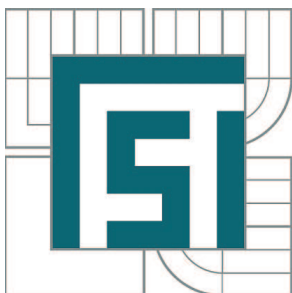


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PEVNOSTNĚ DEFORMAČNÍ ANALÝZA UCHYCENÍ FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC NA TRAKTORU

STRESS-STRAIN ANALYSIS OF DIESEL PARTICULATE FILTER SUPPORT ON TRACTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PŘEMYSL JEŽEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADIM DUNDÁLEK, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Přemysl Ježek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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

Pevnostně deformační analýza uchycení filtru pevných částic na traktoru

v anglickém jazyce:

Stress-strain Analysis of Diesel Particulate Filter Support on Tractor

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte pevnostně deformační analýzu uchycení filtru pevných částic na traktoru. Posuďte stávající stav, respektive navrhněte možnosti pro nápravná opatření.

Cíle diplomové práce:

Získání znalostí o zadané problematice. Osvojení používání výpočtových programů pro analýzu metodou konečných prvků. Provedení pevnostně deformační analýzy stávající konstrukce. Posouzení konstrukčního řešení. Navržení možností pro nápravná opatření.

Seznam odborné literatury:

- [1] Koehler, E.: Verbrennungsmotoren, Vieweg ferlag, Braunschweig 1998
- [2] Rauscher, J.: Vozidlové motory, studijní opory, FSI VUT Brno 2003
- [3] HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.
- [4] Baumruk, P.: Příslušenství spalovacích motorů, ČVUT Praha, 1996

Vedoucí diplomové práce: Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 23.11.2011

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce je vypracování pevnostně deformační analýzy uchycení filtru pevných částic na traktor. Jsou zde uvedeny všechny podstatné kroky pro sestavení modelu pro výpočet metodou konečných prvků. Tedy jak popis geometrie, tak především tvorba sítě a zjišťování a definování všech zátěžných sil. Výsledek výpočtu je posouzen z pevnostního hlediska a je navrženo jedno nápravné opatření s cílem snížit napěťové maximum.

KLÍČOVÁ SLOVA

Filtr pevných částic, DPF, PM, pevné částice, držák filtru, pevnostně deformační analýza, metoda konečných prvků, MKP, vnitřní napětí, traktor.

ABSTRACT

The subject of this thesis is to carry out stress-strain analysis of diesel particulate filter support on tractor. So it describes sequence of steps for the analysis model, such as geometry description, mesh generation, applied forces definition and others. Result of the analysis is assessed in terms of strength and improvement was proposed.

KEYWORDS

Diesel particulate filter, DPF, PM, particulate matter, filter support, Stress-strain Analysis, Final Element Method, FEM, internal stress, traktor.



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JEŽEK, P. Pevnostně deformační analýza uchycení filtru pevných částic na traktoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 25. května 2012

.....

Přemysl Ježek



PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu této diplomové práce panu Ing. Radimu Dundálovi, Ph.D. za vždy vstřícný a pozitivní přístup. V neposlední řadě také oběma svým rodičům za vytrvalou podporu v průběhu let.



OBSAH

Úvod.....	7
1 Redukce emisí dieselových motorů	8
1.1 Dvoucestný oxidační katalyzátor.....	10
1.2 Třícestný katalyzátor, NSCR.....	10
1.3 Selektivní katalytická redukce, SCR	10
1.3.1 Redukce za pomoci amoniaku.....	10
1.3.2 Redukce za pomoci uhlovodíků	14
1.4 NO _x Adsorbční katalyzátor, NAC.....	14
1.5 Filtr pevných částic, DPF, FAP	15
1.5.1 Materiál, konstrukce	16
1.5.2 Regenerace filtru.....	18
1.6 Způsoby řízeního zvýšení teploty výfukových plynů	21
1.6.1 Palivový hořák.....	22
1.6.2 Single-stage Burner.....	23
1.6.3 Two-stage Burner	24
2 Popis konstrukce držáku filtrační jednotky	27
2.1 Příruba výfuku a držák filtru pevných částic.....	29
2.2 Držák oxidačního katalyzátoru.....	31
2.3 Vzpěra	32
2.4 Materiál	33
2.4.1 Typ materiál držáku filtrační jednotky	33
2.4.2 Typ spojovacího materiálu	33
3 Stanovení zatížení	34
3.1 Stanovení zatížení od filtrační jednotky.....	35
3.2 Stanovení zatížení od výfuku	37
4 Tvorba sítě	41
4.1 Volba elementu sítě	42
4.2 Volba velikosti elementu sítě	42
4.3 Náhrada svarových spojů	43
4.4 Sjednocení směru normál elementů sítě.....	44
4.5 Zjemnění sítě	45
4.6 Náhrada šroubových spojů	46
5 Zátěžný stav	47
5.1 Uchycení na blok motoru	48
5.2 Zatěžující síly	48



6	Výsledek výpočtu.....	50
6.1	Vnitřní napjatost	50
6.2	Kritické místo	51
7	Posouzení stávající konstrukce	52
8	Návrh nápravného opatření.....	53
	Závěr	54
	Seznam použitých zkratk a symbolů	57



ÚVOD

Cílem této diplomové práce je provést pevnostně deformační analýzu uchycení filtru pevných částic na traktoru pomocí výpočtového programu pro analýzy metodou konečných prvků Ansys. S pomocí výsledku výpočtu potom posoudit stav stávajícího konstrukčního řešení a navrhnout nápravná opatření.

Za tímto účelem je nezbytné do výpočtu vnést úvahy vedoucí k co nejlepšímu posouzení a pochopení situace. Jedině to může vést k výsledku, který i přes značná zjednodušení může nabídnout kvalitní výpočtový model a pro zhodnocení použitelné výsledky.

V úvodní rešeršní části si dává autor za cíl sumarizovat a přehledně popsat především aktuální trendy a technologie z oblasti *aftertreatmentu* výfukových plynů vznětových motorů. Zde jsou nejčastěji skloňovanými pojmy filtrace pevných částic a redukce oxidů dusíku NO_x .



1 REDUKCE EMISÍ DIESELOVÝCH MOTORŮ

Osobní mobilita a její běžná dostupnost se staly v posledních dvou dekadách trendem ve všech vyspělých částech světa. Tento fakt rozběhl kolotoč, ve kterém jsou hnací silou peníze. A kde jsou peníze, otevírá se prostor vědeckému bádání a přirozené vlastnosti člověka – jít a hledat stále nová a lepší řešení. Výsledkem je skutečnost, že dieselové motory už nepatří výhradně do světa nákladní a lodní dopravy, těžké mechanizace a dalších, ale v Evropě zprostředkovávají pohon více než 50 % všech osobních automobilů. Ukázalo se totiž, že jejich specifická charakteristika vysokého točivého momentu v nízkých otáčkách a přirozeně menší spotřeba, se díky investicím do vývoje ještě zvýraznila.

Ruku v ruce s masovým rozšířením do osobní dopravy vzrostl i tlak na vyřešení specifických exhalací dieselových motorů. Hlavním cílem se tak stalo dramatické snížení množství emitovaných pevných částic PM, z anglického „*particulate matter*“, společně s oxidy dusíku NO_x. V Evropě se tento tlak přetavil do legislativní podoby závazných emisních norem pro vyráběné automobily, tzv. **evropské emisní standardy**. Základem všech budoucích emisních standardů se stala direktiva Evropského Hospodářského Společenství z roku 1970 - 70/220/EHS. [15]

V současné době je v platnosti norma Euro 5 (viz Tab. 1), pro nákladní automobily je to norma Euro V (označení se liší v arabských a římských číslicích).

Tab. 1 Přehled emisních norem Euro pro osobní automobily („Passenger cars“) se vznětovými motory. [15]

označení normy	počátek platnosti	CO [g/km]	NO _x [g/km]	HC + NO _x [g/km]	PM [g/km]
Euro 1	leden 1992	3,16	-	1,13	0,180
Euro 2	leden 1996	1,00	-	0,70	0,080
Euro 3	leden 2000	0,60	0,50	0,56	0,050
Euro 4	leden 2005	0,50	0,25	0,30	0,025
Euro 5	září 2009	0,50	0,18	0,23	0,005
Euro 6	září 2014	0,50	0,08	0,17	0,005

Evropské emisní standardy jsou stanoveny v kategoriích jak pro osobní, užitkové, tak i nákladní automobily. Pro stanovení měřítka a možnosti srovnání musí vycházet udávané hodnoty exhalací jednotlivých vozidel z jistého normovaného jízdního cyklu. Téma stanovení hodnot exhalací a jejich srovnávání je natolik obsáhlé a tematicky oddělené od předmětu této diplomové práce, že se jí autor nebude věnovat do podrobností.

Označení norem pro nákladní automobily se od označení norem pro osobní a užitková vozidla liší použitím římských číslic. Dalším rozdílem je udávání povoleného množství exhalací



v rozdílných jednotkách. To souvisí s typem pracovního prostředí, ve kterém motory fungují. Zatímco u osobních automobilů jsou to jednotky gramů na ujetý kilometr, u nákladních automobilů (a pracovních strojů) jsou to gramy na kilowatthodinu.

Tab. 2 Přehled emisních norem Euro pro nákladní automobily (přesněji „Heavy duty diesel engines“) se vznětovými motory.

označení normy	počátek platnosti	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC [g/kWh]	PM [g/kWh]
Euro I	leden 1992	4,5	8,0	1,1	< 85kW => 0,180
					> 85kW => 0,360
Euro II	říjen 1996	4,0	7,0	1,1	0,25
	říjen 1998	4,0	7,0	1,1	0,15
Euro III	říjen 2000	2,1	5,0	0,66	0,10
Euro IV	říjen 2005	1,5	3,5	0,46	0,02
Euro V	říjen 2008	1,5	2,0	0,46	0,02
Euro VI	prosinec 2013	1,5	0,4	0,13	0,02

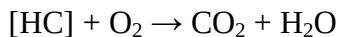
Jak již bylo naznačeno, pozornost se v případě vznětových motorů zaměřila na oxidy dusíku NO_x a především pevné částice. Ty na sebe totiž po svém vzniku a cestou výfukovým systémem adsorbují další produkty spalování, jako jsou oxidy síry a dusíku a tím se pro lidský organismus představují zdroj rizika závažných onemocnění.

Způsob řešení otázky redukce pevných částic udělal za posledních deset let veliký skok. Dnešní provedení, zejména pro nákladní automobily a pracovní techniku, své předchůdce daleko překonávají v dostupnosti, variabilitě, účinnosti samotné filtrace, ale na druhé straně i ve složitosti systémových provedení a nároků na jakost materiálu samotného filtru.



1.1 DVOUCESTNÝ OXIDAČNÍ KATALYZÁTOR

Tento typ filtrace využívá procesu oxidace k přeměně škodlivin na méně nebezpečné látky.



Tato reakce ze své podstaty funguje nejlépe ve spolupráci s výfukovými plyny bohatými na nespálený kyslík, typickými exhalacemi diesellových motorů.

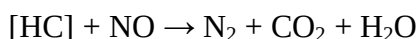
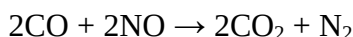
I když tento typ katalyzátoru není určen přímo pro filtraci pevných částic, při jeho použití může procento odfiltrovaných pevných částic dosáhnout hodnot vyšších než 30%. [1]

1.2 TŘÍCESTNÝ KATALYZÁTOR, NSCR

Třícestný katalyzátor bývá také označován zkratkou NSCR, z anglického „*non-selective catalytic reduction*“ a zabezpečuje přeměnu následujících složek výfukových plynů:



tato přeměna probíhá přes následující reakce: [1]



1.3 SELEKTIVNÍ KATALYTICKÁ REDUKCE, SCR

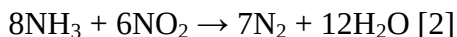
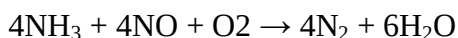
Tato technologie je obecně označována zkratkou SCR, z anglického „*selective catalytic reduction*“ a zaměřuje se na redukci množství oxidů dusíku za vzniku neškodných látek - vody a molekulového dusíku. [2]

Podle druhu redukčního činidla použitého při reakci se tato technologie dále dělí dvěma směry. Jedná se o systém využívající jako redukční činidlo amoniak, druhé provedení pracuje s přítomností uhlovodíků.

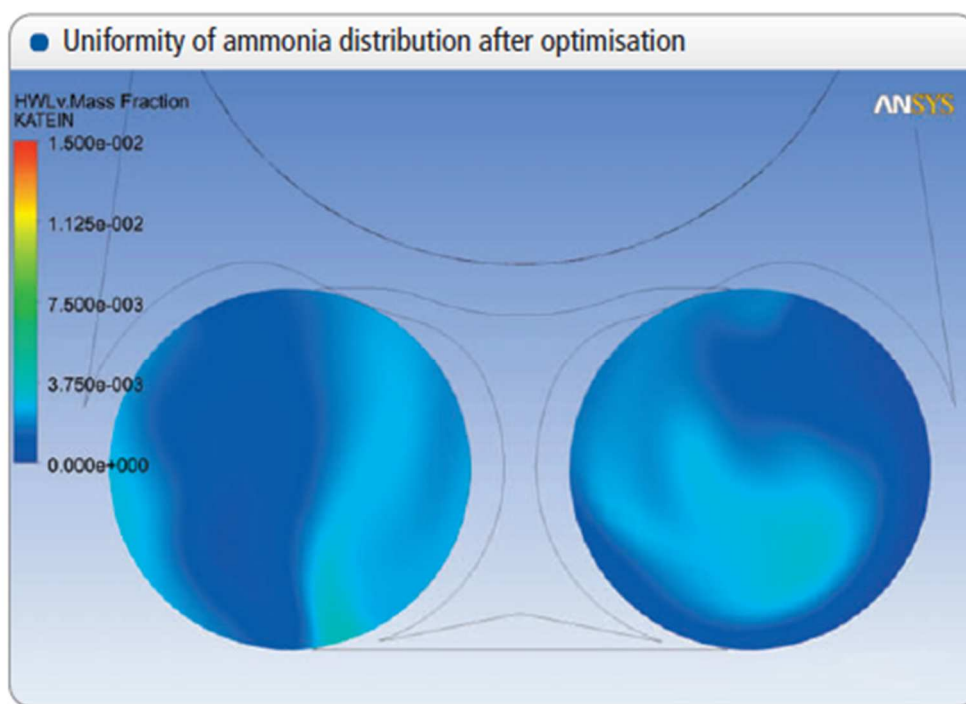
1.3.1 REDUKCE ZA POMOCÍ AMONIAKU

Zásadním problémem je zabezpečit přítomnost redukčního činidla při průchodu katalyzační jednotkou. Jako zdroj amoniaku slouží v tomto případě močovina $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, tedy kapalná báze obsahující amoniak. Ta je dnes běžně dostupná pod obchodním označením *AdBlue®*. Řešením je oddělená nádrž na močovinu a systém, který zabezpečí dopravu, dávkování

a vstřikování (rozprášení) močoviny do výfukového potrubí, přesněji do prostoru před katalyzátor (*Obr. 2*). Po vstříknutí dojde k rozkladu močoviny na oxid uhličitý a kýžený amoniak, který takto vstupuje do následujících reakcí:



Účinnost této redukce závisí značným způsobem na kvalitě rozprášení močoviny do proudu výfukových plynů. Pro dosažení dostatečně homogenního rozprášení (viz. *Obr. 1*) po celém průřezu výfukového potrubí, musí teplota výfukových plynů dosáhnout minimálně 200 °C. Tento fakt si vyžaduje umístění trysky do správné polohy v průřezu a do dostatečné vzdálenosti před SCR katalyzátor. Ve výfukových potrubích malých průměrů není dostatečně kvalitní rozprášení možné realizovat, v těchto případech je zapotřebí za bod vstřiku umístit směšovací zařízení, které homogenizaci zabezpečí. V aplikacích určených pro osobní vozidla je určitá kvalita rozprášení zabezpečena díky tlakovému vstřikování. Vozidla těžké mechanizace systémem dodávající tlakový vzduch vybavena nejsou, v tomto případě je přítomnost směšovače v potrubí nutností. [14]



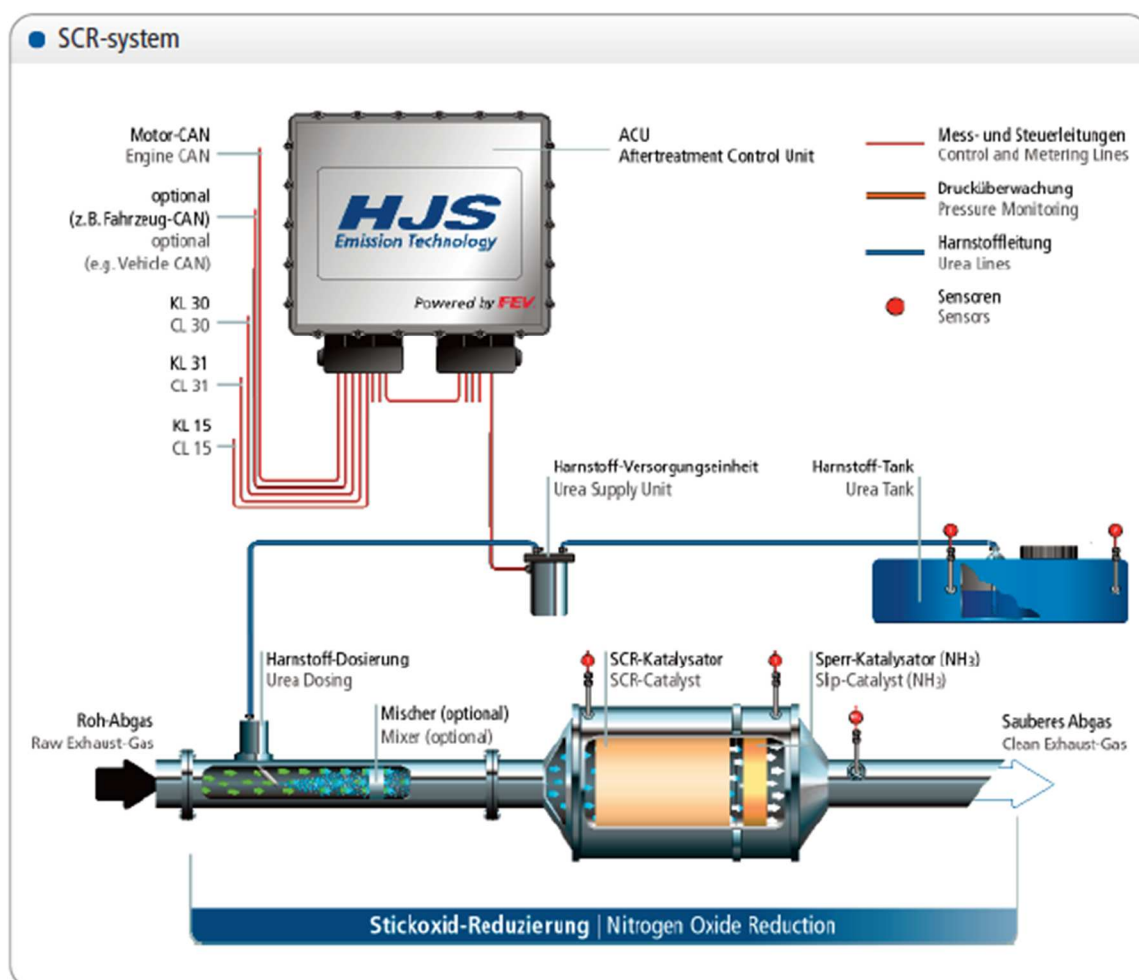
Obr. 1: CFD simulace rozprášení močoviny do výfukového potrubí. [14]

Na *Obr. 2* je konkrétní SCR systém v provedení od firmy HJS a jeho komponenty:

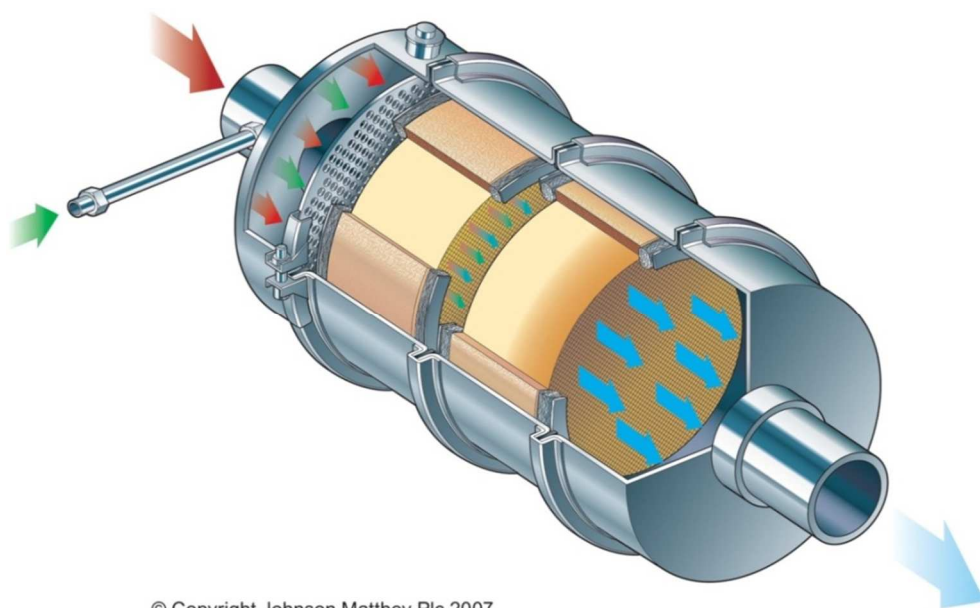
- Urea Tank – Samostatná nádrž na močovinu,
- Urea Supply Unit – jednotka ovládající dodávky močoviny do vstřikovače, je řízená ACU,
- Urea Dosing – vstřikovací jednotka močoviny,

- Mixer – směšovač vstříknuté močoviny,
- SCR-Catalyst – katalyzátor pro selektivní katalytickou redukci,
- Slip-Catalyst – část SCR katalyzátoru povlakována drahými kovy, která je určena k eliminaci amoniaku NH_3 nespotřebovaného pro redukci,
- ACU-Aftertreatment Control Unit – řídicí jednotka systému napojená na řídicí systém vozidla/stroje.

Vzhledem k faktu, že močovina mrzne již při $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$, musí být součástí systému i řešení vyhřívání nádrže stejně jako vedení, kde hrozí nebezpečí zamrznutí za běžných provozních podmínek. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby. Prvním je umístění nádrže a vedení močoviny do blízkosti chladicího systému motoru. V případech ve kterých toto jednoduché a energeticky výhodné řešení nelze aplikovat, opatření vůči zamrznutí se řeší instalací elektrického vytápění kritických částí.



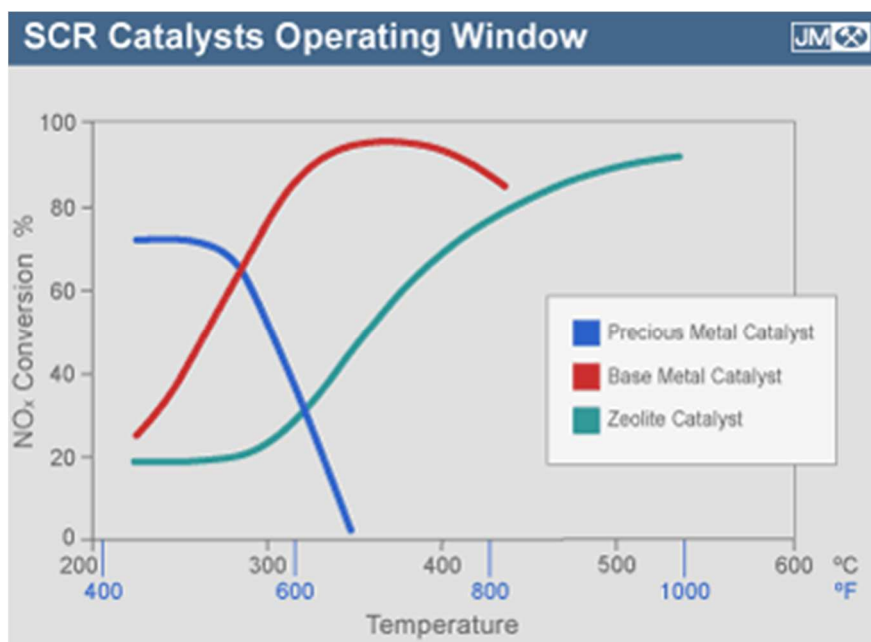
Obr. 2: Technologie SCR v provedení firmy HJS. [14]



© Copyright Johnson Matthey Plc 2007

Obr. 3: SCR katalyzátor s vstřikem močoviny [3]

Účinnost této redukce je v porovnání s druhým, níže uvedeným systémem redukce za pomoci uhlovodíků vyšší.

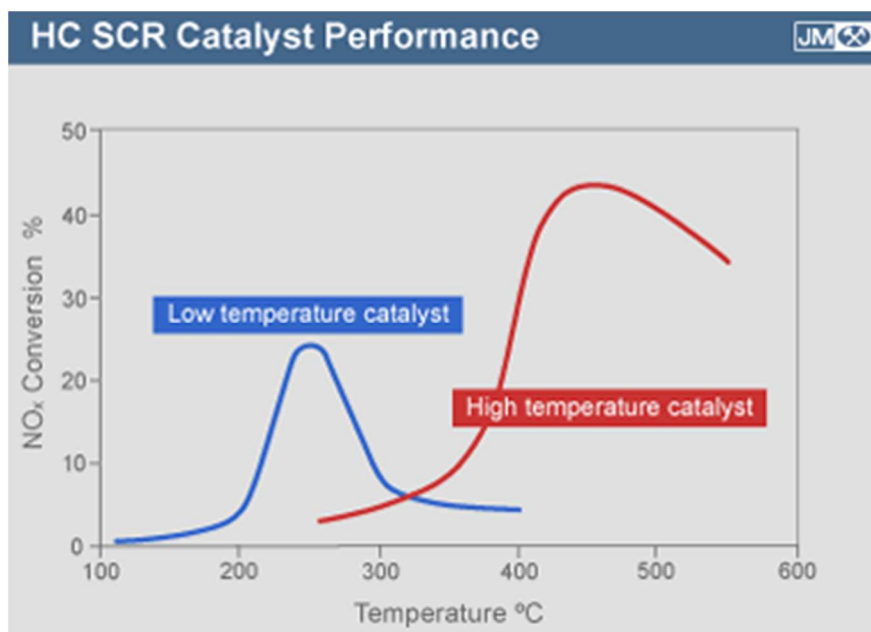


Obr. 4: Účinnost katalytické redukce s využitím čpavku v závislosti na teplotě a použitém typu katalyzátoru. [4]

Systém pracující se čpavkem dosahuje účinnosti přeměny 70 až 90 % a to v rozmezí cca 200 – 500 °C. V tomto případě je v závislosti na pracovních podmínkách motoru určen nejvhodnější materiál katalyzátoru, který bude za daných teplot dosahovat nejlepší účinnosti, viz Obr. 4.

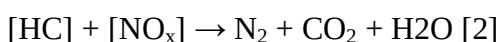
1.3.2 REDUKCE ZA POMOCI UHLOVODÍKŮ

Hlavní výhodou systému redukce za použití uhlovodíků je fakt, že ty se ve výfukových plynech vyskytují přirozeně. Systém je tedy opravdu jednoduchý, stačí aplikovat správný materiál katalyzátoru a tím dosáhnout nejlepší účinnosti buď pro nízké (cca 250 °C) nebo vysoké teploty (cca 400 °C a vyšší). Na druhé straně hlavní nevýhodou je v porovnání s prvním systémem nízká účinnost přeměny, která se v tomto případě pohybuje vždy pod 50%, viz Obr. 5.



Obr. 5: Účinnost katalytické redukce s využitím uhlovodíků. [5]

Podoba redukční katalýzy je tomto případě závislá na typu reagujících uhlovodíků, celková přeměna má ale vždy charakter:

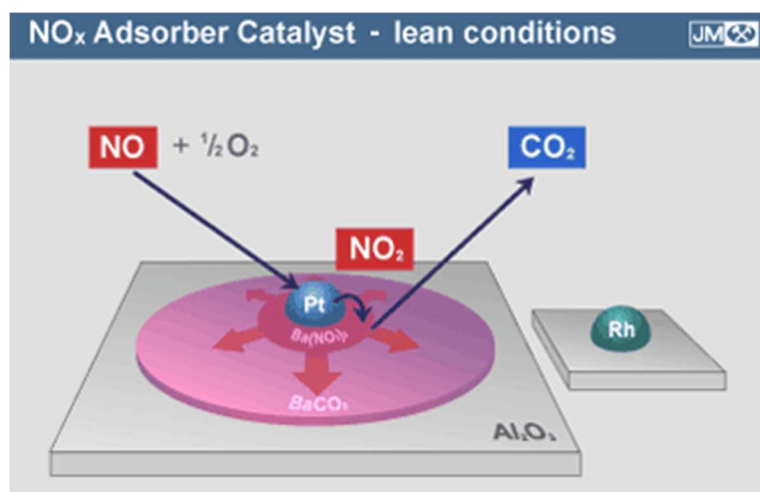


Selektivní katalytické redukce se dnes již běžně využívá v aplikacích určených jak pro osobní automobily, především však jako účinná metoda redukce NO_x v exhalacích nákladních automobilů a těžké mechanizace.

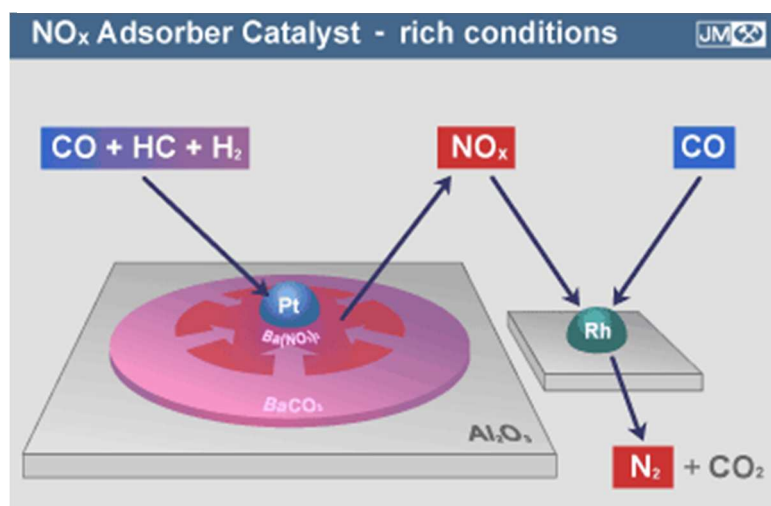
1.4 NO_x ADSORBČNÍ KATALYZÁTOR, NAC

Adsorbční katalyzátor (NAC z anglického „ NO_x adsorber catalyst“) je dalším v řadě systémů, zaměřujících se na redukcí oxidů dusíku. Předkládaná technologie byla vyvinuta především jako jednodušší alternativa k výše uvedené selektivní katalytické redukci, která pro svoji správnou funkci potřebuje dávkování močoviny a celý systém s tím spojený. [6]

Systém funguje na principu chemické adsorpce oxidů dusíku na povrch katalyzátoru. Ten je schopen adsorpce pouze konečného množství oxidů dusíku a zároveň pracuje ideálně pouze v podmínkách, které odpovídají spalování chudé směsi, za přebytku nespáleného kyslíku. Za těchto podmínek probíhá adsorpce viz Obr. 6.



Obr. 7: Proces adsorpce NO_x za podmínek spalování chudé směsi. [6]



Obr. 6: Regenerace adsorbéru za podmínek spalování bohaté směsi. [6]

Po naplnění kapacity adsorbéru dojde ke ztrátě jeho funkce, v tomto případě už jednotkou výfukové plyny prochází beze změny. Pro znovuoobnovení funkce se musí adsorbér chemicky vyprázdnit. To se děje za podmínek odpovídajících spalování bohaté směsi, tedy za přítomnosti nespálených zbytků paliva – uhlovodíků HC, a molekulového vodíku H_2 . Zde dojde k uvolnění nashromážděných oxidů dusíku a jejich následné redukci na molekulový dusík, viz Obr. 7.

1.5 FILTR PEVNÝCH ČÁSTIC, DPF, FAP

Filtr pevných částic se zkráceně označuje jako DPF z anglického „Diesel Particulate Filter“, nebo FAP z francouzského „Filtre A Particules“. Tato technologie je dnes na úrovni, při které účinnost filtrace dosahuje 99%. [8]

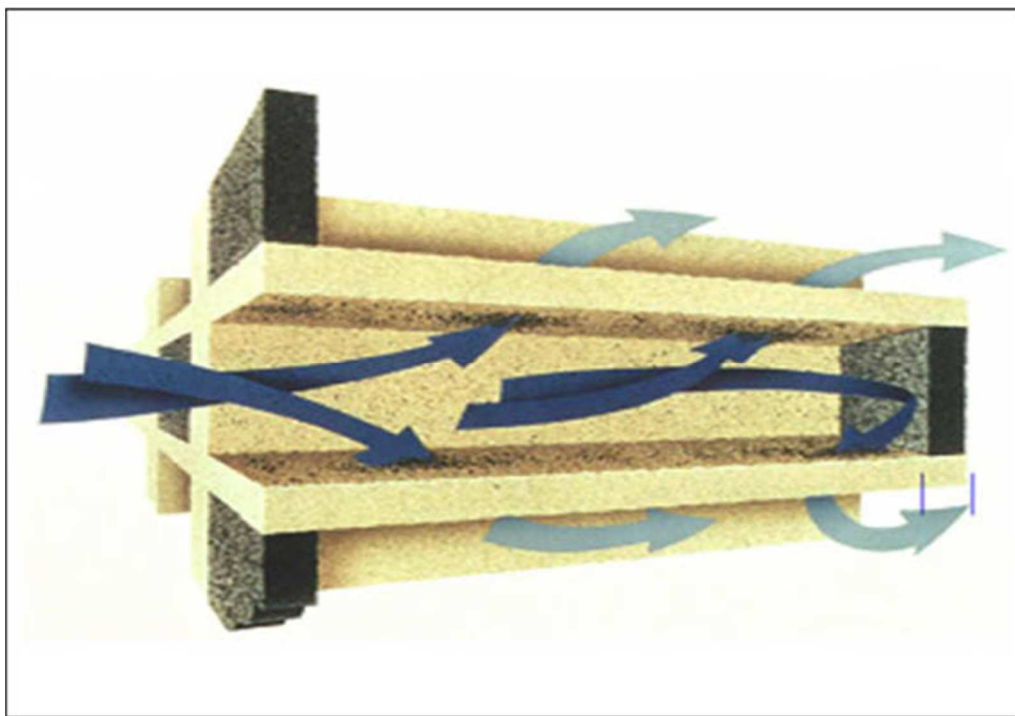
Filtrace pevných částic dnes tvoří jádro celého programu čištění výfukových plynů vznětových motorů a to jak na užitkových vozech a těžké mechanizaci, tak v případě vozidel určených pro osobní přepravu poháněných vznětovými motory. V těch se jako sériová součást



poprvé objevila v roce 2000 na motorech Peugeot a Citroen, v oblasti těžké techniky se však používala již o desetiletí dříve. [8]

1.5.1 MATERIÁL, KONSTRUKCE

Filtr pevných částic funguje na principu fyzické filtrace popílku z výfukových plynů. K tomu je zapotřebí specifický materiál, který je dostatečně pórovitý a odolný vůči vysokým teplotám. Jako vhodný materiál pro bázi filtrů pevných částic se během jejich vývoje ukázala keramika s velkým podílem přírodního minerálu *cordieritu*, přičemž v posledních letech dominuje *karbid křemíku SiC*, který má ve srovnání s *cordieritem* větší teplotní a chemickou odolnost. [7] Takto spékaný karbid křemíku se vyrábí s pórovitostí cca 1290 pórů na centimetr čtvereční, což je hodnota při které se dosahuje přibližné rovnováhy mezi fyzickou stabilitou keramiky a co možná největším činným objemem filtru. Tloušťka stěn mezi jednotlivými póry je v tomto případě přibližně 0,369 mm, což zajišťuje dostatečnou mechanickou stabilitu. [11]



Obr. 8: Schéma prostupu výfukových plynů před DPF. [10]

Keramické jádro je tvořeno strukturou podobnou klasickým oxidačním, či redukčním katalyzátorům, tedy voštinovou strukturou umožňující dosáhnout velké funkční plochy v poměru k velikosti samotného jádra. Hlavním rozdílem v konstrukci jádra je zaslepení vstupních kanálů na straně výstupu a zaslepení paralelních (výstupních) kanálů na vstupu do filtru, viz Obr. 8. Díky tomu jsou plyny nuceny prostupovat porézní strukturou stěn do sousedních kanálů. Během tohoto procesu dochází k zachycení částic popílku na povrchu stěn, přes které pevné částice díky své velikosti neprostoupí. Výsledkem takovéto filtrace je kontinuální zhoršování prostupnosti výfukových plynů filtrem, tzn. navyšování protitlaku proudu spalin. Tato skutečnost se projevuje jako větší tlaková diference mezi prostorem před a za filtrem. Z tohoto důvodu je právě sledování hodnot tlaku před a za filtrem pevných částic



rozhodující vstupní veličinou pro diagnostiku a vyhodnocování „kondice“ DPF řídicí jednotkou. [10]

Jádro filtru je tvořeno jedním celkem a má zpravidla válcovitý tvar, viz *Obr. 9*. Ani tato skutečnost v dnešní době není pravidlem. Pro různé aplikace se výsledná velikost filtru dimenzuje přesně na míru provozním podmínkám, ve kterých bude daný filtr pracovat. Aktuálním řešením možnosti kvalitní optimalizace je nabídka základních stavebních elementů, ze kterých lze vytvořit filtr požadovaného tvaru a velikosti. Příkladem je firma *Huss* nabízející filtry, které nejsou tvořeny jedním válcovitým tělesem, ale jejichž výsledný tvar je složen z lichoběžníkových elementů slepených do výsledného tvaru, viz *Obr. 10*. Další výhoda této skládané konstrukce se projeví při procesu regenerace, kdy filtr při ne vždy optimálních pracovních podmínkách a následné regeneraci dosahuje teplot až kolem 1000 °C. V této chvíli pak lepené švy mezi jednotlivými elementy napomáhají vyrovnávat teplotní rozdíly a tím zmenšují riziko mechanického poškození filtru. Dalším posunem je nahrazení nejčastěji využívaného čtvercového profilu jednotlivých kanálů tvarem trojúhelníkovým. Tím dojde k poměrnému zvýšení filtrační plochy o 14%. [11]



Obr. 9: Válcovitý tvar DPF. [9]



Obr. 10: DPF od firmy Huss. Výsledný tvar je slepen z lichoběžníkových elementů. [11]

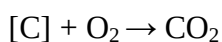
Důležitou informací je, že filtry PM mají konečnou kapacitu množství zachycených částic. Odpovědí na tuto skutečnost je fakt, že jedním z nejdiskutovanějších pojmů spojených s touto problematikou je **regenerace filtru**, čili řešení, zabezpečení a optimalizace fungování filtru po maximálně možnou dobu životnosti konkrétní aplikace, pro kterou je použit. Současný stav je na úrovni, kdy se v případě aplikace v osobních automobilech dosahuje životnosti až 300 000 najetých kilometrů. To však za podmínek, kdy jsou filtry pevných částic dopřány výhradně ideální podmínky pro regeneraci. [10]

1.5.2 REGENERACE FILTRU

Jak již bylo výše uvedeno, regenerace filtru je pro jeho dlouhodobé fungování nutnou součástí. V případě že by k regeneraci nedošlo, filtr by se postupně zanášel a tím kladl stále větší odpor průchodu výfukových plynů až do chvíle kdy by se stal zcela neprůchodným. Důsledkem by bylo odpovídající snižování výkonu takto „dušeného“ motoru a ve finále by mohlo dojít k jeho zastavení, poškození či úplnému zničení.

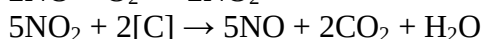
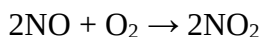
Podstatou procesu regenerace DPF je faktické **vyhoření vyfiltrovaných částic**. V praxi existují dva principy:

- Vyhoření za účasti **kyslíku O₂**

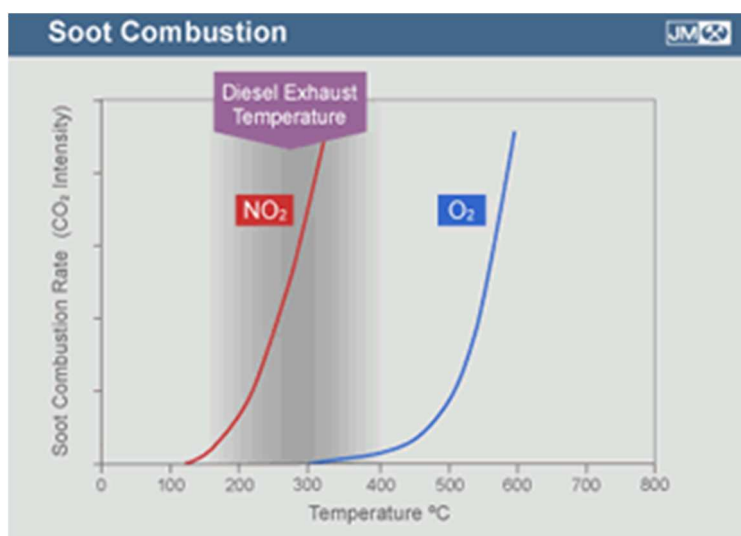


K nastartování a kvalitnímu průběhu regenerace za účasti kyslíku je zapotřebí dosáhnout a udržet teplotu výfukových plynů v pásmu 550 – 600 °C, viz Obr. 11.

- Vyhoření za účasti **oxidu dusičitého** NO_2



Tato varianta vypálení částic z DPF je z hlediska teplotních podmínek příznivější. Potřebné teplotní pásmo v tomto případě leží mezi 250 – 400 °C, viz *Obr. 11*. Nižší regenerační teplota je výhodou, problémem ale zůstává fakt, že ve výfukových plynech vznětových motorů se přirozeně nevyskytuje dostatek oxidu dusného NO, jehož přítomnost je nutná k přeměně na potřebný oxid dusičitý NO_2 . [10]



Obr. 11: Teploty hoření pevných částic za účasti NO_2 a O_2 . [12]

Základem úspěšné regenerace DPF je dosažení a setrvání v pásmu teplot, při kterých k výše uvedeným způsobům vyhoření částic dochází. V závislosti na tom zda k regeneraci dochází samovolně či je záměrně vyvolána, je tento proces pojmenovává jako **pasivní** a **aktivní regenerace**.

PASIVNÍ REGENERACE

Pojmem pasivní regenerace se rozumí proces regenerace, který je vyvolán a probíhá výhradně za podmínek, daných přirozenými pracovními podmínkami motoru, tedy dochází k němu samovolně vždy, když teplota výfukových plynů dosáhne potřebných hodnot. Tlaková difference před a za filtrem pevných částic je sice sledovanou veličinou, ale v systému takového vozidla neexistují nástroje pro umělé vyvolání regeneračního procesu.

Teplota výfukových plynů osobních automobilů poháněných vznětovými motory v městském provozu jen zřídka přesáhne 250 °C. Pasivní regenerace v takovýchto podmínkách může probíhat pouze za účasti oxidu dusičitého, a to jen v omezené míře. Dostatečných teplot výfukových plynů pro tento typ regenerace dosáhne osobní automobil již při rychlostech kolem 100 km/h, při kterých se v předřazeném oxidačním katalyzátoru za pomoci platiny přemění dostatečné množství oxidu dusnatého NO na potřebný oxid dusičitý NO_2 .

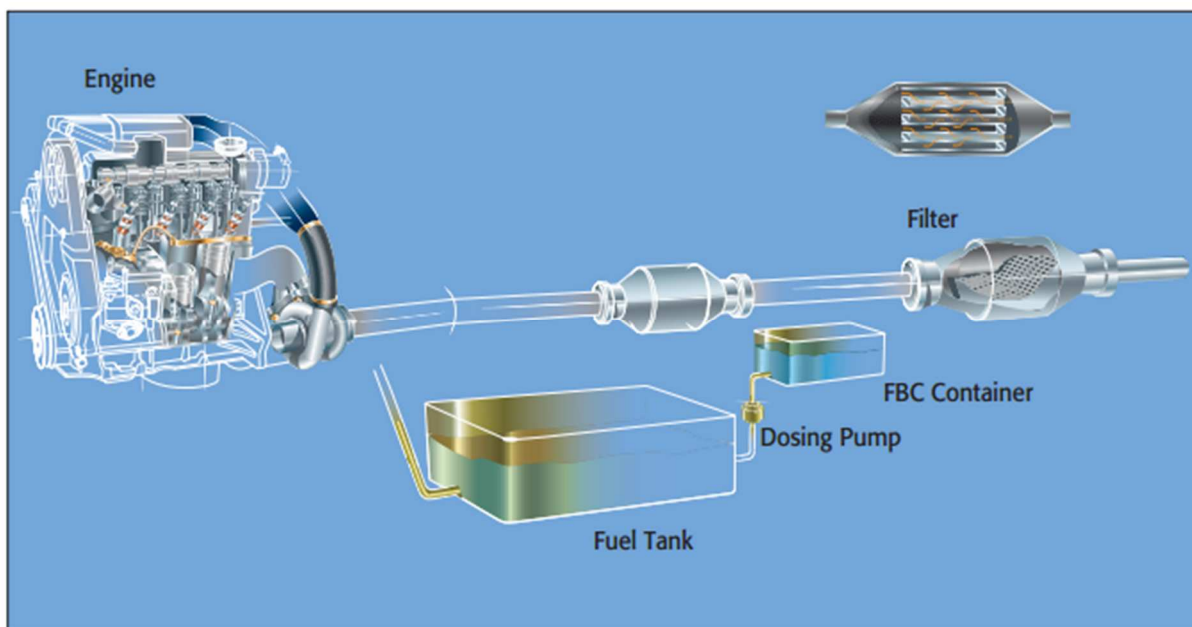


Samostatnou kapitolou je regenerace DPF nasazených v aplikacích těžké mechanizace, pracovních strojích, nákladní dopravě a dalších. Teplota jejich výfukových plynů je sice řádově vyšší než u vozidel osobní dopravy (pracují pod větším zatížením), ovšem vzhledem k proměnlivosti pracovních podmínek především u pracovních strojů je zde problém s udržením dostatečně vysokých teplot po dobu nutnou k vypálení většiny zachycených částic. [10]

FUEL BORNE CATALYST, FBC

Technologie použití FBC je jednoduchý a levný způsob jak výrazným způsobem zlepšit efektivitu pasivní i aktivní regenerace.

Principem je využití palivového aditiva – *Fuel Borne Catalyst*, díky němuž se při spalování na vznikající pevné částice naváže oxid železitý, který zde působí jako katalyzátor hoření. Výsledkem je snížení teploty potřebné k hoření zachycených částic na úroveň hodnot, kterých vznětové motory dosahují za běžných provozních podmínek.



Obr. 12: Schéma FBC systému pro osobní vozidla. [13]

Systém (viz Obr. 12) je tvořen zásobníkem (*FBC Container*), dávkovacím zařízením (*Dosing Pump*) a řídicí jednotkou (na obrázku není), která určuje dávkování do palivové nádrže.

Vedlejším, ale přesto pozitivním účinkem je redukce množství oxidu dusičitého NO_2 ve výfukových plynech. Dalším, nicméně negativním vedlejším efektem je usazování zbytků FBC ve filtru pevných částic a tím zhoršování jeho průchodnosti. Tyto zachycené zbytky se při regeneraci neodstraní, v průběhu životnosti tak postupně zmenšují kapacitu filtru. [13]

Tato technologie se díky své jednoduchosti a funkčnosti masově rozšířila hlavně v počátcích zavádění aktivních regeneračních systémů. Tvoří jakýsi můstek mezi pasivní regenerací a systémy aktivní regenerace, to především díky tomu, že její fungování má v porovnání s aktivními systémy minimální energetické nároky.



AKTIVNÍ REGENERACE

Aktivní regenerace je taková, která je vyvolaná cíleně, bez ohledu na aktuální pracovní podmínky motoru. Kondice filtru pevných částic je palubním systémem sledována a na základě jejího vyhodnocení se teplota filtru pevných částic uměle zvýší a je udržována po dobu nutnou k vyhoření všech zachycených částic.

Díky faktu, že systémy pro redukci oxidů dusíku jsou standardně součástí komplexního řešení škodlivých emisí diesellových motorů, aktivní regenerace filtru za účasti oxidu dusičitého se v těchto systémech nepoužívá. Ideální teplota pro kvalitní regeneraci je tedy 550 – 600 °C (vyhoření za účasti kyslíku O₂).

První systémy aktivní regenerace fungovaly právě v kombinaci s využitím aditiva FBC pro snížení teploty hoření pevných částic. Teplota výfukových plynů je uměle zvyšována managementem motoru, např. výraznými dostřiky paliva, které se nespálené dostává do výfukového potrubí a v předřazeném oxidačním katalyzátoru shoří. Tím je teplota plynů před filtrem pevných částic uměle zvýšena.

Další evolucí aktivních regeneračních systémů je opět kombinace předřazeného oxidačního katalyzátoru s filtrem pevných částic, ovšem bez použití technologie *Fuel Borne Catalyst*. To umožnil vývoj DPF jehož stěny jsou obohaceny o katalyzátor hoření, který spolu s uměle zvýšenou teplotou výfukových plynů zabezpečí vyhoření pevných částic.

Poslední, a **dnes aktuální řešení** představuje jednotka umístěná ve výfukovém potrubí, která plní současně funkci oxidačního katalyzátoru pro redukci CO a HC, tak filtru pevných částic. Takovéto řešení má optimální (nejnižší) energetickou náročnost. Oxidační reakce paliva (jeho hoření) probíhá přímo v prostoru, který má být takto vzniklým teplem ohřátý. Nedochozí tak ke ztrátám jako v případě generace tepla v předřazeném oxidačním katalyzátoru. Ve výsledku je pro regeneraci filtru potřeba méně paliva spotřebovaného pouze za tímto účelem. [10]

1.6 ZPŮSOBY ŘÍZENÉHO ZVÝŠENÍ TEPLoty VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Jak již bylo výše uvedeno, základem aktivní regenerace filtru pevných částic je časově i kvalitativně řízené zvýšení teploty výfukových plynů vedoucích k zapálení a úplnému vyhoření usazených pevných částic. Jinými slovy jde o **teplotní management výfukových plynů**.

Aktivní regenerační systémy určené jak pro osobní automobily, tak pro těžkou mechanizaci a pracovní stroje se při hledání zdroje tepla ubírají stejným směrem, zaměřují se na využití paliva. Výhoda je v tomto případě zřejmá – zdroj energie je ve stroji běžně dostupný.

Zdroj energie je sice stejný, provedení však různá. To souvisí s rozdílnými pracovními podmínkami motoru běžného osobního vozu a motoru pracujícím v např. bagru. Jak již bylo výše zmíněno, zvýšení teploty výfukových plynů v osobních automobilech je většinou realizováno **pozdními dostřiky paliva**, které se vypaří a nespálené putuje do předřazeného oxidačního katalyzátoru (nebo přímo do DPF schopného oxidační katalýzy), ve které vzplane a uvolněným teplem žhaví DPF až na hodnotu cca 600 °C při kterých se proces regenerace startuje.

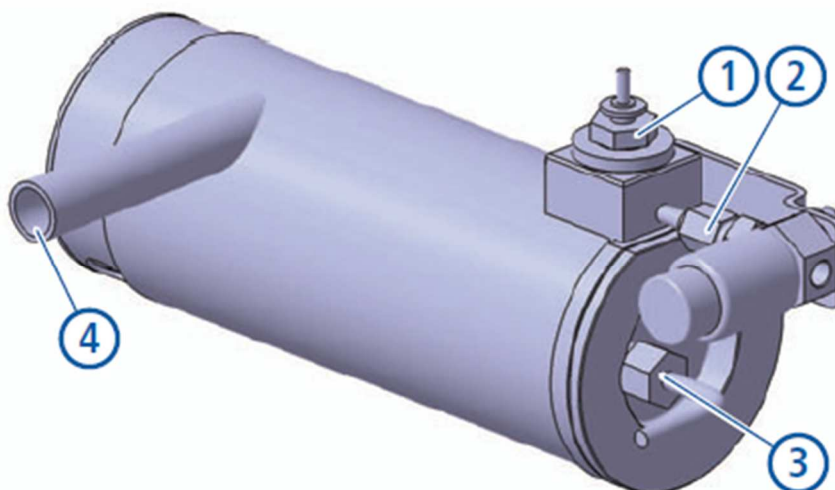


Tento systém funguje správně pouze za předpokladu, že teplota výfukových plynů je na jisté minimální hodnotě nutné k ohřátí oxidačního katalyzátoru na teplotu, při které dokáže nespálené palivo z pozdních dostřiků vznítit.

K zabezpečení plné nezávislosti regenerace filtru na pracovních podmínkách motoru byly vyvinuty technologie pro ohřev výfukových plynů pracujících na společném základu – vstříku a spalování paliva v prostoru před oxidačním katalyzátorem. Pro představení těchto technologií zvolil autor produkty z nabídky firmy *HJS*, jako jednoho ze světových lídrů v této oblasti. [14]

1.6.1 PALIVOVÝ HOŘÁK

Palivový hořák je zařízení, které uměle zvyšuje teplotu výfukových plynů. Je umístěn v prostoru mezi turbodmychadlem a jednotkou obsahující oxidační katalyzátor a filtr pevných částic.



Obr. 13: Tangenciální palivový hořák s max. výkonem 30 kW.

Pozice na obrázku jsou následující:

1. Zapalovací svíčka
2. Přívod paliva
3. Teplotní senzor
4. Přívod vzduchu

Jak je vidět z tangenciální polohy přívodu vzduchu, jedná se o vířivý typ hořáku. V činnost se uvádí otevřením ventilu paliva a aktivováním žhavicí svíčky, která generuje dostatek tepla pro vypaření paliva, které společně s dodávaným tlakovým vzduchem vytvoří vznětlivou směs. Jakmile dojde k vznícení směsi, přívod energie žhavicí svíčky je přerušen. Od této chvíle funguje hořák bez vnějších energetických vstupů. Veškerá energie potřebná pro odpaření paliva a jeho zažehnutí je odebírána z již hořícího plamene. Za pomoci regulace přívodu vzduchu a paliva je výkon hořáku plynule regulovatelný.

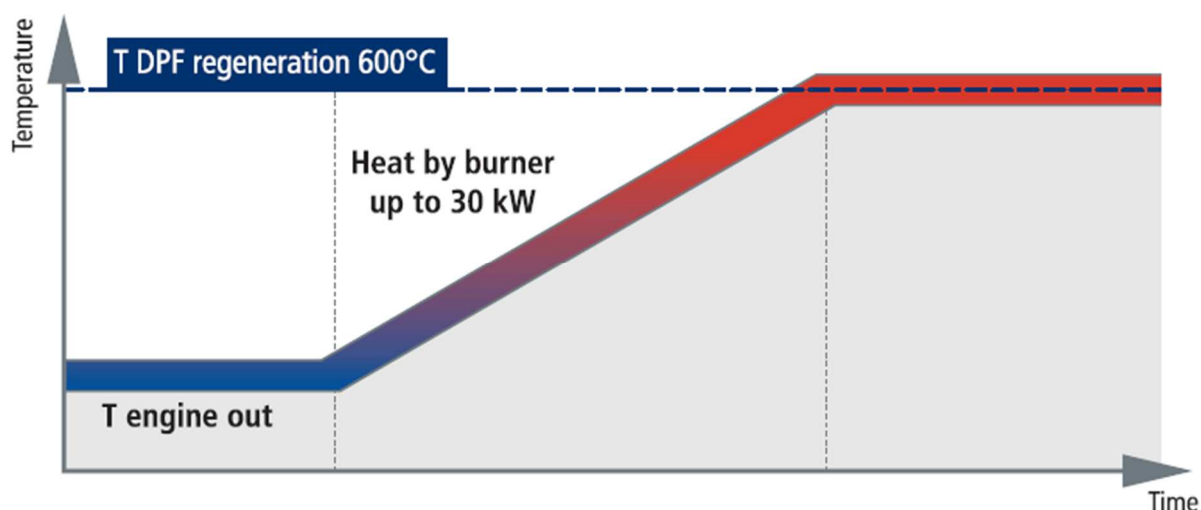


Provedení na Obr. 13 pracuje ve výkonovém pásmu o rozsahu 5 - 30 kW a bývá používán v systémech aktivní regenerace určené pro menší motory, kde je takový výkon dostatečný pro dosažení regenerační teploty ve filtru PM. U větších motorů je kapacita DPF úměrně větší a výkon samostatného hořáku by nebyl dostačující.

V praxi se hořák právě podle velikosti motoru využívá ve dvou systémových provedeních. V prvním z nich, určeném menším motorům, figuruje samostatně. Takovýto systém ohřevu výfukových plynů je pak označován z anglického „*single-stage burner*“ jako **jednostupňový**. [14]

1.6.2 SINGLE-STAGE BURNER

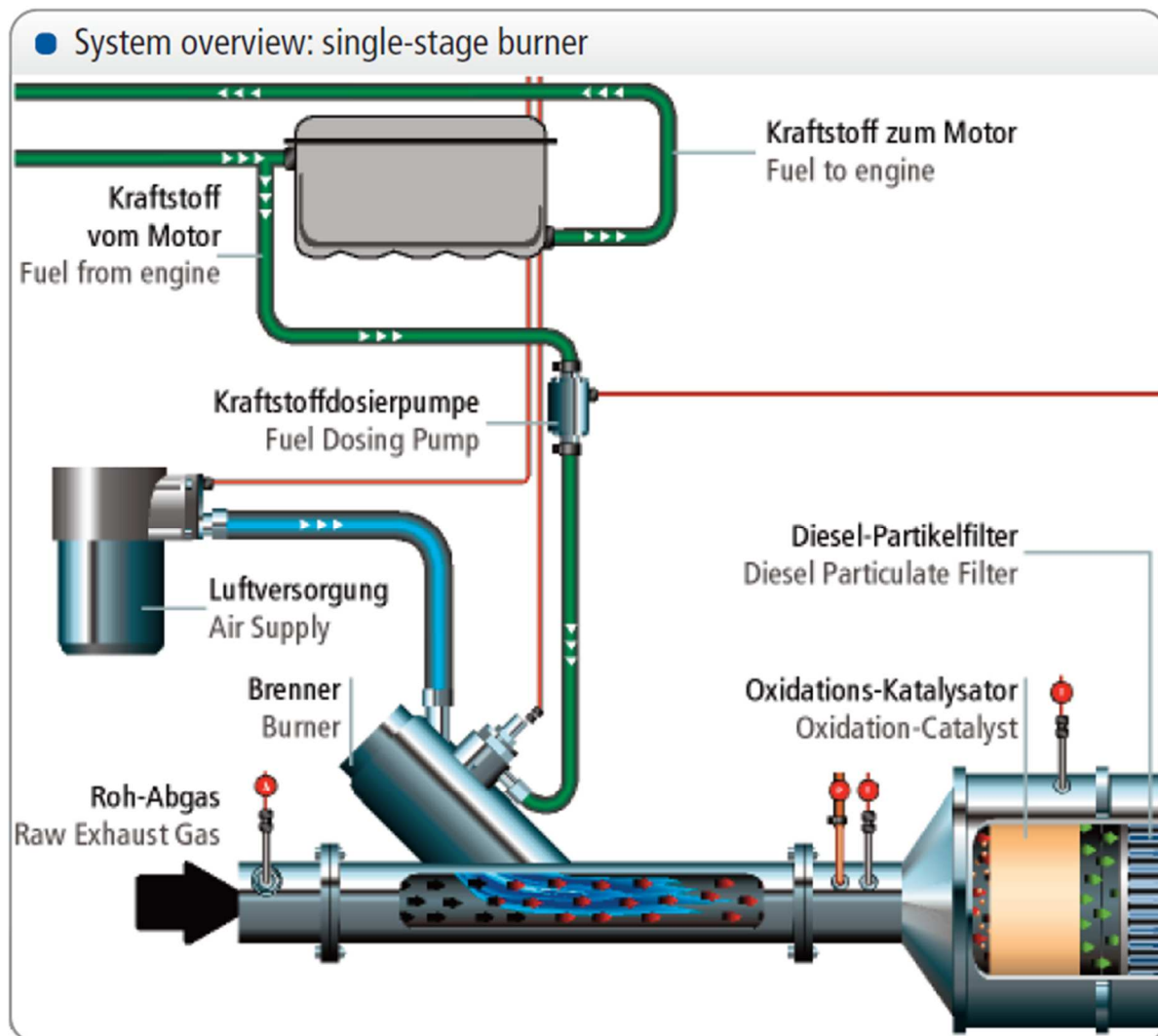
V tomto provedení hořák plně nahrazuje funkci pozdních dostřiků a je elementem, který spouští proces aktivní regenerace zvýšením a udržováním teploty výfukových plynů na 600 °C, viz Obr. 14, kde $T_{\text{engine out}}$ je teplota výfukových plynů a $T_{\text{DPF regeneration}}$ teplota při které DPF regeneruje.



Obr. 14: Teplotní management aktivní regenerace vedené Single-stage Burner technologií. [14]

Na Obr. 15 je znázorněno schéma zapojení a jsou vyjmenovány klíčové součásti jednostupňového provedení:

- Fuel Dosing Pump – dávkovací zařízení řídící množství přivedeného paliva
- Air Supply – zařízení přivádějící do hořáku stlačený vzduch
- Burner – hořák
- Oxidation-Catalyst – oxidační katalyzátor
- Fuel from engine – přívod paliva navázaný na zpětné vedení paliva od motoru k palivové nádrže



Obr. 15: Schéma Single-stage Burner systému. [14]

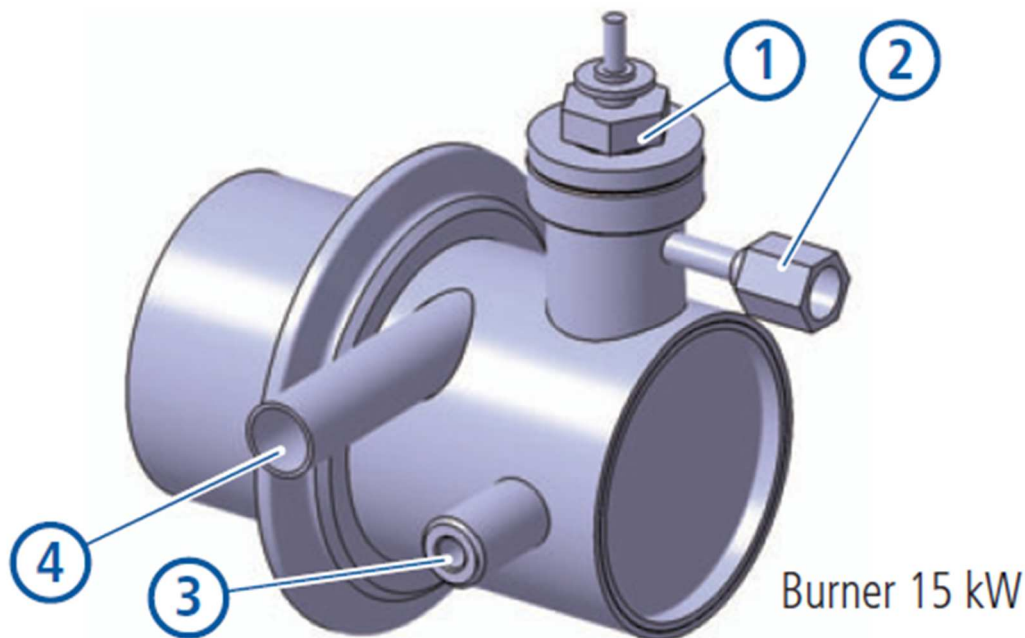
Na Obr. 15 jsou znázorněny snímače veličin rozhodujících pro sledování zaplněnosti DPF a řízení celého procesu aktivní regenerace. Těsně před tubusem jsou to čidla tlaku a teploty, v prostoru těsně za oxidačním katalyzátorem je to snímač teploty. [14]

1.6.3 TWO-STAGE BURNER

Jinak také **dvoustupňový hořák**. Tento český ekvivalent ovšem není pro správnou představu přesný. V daném uspořádání je celý systém oproti jednostupňovému doplněn o jednotku pro vstřikování paliva umístěnou ve výfukovém potrubí do prostoru mezi hořákem a tubusem oxidační a filtrační jednotky.

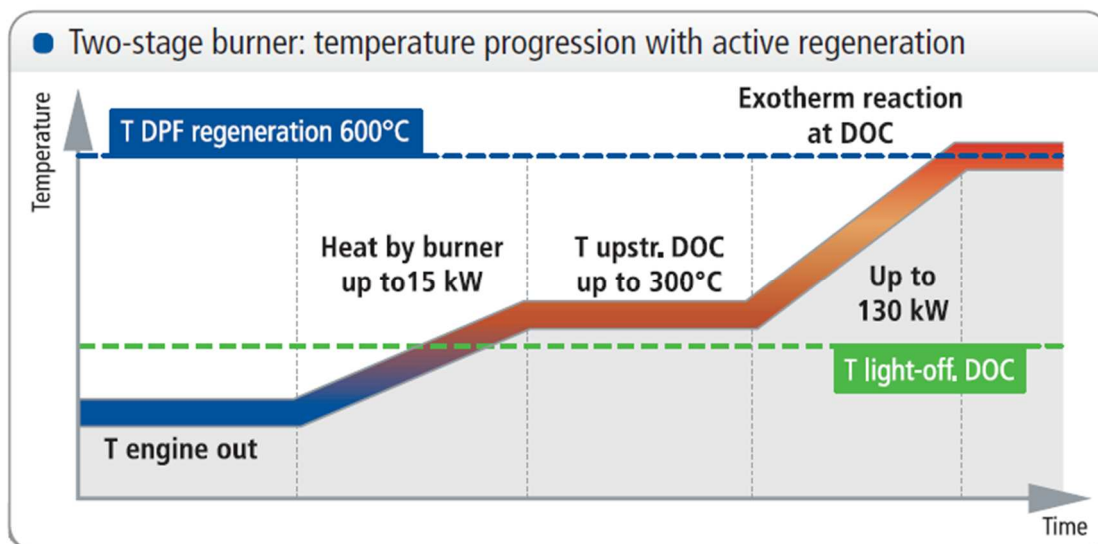
Jak již bylo výše uvedeno, toto uspořádání je primárně cíleno do výfukových sestav větších motorů. Důvodem pro toto uspořádání je nepříjemná velikost hořáku, který by disponoval dostatečným výkonem pro ohřev filtru pevných částic takovéto velikosti. Řešením je tedy použití hořáku s výkonem v rozmezí 5 - 15 kW (na Obr. 16), který zabezpečí za všech

provozních podmínek dosažení minimální potřebné teploty oxidačního katalyzátoru pro vznícení vstříknutého a rozprášeného paliva.



Obr. 16: Tangenciální palivový hořák s max. výkonem 15 kW. [14]

Klíčové části tohoto provedení jsou shodné s 30 kW provedením, používaným v jednostupňovém systému.

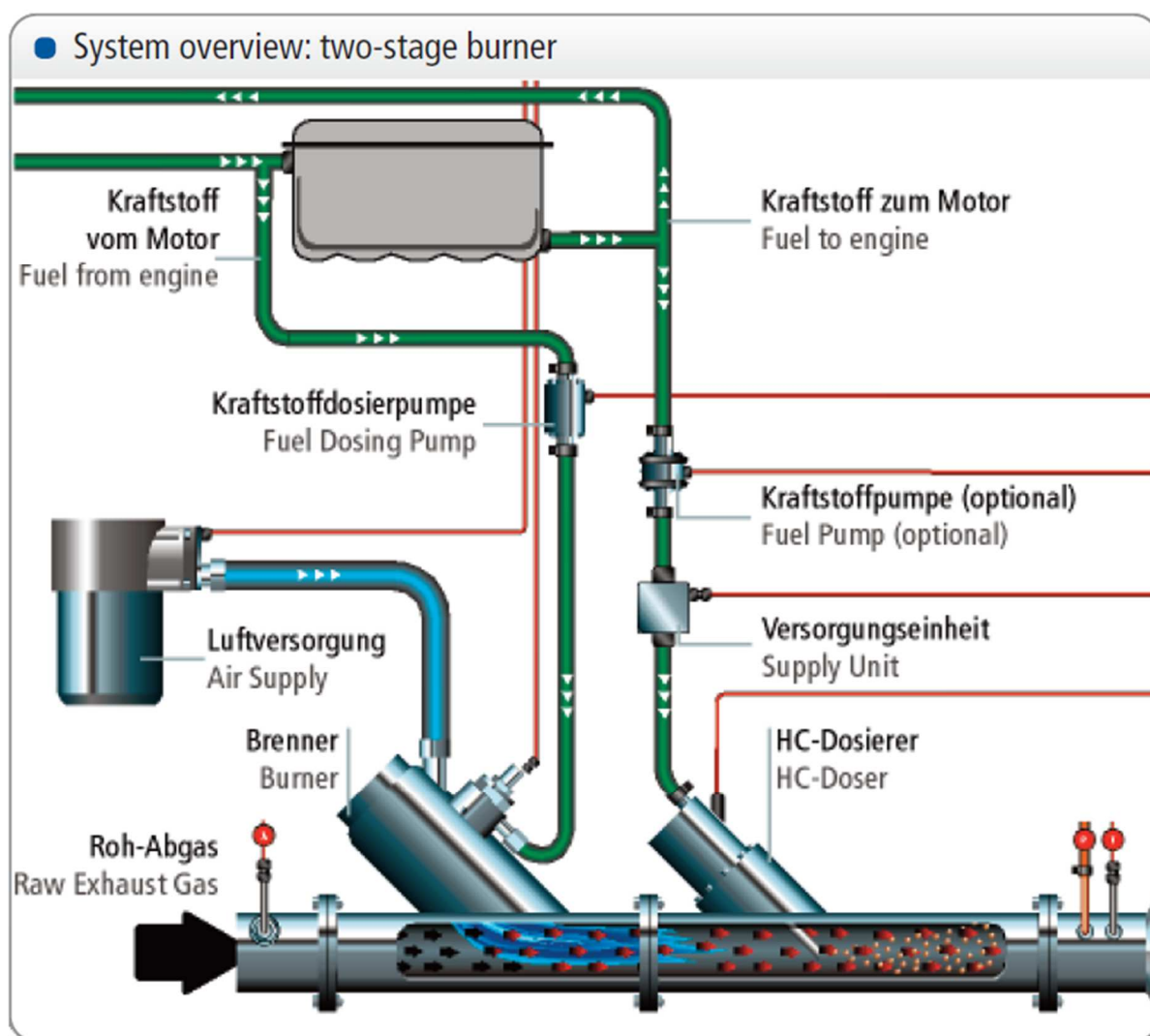


Obr. 17: Teplotní management Two-stage Burner systému. [14]

V tomto provedení plní hořák funkci ohřívače oxidačního katalyzátoru na minimální teplotu, při které se v něm palivo dokáže vznítit. Po jeho ohřátí se aktivuje jednotka pro vstřikování paliva. Regenerační teploty DPF je poté dosaženo oxidační reakcí paliva, nezávisle na činnosti hořáku.

Schéma Two-stage Burner je na Obr. 18, kde jak již bylo výše uvedeno, jsou oproti Single-stage Burner navíc tyto komponenty:

- Fuel Pump – dopravní čerpadlo zásobující Supply Unit
- Supply Unit – jednotka řídící množství dodávaného paliva
- HC-Doser – jednotka pro vstřikování paliva [14]



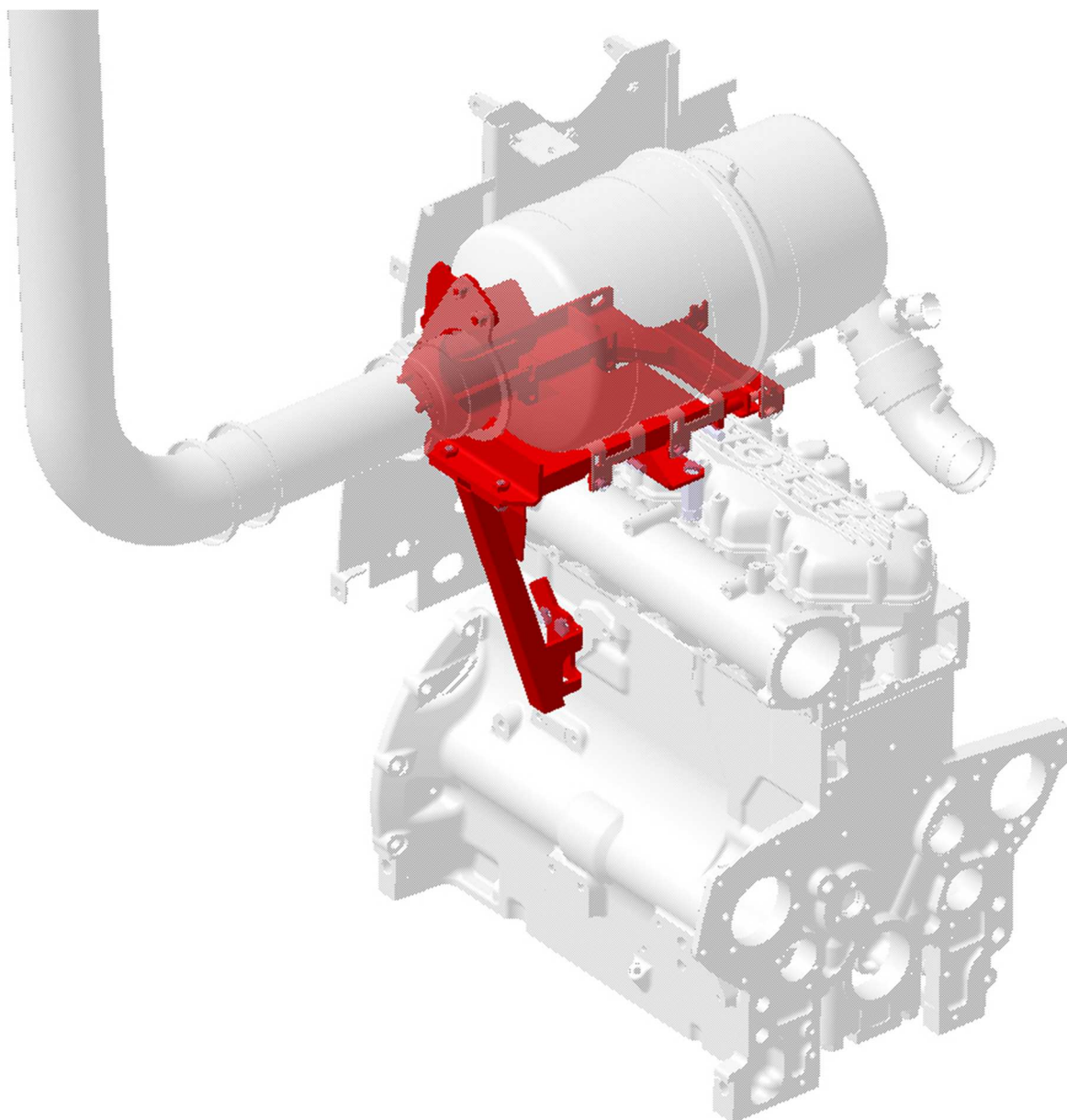
Obr. 18: Schéma Two-stage Burner systému. [14]



2 POPIS KONSTRUKCE DRŽÁKU FILTRAČNÍ JEDNOTKY

Z konstrukčního hlediska má řešení filtrace výfukových plynů na traktoru svá specifika. Ta jsou dána charakterem stroje, podmínkami ve kterých pracuje a z toho plynoucích konstrukčních priorit.

Předmětný držák filtrační jednotky a jeho umístění na traktoru jsou na *Obr. 19*.



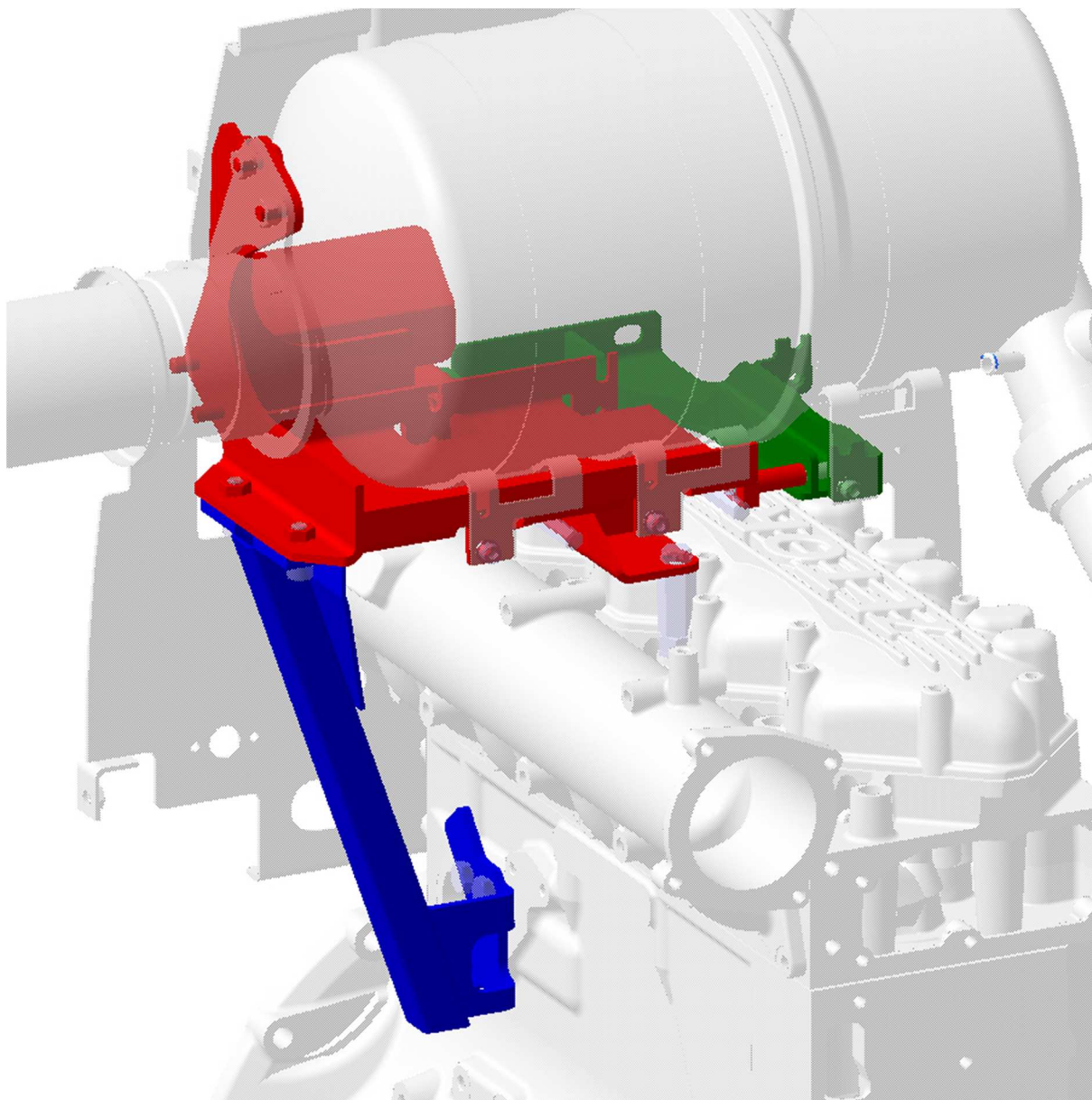
Obr. 19: Držák filtrační jednotky a jeho umístění na traktoru.

Jedním z důležitých vstupů do konstrukce držáku filtrační jednotky na traktor je, že zde není tlak na dosažení co nejnižší hmotnosti. Na druhou stranu je hmotnost limitována cenou materiálu. Konstruktor prověřovaného řešení byl dle autorova názoru nejvíce limitován umístěním držáku do prostoru nad hlavou motoru. Ten dovoluje realizovat samotné uchycení pouze na několika místech, důsledkem čehož není zatížení rozloženo příliš rovnoměrně. Při



návrhu konstrukce dosud nebyly použity žádné MKP výpočty. Stávající konstrukce je dílem zkušeností konstruktérů z firmy Zetor.

Jak je vidět na *Obr. 20*, držák nese celý tubus filtrační jednotky. Ten je složen ze silnější části tubusu, která obsahuje filtr pevných částic a užší části s předřazeným oxidačním katalyzátorem.



Obr. 20: Bližší pohled na zástavbu a konstrukci držáku filtrační jednotky.

Celá konstrukce se dá rozdělit na tři logické celky:

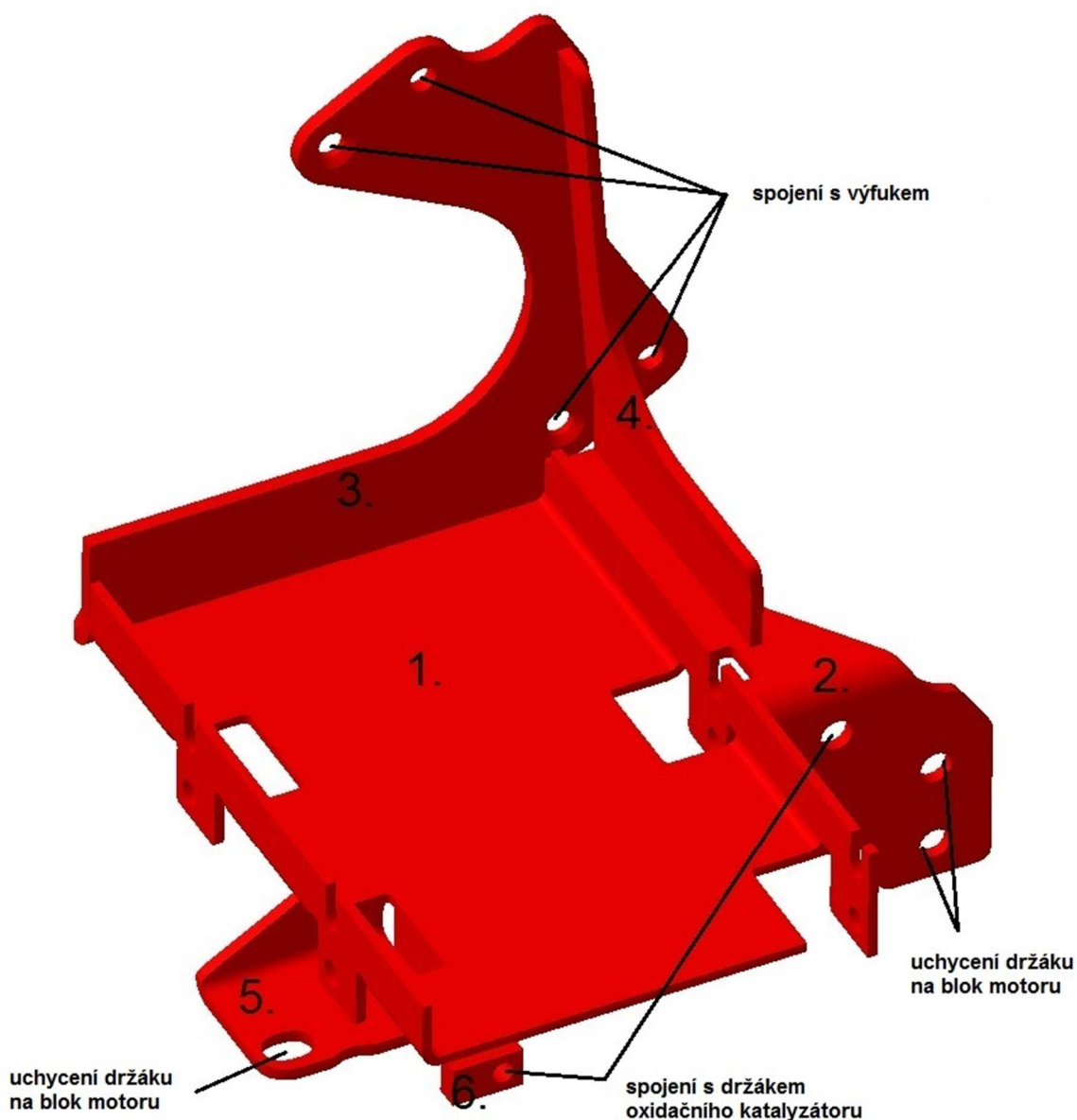
1. příruba výfuku a držák filtru pevných částic (na *Obr. 20* červený),
2. držák oxidačního katalyzátoru (na *Obr. 20* zelený),
3. vzpěra (na *Obr. 20* modrá).

Jak je patrné, vyčlenění samotného držáku filtru pevných částic z tohoto konstrukčního celku by nevedlo k dobrým výsledkům. Znamenalo by to totiž významné zjednodušení především na straně okrajových podmínek výpočtu. Po dohodě s vedoucím práce je tedy **předmětem této diplomové práce kompletní konstrukce držáku filtrační jednotky**.

V následujících kapitolách budou představeny jednotlivé logické celky konstrukce, tak jak byly výše vyjmenovány.

2.1 PŘÍRUBA VÝFUKU A DRŽÁK FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC

Držák filtru pevných částic je konstruován jako svařenec pěti ohýbaných plechů různých tloušťek a jednoho vyráběného dílu – matky – v podobě hranolu s vnitřním závitem M10.

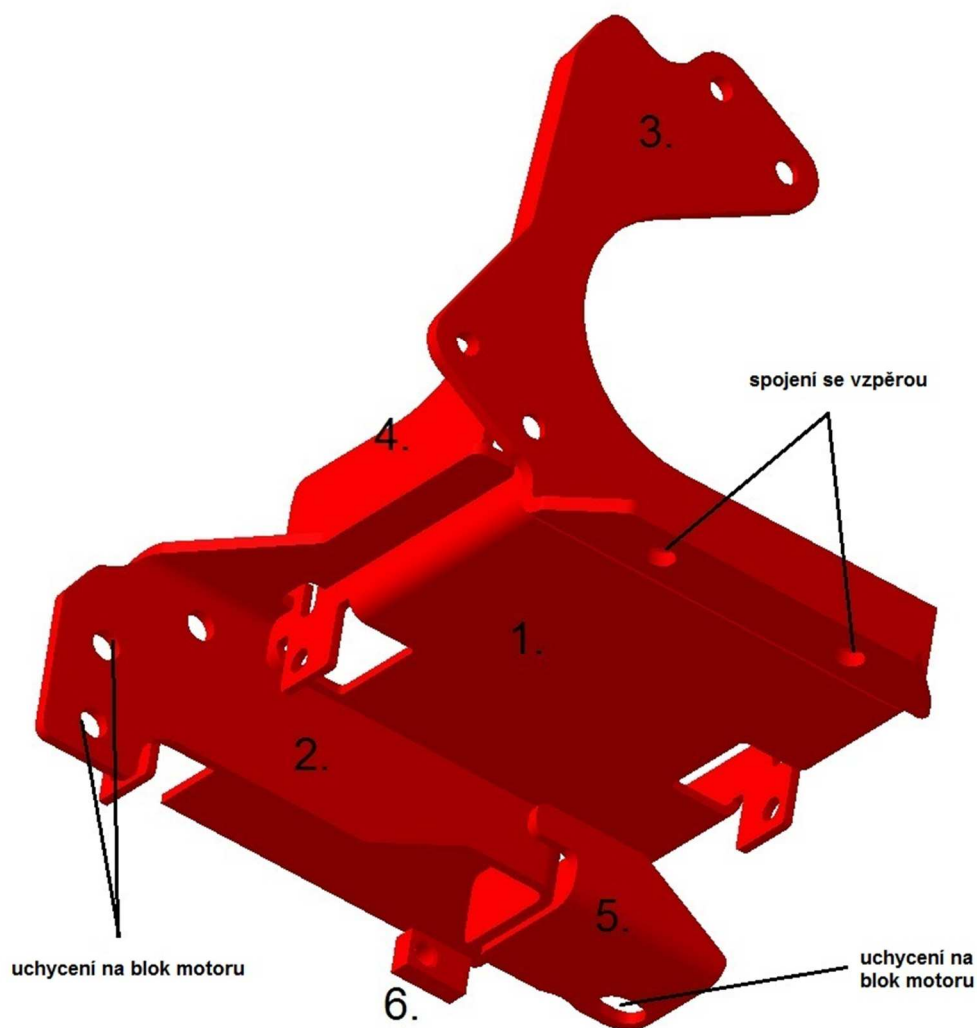


Obr. 21: ISO pohled shora na přírubu výfuku a držák filtru pevných částic.



Jednotlivé díly svařence a jejich tloušťky jsou:

1. spodní nosný plech, $t = 4 \text{ mm}$,
2. výztuha spodního nosného plechu, $t = 5 \text{ mm}$,
3. příruba výfuku, $t = 6 \text{ mm}$,
4. výztuha příruby, $t = 5 \text{ mm}$,
5. podložka, $t = 5 \text{ mm}$ a
6. matice.



Obr. 22: ISO pohled ze spodu na přírubu výfuku a držák filtru pevných částic.

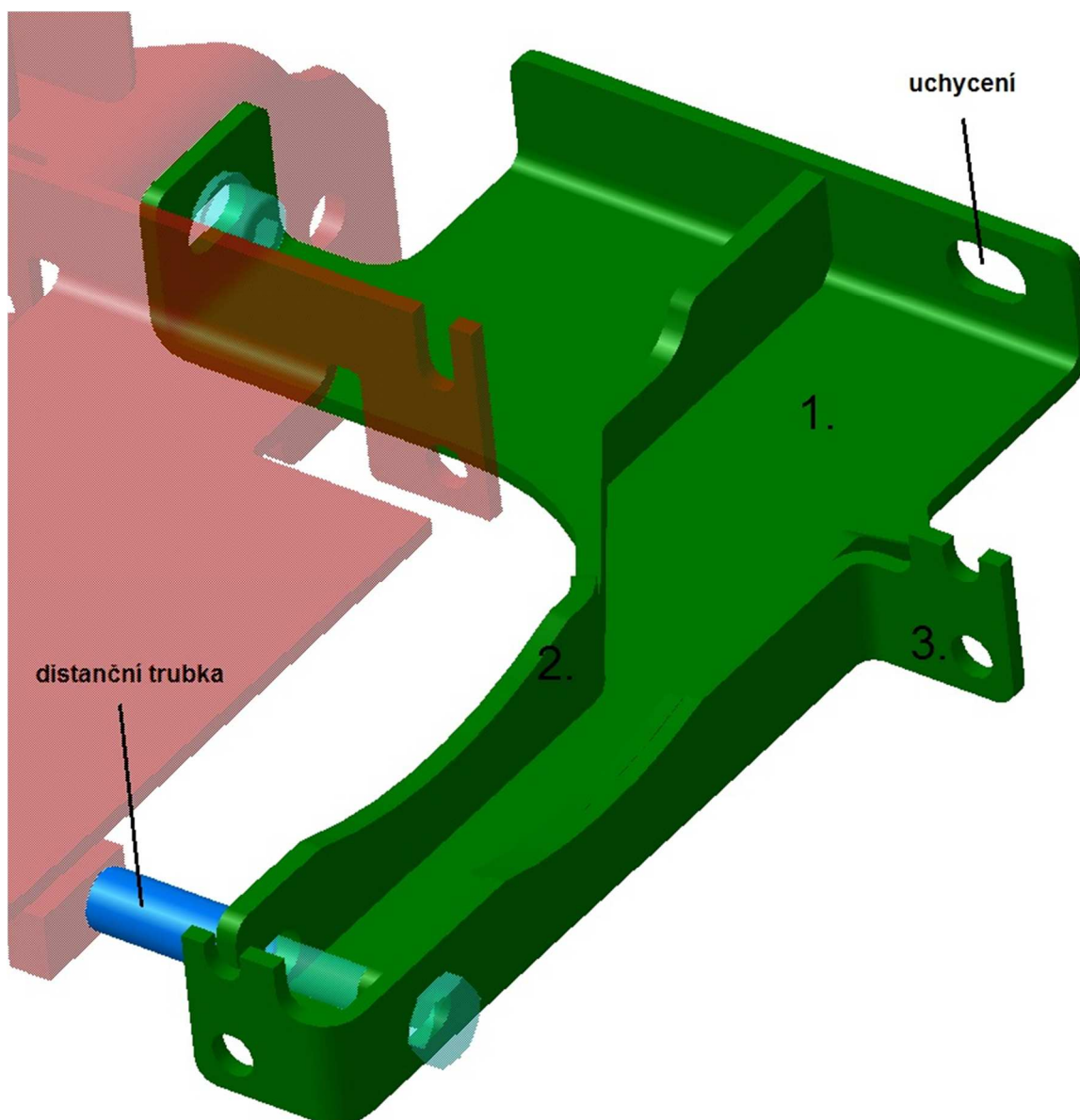
Uchycení držáku je provedeno jedním šroubovým spojem v místě *podložky*, dvěma na *výztuze spodního nosného plechu* viz Obr. 21 a dalšíma dvěma na *přírubě výfuku* v místech stojny viz Obr. 22.

Pojištění spojení s výfukem je provedeno čtyřmi šroubovými spoji M10.

2.2 DRŽÁK OXIDAČNÍHO KATALYZÁTORU

Druhá podsestava celého držáku filtrační jednotky je držák oxidačního katalyzátoru. Jedná se opět o svařenec ohýbaných plechů, v tomto případě složený ze tří částí:

1. spodní plech, $t = 4$ mm,
2. výztuha spodního plechu, $t = 5$ mm,
3. nosný plech, $t = 4$ mm.



Obr. 23: Horní ISO pohled na držák oxidačního katalyzátoru.

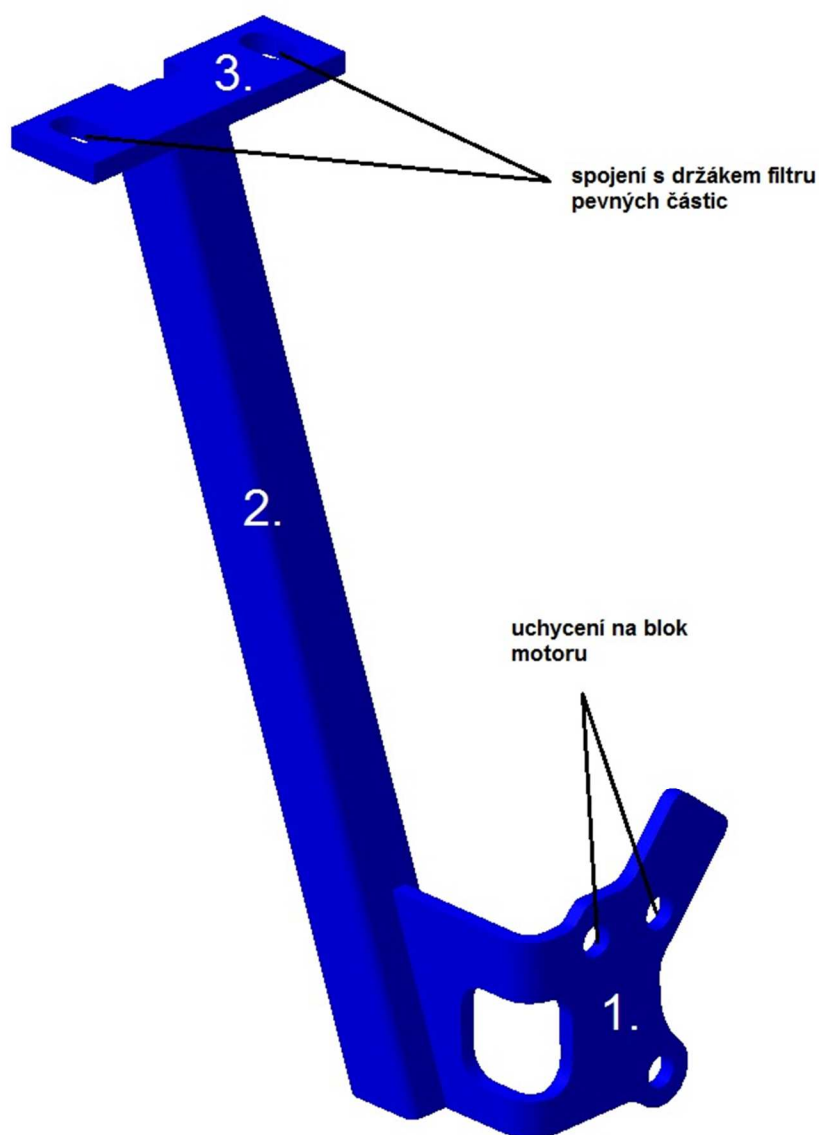
K držáku filtru pevných částic je tento držák oxidačního katalyzátoru připojen dvěma šroubovými spoji M10, přičemž jedno spojení je realizováno za pomoci distanční trubky o vnitřním průměru $d = 11$ mm a tloušťce $t = 1,5$ mm.



2.3 VZPĚRA

Vzpěra je navržena jako svařenec ze tří dílů:

1. patky, $t = 6 \text{ mm}$,
2. tyče čtvercového profilu $30 \times 30 \text{ mm}$, $t = 3 \text{ mm}$,
3. příruby, $t = 8 \text{ mm}$.



Obr. 24: Vzpěra držáku výfukové jednotky.

Patka vzpěry je uchycena na blok motoru dvěma šroubovými spoji M12. Příruba vzpěry je k přírubě výfuku (součást držáku filtru pevných částic) napojena dvěma šroubovými spoji M10.



2.4 MATERIÁL

2.4.1 TYP MATERIÁL DRŽÁKU FILTRAČNÍ JEDNOTKY

Celá konstrukce je tvořena plechy z oceli S235JR+N EN 10025-2. Tento materiál odpovídá přibližně oceli pod starým označením ČSN 11 373, tedy nelegované konstrukční oceli vhodné pro svařované konstrukce.

Mez kluzu $R_e = 370 \text{ MPa}$

Celá konstrukce je po svaření normalizačně žíhána pro odstranění zbytkového vnitřního napětí.

2.4.2 TYP SPOJOVACÍHO MATERIÁLU

Třída oceli použitých šroubů je 8.8, ta má v porovnání s materiálem zbytku konstrukce výrazně lepší mechanické vlastnosti.

Smluvní mez kluzu této třídy oceli je:

$R_{p0,2} = 640 \text{ MPa}$

Této skutečnosti autor využije při náhradě skutečných šroubových spojů náhradními prvky sítě.

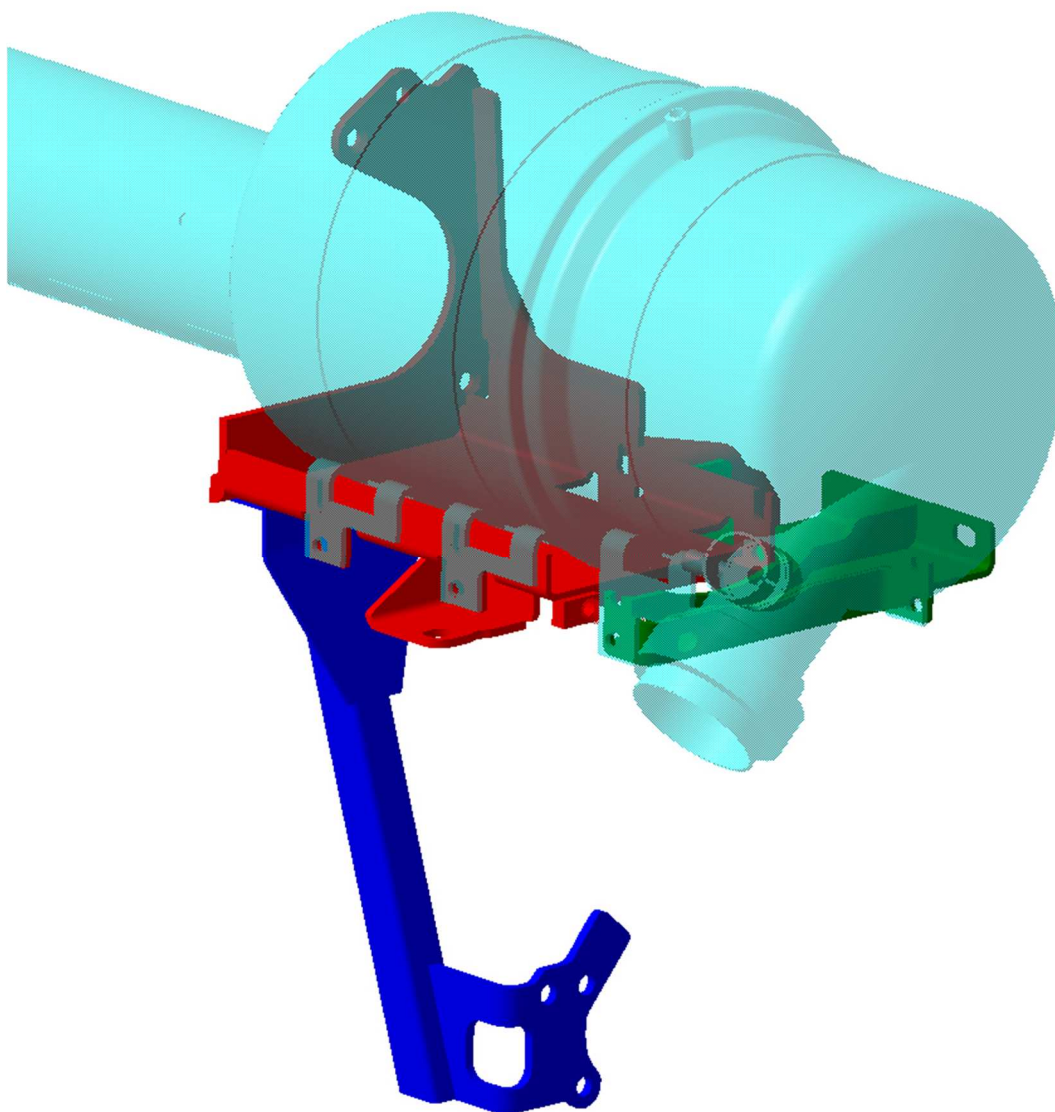


3 STANOVENÍ ZATÍŽENÍ

Cílem výpočtu je určit vnitřní napjatost držáku filtrační jednotky staticky zatíženého hmotností této jednotky a výfuku. Celý držák je zatížen jak filtrační jednotkou tak funguje jako jediný držák pro výfuk.

Právě uchycení výfuku bude pravděpodobně kritické místo. K držáku filtrační jednotky je totiž uchycen v takovém místě, skrze které přenáší svoji hmotnost na držák výhradně jako moment síly.

Všechna zatížení a jejich výpočty jsou pro účely MKP výpočtů zjednodušena. Autor v následujících kapitolách tato zjednodušení opíše, zdůvodní a nastíní jejich dopad na kvalitu výpočtu.

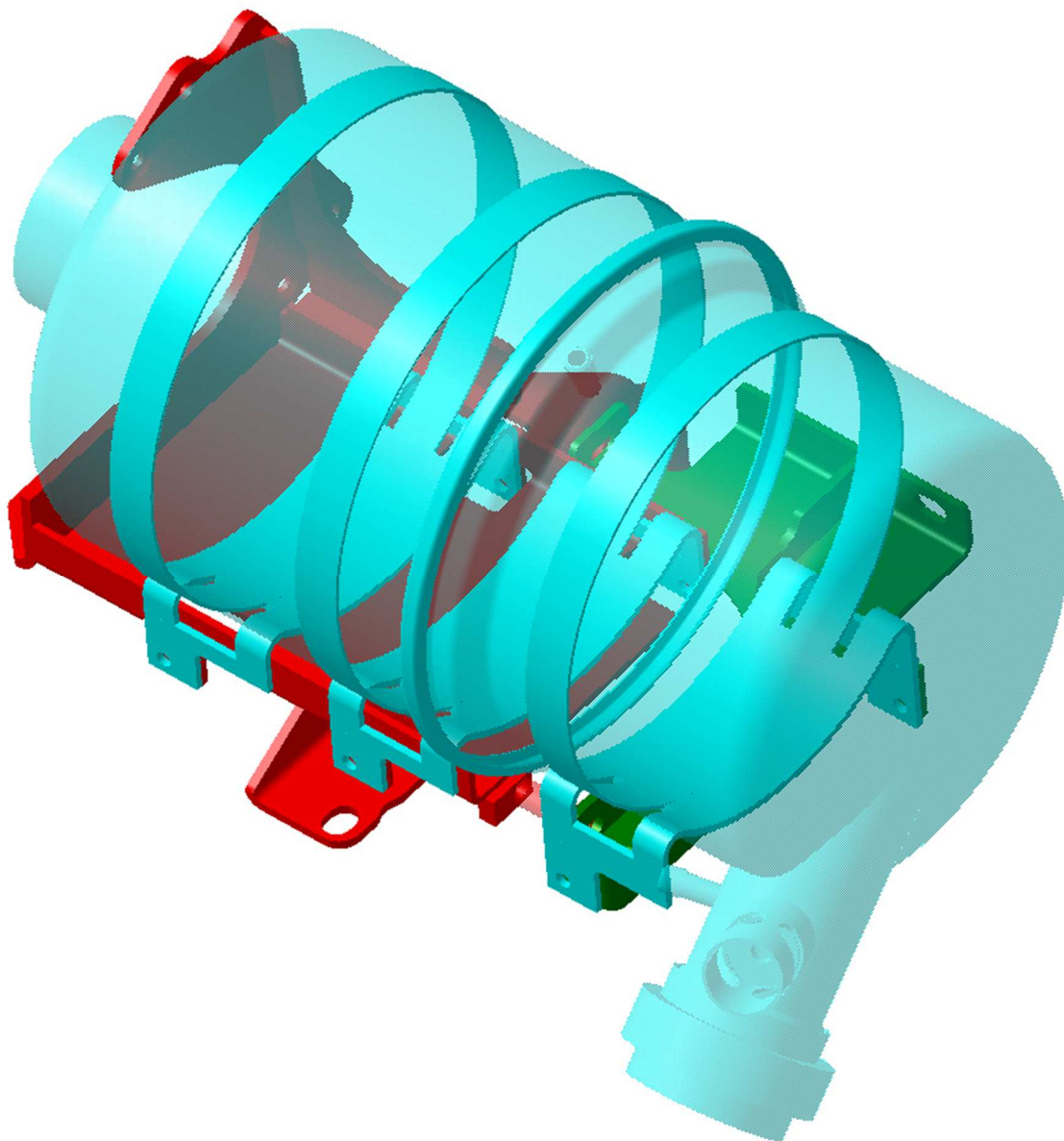


Obr. 25: Sestava držáku filtrační jednotky a výfuku.



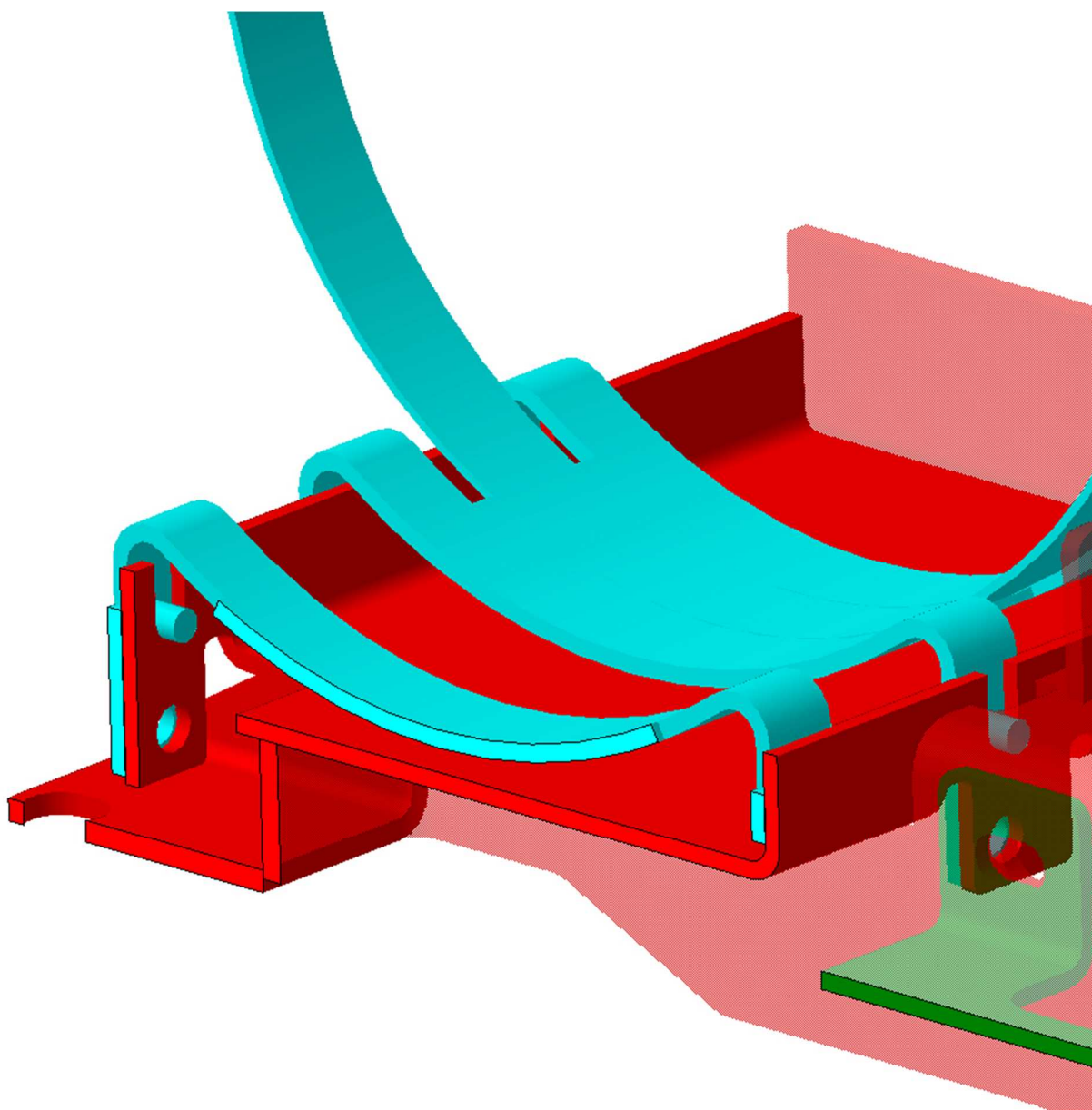
3.1 STANOVENÍ ZATÍŽENÍ OD FILTRAČNÍ JEDNOTKY

Uchycení tubusu filtrační jednotky k držáku je realizováno přes tři přepásání po délce tubusu. Součástí těchto přepásání jsou packy, ohnuté do svislé polohy, tak aby kopírovaly lem spodního nosného plechu na držáku filtru pevných částic a stejně tak lem na nosném plechu držáku oxidačního katalyzátoru. Celá situace viz *Obr. 26*.



Obr. 26: Uchycení tubusu filtrační jednotky přes tři přepásání po délce.

Na každé ze šesti ohnutých pacek jsou čepy, které tvarově dosedají do drážek v lemu. Tato poloha je pojištěna šroubovými spoji umístěnými také na packách přepásání. Náhled na tuto situaci je na *Obr. 27*.



Obr. 27: Řez držákem filtrační jednotky a pohled na čep přepásání v drážce spodního nosného plechu.

Díky příznivé poloze těžiště filtrační jednotky se dá zatížení od hmotnosti rozložit rovnoměrně do všech šesti dosedů v drážkách. Šroubové spojení přepásání s držákem zde plní pojišťovací funkci

Ve skutečnosti je, při správném dotažení pojišťovacích šroubů, zatížení od filtrační jednotky přenášeno především na kontaktních plochách mezi packami opásání a lemy nosného plechu. Z předběžných výpočtů při umístění silového zatížení do dosedů drážek je však zřejmé, že i tento náhradní zátěžný stav je pro zhodnocení výsledné vnitřní napjatosti dostačující.

Veškeré síly pro potřeby výpočtu budou tedy aplikovány na dosedy drážek.



Hmotnost filtrační jednotky:

$$m_{FJ} = 22,7 \text{ kg}$$

Tíha filtrační jednotky:

$$G_{FJ} = m_{FJ} \times g = 22,7 \times 9,81 = 222,7 \text{ N}$$

Silové zatížení pro každou z dosedacích drážek:

$$F_R = G_{FJ} \div 6 = 222,7 \div 6 = 37,1 \text{ N}$$

Výsledné silové reakce odpovídají statickému zatížení. Ve skutečnosti bude držák zatěžován vibracemi od motoru, reakcemi na setrvačné síly způsobené neplynulým pohybem při jízdě traktoru v terénu a dalšími dynamickými jevy.

Pro přibližnou náhradu těchto skutečných silových poměrů a po konzultaci s vedoucím práce autor na vypočtené statické zatížení uplatnil bezrozměrný „dynamický koeficient“ $k_d = 1,6$ a takto korigované silové zatížení použije pro výpočet. Potom velikost každé z korigovaných sil je:

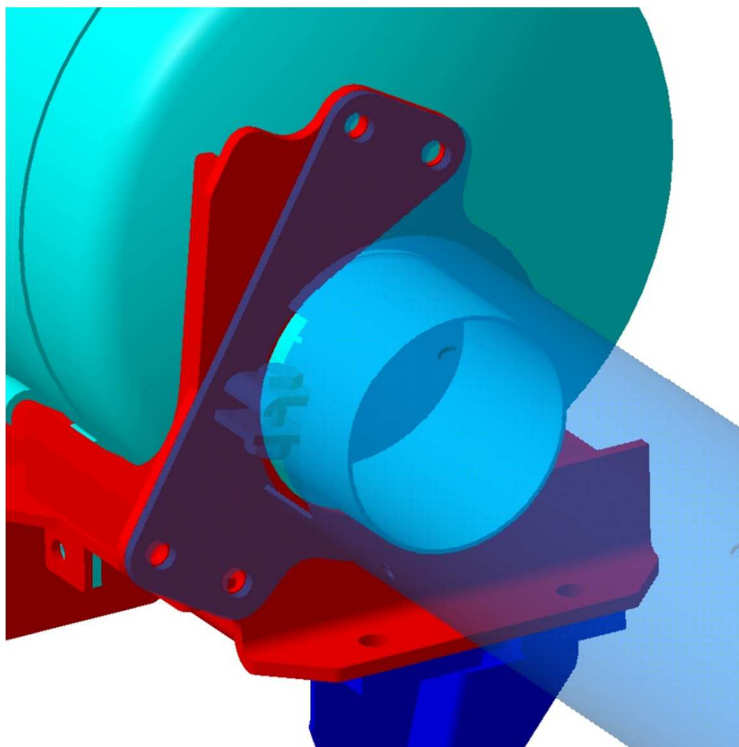
$$F_{RD} = F_R \times k_d = 37,1 \times 1,6 = 60,2 \text{ N}$$

3.2 STANOVENÍ ZATÍŽENÍ OD VÝFUKU

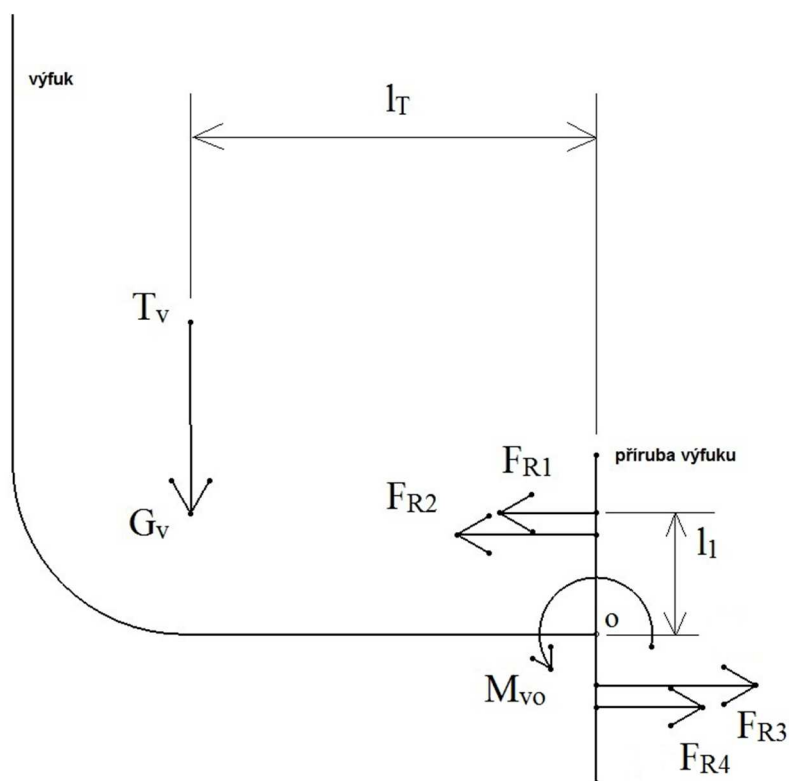
Celá hmotnost výfuku je držena na přírubě, která je součástí držáku filtru pevných částic. Zde je spojení realizováno čtyřmi šroubovými spoji M10.

Výfuk je nasazen na výstup z filtru pevných částic a pojištěn objímkou. Toto nasazení je zabezpečeno výše zmíněnými šroubovými spoji, na které jsou přenášeny silové účinky od hmotnosti výfuku.

Celá situace je na *Obr. 28*.



Obr. 28: Způsob uchycení výfuku na držák filtrační jednotky.



Obr. 29: Schéma přenosu zatížení od hmotnosti výfuku.

Výpočet silového zatížení od výfuku vychází z pozice jeho umístění a faktu že držák filtrační jednotky se jako jediný podílí na jeho uchycení v prostoru.



Pro výpočet byla stanovena poloha těžiště výfuku v programu Catia. Poté byl vypočten momentový účinek, který byl přenesen rovnoměrně na všechny čtyři šroubové spoje, viz *Obr. 29*. Do zátěžného stavu pro výpočet tak vstupují síly izolovaně, bez ohledu na kontaktní plochu výfuku s přírubou. Toto zjednodušení zanedbává právě zmíněný kontakt, který má ve skutečnosti na tuhost tohoto lokálního systému pozitivní účinek. Zjednodušení jde tedy směrem na bezpečnou stranu, kdy zátěžný stav pro výpočet je horší než stav skutečný.

Hmotnost výfuku:

$$m_v = 12 \text{ kg}$$

Tíha výfuku:

$$G_v = m_v \times g = 12 \times 9,81 = 117,72 \text{ N}$$

Kolmá vzdálenost od těžiště výfuku k přírubě:

$$l_T = 384 \text{ mm} = 0,384 \text{ m}$$

Moment od tíhy výfuku v bodě o:

$$M_{vo} = G_v \times l_T = 117,72 \times 0,384 = 45,2 \text{ N.m}$$

Výsledné silové reakce od momentu jsou přenášeny rovnoměrně všemi čtyřmi šrouby, potom:

$$\frac{M_{vo}}{4} = F_{Ri} \times l_i$$

a odtud velikost každé z reakcí:

$$F_{Ri} = \frac{\frac{M_{vo}}{4}}{l_i}$$

tedy:

$$F_{R1} = \frac{\frac{M_{vo}}{4}}{l_1} = \frac{\frac{45,2}{4}}{0,113} = 100,0 \text{ N}$$

$$F_{R1} = \frac{\frac{M_{vo}}{4}}{l_2} = \frac{\frac{45,2}{4}}{0,093} = 121,5 \text{ N}$$

$$F_{R1} = \frac{\frac{M_{vo}}{4}}{l_3} = \frac{\frac{45,2}{4}}{0,048} = 235,4 \text{ N}$$

$$F_{R1} = \frac{\frac{M_{vo}}{4}}{l_4} = \frac{\frac{45,2}{4}}{0,068} = 166,2 \text{ N}$$



Potom pro korigované silové zatížení:

$$F_{RiD} = F_{Ri} \times k_d$$

tedy:

$$F_{R1D} = F_{R1} \times k_d = 100,0 \times 1,6 = 160,0 \text{ N}$$

$$F_{R2D} = F_{R2} \times k_d = 121,5 \times 1,6 = 194,4 \text{ N}$$

$$F_{R3D} = F_{R3} \times k_d = 235,4 \times 1,6 = 376,6 \text{ N}$$

$$F_{R4D} = F_{R4} \times k_d = 166,2 \times 1,6 = 265,9 \text{ N}$$

Směr reakčních sil je dán schématem na *Obr. 26*.

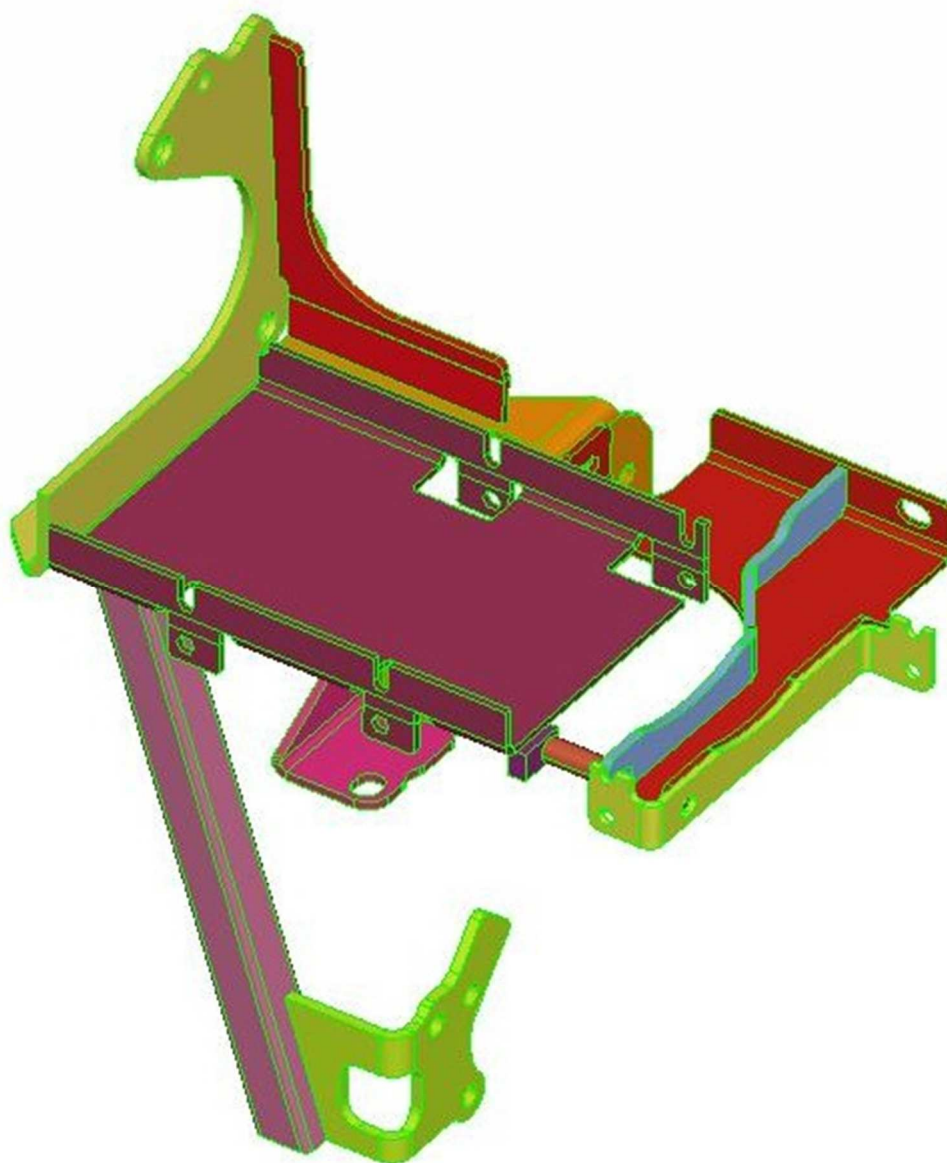


4 TVORBA SÍTĚ

Pro tvorbu sítě použil autor preprocesor Ansa, který je dle autorova názoru díky své specializaci schopnějším nástrojem v porovnání s preprocesorem, který je přímou součástí výpočtového softwaru Ansys.

Předmětný držák filtrační jednotky je svařenec převážně z ohýbaných plechů, tedy těles s právě jedním dominantním rozměrem. Z toho důvodu zvolil autor pro tvorbu sítě metodu, pomocí které se vytváří **sít' na střednicích** takovýchto rovinných objektů.

Hlavní výhodou daného přístupu je mnohonásobně menší náročnost na samotný výpočet ve srovnání s nároky na výpočet při použití objemové sítě.



Obr. 30: Importovaná geometrie do prostředí preprocesoru Ansa.



4.1 VOLBA ELEMENTU SÍTĚ

Pro definování sítě po střednicích byl zvolen prvek, který je svými parametry pro tento typ ideální.

SHELL 181

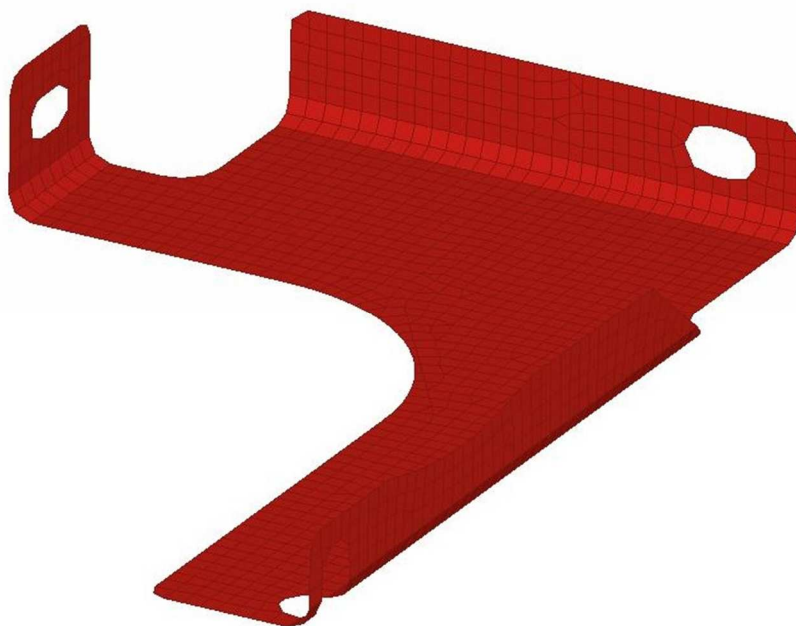
Jedná se o čtyř-prvkový skořepinový element, jehož hlavním vstupním parametrem je tloušťka. Při jejím zadání pomocí reálných konstant, počítá Ansys po normále tloušťky v pěti integračních bodech a tím vzniká náhrada objemového síťování. Integrační body jsou rozmístěny po dvou z každé strany, na povrch a mezi střednicí a povrchem.

4.2 VOLBA VELIKOSTI ELEMENTU SÍTĚ

Omezení použití těchto elementů spočívá právě v umísťování integračních bodů na normálu střednice. Nebezpečí s tím spojené může nastat v případě, kdy se na jinak rovinné geometrii střednice objeví například rádius. Potom může nastat případ, kdy velikost prvku a jeho tloušťka jsou větší než hodnota rádiu a způsobí překřížení, penetraci, integračních bodů na okraji definované tloušťky.

V takovýchto případech je na zvážení, zda je takový rádius v geometrii nahraditelný (například ostrou hranou) bez negativního dopadu na kvalitu výpočtu. Dalším řešením je zmenšení velikosti prvků.

S ohledem na vlastnosti elementu a tvar geometrie držáku filtrační jednotky autor zvoliv obecnou **velikost elementu sítě 5 mm**.



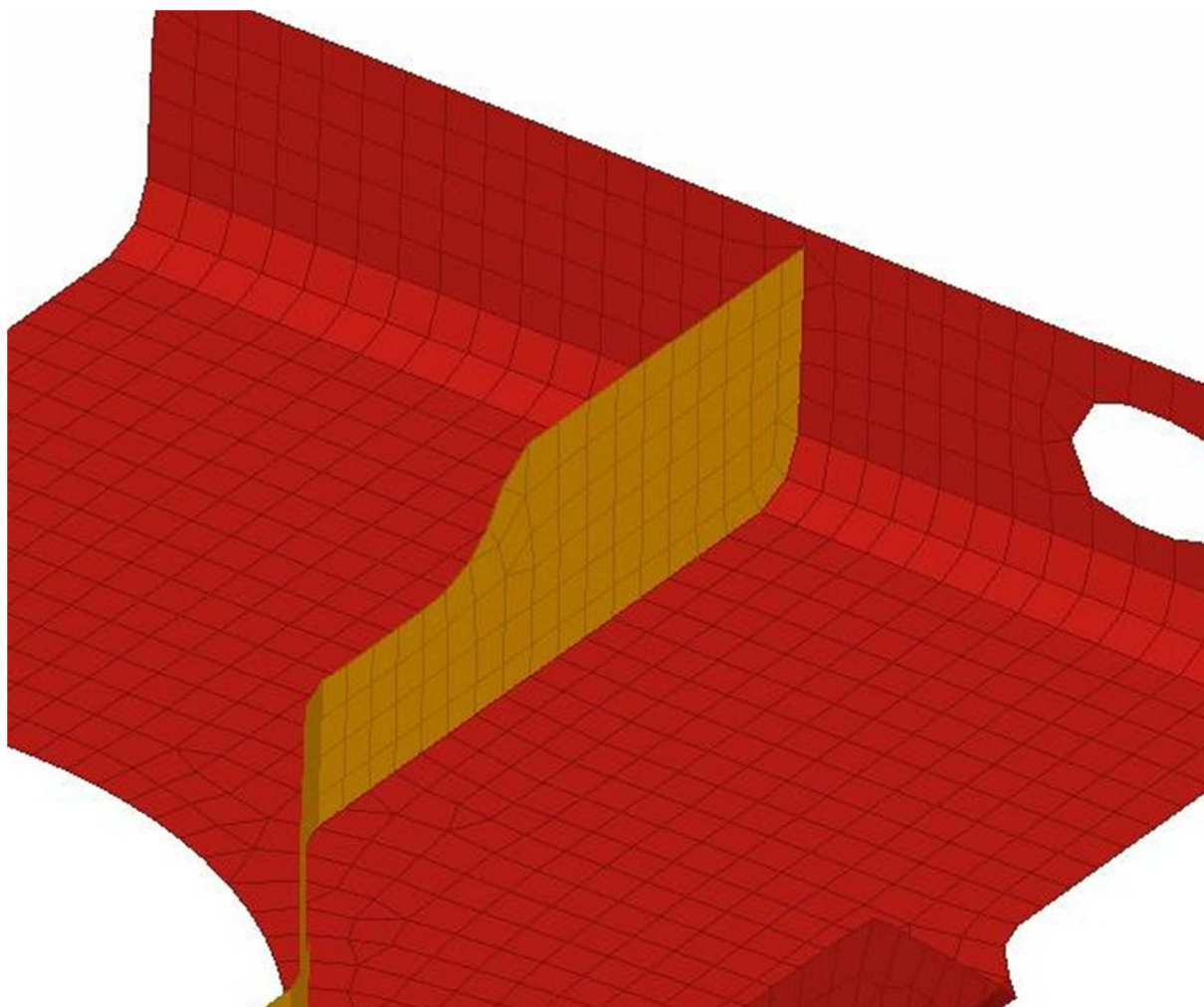
Obr. 31: Střednice spodního plechu pokryta sítí o velikosti elementu 5mm.



4.3 NÁHRADA SVAROVÝCH SPOJŮ

Základním krokem bylo vytvoření střednicových ploch z importované geometrie. Na tyto plochy byla nanесena síť o velikosti prvku 5 mm.

Protože svary nebyly součástí geometrie, musely být v síti nahrazeny. To autor provedl doplněním sítě a navázáním střednicových nodů. Ukázka jednoho z takto nahrazených svarů mezi spodním plechem oxidačního katalyzátoru a jeho výztuhou je na *Obr. 32*.

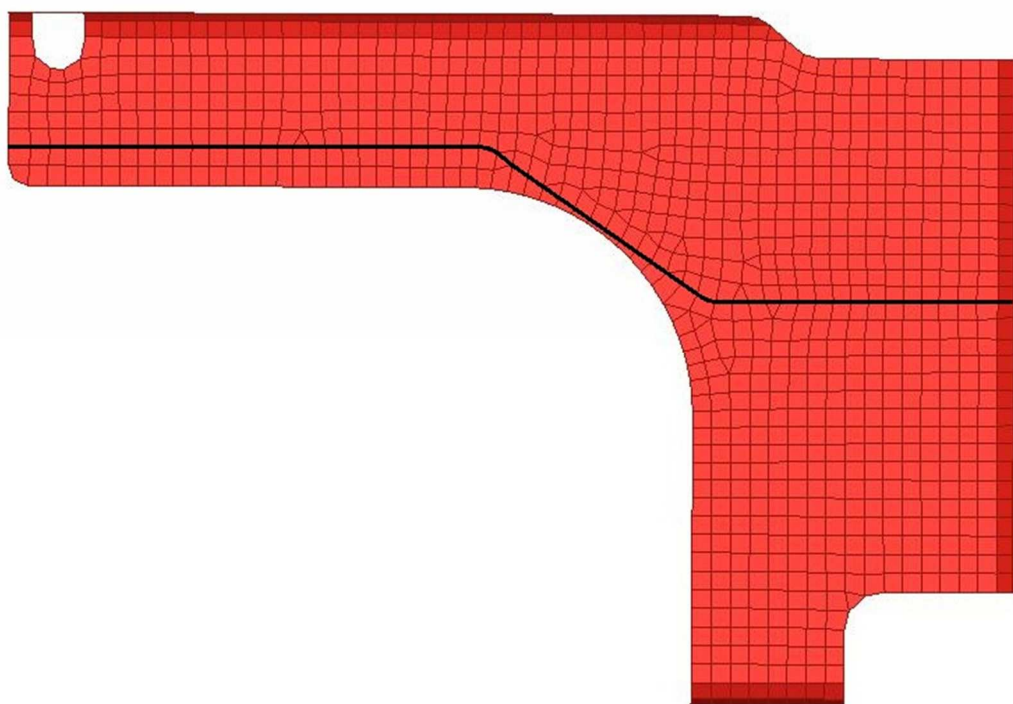


Obr. 32: Náhrada svarového spojení.

V tomto případě je síť výztuhy *navazující* a síť spodního plechu *navázaná*. Dříve vytvořená síť navázaného dílu byla upravena tak, aby nedošlo ke směrovému vychýlení elementů navazující sítě.

Tímto způsobem byly vytvořeny všechny svarové náhrady.

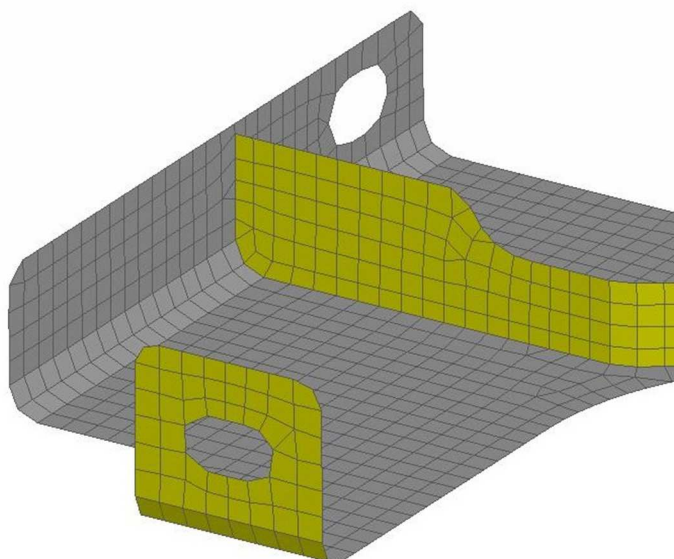
Konkrétní provedení na příkladu výztuhy a spodního plechu držáku oxidačního katalyzátoru je uvedeno na *Obr. 33*.



Obr. 33: Upravená síť spodního plechu s vytvořenou linií pro kolmé doplnění navazovaného dílu výztuhy.

4.4 SJEDNOCENÍ SMĚRU NORMÁL ELEMENTŮ SÍTĚ

Po náhradě svarů bylo nutné sjednotit směr normál doplněných elementů s normálami jejich mateřských sítí.



Obr. 34: Zobrazení normál jednotlivých elementů sítě.



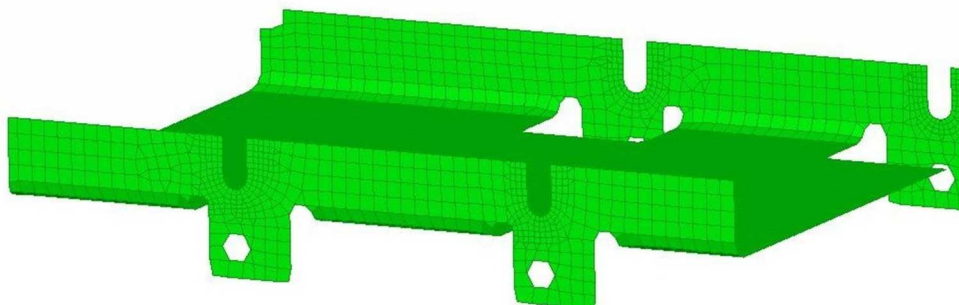
4.5 ZJEMNĚNÍ SÍŤ

Lokace zjemnění sítě autor volil s ohledem na zatěžující síly. Vhodným místem se tak ukázaly dosedy drážek na spodním nosném plechu držáku filtru pevných částic a ty samé pozice na držáku oxidačního katalyzátoru. Zde jsou totiž síly aplikované v rovině střednice geometrie a pro výpočet je právě zde důležité pomocí zjemnění sítě dosáhnout plynulejšího rozložení zátěžných sil.

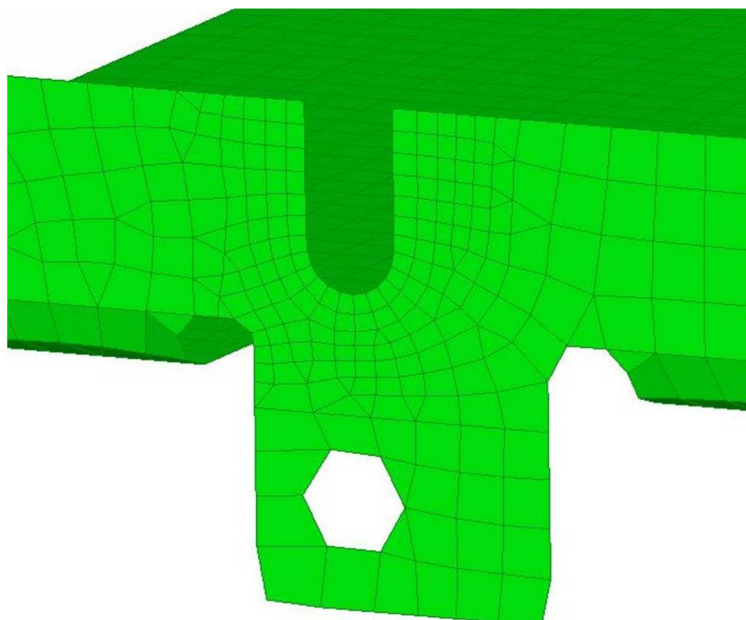
Síť zde proto autor upravil pomocí nástroje RECONS, který dle požadované velikosti prvků a zadaného typu (čtyř/tří nodový respektive smíšený) upraví síť v požadované oblasti.

Prvky v této oblasti byly zjemněny na **velikost 2 mm**.

Na Obr. 35 je pak výsledná zjemněná síť



Obr. 35: Zjemnění v oblasti dosedů drážek.



Obr. 36: Detail zjemněné oblasti.



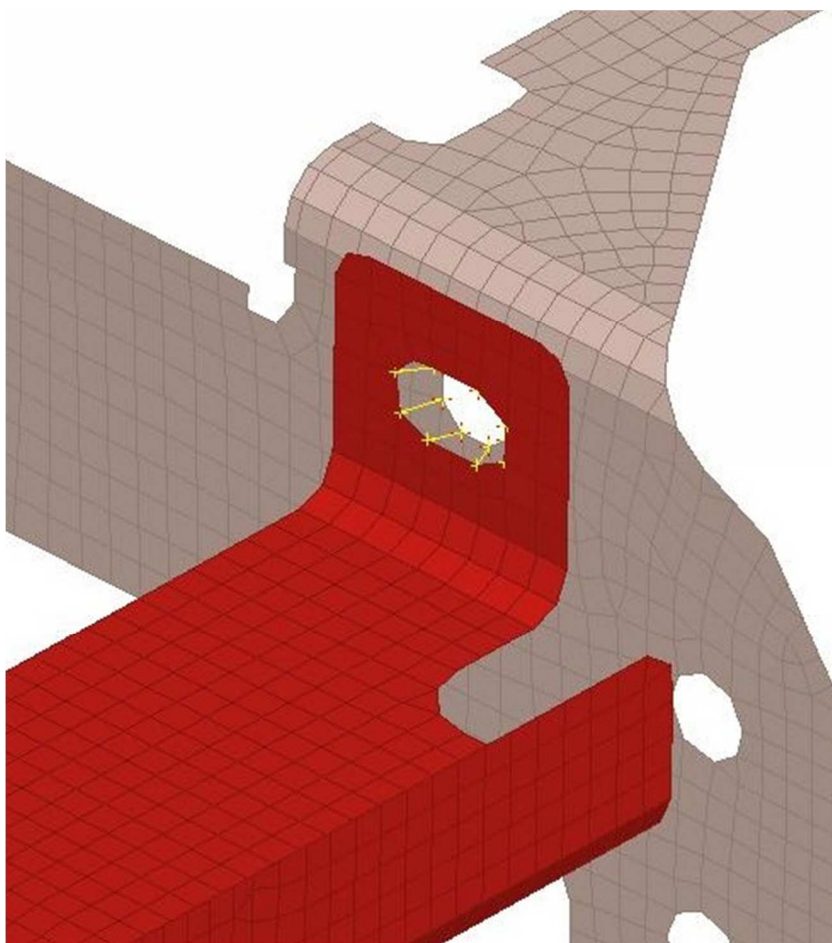
Zjemnění v místech šroubových spojů mezi přírubami držáku a výfuku autor neprováděl. Důvodem je směr zatěžujících sil ve shodě s normálou plochy. Přímě v místě působení tak nevzniká lokální napěťový extrém, ten se momentově přenáší do celé příruby výfuku.

4.6 NÁHRADA ŠROUBOVÝCH SPOJŮ

Konstrukci držáku filtrační jednotky představuje logický celek tří svařovaných částí. Tyto celky jsou spojeny šroubovými spoji, které není možno nahradit doplněním skořepinových prvků SHELL 181, jako v případě svarů.

Autor při náhradě těchto spojení přihlédl k téměř dvojnásobné hodnotě meze kluzu spojovacího materiálu oproti materiálu konstrukce.

Šroubová spojení autor nahradil vazbami mezi okrajovými nody sítě, které zamezují změně jejich vzájemné polohy.



Obr. 37: Náhrada šroubového spoje držáku filtru pevných částic a držáku oxidačního katalyzátoru.



5 ZÁTĚŽNÝ STAV

Připravená síť byla importována do výpočetního programu Ansys. Součástí sítě nachystané v programu Ansa jsou i definované reálné konstanty prvků. V tomto případě se jedná o tloušťky jednotlivých svařovaných dílů. Stejně tak jsou součástí i materiálové vlastnosti odpovídající isotropickému lineárně elastickému materiálu:

- Youngův modul pružnosti v tahu E

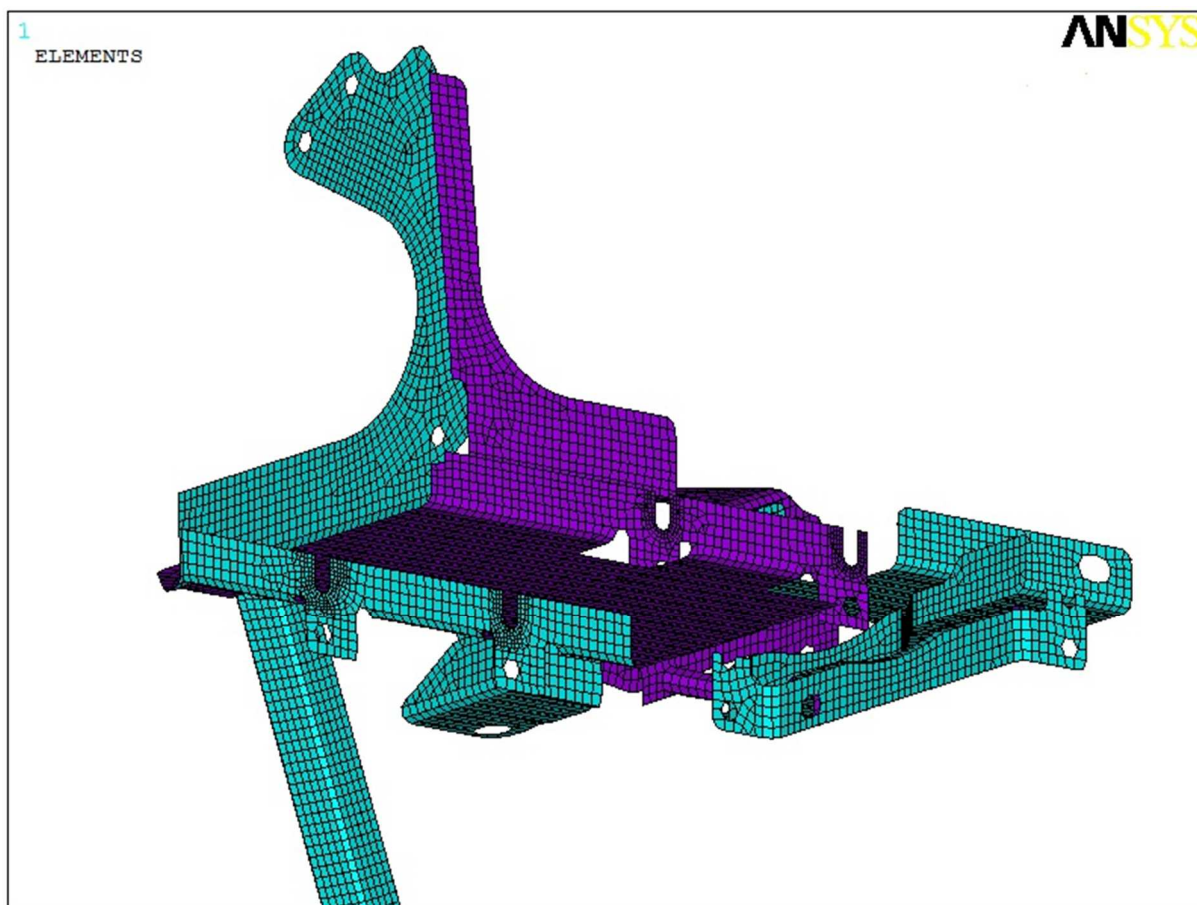
$$E = 2,1 \times 10^5 \text{ MPa}$$

- Poissonovo číslo μ

$$\mu = 0,3$$

A dále hustota ρ

$$\rho = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



Obr. 38: Síť importovaná do Ansysu.

Následuje definování okrajových podmínek držáku v prostoru (uchycení na blok motoru) a aplikování zatěžujících sil.

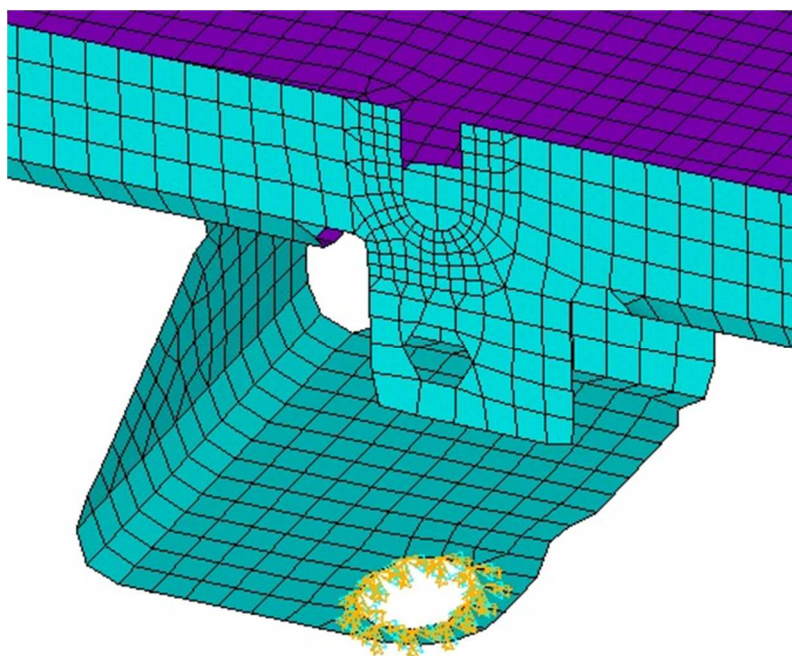


5.1 UCHYCENÍ NA BLOK MOTORU

Celý držák filtrační jednotky i se vzpěrou je šroubovými spoji uchycen v pěti bodech na blok motoru.

Ve skutečnosti jsou přes tato uchycení na držák přenášeny síly, jejichž zdrojem mohou být jak vibrace motoru, tak i další namáhání plynoucí z pracovních podmínek traktoru. Tyto vstupy nejsou jednoduše zjistitelné ani definovatelné, po dohodě s vedoucím práce se tak body uchycení považují za pevné.

Okrajovým nodům sítě v místech uchycení byly přiděleny vazby odebírající všechny stupně volnosti.



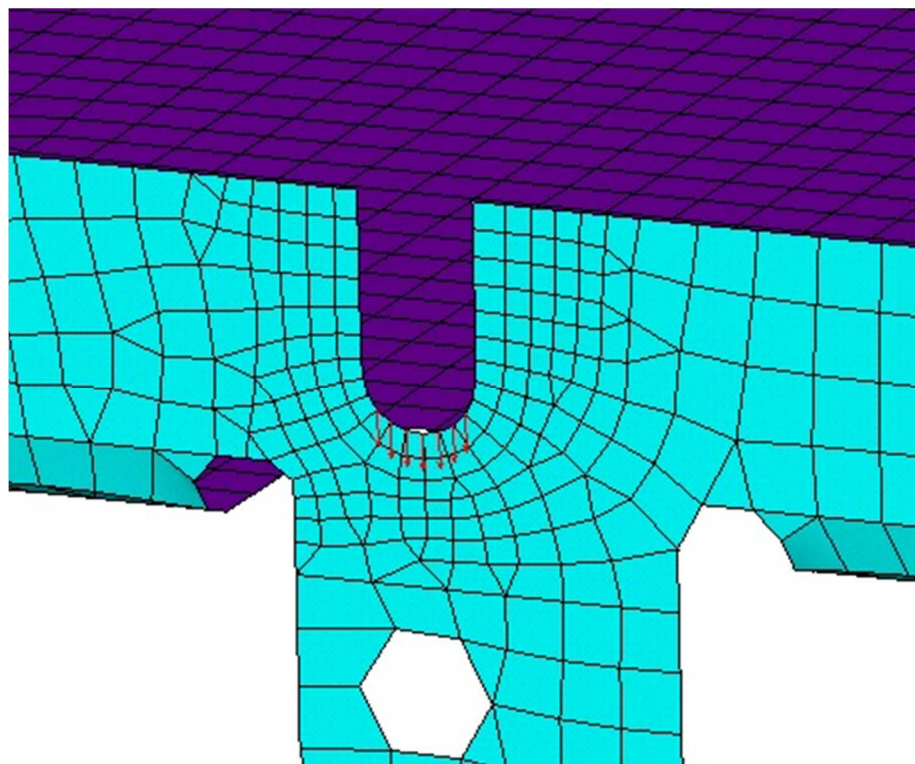
Obr. 39: Pevné uchycení držáku filtrační jednotky na blok motoru.

5.2 ZATĚŽUJÍCÍ SÍLY

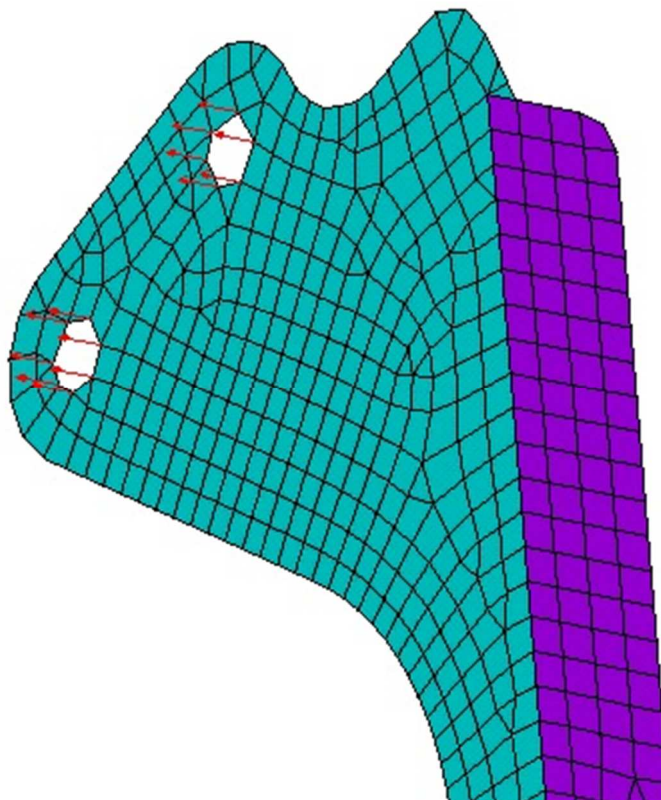
Směry i velikosti zatěžujících sil byly stanoveny ve čtvrté kapitole a nyní jsou aplikovány na síť.

Jak bylo v kapitole 4.1 prezentováno, zatížení od filtrační jednotky se přenáší na dosedy všech šesti drážek. V těchto místech byla síť zjemněna pro lepší rozložení zatěžujících sil.

Zatěžující síly od výfuku jsou aplikovány ve shodě s jejich stanovením v kapitole 4.2, viz Obr 41.



Obr. 40: Zatěžující síly od filtrační jednotky v dosedu drážky.



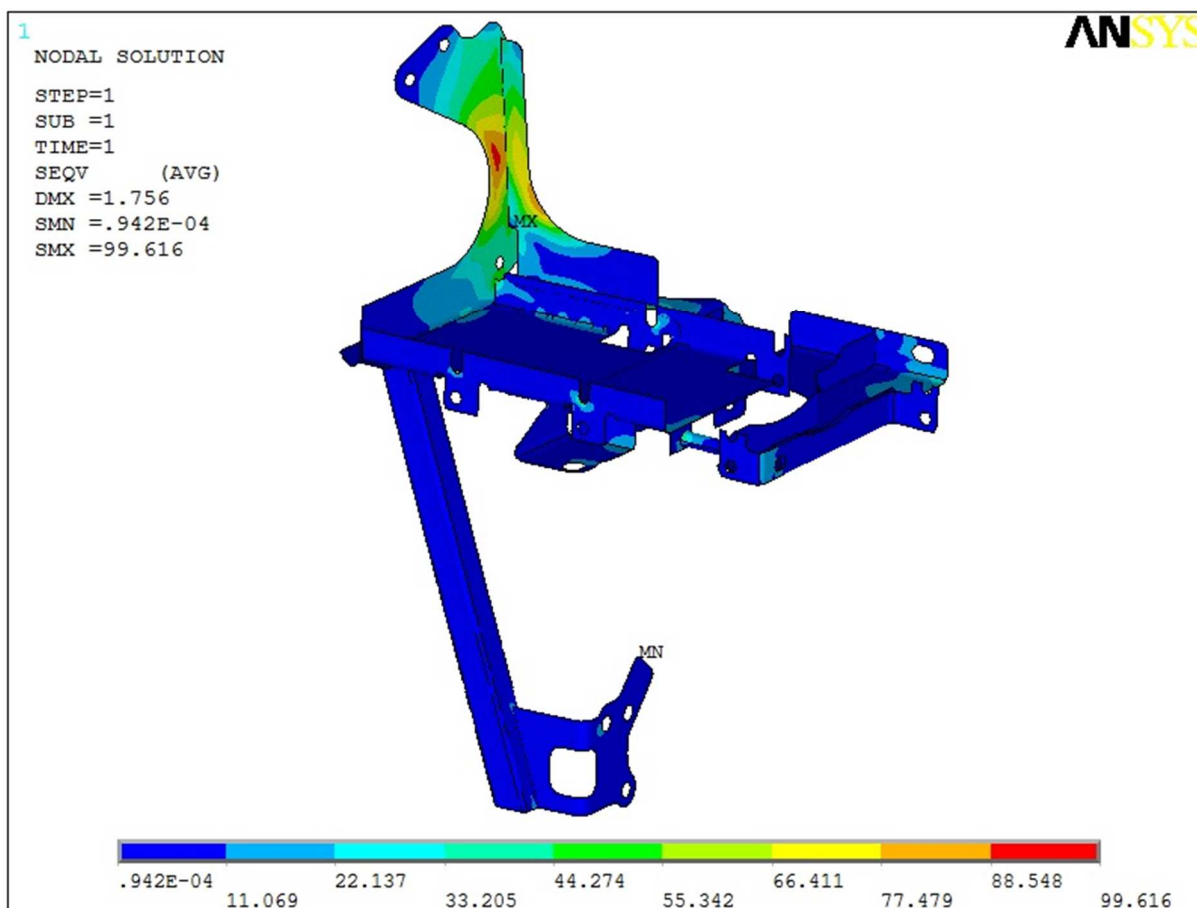
Obr. 41: Zatěžující síly od výfuku.



6 VÝSLEDEK VÝPOČTU

6.1 VNITŘNÍ NAPJATOST

Celkový pohled na výsledek statické analýzy vnitřní napjatosti držáku filtrační jednotky je na Obr. 42.



Obr. 42: Průběh vnitřní napjatosti držáku filtrační jednotky.

Zobrazené měřítko a hodnoty odpovídají vnitřní napjatosti dle podmínky HMM (von Mises).

Extrém vnitřního napětí je v oblasti příruby výfuku a její výztuhy. Hodnota maximálního redukovaného napětí v tomto místě dosahuje:

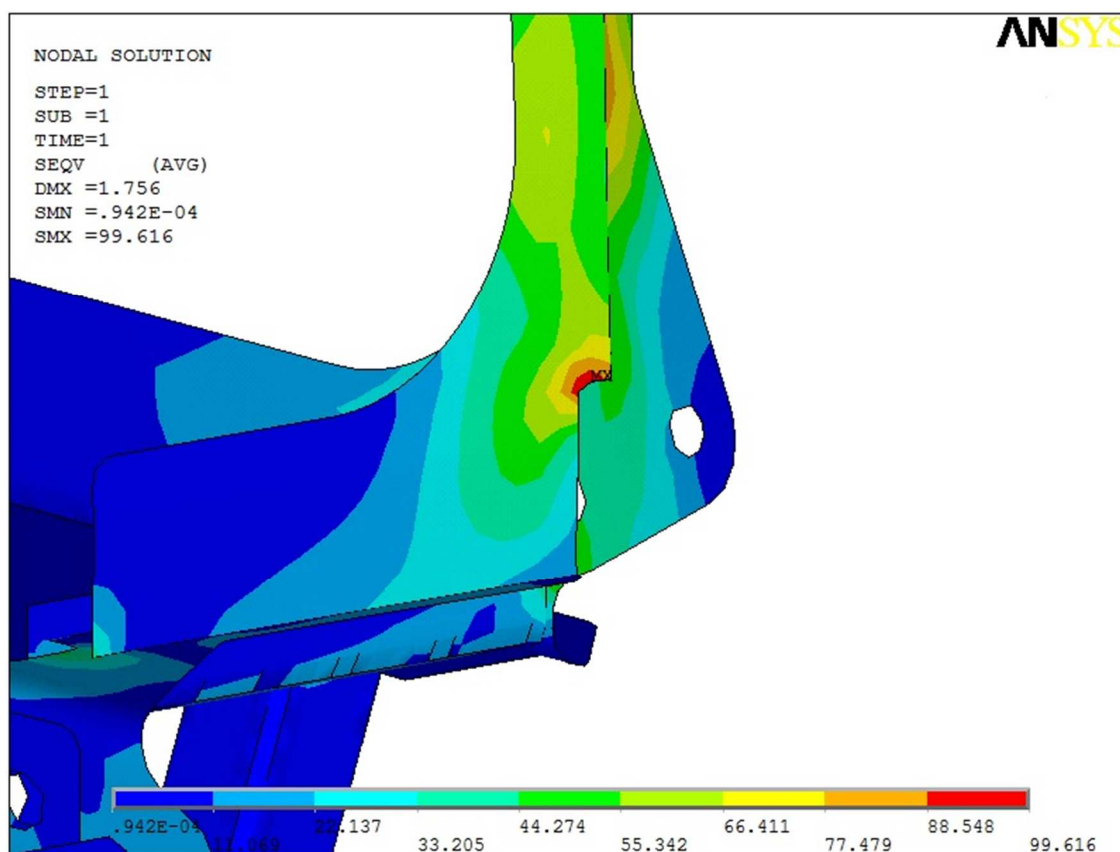
$$\sigma_{red_{max}} = 99,616 \text{ MPa}$$



6.2 KRITICKÉ MÍSTO

Ukázalo se, že potenciálně nebezpečným místem bude oblast příruby výfuku a k ní přivařené výztuhy. Tato část držáku je výrazně zatěžována od hmotnosti výfuku.

Maximální redukované napětí a tedy nejkritičtější místo celé konstrukce je na výztuze příruby výfuku, viz *Obr. 43*. Jedná se o rádius v blízkosti konce svařované oblasti.



Obr. 43: Napěťový extrém na výztuze příruby výfuku.



7 POSOUZENÍ STÁVAJÍCÍ KONSTRUKCE

Analýza vnitřní napjatosti ukázala na slabá místa konstrukce, stanovila maximální redukované napětí a jeho hodnotu.

Základní posouzení konstrukce držáku filtrační jednotky vychází ze srovnání stavu napjatosti s materiálovými vlastnostmi.

$$\sigma_{red_{max}} = 99,616 \text{ MPa}$$

$$R_e = 370 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{red_{max}} < R_e$$

Srovnání ukazuje, že napětí v kritickém místě nedosáhlo ani třetinové hodnoty meze kluzu materiálu. Z toho vyplývá, že pro daný statický zátěžový model je držák filtrační naddimenzovaný. Navíc pro zohlednění dynamických jevů byl ve výpočtu zatěžovacích sil použit násobný koeficient $k_d = 1,6$.

Důležité pro zhodnocení výsledků výpočtu je posouzení vlivu vnesených zjednodušení a to především při definování okrajových podmínek.

Jedním takovým zjednodušením bylo definování bodů uchycení držáku na blok motoru jako pevných. Ve skutečnosti jsou přes tato místa do konstrukce držáku přenášeny silové impulzy od pohybu traktoru při jízdě v terénu, vibrace od motoru a další vlivy s negativním dopadem na výslednou vnitřní napjatost. Výsledkem tohoto zjednodušení je potenciálně vyšší hodnota vnitřního napětí v kritickém místě výztuhy příruby.

Zjednodušení na straně výpočtu reakčních sil má dle autorova názoru opačný vliv, jde směrem na bezpečnou stranu. To především v případě zatížení od výfuku. Zde byl z výpočtu eliminován vliv kontaktu mezi přírubami výfuku, když byly síly aplikovány izolovaně na místa jednotlivých šroubových spojů a ve výpočtovém modelu byla zahrnuta pouze příruba výfuku jako součást držáku. Opěra pro tuto přírubu v podobě obdobné příruby umístěné přímo na výfuku zde výrazně zmenšuje tuhost tohoto spojení.

Dalším a stejně důležitým zjednodušením s negativním vlivem na velikost výsledného vnitřního napětí byl způsob výpočtu reakčních sil v těchto šroubových spojkách. Velikost sil vycházela z velikosti ramene momentu, který byl počítán od bodu střednice výfuku. Ve skutečnosti je toto vetknutí výfuku do příruby realizováno nasazením výfuku na výstup z filtru pevných částic o určitém průměru. Zatížení se tak nepřenáší do bodu a odtud do šroubových spojů, ale je rozloženo mezi zmiňované nasazení, kontaktní plochu přírub a šroubové spoje. Tímto zjednodušením také došlo k zpřísnění oproti skutečnému stavu, i toto zjednodušení tak šlo na bezpečnou stranu.

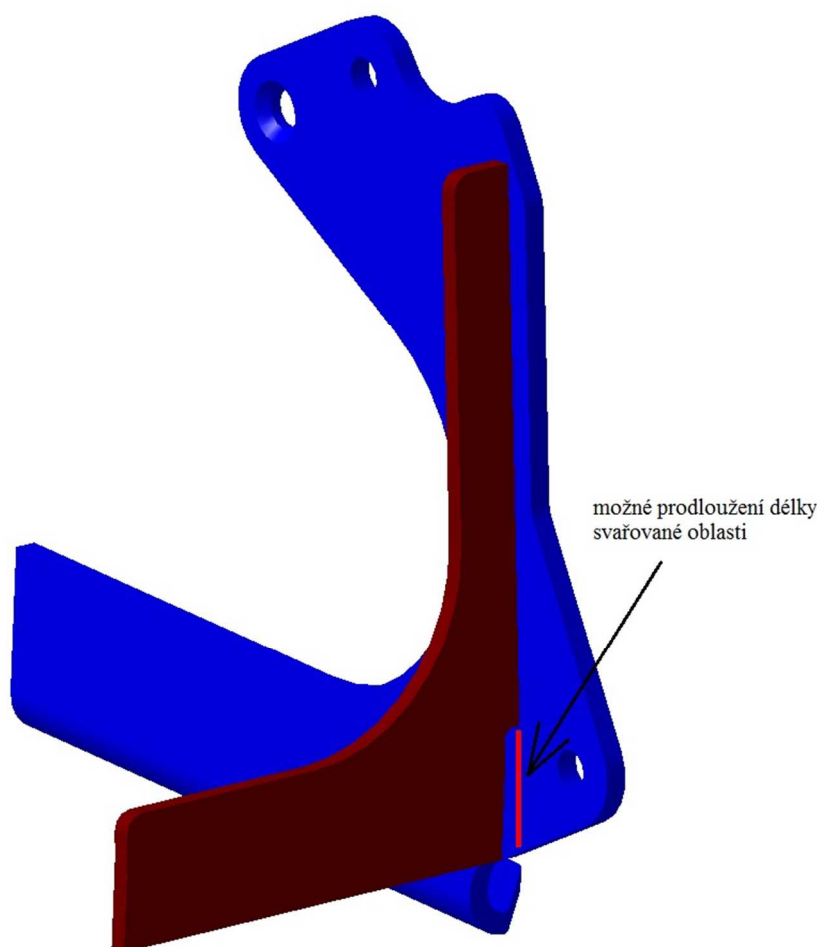
S přihlédnutím k velkému rozdílu mezi vypočítaným a potenciálně únosným maximálním vnitřním napětím a také výše popsány zjednodušeními a jejich dopady, hodnotí autor stávající konstrukci jako pevnostně dostačující.



8 NÁVRH NÁPRAVNÉHO OPATŘENÍ

Autor nemá s podobnými typy konstrukce žádné zkušenosti, ale je si vědom existence určitých specifik plynoucích z faktu, že tento držák filtrační jednotky je určen pro traktor. Z posouzení stávající koncepce nutnost změny nevyplývá. Navíc návrh zásadní změny v konstrukci bez znalosti všech potřebných souvislostí, mezi konstrukčního zadání a dalších informací by pravděpodobně nebyl velkým přínosem.

Z toho důvodu se autor omezuje na návrh změny geometrie výztuhy. Pokud by to bylo možné, podle autorova názoru by průběh napětí v kritickém místě příznivě ovlivnilo prodloužení kontaktu mezi přírubou výfuku a její výztuhou, viz *Obr. 44*.



Obr. 44: Možné nápravné opatření

Tímto opatřením by se zvětšila kontaktní plocha a napětí by bylo přenášeno do většího objemu materiálu. Výsledkem by bylo odstranění dosavadního kritického místa a pravděpodobné snížení hodnoty napětíového extrému.



ZÁVĚR

Závěrem je možné konstatovat, že bylo dosaženo stanovených cílů práce. Autor se snažil najít rozumný kompromis mezi striktně výpočtářským přístupem založeným na stoprocentní znalosti okrajových podmínek a přístupem, kdy výsledek takovéto pevnostně deformační analýzy rozumně napomáhá zdravému konstruktérskému oku.

Autorovým cílem bylo udržet v průběhu práce logickou linku, jakousi posloupnost úvah a z nich plynoucích kroků. S jejich využitím by po této zkušenosti postupoval i na dalších výpočtových projektech.

Součástí práce je popis samotné konstrukce, postup tvorby sítě, zamyšlení nad definováním okrajových podmínek. Následoval samostatný výpočet pomocí metody konečných prvků v programu Ansys a na něm založené zhodnocení stávající konstrukce. Výsledkem zhodnocení je konstatování, že stávající konstrukce držáku filtrační jednotky je z pevnostního hlediska v pořádku.

Pro dodatečné snížení napětového maxima v kritickém místě byla navržena změna geometrie výztuhy příruby výfuku, která je v principu velmi jednoduchá, ale dle autorova názoru by měl její dopad na rozložení napjatosti v daném místě skutečně pozitivní efekt.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Technologies. JOHNSON MATTHEY PUBLIC LIMITED COMPANY. *Johnson Matthey* [online]. 1.19.2012 [cit. 2012-01-19]. Dostupné z: <http://ect.jmcatalysts.com/emission-control-technologies-catalysts>
- [2] Selective Catalytic Rediction (SCR Catalyst). JOHNSON MATTHEY PUBLIC LIMITED COMPANY. *Johnson Matthey* [online]. 1.19.2012 [cit. 2012-01-19]. Dostupné z: <http://ect.jmcatalysts.com/emission-control-technologies-ammonia-selective-catalytic-reduction-SCR>
- [3] Obr. 1: SCR katalyzátor se vstřikem močoviny. Dostupný on-line z: <http://ect.jmcatalysts.com/emission-control-technologies-ammonia-selective-catalytic-reduction-SCR>
- [4] Obr. 2: Účinnost katalytické redukce s využitím čpavku v závislosti na teplotě a použitém materiálu katalyzátoru. Dostupný online z: <http://ect.jmcatalysts.com/emission-control-technologies-ammonia-selective-catalytic-reduction-SCR>
- [5] Obr. 3: Účinnost katalytické redukce s využitím uhlovodíků. Dostupný online z: <http://ect.jmcatalysts.com/emission-control-technologies-hydrocarbon-selective-catalytic-reduction-SCR>
- [6] Obr. 45: Proces adsorpce NO_x za podmínek spalování chudé směsi. Dostupný online z: <http://ect.jmcatalysts.com/emission-control-technologies-Nox-adsorber-catalysts>
- [7] Diesel Particulate Filter. JOHNSON MATTHEY PUBLIC LIMITED COMPANY. *Johnson Matthey* [online]. 1.19.2012 [cit. 2012-01-19]. Dostupné z: <http://ect.jmcatalysts.com/emission-control-technologies-diesel-particulate-filter-DPF>
- [8] SAJDL, Jan. DPF (Diesel Particulate Filter). *Autolexikon.net* [online]. nedatováno [cit. 2012-03-06]. Dostupné z: <http://cs.autolexikon.net/articles/dpf-diesel-particulate-filter/>
- [9] BLAIR, Graydon. Why 2007 & Newer ULSD Emission Vehicles Don't Like Biodiesel. In: *Biodiesel.infopop.cc* [online]. 16.12.2008 [cit. 2012-03-06]. Dostupné z: <http://biodiesel.infopop.cc/eve/forums/a/tpc/f/419605551/m/2721003282/p/2>
- [10] TWIGG, Martyn a Paul PHILLIPS. Cleaning the Air We Breathe – Controlling Diesel Particulate Emissions from Passenger Cars. *Platinum Metals Review* [online]. 2009, roč. 53, č. 1 [cit. 2012-03-20]. DOI: 10.1595/147106709x390977. Dostupné z: <http://www.platinummetalsreview.com/article/53/1/27-34/>
- [11] RAHN, Thomas. Huss takes a new angle on DPF design. In: *SAE Vehicle Engineering Online* [online]. 2009 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.sae.org/mags/sve/6770>
- [12] Regeneration. JOHNSON MATTHEY PUBLIC LIMITED COMPANY. *Johnson Matthey* [online]. 27.3.2012 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://ect.jmcatalysts.com/emission-control-technologies-regeneration-diesel-particulate-filter-DPF>



- [13] Fuel Borne Catalyst. INNOSPEC. *Innospecinc* [online]. 2011 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: http://www.innospecinc.com/assets/files/documents/dec_07/cm_1197648515_Fuel_Borne_Catalysts_EMEA.pdf
- [14] Standalone Exhaust-gas Aftertreatment. In: HJS Technology Portfolio [online]. 2010, 15.9.2010 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: http://www.hjs.com/download/26_03_5133_www_eng13_oe_technology.pdf
- [15] Directive 70/220/EEC. EUROPEAN COMMISSION. European Commission: Enterprise and Industry [online]. 2.2.2012 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/documents/directives/directive-70-220-eeec_en.htm



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

μ	[-]	Poissonovo číslo
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
F_R	[N]	silové zatížení od filtrační jednotky
F_{R1-4}	[N]	silová zatížení od výfuku
F_{RD}	[N]	korigované silové zatížení od filtrační jednotky
F_{Ri}	[N]	silová reakce
F_{RiD}	[N]	korigovaná silová reakce
G_{FJ}	[N]	tíha filtrační jednotky
G_V	[N]	tíha výfuku
k_d	[-]	dynamický koeficient
l_{1-4}	[m]	ramena jednotlivých momentů
l_T	[m]	kolmá vzdálenost těžiště
m_{FJ}	[kg]	hmotnost filtrační jednotky
m_V	[kg]	hmotnost výfuku
M_{vo}	[Nm]	moment od tíhy výfuku
R_e	[MPa]	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez pevnosti v tahu
t	[mm]	tloušťka
T_V	[-]	těžiště výfuku
ρ	[kg/m ⁻³]	hustota
$\sigma_{red\ max}$	[MPa]	maximální redukované napětí dle podmínky HMM