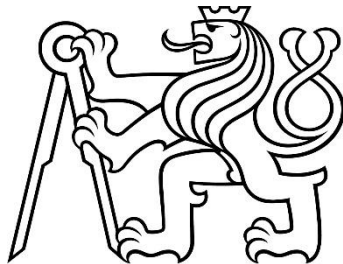


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ A KOLEJOVÝCH
VOZIDEL



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Sací potrubí pro experimentální zážehový jednoválec

Intake manifold for experimental spark ignition single cylinder engine

AUTOR: Vojtěch Winter

STUDIJNÍ PROGRAM: Strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: Konstruování podporované počítačem

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jiří Vávra, Ph.D.

PRAHA 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Winter** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **456784**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Strojirenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Sací potrubí pro experimentální zážehový jednoválec

Název bakalářské práce anglicky:

Intake manifold for experimental spark ignition single cylinder engine

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte sací potrubí pro experimentální zážehový jednoválec. Navrhněte připojení modulu škrticí klapky a navrhněte a optimalizujte polohu vstřikovačů kapalných a plyných paliv. Zhodnoťte možnosti 3D tisku. Připravte CAD model pro 3D tiskárnu. Připravte výrobní a výkresovou dokumentaci navrhovaných dílů.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Vávra, Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce:



Ing. Jiří Vávra, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valásek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

30.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Tato práce popisuje návrh sacího potrubí pro experimentální spalovací motor. Navrhované potrubí musí obsahovat připojení pro všechny prvky regulující množství vzduchu a množství vstřikovaných paliv do motoru. Potrubí je navrhováno s ohledem na bezpečnostní požadavky spojené s provozováním tohoto motoru. Práce pojednává také o možných variantách výroby jednotlivých součástí a výrobě aditivními technologiemi, zejména 3D tisku za použití plastových materiálů.

Klíčová slova

experimentální jednoválcový motor, sací potrubí, vstřikování paliva

Annotation

This thesis describes designing of intake manifold for experimental combustion engine. The intake manifold must contain connection for all the elements regulating amount of air and amount of injected fuels to the engine. The manifold is designed to meet safety requirements for operating the engine. The thesis also deals with various variants of production of individual components and technologies, especially 3D printing using plastic materials.

Keywords

experimental single-cylinder engine, intake manifold, fuel injection

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval hlavně panu Ing. Jiřímu Vávrovi, PhD., který mne při tvorbě této práce vedl a poskytnul své odborné rady vždy, když bylo potřeba. Také bych chtěl poděkovat panu Ing. Davidu Světlíkovi, který byl ochoten mi pomoci při pronikání do základů 3D tisku. Mé veliké díky patří též paní Ing. Zdeňce Jeníkové, PhD., za její ochotu a vstřícnost při provádění zkoušek materiálů. A děkuji také panu Ing. Jiřímu Kuželkovi PhD. a panu Ing. Jindřichu Hořenínovi, za pomoc s pevnostní analýzou.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Konstrukční návrh	10
2.1	Zátěžové režimy	12
3	Aditivní technologie – 3D tisk.....	12
3.1	Technologie FFF/FDM.....	13
3.2	Technologie SLA	13
3.3	Technologie SLS.....	14
3.4	Volba technologie a materiálu	14
4	Ověření pevnosti materiálu PA12.....	15
4.1	Tahová zkouška filamentu.....	16
4.1.1	Výsledky měření	17
4.1.2	Vyhodnocení výsledků.....	17
4.2	Tahová zkouška zkušebních vzorků	18
4.2.1	Struktura vzorků	20
4.2.2	Výsledky měření	22
4.2.3	Vyhodnocení výsledků.....	23
5	Návrh příruby škrticí klapky.....	24
5.1	Simulace MKP.....	26
6	Postup výroby pomocí 3D tisku.....	27
7	Návrh uklidňovací nádoby.....	29
7.1	První návrh	30
7.1.1	Simulace MKP.....	31
7.2	Druhý návrh.....	33
7.2.1	Simulace MKP.....	34
7.2.2	Vyhodnocení výsledků.....	35
7.3	Návrh pojišťovacího prvku.....	36

8	Návrh hlavní příruby.....	37
8.1	Příruba s hrdlem	37
8.2	Poloha vstřikovačů	39
8.3	Návrh benzinové palivové lišty.....	41
8.4	Uchycení benzinové palivové lišty	43
9	Celková sestava potrubí	45
10	Návrh dalšího postupu	46
11	Závěr	47
12	Seznam použité literatury	48
13	Seznam obrázků	50
14	Přílohy	51

1 Úvod

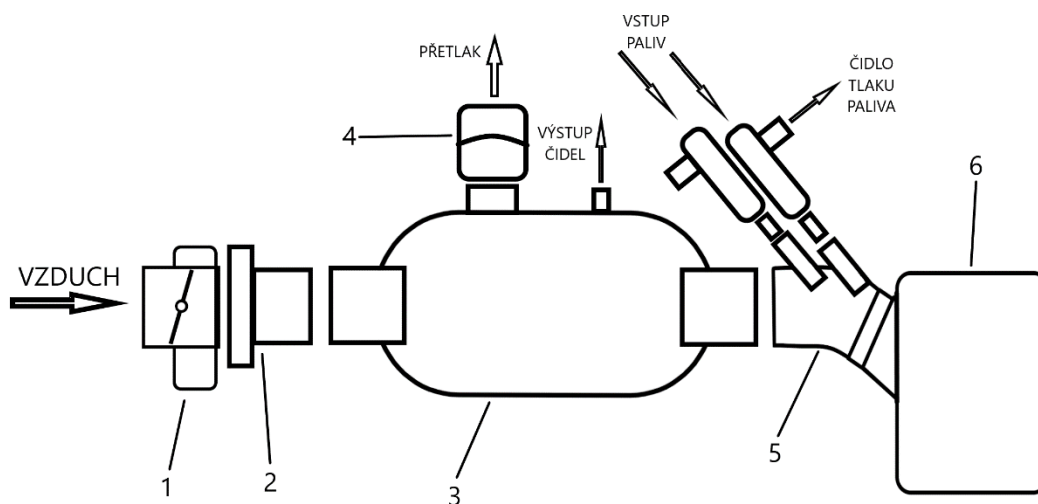
Tématem této práce je návrh kompletního sacího potrubí pro experimentální zážehový jednoválcový motor. Tento motor bude provozován v laboratoři ČVUT ve Vědeckotechnickém parku v Roztokách u Prahy a bude sloužit pro vývoj alternativních spalovacích cyklů za použití kapalných, plyných a směsných paliv. Motor vznikl ve spolupráci ČVUT v Praze a průmyslového partnera. Motor je výsledkem mnoha diplomových a bakalářských prací. [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]

Navrhované potrubí musí obsahovat připojení pro všechny prvky, které regulují a monitorují vstupní média motoru – vzduch a palivo, to znamená připojení pro škrticí klapku, palivové vstřikovací ventily a vstupy pro čidla vybraných veličin. Zároveň musí potrubí splňovat předem určené bezpečnostní požadavky, aby v případě neřízeného hoření v sacím potrubí nedošlo k destrukci potrubí, či ohrožení obsluhy stanoviště.

Při návrhu potrubí budou zvaženy možné varianty výroby jednotlivých součástí a vybrané metody budou teoreticky popsány. Bude provedena statická pevnostní analýza součástí metodou konečných prvků a vyhodnocena jejich bezpečnost. Pro získání kvalitativních hodnot mechanických vlastností součástí vyrobených pomocí 3D tisku, bude provedena tahová zkouška na vytištěných vzorcích. Pro vybrané součásti bude zhotovena výkresová dokumentace a pomocí aditivní technologie budou vyrobeny modely některých součástí.

2 Konstrukční návrh

Experimentální motor bude provozován ve stacionárním stavu, to znamená, že blok motoru bude přes pružné prvky pevně spojen s podlahou laboratoře. Pro sací potrubí bude tedy okolo motoru dostatek místa na to, aby celé potrubí bylo ve vodorovné poloze a všechny jeho prvky na sebe plynule navazovaly. Jako první část potrubí je elektronická škrticí klapka, do které je hadicí přiváděn filtrovaný vzduch ze vzdušníku, který se nachází pod samotnou laboratoří. Na výstup z této klapky je šroubovými spoji připojena příruba, která vyústuje kruhovým hrdlem. Tato příruba je vůči kovovému tělu škrticí klapky utěsněna gumovým kruhovým těsněním. Na kruhové hrdlo je pomocí silikonové hadicové spojky připojena uklidňovací nádoba, která kromě vstupů pro čidla různých veličin obsahuje také připojení pro bezpečnostní přetlakový prvek. Výstupem z této nádoby je opět kruhové hrdlo, které je pomocí silikonové hadicové spojky propojeno s hrdlem hlavní příruby. Hlavní příruba propojuje sací potrubí se sacím kanálem hlavy motoru a také poskytuje vstupy a uchycení pro dva palivové vstřikovací ventily. Příruba je opět vůči dosedací ploše na hlavě motoru těsněna gumovým těsnicím kroužkem. Schéma sacího potrubí je znázorněno na Obr. 1.



Obr. 1: Schéma sacího potrubí

- 1. Škrticí klapka
- 2. Příruba škrticí klapky
- 3. Uklidňovací nádoba
- 4. Pojistná průtržná membrána
- 5. Hlavní příruba se vstřikovači
- 6. Hlava motoru

Před samotným navrhováním součástí bylo nutné rozmyslet, jaké technologie výroby by bylo vhodné použít pro výrobu jednotlivých součástí. Pokud bychom začali u první navrhované součásti, a to příruba mezi škrticí klapkou a uklidňovací nádobou, nabízejí se dvě velmi efektivní možnosti – svařování, nebo 3D tisk. Vzhledem k jednoduchosti přípravy a cenové dostupnosti, byla zvolena výroba pomocí 3D tisku.

Pro výrobu uklidňovací nádoby se jeví jako nejlepší řešení svaření z nerezové oceli. Jedná se o relativně jednoduchou nádobu, která nebude na výrobu svařováním příliš složitá. Výroba nádoby 3D tiskem byla také zvažena, nicméně se jedná o poměrně velkou nádobu a na 3D tiskárně by byla výroba příliš náročná. Navíc bude tato nádoba muset splňovat určité požadavky na mechanické vlastnosti, kterých by se dostupnými materiály pro 3D tisk dosahovalo velmi obtížně.

Výroba příruby hlavy motoru se vstupy pro vstřikovače by mohla být vyrobena svařováním, jedná se však o geometricky složitý útvar a zajistit přesnou polohu vstřikovače by bylo při použití této metody velmi obtížné. Proto byla pro výrobu hlavní příruby zvolena metoda 3D tisku. Přestože bude tato součást v přímém kontaktu s hlavou motoru, kde bude vystavena vysokým teplotám a chemickému působení paliv, při zvolení správného materiálu pro tisk by to neměl být problém.

2.1 Zátěžové režimy

Běžné provozní režimy motoru by nijak neměli ohrozit bezpečnost konstrukce sacího potrubí. V sacím potrubí však bude při provozu motoru vznikat homogenní směs vzduchu a vstřikovaného paliva, případně více paliv najednou. Tato vzniklá směs bude vysoce hořlavá a hrozí nebezpečí zpětného zažehnutí směsi ze spalovacího prostoru do sacího potrubí. Hoření směsi v potrubí může způsobit rychlý nárůst tlaku nad běžnou pracovní úroveň. Při chodu motoru však může nastat také situace, kdy bude škrticí klapka plně zavřena a vlivem nasávání motoru tak vznikne v sacím potrubí značný podtlak. Všechny komponenty tudíž musí být schopny odolat předepsanému podtlaku i přetlaku. Běžný pracovní rozsah tlaku v potrubí je 0,2 *bar* absolutně až 4 *bar* absolutně. Maximální přetlak, který může nastat v potrubí byl stanoven na 10 *bar*.

3 Aditivní technologie – 3D tisk

Jak již název napovídá, aditivní technologie je obecný název pro technologie výroby pomocí přidávání materiálu. Například na rozdíl od obrábění, kde je výrobek tvořen odebráním materiálu z většího celku, u aditivních technologií je materiál přidáván vrstvu po vrstvě (3D tisk), nebo pomocí vstřikování materiálu do forem. To nabízí mnoho výhod, ale i nevýhod. Využitím 3D tisku je možné vytvářet objekty složitých tvarů, které by například obráběním bylo velmi složité, někdy i nemožné vyrobit. Zároveň je příprava pro 3D tisk relativně jednoduchá. Nevýhodou 3D tisku jsou však v dnešní době dostupnost lepších materiálů, přesnost výroby a časová náročnost tisku. Přestože je možné používat pro 3D tisk i kovové či kompozitní materiály, výběr z materiálů není příliš rozsáhlý a navíc je tento proces velmi nákladný.

3D tisk je velmi využívaný pro tvorbu prototypových či zkušebních výrobků, nebo součástí malosériové výroby. Zařízení pro 3D tisk – 3D tiskárny, jsou čím dál více rozšířené i v malých firmách, dokonce i v domácnostech. Následující odstavce popisují pouze nejčastější technologie 3D tisku, na trhu jich však můžeme najít mnohem více. [8]

3.1 Technologie FFF/FDM

Technologie FFF (Fused Filament Fabrication) je mezi širokou veřejností nejrozšířenější technologií 3D tisku. Je to také jedna z nejdostupnějších technologií a je využívána například pro výrobu funkčních součástí a prototypů. Tato technologie spočívá v nanášení jednotlivých vrstev roztaveného plastového či kompozitního materiálu. Tento materiál je dodáván ve formě navinutých vláken (filamentu) o průměru nejčastěji 1,75 mm. Filament je ze svitku podáván do extruderu kde prochází tiskovou hlavou a je roztaven. Tryskou na konci tiskové hlavy je pak nanášen na předchozí vrstvu. Tiskne se na vyhřívanou podložku v otevřeném nebo uzavřeném prostoru. Tloušťky jednotlivých vrstev se nejčastěji pohybují v rozmezí 0,05 – 0,4 mm, v závislosti na použité tiskárně a použitém průměru trysky.

Výhodou FFF je široká nabídka použitelných materiálů. Mezi nejběžnější patří termoplasty typu PLA, nebo ABS. Odolnější mohou být pak PA, PETG, nebo TPU. A mezi ty nejodolnější patří například materiál PEEK, nebo PEI. [8] [9]

3.2 Technologie SLA

SLA, neboli stereolitografie je jedna z nejstarších metod 3D tisku. Principem této technologie je vytvrzování fotocitlivé pryskyřice pomocí světelných paprsků. Existuje několik možností, jak tohoto procesu docílit, ale základní princip je stejný. Tekutá pryskyřice se nachází v nádobě, která je vůči tiskové ploše posouvána po svislé ose. Jednotlivé vrstvy jsou pak vytvrzovány buď jedním laserovým paprskem, nebo je vytvrzována celá vrstva najednou pomocí digitálního projektoru či LCD displeje. Mezi výhody této metody patří vysoká přesnost, jakost povrchu a rychlost tisku.

Jednou z nevýhod této technologie může být relativně malá tisková plocha, nebo toxicita pryskyřice. Nabídka materiálu také není příliš široká a model navíc není připraven pro použití ihned po vytištění. Nejdříve je potřeba se zbavit nevytvrzené pryskyřice na povrchu výtisku a výsledný povrch ideálně vytvrdit UV světlem. [8] [9]

3.3 Technologie SLS

Zkratka SLS představuje pojem Selective Laser Sintering, neboli selektivní laserové spékání, často také „sintrování“. Princip metody spočívá ve spékání materiálu dodaného v práškové formě. Materiál je nanášen na tiskovou plochu v tenkých vrstvách pomocí válečkového podavače. Výkonný laserový paprsek pak speče vybranou plochu s předchozí vrstvou. Po spečení se tisková plocha posune o výšku jedné vrstvy níže a válečkový podavač nanese další vrstvu prášku. Tento proces se opakuje, dokud není vytištěn celý výrobek.

Metoda SLS nepotřebuje vytvářet při tisku žádné dočasné podpory, protože podporu výrobku poskytuje přebytečný práškový materiál. Výrobky vyrobené metodou SLS mají dobré mechanické vlastnosti. Jakost povrchu a přesnost však nejsou jejími přednostmi. Mezi největší výhody této metody patří široká nabídka pracovních materiálů a možnost pracování s kovovými materiály. V případě tisku z kovových materiálů se mluví o metodě SLM, neboli Selective Laser Melting. [8] [9]

3.4 Volba technologie a materiálu

Tato kapitola popisuje volbu technologie a materiálu pro výrobu součástí pomocí 3D tisku. Jako první bylo potřeba si uvědomit, že hlavní příruba bude v přímém kontaktu s hlavou motoru, tudíž bude vystavena zvýšeným teplotám. Navíc bude příruba vystavena chemickému působení paliv uvnitř sacího potrubí. Jako vhodné řešení pro toto použití se jeví materiál PA (polyamid), neboli nylon. Je to materiál velmi houževnatý a chemicky odolný. Materiál na této bázi používají i automobilové společnosti na výrobu obdobných prototypových součástí sacích potrubí. Tento materiál se dá použít pro výrobu například pomocí SLS, nebo FFF. Vzhledem k nákladnosti použití technologie SLS, byla nejdříve zvolena technologie FFF, která je výrazně dostupnější.

Pro tisk vybraných součástí byla použita tiskárna Original Prusa i3 MK2.5. Tiskový materiál byl zvolen PA12 s obchodním označením PAJet 160 NATUR od společnosti Filament PM. Více o tomto materiálu je obsaženo v následující kapitole.

4 Ověření pevnosti materiálu PA12

Existuje mnoho zdrojů popisujících mechanické vlastnosti materiálu PA12, který bude použit pro výrobu některých součástí sacího potrubí. Tyto informace jsou však pouze orientační a žádný z těchto zdrojů nepopisuje mechanické vlastnosti výrobků vytištěných na námi používané tiskárně, za našich podmínek tisku. A nejedná se pouze o mechanické vlastnosti materiálu, ale také o to, jaký vliv právě na mechanické vlastnosti mají různé parametry tisku. Proto bylo v rámci této práce provedeno několik tahových zkoušek, které pomohli stanovit základní mechanické chování tištěného materiálu PA12 při namáhání tahem a také zjistit, jaký vliv má struktura tištěného materiálu na vlastnosti zkušební vzorku. Pro výrobu zkušebních vzorků byla použita 3D tiskárna Original Prusa i3 MK2.5 a filament PA12 PAJet 160 NATUR od společnosti Filamenty PM, jehož materiálové vlastnosti jsou uvedeny na Obr. 2. Pro tahovou zkoušku byl použit zkušební stroj W+B ZD 10/90, viz Obr. 3.

Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	170 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	165 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	11 kJ/m ²
	flexural modulus	ISO 178	1180 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,01 g/cm ³
	Melt Flow Index	ISO 1133	8 g/10 min

Obr. 2 Materiálové vlastnosti PAJet 160 NATUR udávané výrobcem [10]



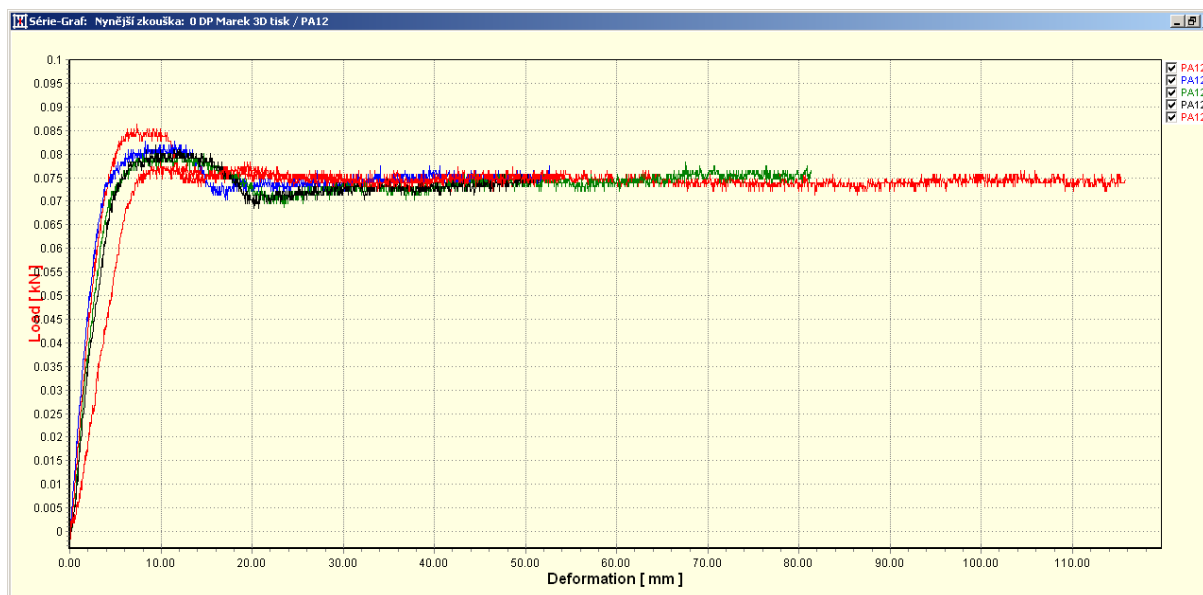
Obr. 3 Trhací stroj W+B ZD 10/90 (autor fotky: Vojtěch Winter)

4.1 Tahová zkouška filamentu

Nejdříve proběhla zkouška pevnosti v tahu pouze na filamentu. To znamená na samotné struně materiálu, který ještě nebyl roztaven a slepen ve 3D tiskárně. Vzorky této struny byly přímo odebrány z téhož svitku, ze kterého proběhl následný tisk zkušebních vzorků. Průměr tiskové struny garantovaný výrobcem je $1,75 \pm 0,05 \text{ mm}$, délka zkušebních strun $150 \pm 2 \text{ mm}$. Pro tuto zkoušku bylo provedeno 5 měření. Počáteční vzdálenost čelistí byla přibližně 96 mm , rychlost posuvu čelistí byla $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a teplota v místnosti během zkoušky $22 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.1.1 Výsledky měření

Průběh každé zkoušky byl zvlášť zachycen do grafického záznamu. Na Obr. 4 jsou vidět průběhy všech zkoušek v jednom grafu. Graf popisuje závislost deformace a zatěžující síly. Z grafu je patrné, že při žádném měření nedošlo k přetržení zkušební struny, měření bylo přerušeno dříve, protože prodloužení vzorků překročilo více než 50 % počáteční délky l_0 .



Obr. 4 Výsledky tahové zkoušky strun PA12

4.1.2 Vyhodnocení výsledků

Ze samostatných grafů byly odečteny hodnoty maximálních zatížení F_{max} , ze kterých byla následně vypočtena hodnota maximálního napětí σ_{max} dle rovnice níže. Hodnota plochy průřezu S_0 byla vypočtena z udaného průměru struny dle rovnice níže. Výsledná napětí jednotlivých strun jsou uvedena v Tab. 1.

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S_0} [MPa]$$

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} [mm^2]$$

$$S_0 = \frac{\pi \cdot 1,75^2}{4} mm^2 \cong 2,405 mm^2$$

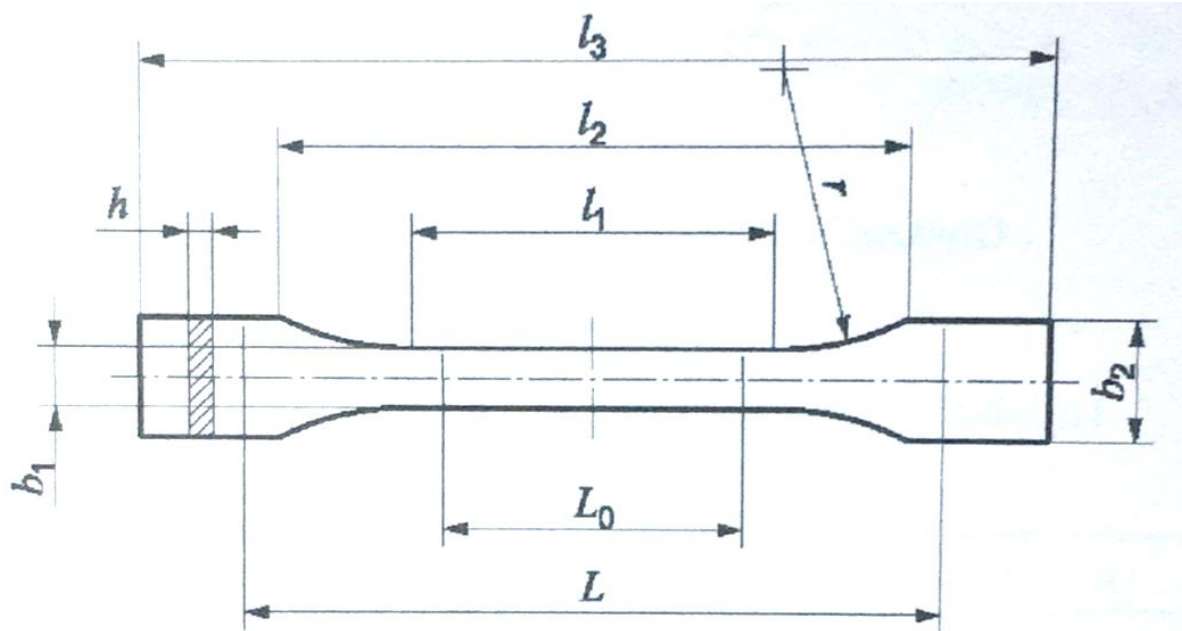
Tab. 1 Výsledky tahové zkoušky strun PA12

Struna č.	1	2	3	4	5
F_{max} [N]	85	82	80	78	80
σ_{max} [MPa]	35,34	34,10	33,26	32,43	33,26

Z vypočítaných hodnot maximálního napětí pak byla spočítána průměrná hodnota maximálního napětí $\sigma_{max_p} = 33,68 \text{ MPa}$, což je tedy napětí na mezi kluzu materiálu PA12 PAJet 160 NATUR od společnosti Filamenty PM, před zpracováním ve 3D tiskárně.

4.2 Tahová zkouška zkušebních vzorků

Jako další byla provedena tahová zkouška na vytištěných vzorcích. Pro zjištění vlivu struktury na výslednou pevnost v tahu, byly vytištěny tři varianty vnitřních struktur. Z důvodu časové náročnosti tisku vzorků, byly od každé struktury vytištěny pouze 3 vzorky, které však budou v tomto případě pro vyhodnocení dostačující. Všechny struktury byly vytvořeny plnou výplní, s výškou vrstvy $0,15 \text{ mm}$ a s počtem perimetrů 2. Počet perimetrů udává počet obrysových vrstev. Zkušební vzorky byly vymodelovány dle ČSN EN ISO 527-2 typ 1BA [11], viz Obr. 5. Konkrétní rozměry použité pro výrobu vzorku jsou uvedeny v Tab. 2. Počáteční vzdálenost čelistí byla přibližně 65 mm , rychlost posuvu čelistí byla $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a teplota v místnosti během zkoušky $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 5 Okótované rozměry zkušebního vzorku [11]

Tab. 2 Rozměry zkušebních vzorků

Kóta	Popis	Rozměr [mm]
l_3	Celková délka	100
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	30
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi	58
r	Poloměr	40
b_1	Šířka zúžené části	5
b_2	Šířka konců	10
h	Tloušťka	4

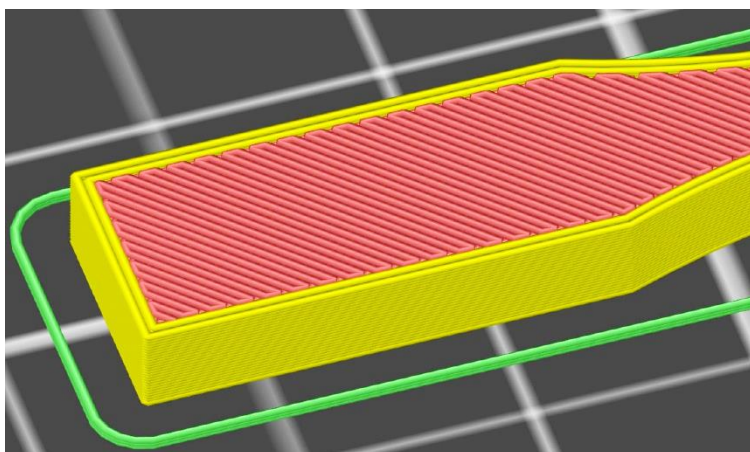
Po vytištění vzorků proběhla kontrola průřezových rozměrů všech vzorků, pokaždé na třech místech zúžené části s rovnoběžnými hranami a z naměřených dat byla stanovena průměrná hodnota plochy průřezu S_0 . Výsledky měření jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Naměřené rozměry zkušebních vzorků

Vzorek č.	1	2	3	I	II	III	A	B	C
b_1 [mm]	5,08	5,12	5,06	5,08	5,02	5,06	5,00	5,00	5,00
b_2 [mm]	5,02	5,08	5,00	5,06	5,02	5,02	5,00	5,00	4,98
b_3 [mm]	5,04	5,10	5,08	5,08	5,04	5,06	5,00	5,00	4,96
b_{prum} [mm]	5,05	5,10	5,05	5,07	5,03	5,05	5,00	5,00	4,98
h_1 [mm]	4,00	3,96	3,94	3,94	3,98	3,92	3,92	3,92	3,94
h_2 [mm]	3,98	3,98	3,98	3,94	3,94	3,94	3,92	3,90	3,94
h_3 [mm]	3,96	4,00	3,96	3,96	3,94	3,92	3,92	3,90	3,94
h_{prum} [mm]	3,98	3,98	3,96	3,95	3,95	3,93	3,92	3,90	3,94
S_0 [mm ²]	20,1	20,3	20,0	20,0	19,9	19,8	19,6	19,5	19,6

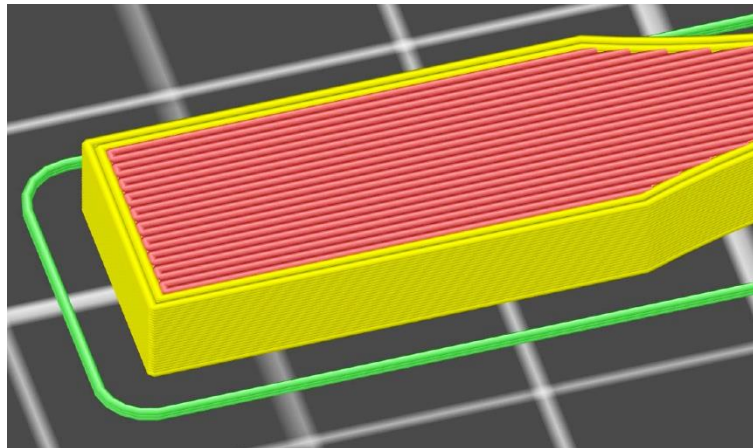
4.2.1 Struktura vzorků

První struktura byla vytištěna se smyslem vláken natočeným o 45° vůči hlavní ose vzorku a jednotlivé vrstvy byly natočeny vůči sobě o 90°, viz Obr. 6. Tyto vzorky byly označeny číslicemi 1 – 3.



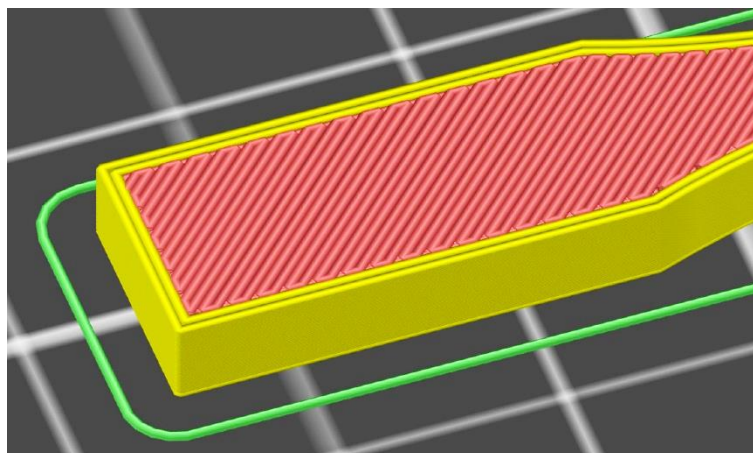
Obr. 6 Vnitřní struktura 45°/90°

Druhá struktura byla vytištěna se smyslem vláken natočeným o 90° vůči hlavní ose vzorku a jednotlivé vrstvy byly natočeny vůči sobě o 90° , viz Obr. 7. Tyto vzorky byly označeny římskými číslicemi *I – III*.



Obr. 7 Vnitřní struktura $90^\circ/90^\circ$

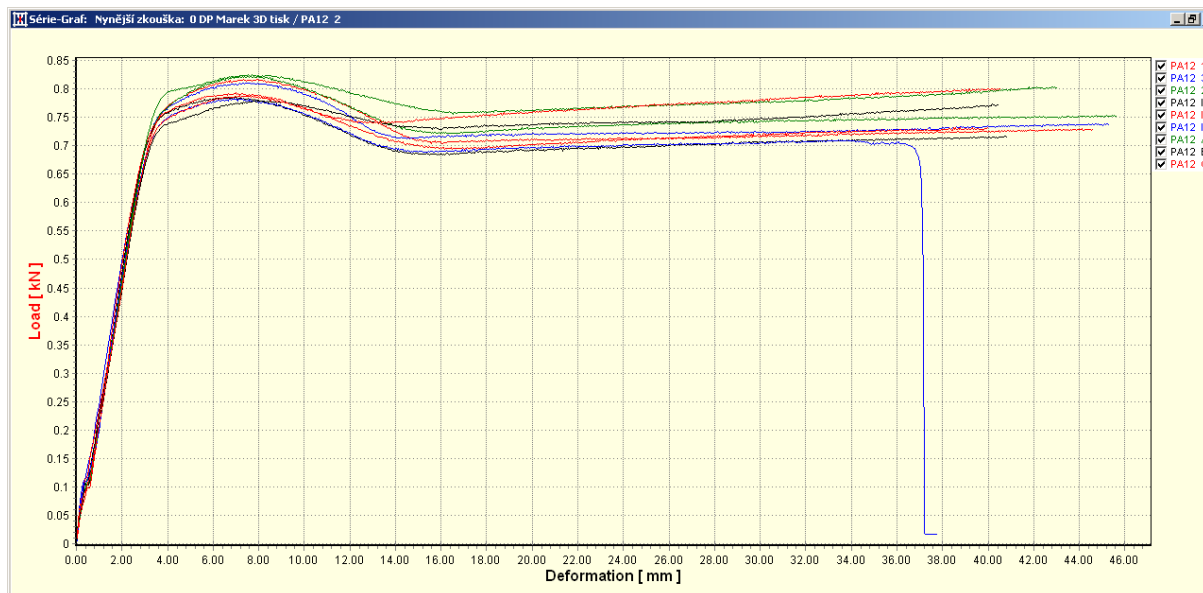
Třetí struktura byla vytištěna opět se smyslem vláken natočeným o 90° vůči hlavní ose vzorku a jednotlivé vrstvy byly natočeny vůči sobě o 90° . Pro tento vzorek ale byla využita funkce „vyhlazení vrstev“, což zmenšilo výšku vrstev na minimum a tím došlo k celkovému vyhlazení výtisku, viz Obr. 8. Tato struktura byla testována proto, že je předpokládáno její využití při výrobě některých součástí sacího potrubí. Zejména v místech, kde je požadována co nejlepší jakost povrchu. Tyto vzorky byly označeny písmeny *A – C*.



Obr. 8 Třetí struktura s $45^\circ/90^\circ$ a s vyhlazením vrstev

4.2.2 Výsledky měření

Výsledkem každého měření byl samostatný grafický záznam. Na Obr. 9 jsou vidět průběhy všech zkoušek v jednom grafu. Graf popisuje závislost deformace a zatěžující síly. Z grafu je patrné, že u jednoho vzorku došlo k předčasnému přetržení, to bylo nejspíše způsobeno vadou materiálu a jeho nehomogenitou, vzniklou při tisku. U žádného z ostatních vzorků nedošlo při měření k přetržení, měření bylo přerušeno dříve, protože prodloužení vzorků překročilo více než 50 % počáteční délky l_0 .



Obr. 9 Výsledky tahové zkoušky vzorků PA12

4.2.3 Vyhodnocení výsledků

Z jednotlivých grafů byly odečteny hodnoty maximálních zatížení F_{max} , ze kterých byla následně vypočtena hodnota maximálního napětí σ_{max} dle rovnice níže. Výsledky maximálních napětí σ_{max} jsou uvedeny v Tab. 4. Hodnota σ_{prum} pak v tabulce udává průměrné maximální napětí pro každou strukturu.

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S_0} [MPa]$$

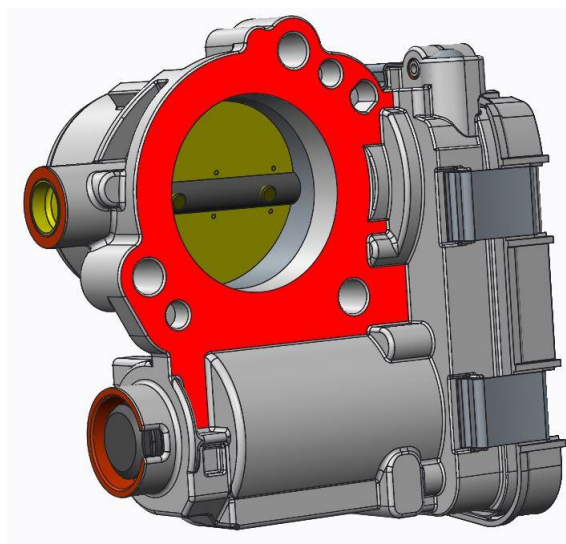
Tab. 4 Výsledky tahové zkoušky vytištěných vzorků materiálu PA12

Vzorek č.	1	2	3	I	II	III	A	B	C
F_{max} [N]	820	810	825	780	790	780	825	775	790
S_0 [mm ²]	20,1	20,3	20,0	20,0	19,9	19,8	19,6	19,5	19,6
σ_{max} [MPa]	40,8	39,9	41,3	39	39,7	39,4	42,1	39,7	40,3
σ_{prum} [MPa]	40,67			39,37			40,70		

Z výsledků v Tab. 4 je zřejmé, že struktura s vlákny pootočenými vůči hlavní ose o 45° (vzorky 1 – 3 a A – B) vykazuje lehce větší pevnost v tahu, než struktura s vlákny pootočenými o 90° respektive 0° vůči hlavní ose (vzorky I – III). Z výsledků je také patrné, že vyhlazení vrstev nemá na pevnost v tahu zásadní vliv. Výsledky těchto zkoušek budou použity pro následné vyhodnocení MKP analýzy součástí, které budou vytištěny z tohoto materiálu. Při výrobě bude brán v úvahu také vliv orientace struktury na výslednou pevnost.

5 Návrh příruby škrticí klapky

Na vstupu do sacího potrubí se nachází elektronická škrticí klapka. Tato klapka funguje obdobně jako proporcionální ventil a má za úkol regulovat průtočný průřez potrubí. Pro naše sací potrubí bude použita škrticí klapka MAGNETI MARELLI 04C133062D. Model kompletní škrticí klapky byl dodán ve formátu *STEP*, takže bylo možné na model rovnou navázat vlastní tvorbou příruby. Příruba bude opět vyrobena pomocí technologie 3D disku a k tělesu škrticí klapky bude připevněna pomocí tří šroubů s maticemi a podložkami. Model tělesa škrticí klapky je vidět na Obr. 10, kde je zároveň červenou barvou zvýrazněna dosedací plocha navrhované příruby a jsou zřetelné díry pro šrouby.

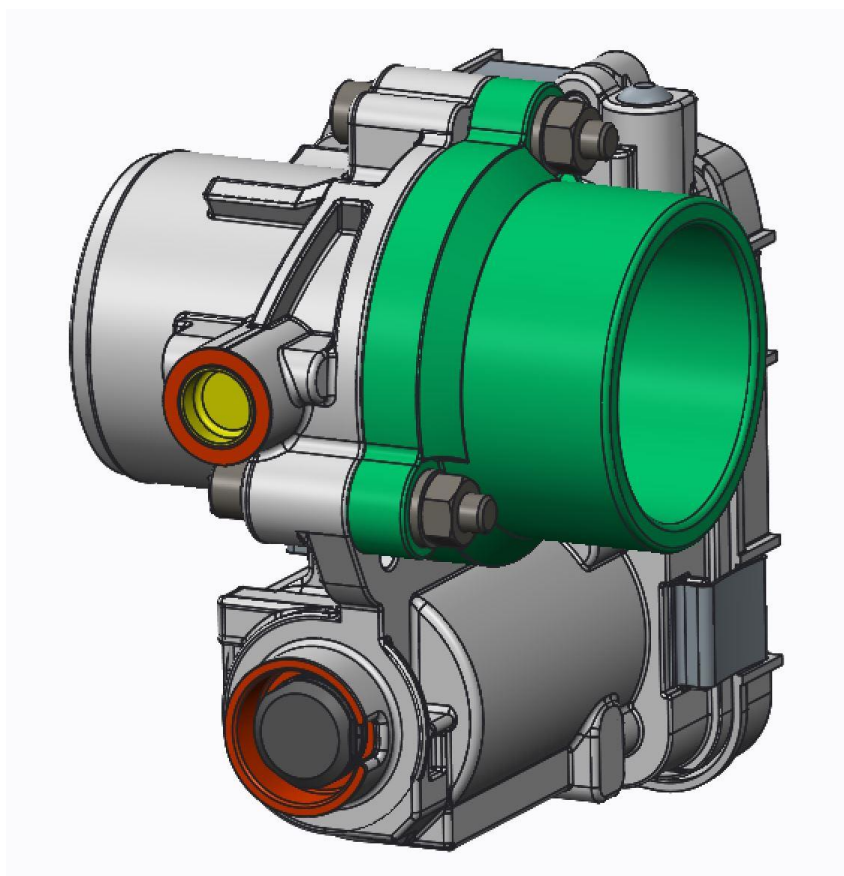


Obr. 10 Těleso škrticí klapky

Pro těsnění mezi přírubou a tělesem škrticí klapky je použit kruhový gumový kroužek obdélníkového průřezu. Pro tento kroužek je v přírubě vytvořena kruhová drážka. Model příruby je vidět na Obr. 11 a model sestavy spojení škrticí klapky s přírubou je na Obr. 12. Pro šroubové spoje bylo použito tří šroubů *M6* s vnitřním šestihranem a maticemi s podložkami.



Obr. 11 Model příruby pro připojení škrťací klapky

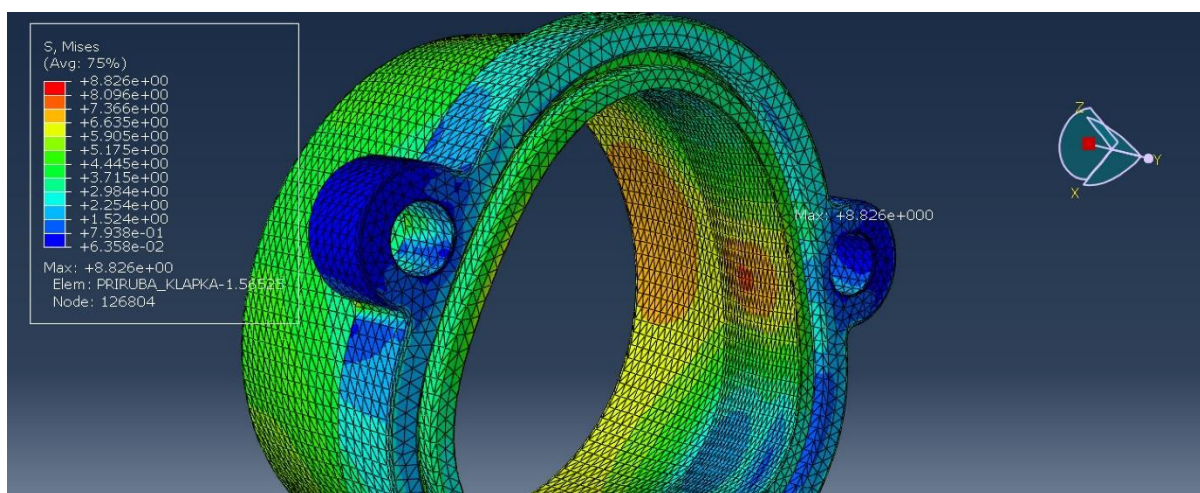


Obr. 12 Sestava spojení škrťací klapky a příruby

5.1 Simulace MKP

Pro simulaci zátěžových stavů, které jsou uvedeny v kapitole 2.1 byla zvolena metoda konečných prvků s využitím programu Abaqus CAE. Z důvodu použití akademické licence byl maximální počet elementů pro výpočet omezen na 250000. Simulace byla provedena pro orientační zjištění velikosti a oblastí vzniklých napětí vlivem vnitřního tlakového zatížení. Pro výpočet byly do programu zadány tyto vlastnosti materiálu:

- Modul pružnosti $E = 1180 \text{ MPa}$ [10]
- Poissonovo číslo $\mu = 0,4$



Obr. 13 Výsledky simulace přetlaku v přírubě

Při provedení simulace na tlak $0,2 \text{ bar}$ absolutně byly výsledky vyhovující. Na Obr. 13 je vidět simulace zatížení příruby vnitřním přetlakem 10 bar . Z výsledků simulace je patrné, že největší redukované napětí vzniklé po zatížení přetlakem 10 bar je přibližně $\sigma_{red_{max}} \cong 8,83 \text{ MPa}$ von Mises. Tahovou zkouško byla zjištěna hodnota pevnosti materiálu v tahu $\sigma_e \cong 40 \text{ MPa}$. Porovnání těchto hodnot popisují následující rovnice.

$$\sigma_{red_{max}} \cong 8,83 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{red_{max}} < \sigma_e \rightarrow \text{příruba vyhovuje}$$

Statická bezpečnost k byla spočítána vzorcem:

$$k = \frac{\sigma_e}{\sigma_{red_{max}}} \cong \frac{40}{8,83} \cong 4,53$$

6 Postup výroby pomocí 3D tisku

Pro výrobu několika součástí sacího potrubí byla zvolena výroba pomocí 3D tisku. Tato kapitola proto zjednodušeně popisuje postup výroby jedné z těchto součástí pomocí technologie FFF, neboli metody nanášení roztaveného plastového materiálu po jednotlivých vrstvách. Pro výrobu této součásti bude plně dostačující tiskárna Original Prusa i3 MK2.5. K tisku bude použit filament materiálu PA12 PAJet 160 NATUR od společnosti Filamenty PM.

Prvním krokem je vytvoření CAD modelu součásti například v programu CREO Parametric 2.0, viz Obr. 14. Tento model je následně nutné uložit ve formátu *STL*, čímž se rozdělí všechny plochy modelu na trojúhelníkové segmenty. S tímto formátem je pak schopný pracovat software pro úpravu modelu pro 3D tisk.



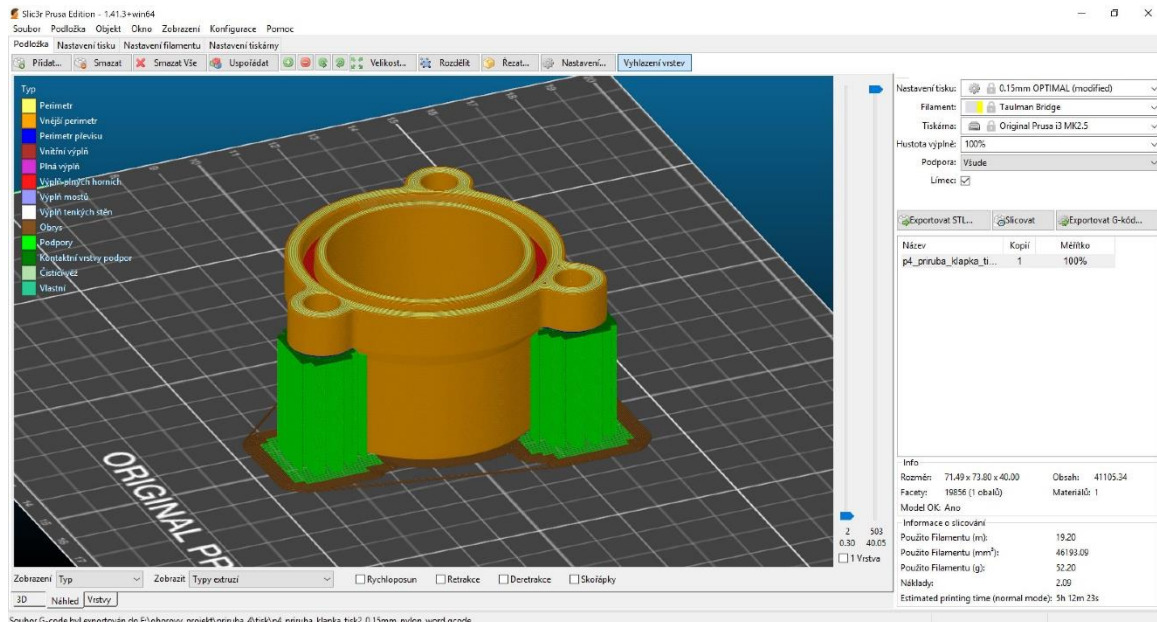
Obr. 14 Model součásti pro 3D tisk

Po vytvoření *STL* modelu se musí použít software, který vygeneruje kód pro 3D tiskárnu. V případě použití tiskárny Original Prusa, je možné použít software Slic3r od společnosti Prusa Research s.r.o., jehož rozhraní je vidět na Obr. 15. Po otevření Slic3ru se do programu vloží *STL* model, který je umístěn na tiskovou podložku. Slic3r nabízí širokou škálu filamentů, pro které má přednastavené parametry tisku. Tyto parametry však lze upravovat dle vlastní potřeby tisku. Základní parametry tisku jsou uvedeny v Tab. 5. [12]

Tab. 5 Parametry tisku

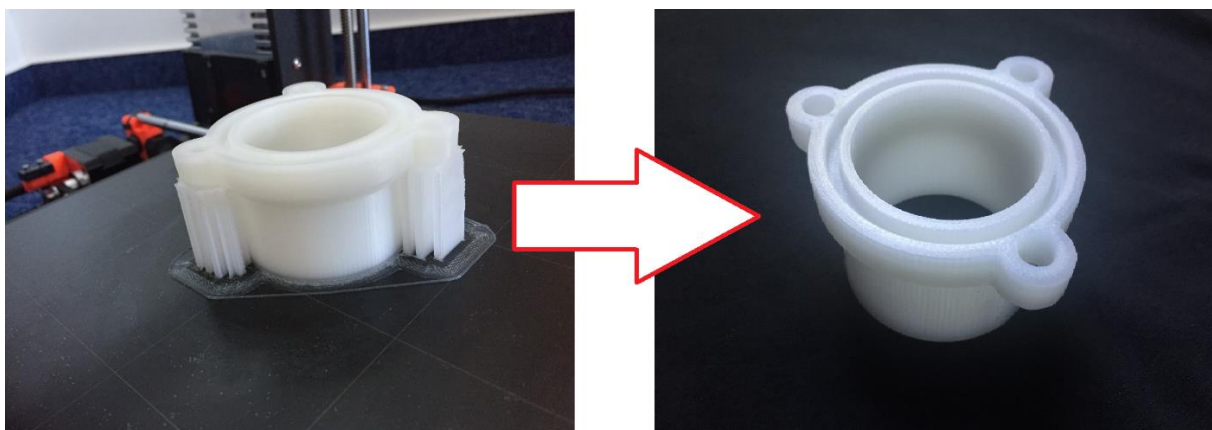
Parametr	Hodnota
Předvolba materiálu	Taulman Bridge
Výška vrstvy	1,5 mm
Počet perimetrů	6
Výplň	100 %
Teplota trysky	245 °C
Teplota podložky	90 °C

Pro tisk byly využity také funkce vytvoření podpor (na Obr. 15 zelenou barvou), které je nutné vytvořit pod strmými a vodorovnými plochami nad podložkou. Dále byla použita funkce pro vytvoření límce (na Obr. 15 hnědou barvou), který zvětší plochu první vrstvy a dodá tak modelu důležitou stabilitu a přilnavost k podložce. Jelikož má samotný materiál relativně špatnou přilnavost k podložce, byla na podložku nanesena tenká vrstva kancelářského lepidla Kores. Předpokládaná spotřeba materiálu je 19,2 m a předpokládaná doba tisku je přibližně 5 h 12 min. [12]



Obr. 15 Rozhraní programu Slic3r

Po vytištění je nutné nechat výrobek zchladnout, následně lze opatrně odlepit od podložky a odstranit z výtisku vzniklé podpory a límec. Na Obr. 16 je vlevo vidět výrobek ihned po vytištění a vpravo finální výrobek příruby škrtecí klapky po odstranění podpor a límce.



Obr. 16 Výrobek po tisku a po odstranění podpor (autor: Vojtěch Winter)

7 Návrh uklidňovací nádoby

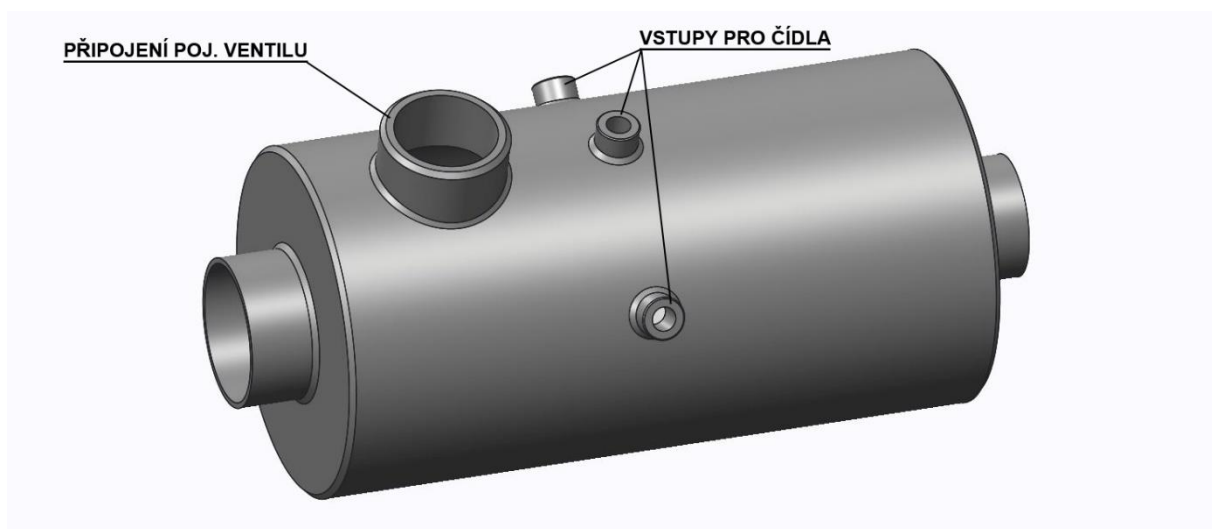
Uklidňovací nádoba neboli „airbox“, je prvkem sacích potrubí mnoha moderních spalovacích motorů. Účelů této nádoby je hned několik. Jedním z nich je nahromadění většího objemu vzduchu, který je dále rozváděn do sacích kanálů pro jednotlivé válce. Vzduch nasátý do nádoby se v této nádobě uklidňuje a redukují se turbulence, vzniklé nasáváním vzduchu z okolí, což je důležité pro udržení stabilního přísunu vzduchu do sacího kanálu. V našem případě je nádoba využita také pro několik vstupů pro čidla a obsahuje připojení pojistného přetlakového prvku. Pro připojení čidel jsou potřeba 3 vstupy s vnitřním metrickým závitem $M10 \times 1$ a pro připojení pojistného přetlakového prvku jeden vstup s vnějším trubkovým závitem $G1\ 1/2''$.

Tvar nádoby byl pro náš motor zvolen co nejjednodušší, s ohledem zejména na snadnou výrobu a zároveň splnění jejího účelu. Hlavním prvkem nádoby je válcová část, která obsahuje vstupy pro čidla a uchycení přetlakového pojistného prvku. Tato válcová část přechází na obou stranách na vstupy kruhového průřezu. Základní parametry nádoby vycházejí z již fungující nádoby, která byla použita na předchozím experimentálním motoru AVL s podobnými parametry. Objem hlavní válcové části byl předběžně zvolen 3l, na základě zkušeností spojených s předchozím motorem.

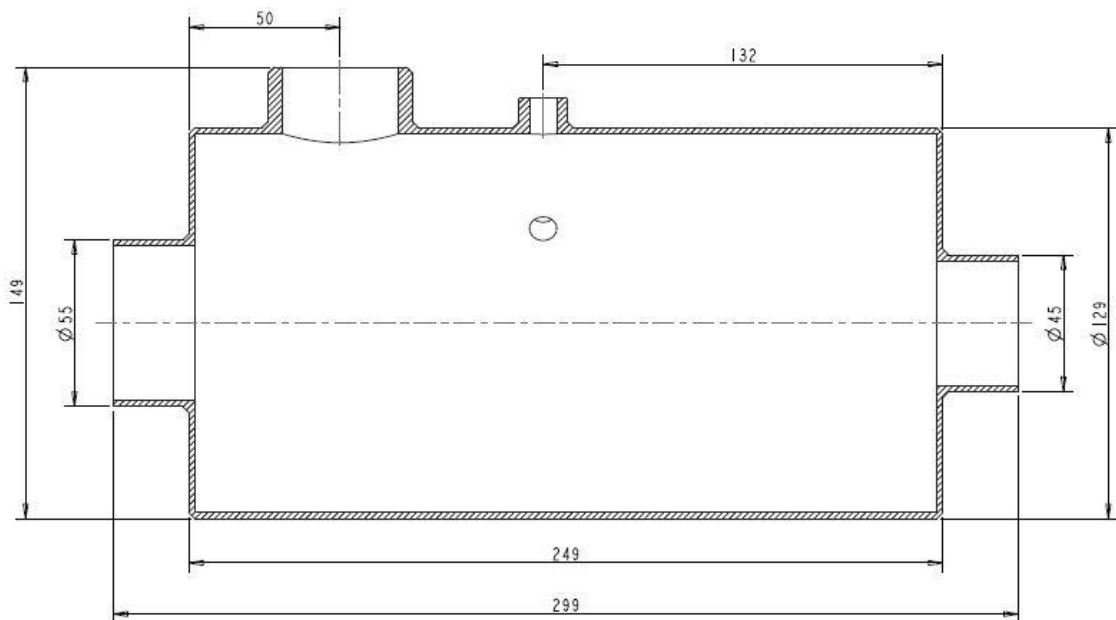
Technologie výroby nádoby byla zvolena svařování z oceli. Vzhledem k rozměrům a poměrně jednoduché geometrii se tato varianta jevila jako nejlepší řešení. V úvahu přicházela také varianta výroby pomocí 3D tisku, která by nám umožnila vytvořit geometricky příznivější nádobu, nicméně byla zavrhnuta z důvodu rozměrnosti a horší pevnosti případného výtisku.

7.1 První návrh

První návrh vychází přímo z původní uklidňovací nádoby vznětového jednoválcového motoru AVL, jejíž konstrukce a výroby byla provedena dodavatelem motoru. Pracovním médiem byl však pouze vzduch a pracovní tlaky a teploty voleny s ohledem pouze na limity přeplňovací jednotky. Při návrhu původní nádoby se nepočítalo s možným výbuchem v potrubí. Proto byla zřejmě použita pouze válcová nádoba s plochými dny a válcová hrdla navařená z vnějších stran. Tloušťka pláště, den i hrdel byla zvolena 2 mm. Model této nádoby je zobrazen na Obr. 17. Obr. 18 znázorňuje základní rozměry nádoby s hrdly.



Obr. 17 Model uklidňovací nádoby



Obr. 18 Řez první nádoby a základní rozměry

Je zřejmé, že původní návrh nebyl konstruován jako tlaková nádoba. Přesto byla provedena pevnostní kontrola, která je popsána v následující kapitole.

7.1.1 Simulace MKP

Pro simulaci kritických stavů potrubí byla zvolena metoda konečných prvků s využitím programu Abaqus CAE. Z důvodu použití akademické licence byl maximální počet elementů pro výpočet omezen na 250000. Simulace byla provedena pro orientační zjištění velikosti a oblastí vzniklých napětí vlivem vnitřního zatížení nádoby. Materiál nádoby je ocel s označením AISI 316 L, DIN 1.4404 - X2CrNiMo17122.

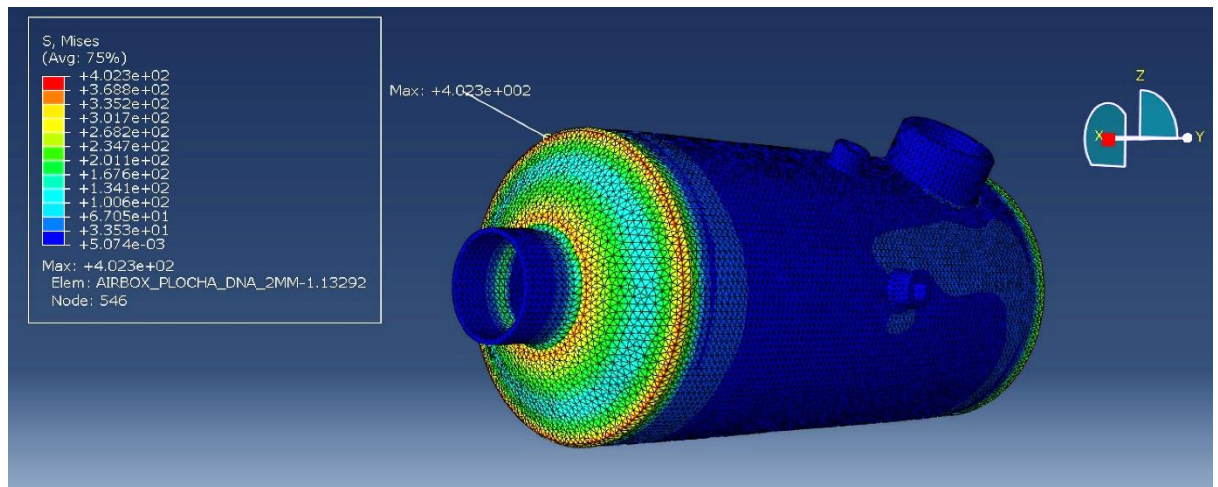
Pro výpočet byly do programu zadány tyto vlastnosti materiálu:

- Modul pružnosti $E = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$
- Poissonovo číslo $\mu = 0,3$

Physical properties							
Density ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]		Electrical resistivity ρ [$\mu\Omega\cdot\text{m}$]		Specific heat C_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]		Thermal conductivity λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	
7980		0.75		500		15	
Coefficient of thermal expansion α [$10^{-6}\cdot\text{°C}^{-1}$] between 20°C and							Elastic modulus E [GPa]
100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	200 at 20°C
16.5	17.5	17.5	18.5	18.5	19	19.5	172 at 400°C
Mechanical properties							
State	Yield strength R _{p0.2} [MPa]				Tensile strength R _m [MPa]	Elongation A ₅ [%]	Vickers Hardness [HV]
	20°C	100°C	200°C	300°C			
Annealed	190	166	137	118	490-690	≥45	150 - 200
Full hard	1300				1400	5	430

Obr. 19 Mechanické vlastnosti použité oceli [13]

Jako první byla provedena simulace při zatížení tlakem 0,2 bar absolutně. Při zatížení nádoby na podtlak byly výsledky pevnostní analýzy vyhovující. Druhý výpočet spočíval v zatížení přetlakem 10 bar.



Obr. 20 Výsledky simulace v programu Abaqus CAE

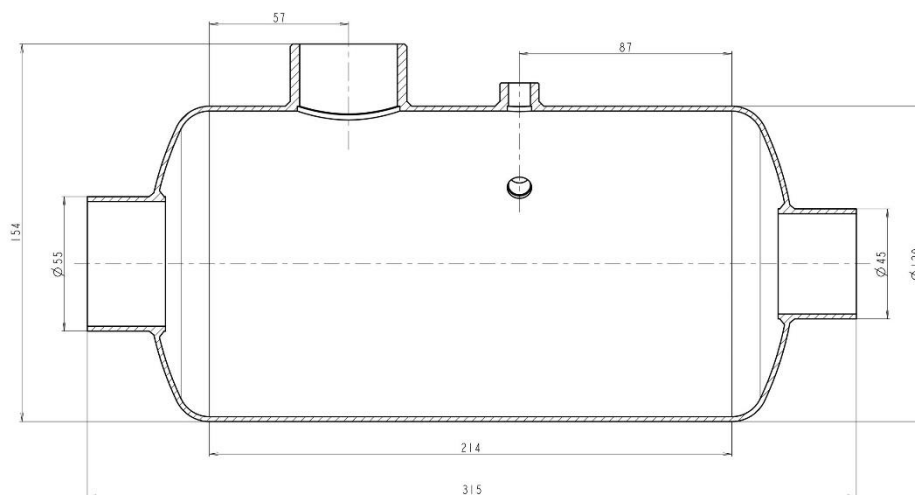
Na Obr. 20 jsou vidět výsledky simulace zatížení přetlakem 10 bar v programu Abaqus CAE, kde je zvýrazněna deformace materiálu. Je patrné, že největší napětí vzniká v rozích, v místech svarových spojů (zobrazeno červenou barvou). Toto napětí nabývá dle simulace hodnoty přibližně $\sigma_{red_{max}} \cong 402 \text{ MPa}$ von Mises. Tímto se potvrzuje počáteční hypotéza, že původní návrh nesplňuje požadavky tlakové nádoby a je nutné navrhnout konstrukci, která by splňovala požadavky tlakové nádoby. Návrh bude spočívat v použití klenutých den místo stávajících plochých. To vyřeší problém v kolmých svarových spojích, kde vznikají největší hodnoty napětí.

7.2 Druhý návrh

Pro druhý návrh bylo použito klenutých den viz Obr. 21. Po prozkoumání předchozí simulace bylo také rozhodnuto, že pro druhý návrh nádoby budou obě hrdla zapuštěna dovnitř nádoby, což dovolí přivařit hrdla jak z vnější, tak z vnitřní strany nádoby a tím se celý spoj výrazně zpevní. Klenutá dna byla vymodelována dle DIN 28011.



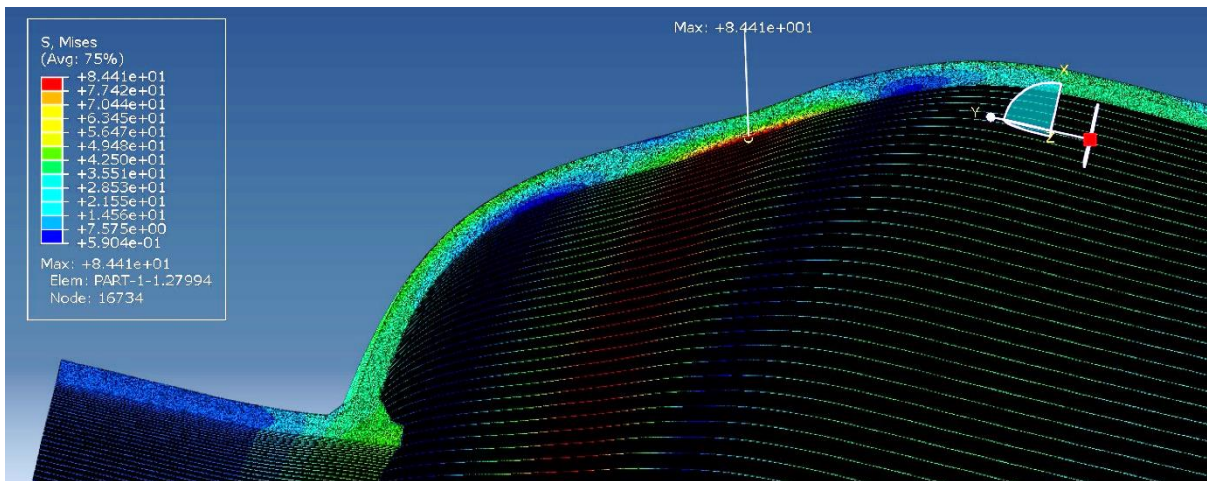
Obr. 21 Model druhé nádoby s klenutými dny



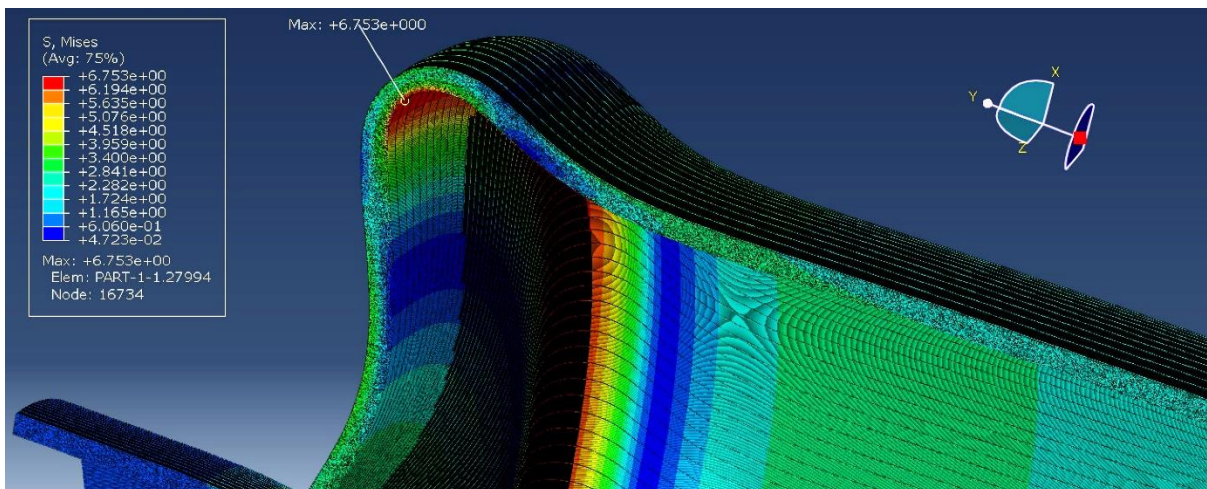
Obr. 22 Řez druhé nádoby a základní rozměry

7.2.1 Simulace MKP

Simulace druhého návrhu uklidňovací nádoby již byla provedena detailnějším způsobem. A to tak, že byl zanedbán vliv navařených vstupů pro čidla a pojišťovací ventil, jelikož v jejich okolí nevznikají napětí příliš ovlivňující výsledné maximální napětí. To nám umožnilo nahlížet na nádobu jako na rotačně symetrickou a bylo možné vymodelovat pouze plochu řezu. Tato plocha pak byla rozdělena na mnohem jemnější síť, nežli v případě první simulace. Výpočet by tak měl být značně přesnější. Vstupní parametry materiálu byly použity stejné jako v předchozí simulaci. [14]



Obr. 23 Výsledky simulace v programu Abaqus CAE pro přetlak 10 bar



Obr. 24 Výsledky simulace v programu Abaqus CAE pro podtlak -0.8 bar

7.2.2 Vyhodnocení výsledků

Z výsledků je patrné, že největší redukované napětí bude vznikat na vnitřní straně klenutého dna. Toto napětí nabývá dle simulace hodnoty přibližně $\sigma_{red_{max}} \cong 84,41 \text{ MPa}$ von Mises pro vnitřní přetlak 10 bar . Dle tabulky na Obr. 19, má použitý materiál dovolené napětí na mezi kluzu $\sigma_{p_{0,2}} = 190 \text{ MPa}$ při $20 \text{ }^\circ\text{C}$, což je maximální přípustné napětí, které může v těle nádoby nastat. Porovnání těchto hodnot popisují následující rovnice.

$$\sigma_{p_{0,2}} = 190 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{red_{max}} \cong 84,41 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{red_{max}} < \sigma_{p_{0,2}} \rightarrow \text{nádoba vyhovuje}$$

Statická bezpečnost k byla spočítána vzorcem:

$$k = \frac{\sigma_{p_{0,2}}}{\sigma_{red_{max}}} \cong \frac{190}{84,41} \cong 2,25$$

Tuto hodnotu bezpečnosti lze považovat za vyhovující, přesto však byla zvětšena tloušťka stěny ze stávajících 2 mm na 3 mm . Zvýšená hmotnost vlivem zvětšení tloušťky stěn není na škodu, neboť se jedná o stacionární aplikaci a zvýšená bezpečnost má přednost.

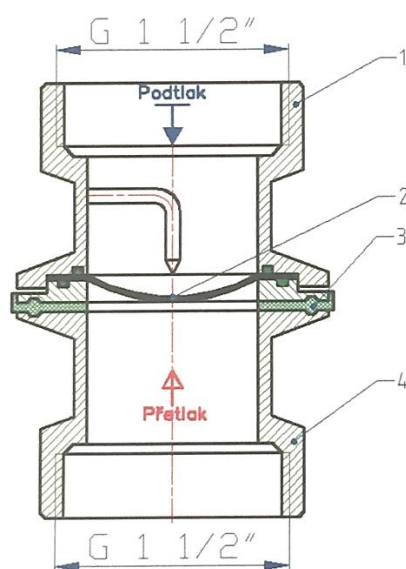
Při simulaci zatížení vnitřním podtlakem bylo zjištěno maximální napětí $\sigma_{red_{max}} = 6,753 \text{ MPa}$ von Mises, toto napětí vznikalo opět na vnitřní straně zaoblení klenutého dna. Velikost tohoto napětí nijak neohrožuje bezpečnost konstrukce nádoby.

Po vyhodnocení výsledků MKP analýzy, bylo rozhodnuto použít pro sací potrubí druhou variantu ukliďňovací nádoby. Je zřejmé, že použitím klenutých den se výrazně zredukovalo napětí, které vznikalo u první verze nádoby v oblastech koutových svarových spojů.

7.3 Návrh pojišťovacího prvku

Pro sací potrubí bylo nutné navrhnout řešení pojišťovacího přetlakového prvku, který musí chránit potrubí v případě, že tlak v potrubí přesáhne kritickou hodnotu. Pro toto řešení se nabízejí dvě varianty. Buď konvenční tlakový ventil, nebo pojistná průtržná membrána. Pokud by však došlo ke vznícení paliva uvnitř potrubí, byl by nárůst tlaku velmi rychlý. Proto je nutné, aby pojistný prvek reagoval na změnu tlaku v co nejkratším čase. Při porovnání dvou nabízených řešení se jeví jako lepší řešení průtržná membrána, jejíž doba otevření bude v porovnání s tlakovým ventilem kratší a tím pádem bude provoz motoru bezpečnější. [15]

Pro návrh průtržné membrány byla oslovena externí firma, která provedla výpočet a návrh membrány na základě námi dodaných parametrů. Schéma tělesa průtržné membrány je na Obr. 25.



Legenda:

- Pozice 1: Tělo držáku s hrotem
- Pozice 2: Membrána,
její správné umístění
- Pozice 3: Těsnění clamp, viton
- Pozice 4: Spodní tělo clampového spoje

Součástí clampového spoje bude také utahovací clampová objímka dle DIN 32676.

Obr. 25 Schéma průtržné membrány [16]

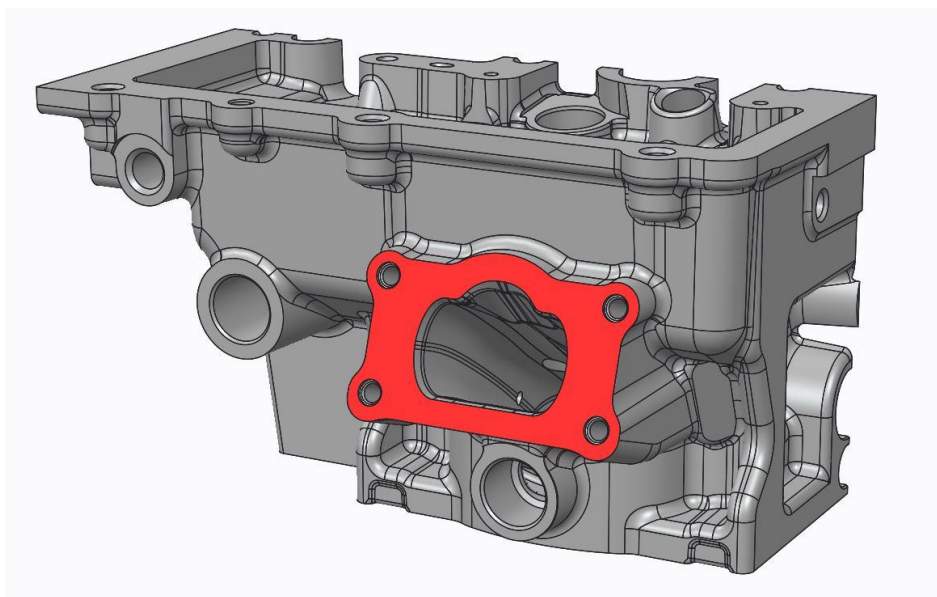
Pro případ výbuchu v sacím potrubí byl pomocí software GT Suite proveden návrh potřebného průřezu pojistného ventilu. Otvírací tlak pojistného ventilu byl nastaven na přetlak 5 bar.

8 Návrh hlavní příruby

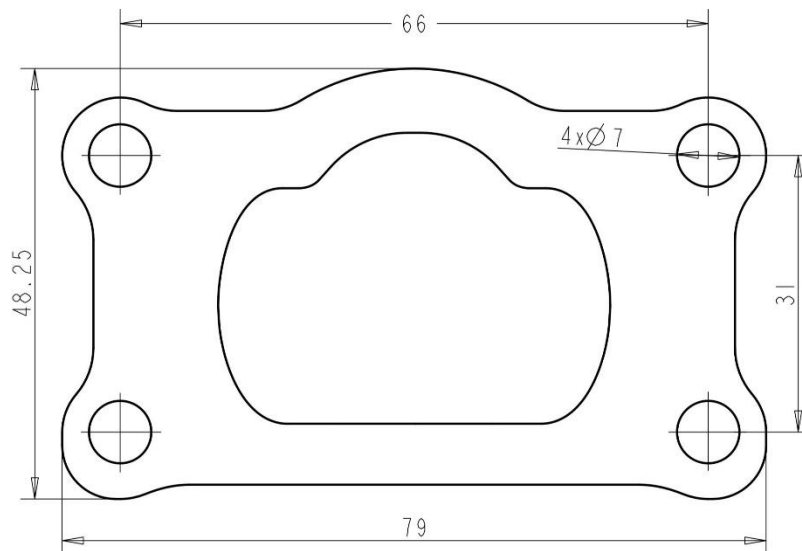
Hlavní příruba je připojena k hlavě motoru. K uchycení byla použita připravená dosedací plocha s dírami pro šrouby. Těsnění mezi přírubou a dosedací plochou na hlavě motoru je vyřešeno pomocí gumového kroužku, který se vloží do tvarové drážky v přírubě. Hrdlo příruby musí obsahovat vstupy pro uchycení CNG a benzinového vstřikovacího ventilu. Benzinový vstřikovač má přesně danou polohu vůči hlavě motoru, respektive polohu vůči sacím ventilům. Protože je benzin vstřikován v kapalném skupenství, je vhodné, aby kuželové paprsky, představující palivo vystříknuté ze vstřikovacího ventilu, mířili na vrchní část sacích ventilů, kde bude benzin lépe odpařen a tím pádem lépe promíšen se vzduchem. Poloha CNG vstřikovacího ventilu vůči sacímu kanálu není až tak důležitá, jelikož palivo bude z tohoto vstřikovače vstřikováno v plynném skupenství a k promíšení se vzduchem tak dojde mnohem lépe než v případě benzínu.

8.1 Příruba s hrdlem

Model sací strany hlavy motoru byl dodán ve formátu *STEP*, takže bylo možné na tento model rovnou navázat vlastní tvorbou sací příruby. Model sací strany hlavy motoru je zobrazen na Obr. 26, kde je červenou barvou zvýrazněna dosedací plocha hlavní příruby. Obr. 27 znázorňuje základní rozměry pro výrobu přírubové části.



Obr. 26 Sací strana hlavy motoru



Obr. 27 Základní rozměry příruby



Obr. 28 Příruba s hrdlem

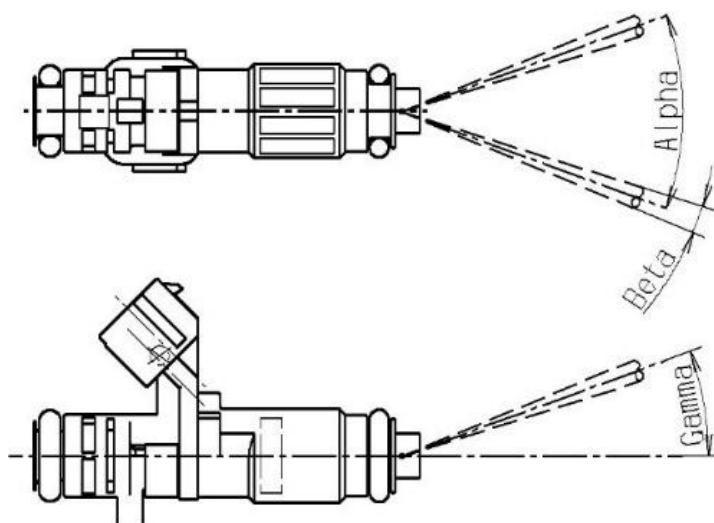
Dosedací plocha na hlavě motoru je vůči svislé rovině nakloněna o $19,5^\circ$. Hlavní osa sacího potrubí však musí být ve vodorovné poloze. Hrdlo příruby tak musí nejen přecházet z obecné křivky průřezu sacího kanálu na kruhový průřez, ale také vyrovnat úhel natočení dosedací plochy s vodorovnou polohou, viz Obr. 28. Zároveň musí být v hrdle přibližně zachována plocha průřezu stejná jako je na vstupu do sacího kanálu. Plocha průřezu sacího kanálu byla změřena jako $1179,58 \text{ mm}^2$, což by odpovídalo kruhovému průřezu o poloměru přibližně $38,75 \text{ mm}$. Pro usnadnění konstrukce byl vnitřní průměr kruhového potrubí zvolen 38 mm , což odpovídá ploše $1134,11 \text{ mm}^2$.

8.2 Poloha vstřikovačů

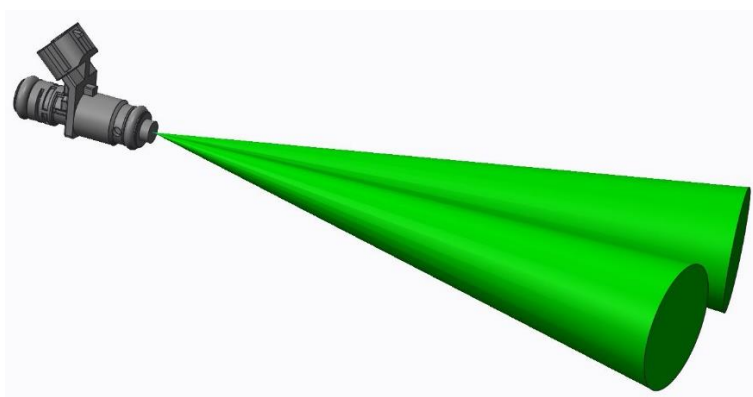
Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, poloha benzinového vstřikovacího ventilu vůči sacímu kanálu je velmi důležitá. Pro polohu vstřikovače byla použita dodaná výkresová dokumentace a pro vizuální kontrolu byly vymodelovány také kuželové paprsky vstřikovaného paliva. Model vstřikovače s palivovými paprsky lze vidět na Obr. 31.

Úhly pro zakótování paprsků (viz Obr. 29):

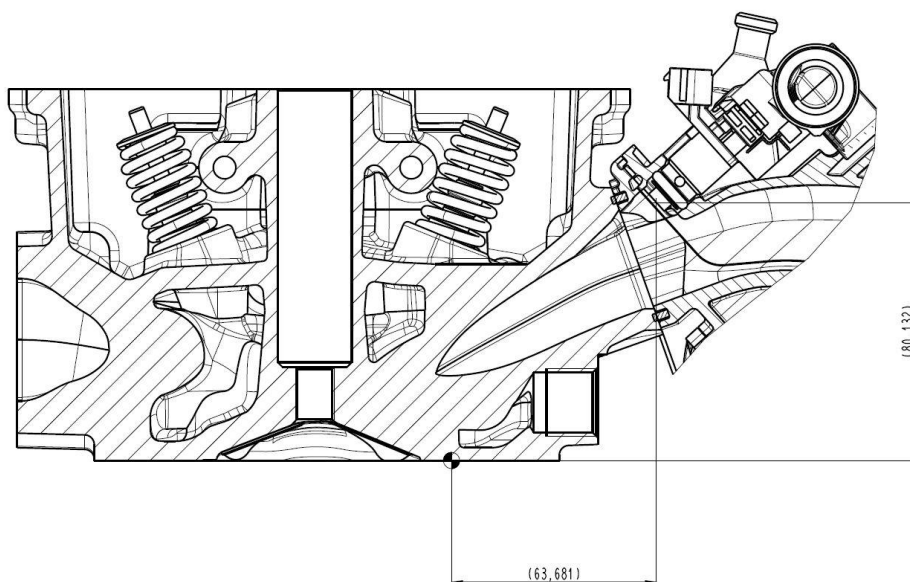
- $Alpha = 18^\circ$
- $Beta = 12^\circ$
- $Gamma = 0^\circ$



Obr. 29 Úhly popisující rozstřík paliva

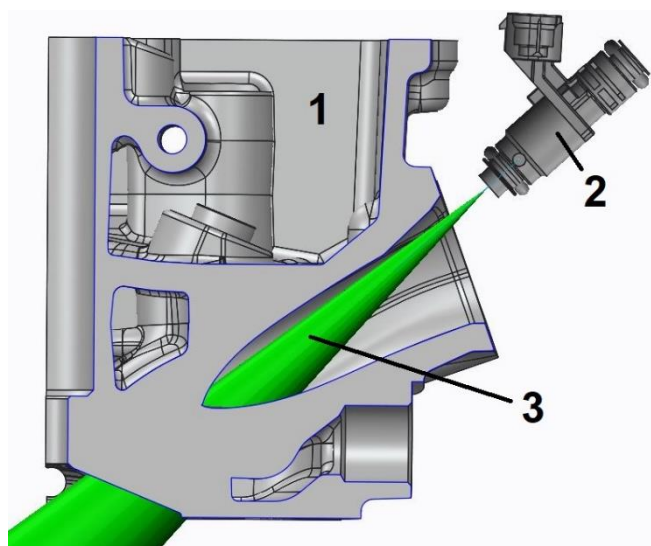


Obr. 30 Vizualizace rozstříku paliva ze vstřikovače



Obr. 31 Poloha trysky vstřikovače vůči referenčnímu bodu

Na Obr. 31 je vidět poloha vstřikovacího ventilu, ze které se vycházelo při návrhu hlavní přírby. Úhel, který svírá vstřikovač s vodorovnou rovinou, byl zvolen dle dodané dokumentace. Na Obr. 32 je vidět řez samotnou hlavou motoru a sacím kanálem s již vloženým vstřikovačem a palivovými kuželovými paprsky.

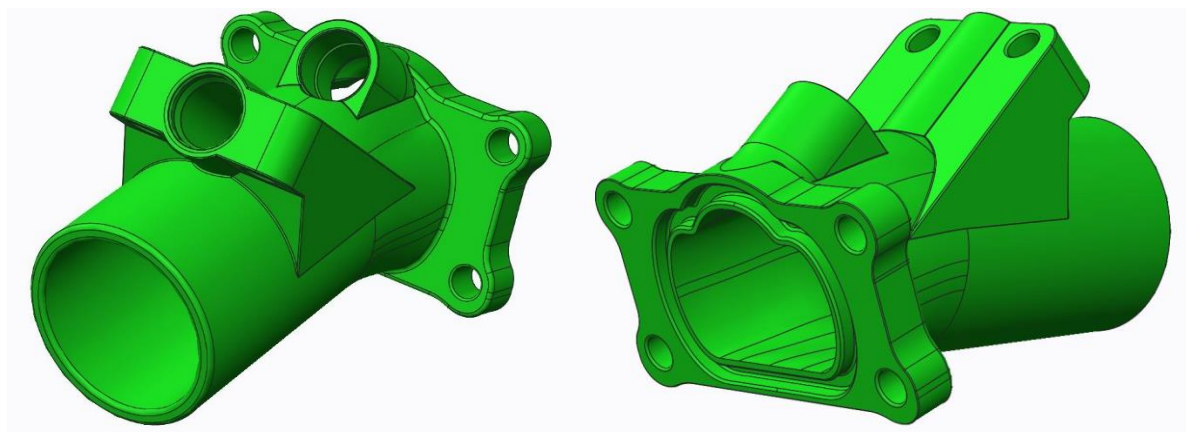


Obr. 32 Řez hlavou motoru s modelem palivového kužele

- 1. Sací strana hlavy motoru
- 2. Tělo vstřikovacího ventilu
- 3. Model palivových paprsků

Po správném umístění vstřikovacího ventilu do sestavy, bylo možné vytvořit vstupní otvor benzinového vstřikovače v hrdle příruby. Vstupní otvor pro CNG vstřikovač byl vytvořen ve stejné rovině jako benzinový a pro zjednodušení následné konstrukce uchycení vstřikovačů je osa CNG vstřikovače rovnoběžná s osou vstřikovače benzinového. Geometrie vstupů pro vstřikovače byly inspirovány dodanou výkresovou dokumentací vstřikovacích ventilů a jejich uložení. Okolo válcového vstupu pro CNG vstřikovač byl přidán materiál, který bude využit pro uchycení lišt pro přívod paliva do vstřikovačů, viz Obr. 33.

Poslední úprava příruby bylo vytvoření drážky pro těsnící kroužek, který těsní mezi přírubou a dosedací plochou na hlavě motoru. Nejedná se o tvarové těsnění, ale o kruhové těsnění obdélníkového průřezu, které se vloží do tvarové drážky. Tato drážka je obecná křivka, která kopíruje vstupní geometrii sacího kanálu.

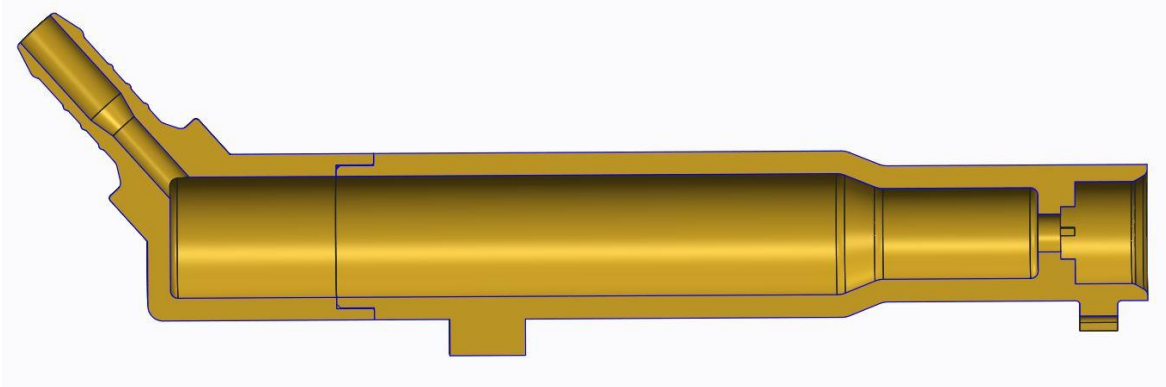


Obr. 33 Příruba s hrdlem, otvory pro vstřikovače, drážkou pro těsnění

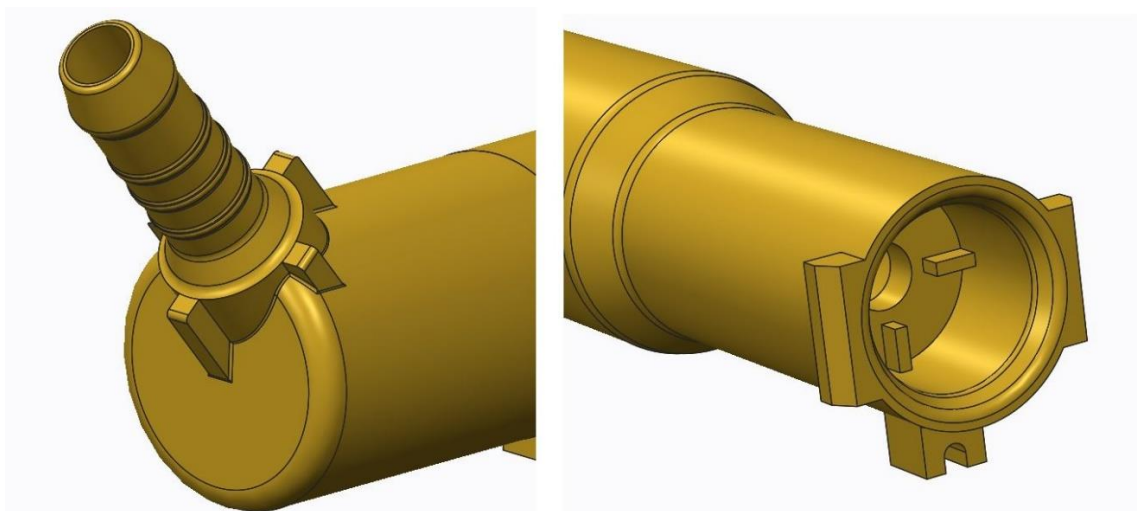
8.3 Návrh benzinové palivové lišty

Důležitá součást palivového systému je tzv. palivová lišta, neboli palivový „rail“. Je to pevná součást, sloužící pro přívod paliva do vstřikovacího ventilu a zároveň zajištění těla vstřikovače v definované poloze. K uchycení vstřikovače v palivové liště slouží plechová pružná pojistka, která zajede do drážek na těle vstřikovače a zároveň do drážek na palivové liště. Přívod paliva do palivové lišty bude zajištěn gumovou palivovou hadicí, která bude nasazena a zajištěna na hadicovém nátrubku na konci palivové lišty. Detaily prvků palivové lišty jsou zobrazeny na Obr. 35 a Obr. 36.

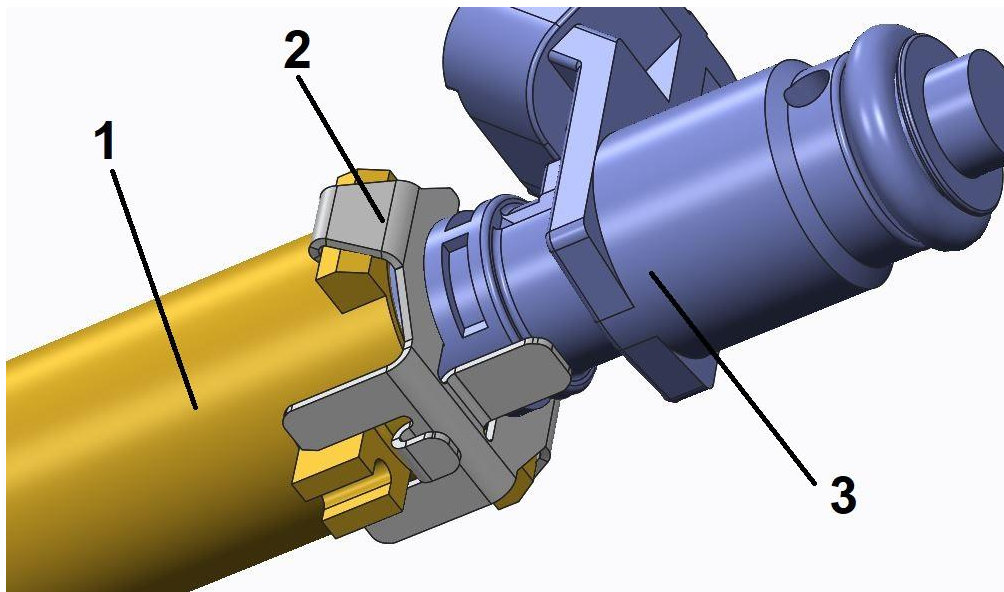
Pro výrobu benzinové palivové lišty bude opět použita technologie 3D tisku. Benzinová palivová lišta bude rozdělena na dvě části, které budou do sebe následně zasunuty a zámkový spoj bude slepen epoxidovým lepidlem. Spoj obou částí palivové lišty je patrný z řezu sestavy palivové lišty na Obr. 34. Funkční prvky palivové lišty byly vytvořeny dle dodané výkresové dokumentace. Součástí palivové lišty bývá také vstup pro čidlo tlaku paliva. Návrh připojení čidla tlaku paliva bude proveden v rámci pokračování této práce.



Obr. 34 Řez benzinovou palivovou lištou.



Obr. 35 Detail na palivovou lištu s nátrubkem a prvky pro uchycení vstřikovače



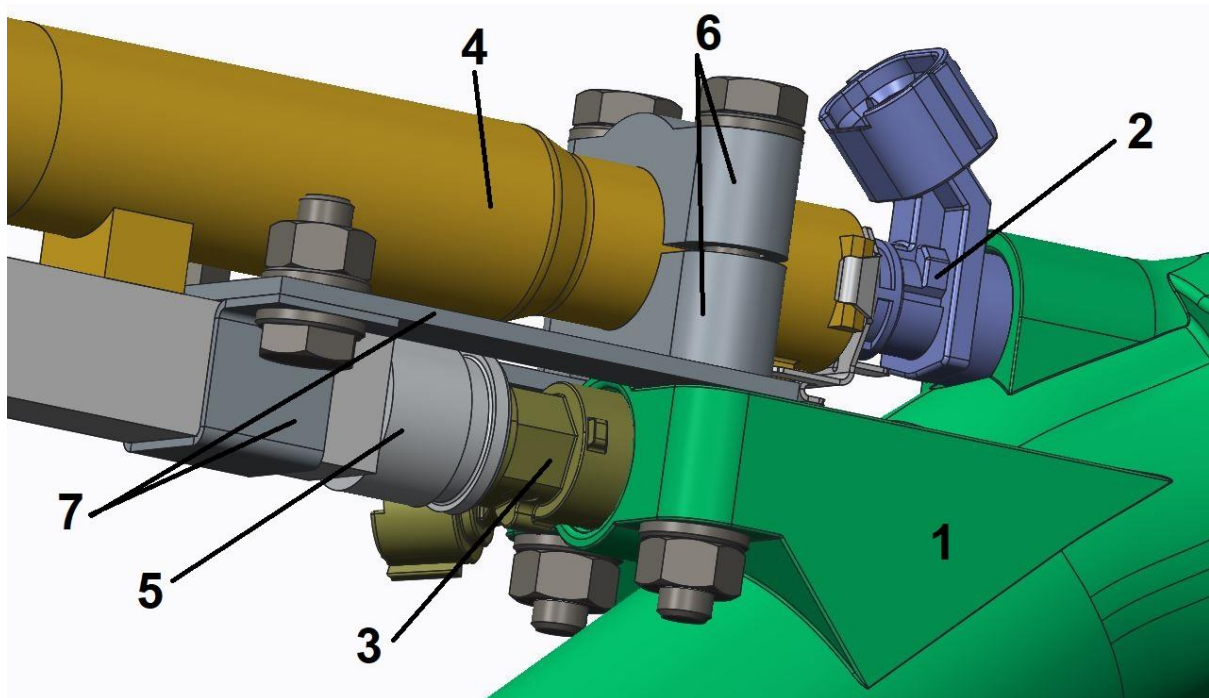
Obr. 36 Detail na uchycení vstřikovače pomocí plechového klipu

- 1. Palivová lišta
- 2. Klip pro zajištění
- 3. Tělo vstřikovacího ventilu

8.4 Uchycení benzinové palivové lišty

Palivová lišta pro CNG vstřikovač bude vyrobena totožná, jako na stávajícím experimentálním motoru AVL, proto nebylo nutné konstruovat novou. Byl pouze vytvořen model, který je dostatečný pro návrh uchycení CNG palivové lišty a podporu benzinové palivové lišty. Pro uchycení bude použit plechový prvek tloušťky 2 mm, který se uchyť k tělu hlavní příruby s hrdlem. CNG palivová lišta pak bude k tomuto prvku přitažena pomocí plechové příchytky a dvěma šrouby s maticemi a podložkami. Tento systém dovolí nastavit při montáži správnou polohu CNG palivové lišty a dotažením šroubů tuto polohu zajistit.

Pro uchycení benzinové palivové lišty byl navržen dvoudílný stahovací přípravek, který bude uchycen k tělu hlavní příruby s hrdlem pomocí dvou šroubů s maticemi a podložkami. Tento prvek dovolí nastavit správnou polohu palivové lišty při montáži. Utažením šroubů se oba díly prvku přitáhnou k sobě a tím upevní palivovou lištu. Pro výrobu uchycovacího prvku bude opět použita technologie 3D tisku. Celá sestava je vidět na Obr. 37.



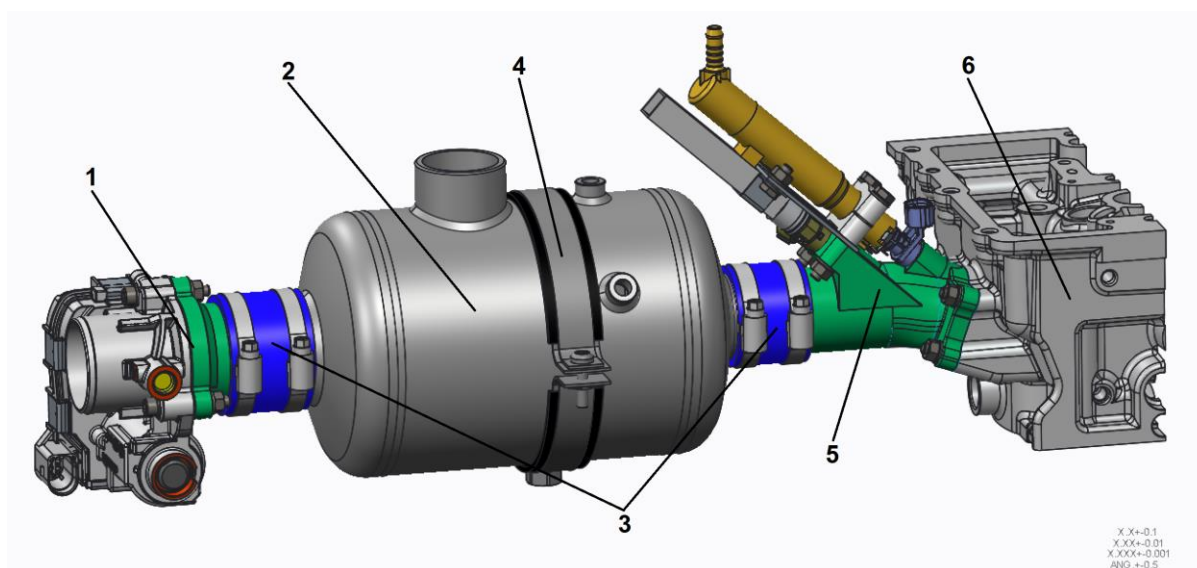
Obr. 37 Detail uchycení palivových lišt a vstřikovačů

- 1. Hlavní příruba
- 2. Benzinový vstřikovač
- 3. CNG vstřikovač
- 4. Benzinová palivová lišta
- 5. CNG palivová lišta
- 6. Držáky benzinové palivové lišty
- 7. Držáky CNG palivové lišty

Obě palivové lišty k sobě budou následně přitaženy pomocí stahovací pásky v místě podpory mezi lištami pro celkové zpevnění celé sestavy. Pevnostní kontrola hlavní příruby a benzinové palivové lišty bude řešena mimo rozsah bakalářské práce.

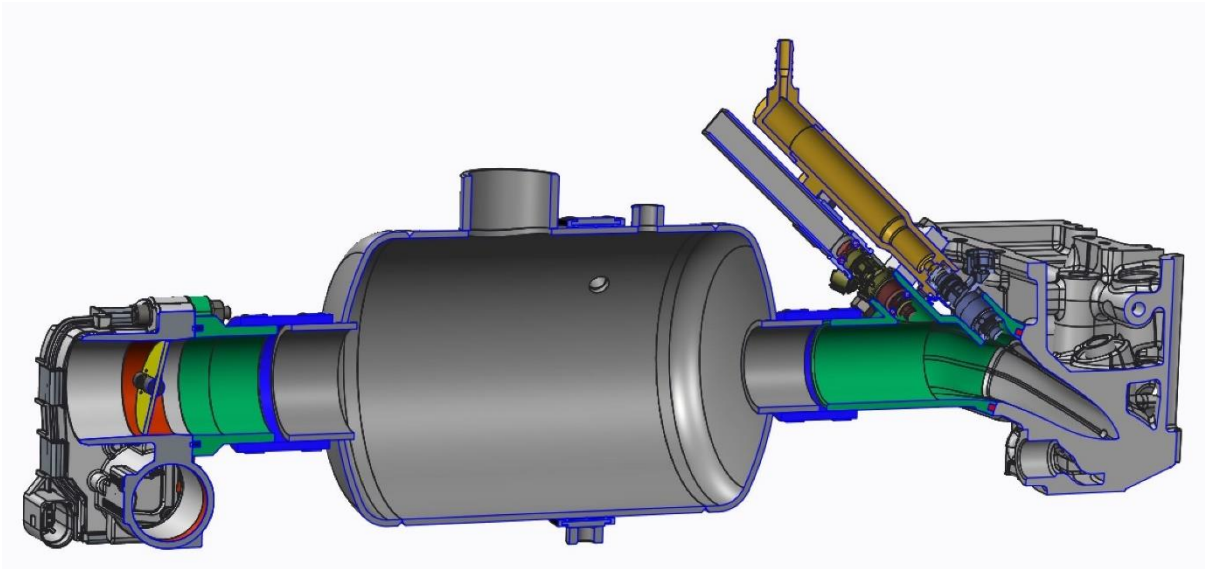
9 Celková sestava potrubí

Po provedení návrhu jednotlivých součástí potrubí byla vytvořena sestava sacího potrubí. Tato sestava obsahuje všechny doposud navržené a dodané součásti. Na Obr. 38 (pozice 4) je zobrazena objímka, která bude sloužit k uchycení podpůrné konstrukce potrubí. Tato spona obepíná tělo uklidňovací nádoby a pomocí tyčové konstrukce bude pevně spojena s rámem motoru. V sestavě není zobrazeno těleso pojistné průtržné membrány. Na Obr. 39 je zobrazen řez celé sestavy sacího potrubí.



Obr. 38 Model sestavy sacího potrubí

- 1. Sestava škrticí klapky
- 2. Uklidňovací nádoba
- 3. Připojení silikonovými hadicemi se sponami
- 4. Objímka
- 5. Sestava hlavní příruby s palivovými komponenty
- 6. Sací strana hlavy motoru



Obr. 39 Řez sestavy sacího potrubí

10 Návrh dalšího postupu

Jelikož tato práce ještě není dokončena, zde je stručně popsán další postup práce. Je nutné provést pevnostní analýzu hlavní příruby. Pokud bude aktuální konstrukce splňovat pevnostní požadavky, bude nutné navrhnout výrobní postup. Zejména se jedná o finální úpravu povrchu funkčních ploch, jako jsou vnitřní plochy vstupů pro vstřikovače a dosedací plocha těsnění příruby. Úpravu povrchu je nutné řešit také na vnitřní straně vstupu pro vstřikovač u benzinové palivové lišty. U benzinové palivové lišty je nutné také vyřešit připojení čidla pro měření tlaku paliva. Poté je nutné dodělat výkresovou dokumentaci ke zmiňovaným dílům a následně díly vyrobit.

11 Závěr

Dle zadání byla navržena konstrukce sacího potrubí pro experimentální jednoválcový motor. Byly zváženy a vybrány možné technologie výroby jednotlivých součástí a shromážděny základní informace o vybraných technologiích 3D tisku. Byla navržena připojovací příruba pro tělo škrticí klapky, uklidňovací nádoba s připojením pro přetlakový bezpečnostní prvek a vstupy pro čidla. Byl navržen pojišťovací přetlakový prvek v podobě průtržné membrány. Dále byla navržena hlavní příruba s hrdlem a vstupy pro vstřikovací palivové ventily, která bude připojena k hlavě motoru. Následně byly vytištěny zkušební vzorky a provedena tahová zkouška materiálu PA12, který byl použit pro výrobu některých součástí potrubí. Výsledky tahové zkoušky byla použity pro vyhodnocení MKP analýzy. Byla provedena MKP analýza uklidňovací nádoby a vybraných tištěných součástí, díky které byla zjištěna bezpečnost konstrukce těchto dílů.

Na 3D tiskárně byla vyrobena příruba škrticí klapky a držáky benzinové palivové lišty. Dále byly vytištěny zkušební modely benzinové palivové lišty s hadicovou přípojkou a model hlavní příruby s hrdlem. Pro vybrané součásti byla vytvořena výkresová dokumentace. Uklidňovací nádoba byla zadána do výroby.

12 Seznam použité literatury

[1] SOUČEK, Jakub. *Úprava klikového mechanismu experimentálního motoru*. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jiří Vávra, PhD.

[2] HORČÍČKA, Filip. *Úprava vyvážení experimentálního jednoválce*. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jiří Vávra, Ph.D. Konzultant Bc. Vojtěch Šíma.

[3] SVOBODA, Michal. *Úprava hlavy válců pro experimentální motor*. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jiří Vávra, PhD.

[4] KOLEČKÁŘ, Pavel. *Úprava pohonu rozvodu experimentálního jednoválce*. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jiří Vávra, PhD.

[5] KOLEČKÁŘ, Pavel. *Návrh pohonu rozvodů pro experimentální jednoválcový motor*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jiří Vávra, PhD.

[6] SVOBODA, Michal. *Konstrukce hlavy zkušebního jednoválce*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jiří Vávra, PhD.

[7] SOUČEK, Jakub. *Klikový mechanismu experimentálního motoru* [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80864/F2-BP-2018-Vich-Ondrej-Bakalarska%20prace%20-%20Vich%20Ondrej.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jiří Vávra, PhD.

[8] STRÍTESKÝ, Ondřej, Josef Průša, Martin Bach. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha, 2019 [cit. 2019-06-12] Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>

[9] VÍCH, Ondřej. *Technologie 3D tisku* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-06-20]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80864/F2-BP-2018-Vich-Ondrej-Bakalarska%20prace%20-%20Vich%20Ondrej.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Zdeňka Jeníková, PhD.

[10] Filament-PM by Plasty Mladec, *Technical datasheet of product: PAJet FILAMENT* [online] Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/user/related_files/technical_data_sheet_pajet.pdf.

[11] ČSN EN ISO 527-2, *Plasty-Stanovení tahových vlastností-Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*, 2012.

[12] *PŘÍRUČKA 3D TISKAŘE*. PRUSA RESEARCH s.r.o. [online] Praha. [cit. 2019-06-4] Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/downloads/manual/Prusa-i3-manual-mk2s-cz.pdf>.

[13] PX GROUP SA. *Technical datasheet 316L 1.4404*. [online] [cit. 2019-06-1] Dostupné z: <https://www.pxgroup.com/sites/default/files/316L1.4404.pdf>

[14] BUKAL, Oldřich. *Kontrolní výpočet tlakové nádoby* [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37883. Bakalářská práce. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Tomáš Létal.

[15] *COMAT produktový list-tlakové pojistky*. PROGROUP ENGINEERING s.r.o. [online] Brno. [cit. 2019-06-3] Dostupné z: <http://progroup.cz/wp-content/uploads/2014/09/Produktov%C3%BD-list-tlakov%C3%A9-pojistky.pdf>.

[16] *COMAT Nabídka membránové tlakové pojistky*. PROGROUP ENGINEERING s.r.o. Brno, 2019.

13 Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma sacího potrubí	11
Obr. 2 Materiálové vlastnosti PAJet 160 NATUR udávané výrobcem [10]	15
Obr. 3 Trhací stroj W+B ZD 10/90 (autor fotky: Vojtěch Winter)	16
Obr. 4 Výsledky tahové zkoušky strun PA12.....	17
Obr. 5 Okótované rozměry zkušební vzorku [11]	19
Obr. 6 Vnitřní struktura 45°/90°	20
Obr. 7 Vnitřní struktura 90°/90°	21
Obr. 8 Třetí struktura s 45°/90° a s vyhlazením vrstev	21
Obr. 9 Výsledky tahové zkoušky vzorků PA12	22
Obr. 10 Těleso škrticí klapky.....	24
Obr. 11 Model příruby pro připojení škrticí klapky	25
Obr. 12 Sestava spojení škrticí klapky a příruby	25
Obr. 13 Výsledky simulace přetlaku v přírubě	26
Obr. 14 Model součásti pro 3D tisk	27
Obr. 15 Rozhraní programu Slic3r	28
Obr. 16 Výrobek po tisku a po odstranění podpor (autor: Vojtěch Winter)	29
Obr. 17 Model uklidňovací nádoby	30
Obr. 18 Řez první nádoby a základní rozměry	31
Obr. 19 Mechanické vlastnosti použité oceli [13]	32
Obr. 20 Výsledky simulace v programu Abaqus CAE	32
Obr. 21 Model druhé nádoby s klenutými dny.....	33
Obr. 22 Řez druhé nádoby a základní rozměry	33
Obr. 23 Výsledky simulace v programu Abaqus CAE pro přetlak 10 bar	34
Obr. 24 Výsledky simulace v programu Abaqus CAE pro podtlak -0.8 bar	34
Obr. 25 Schéma průtržné membrány [16].....	36
Obr. 26 Sací strana hlavy motoru	37
Obr. 27 Základní rozměry příruby	38
Obr. 28 Příruba s hrdlem	38
Obr. 29 Úhly popisující rozstřík paliva	39
Obr. 30 Vizualizace rozstříku paliva ze vstřikovače	39
Obr. 31 Poloha trysky vstřikovače vůči referenčnímu bodu	40
Obr. 32 Řez hlavou motoru s modelem palivového kužele	40
Obr. 33 Příruba s hrdlem, otvory pro vstřikovače, drážkou pro těsnění.....	41

Obr. 34 Řez benzinovou palivovou lištou.	42
Obr. 35 Detail na palivovou lištu s nátrubkem a prvky pro uchycení vstřikovače	42
Obr. 36 Detail na uchycení vstřikovače pomocí plechového klipu	43
Obr. 37 Detail uchycení palivových lišt a vstřikovačů	44
Obr. 38 Model sestavy sacího potrubí.....	45
Obr. 39 Řez sestavy sacího potrubí	46

14 Přílohy

- Příloha 1 – Výkres sestavy potrubí s kusovníkem
- Příloha 2 – Výrobní výkres uklidňovací nádoby
- Příloha 3 – Výrobní výkres příruby klapky
- Příloha 4 – Výrobní výkres palivové lišty
- Příloha 5 – Výrobní výkres hadicového nátrubku
- Příloha 6 – Výrobní výkres spodního držáku palivové lišty
- Příloha 7 – Výrobní výkres horního držáku palivové lišty
- Příloha 8 – Výrobní výkres plechového držáku
- Příloha 9 – CAD model hlavní příruby
- Příloha 10 – CAD model příruby klapky
- Příloha 11 – CAD model spodního držáku pal. lišty
- Příloha 12 – CAD model horního držáku pal. lišty
- Příloha 13 – CAD model palivové lišty
- Příloha 14 – CAD model hadicového nátrubku