Investigations of Emission Control Systems for Gasoline Direct Injection Engines with a Focus on Removal of Particulate Emissions. *Topics in Catalysis* [online]. 2013, **56**(1-8), 434-439 [cit. 2023-04-21]. ISSN 1022-5528. Dostupné z: doi:10.1007/s11244-013-9992-6
- [60] JANG, Jihwan, Jongtae LEE, Yonghyun CHOI a Sungwook PARK. Reduction of particle emissions from gasoline vehicles with direct fuel injection systems using a gasoline particulate filter. *Science of The Total Environment* [online]. 2018, **644**, 1418-1428 [cit. 2023-04-21]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.362
- [61] CHEN, Jian, Suhao HE, Wenzheng XIA et al. *Coated Gasoline Particulate Filter Technology Development to Meet China6 PN Regulation* [online]. In: . s. - [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: doi:10.4271/2020-01-0387
- [62] BOGER, Thorsten, Dominik ROSE, Suhao HE a Ameya JOSHI. Developments for future EU7 regulations and the path to zero impact emissions – A catalyst substrate and filter supplier's perspective. *Transportation Engineering* [online]. 2022, **10** [cit. 2023-04-22]. ISSN 2666691X. Dostupné z: doi:10.1016/j.treng.2022.100129
- [63] *Skoda Scala - Exhaust gas aftertreatment with petrol particulate filter* [online]. In: . Youtube, 2019 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=69O8lwMTUz0>
- [64] BOGER, Thorsten, Dominik ROSE, Per NICOLIN, N. GUNASEKARAN a Thomas GLASSON. Oxidation of Soot (Printex® U) in Particulate Filters Operated on Gasoline Engines. *Emission Control Science and Technology* [online]. 2015, **1**(1), 49-63 [cit. 2023-04-25]. ISSN 2199-3629. Dostupné z: doi:10.1007/s40825-015-0011-1
- [65] ZHU, Xinning, Qingsong ZUO, Yuanyou TANG, Yong XIE, Zhuang SHEN a Xiaomei YANG. Performance enhancement of equilibrium regeneration in a gasoline particulate filter based on field synergy theory. *Energy* [online]. 2022, **244** [cit. 2023-04-24]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2021.122701
- [66] KÖNIG, Daniel, Nadine BAUCKS, Ralph-Uwe DIETRICH a Antje WÖRNER. Simulation and evaluation of a process concept for the generation of synthetic fuel from CO₂ and H₂. *Energy* [online]. 2015, **91**, 833-841 [cit. 2023-04-28]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2015.08.099

- [67] MAURER, Robert, Theodoros KOSSIORIS, Stefan HAUSBERGER, Nicola TOENGES-SCHULLER, Stefan STERLEPPER, Marco GÜNTHER a Stefan PISCHINGER. How to define and achieve Zero-Impact emissions in road transport?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2023, **116** [cit. 2023-04-28]. ISSN 13619209. Dostupné z: doi:10.1016/j.trd.2023.103619
- [68] ELSEMARY, Ismail, Ahmed ATTIA, Kairy ELNAGAR a Mahmoud ELSALEH. Spark timing effect on performance of gasoline engine fueled with mixture of hydrogen–gasoline. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, **42**(52), 30813-30820 [cit. 2023-04-29]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2017.10.125
- [69] QIAN, Lijun, Juye WAN, Yejian QIAN, Yu SUN a Yuan ZHUANG. Experimental investigation of water injection and spark timing effects on combustion and emissions of a hybrid hydrogen-gasoline engine. *Fuel* [online]. 2022, **322** [cit. 2023-04-28]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2022.124051
- [70] SUN, Xingyu, Hengli LIU, Xiongbo DUAN, Hao GUO, Yangyang LI, Junhao QIAO, Qi LIU a Jingping LIU. Effect of hydrogen enrichment on the flame propagation, emissions formation and energy balance of the natural gas spark ignition engine. *Fuel* [online]. 2022, **307** [cit. 2023-04-29]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2021.121843
- [71] SENEAL, P.K. a Felix LEACH. Diversity in transportation: Why a mix of propulsion technologies is the way forward for the future fleet. *Results in Engineering* [online]. 2019, **4** [cit. 2023-05-03]. ISSN 25901230. Dostupné z: doi:10.1016/j.rineng.2019.100060
- [72] WANG, Yue, Atriya BISWAS, Romina RODRIGUEZ, Zahra KESHAVARZ-MOTAMED a Ali EMADI. Hybrid electric vehicle specific engines: State-of-the-art review. *Energy Reports* [online]. 2022, **8**, 832-851 [cit. 2023-05-24]. ISSN 23524847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egyr.2021.11.265

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Al_2O_3	oxid hlinitý
BEV	battery electric vehicle
Ca	vápník
CC	close coupled
Ce_2O_3	oxid ceritý
CeO_2	oxid ceričitý
CH	catalytic heater
CO	oxid uhelnatý
CO_2	oxid uhličitý
DPF	diesel particulate filter
Fe	železo
FSI	fuel stratified injection
GDI	gasoline direct injection
GPF	gasoline particulate filter
H_2O	voda
HC	uhlovodíky
HEV	hybrid electric vehicle
CH	catalytic heater
ICE	internal combustion engine
Mn	mangan
MPI	multi point injection
N_2	dusík
N_2O	oxid dusný
NEDC	new european driving cycle
NEE	non exhaust emissions

NH ₃	amoniak
NO _x	oxidy dusíku
O ₂	kyslík
OPF	otto particle filter
Pd	palladium
PEMS	portable emissions measurement system
PFI	port fuel injection
PM	particulate matter
PM ₁₀	pevné částice s přibližným průměrem 10 μm
PM _{2,5}	pevné částice s přibližným průměrem 2,5 μm
PN	particulate number
PPF	petrol particulate filter
ppm	particles per milion
Pt	platina
RDE	real driving emissions
Rh	rhodium
S	síra
SCR	selective catalytic reduction
SGDI	spray guided direct injection
SiC	karbid křemíku
TEM	transmisivní elektronový mikroskop
TFSI	turbo Fuel Stratified Injection
TSI	turbocharged Stratified Injection
UF	under floor
WGDI	wall guided direct injection
WLTP	worldwide harmonized light vehicles test procedure
Y	yttrium

λ		poměr paliva a vzduchu
C_{TU}	[-]	koeficient nerovnoměrnosti teploty
D	[m]	průměr filtru pevných částic
D_i	[m ² · s ⁻¹]	difúzní konstanta
F	[-]	koeficient přenosu hybnosti
L	[m]	délka filtru pevných částic
$n_1, n_2, m_1 a m_2$		počet jednotlivých složek chemické rovnice
P	[-]	účinnost filtrace
Q	[m ³ · s ⁻¹]	objemový průtok
k	[m ²]	permeabilita
v	[m · s]	rychlost
w	[m]	šířka
x		počet atomů uhlíku
y		počet atomů vodíku
γ	[-]	korekční faktor
μ	[Pa · s]	dynamická viskozita výfukového plynu
μ_d	[-]	depoziční parametr
ξ	[-]	součet koeficientu místní ztráty
ρ	[kg · m ⁻³]	hustota
Δp	[Pa]	celková tlaková ztráta
Δp_s	[Pa]	tlaková ztráta způsobená průchodem skrze stěnu
$\Delta p_{\check{c}}$	[Pa]	tlaková ztráta způsobená průchodem skrz vrstvu sazí
Δp_l	[Pa]	lokální tlaková ztráta
Δp_t	[Pa]	třecí tlaková ztráta