



FAKULTA STROJNÍ ČVUT V PRAZE

Ústav letadlové techniky

**3D tištěné palivo pro malé hybridní
raketové motory**

**3D printed fuel for small hybrid
rocket engines**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Viktor HAIS

Studijní program:

**B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ**

Studijní obor:

Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce:

Ing. Jaromír KUČERA

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hais** Jméno: **Viktor** Osobní číslo: **478012**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

3D tištěné palivo pro malé hybridní raketové motory

Název bakalářské práce anglicky:

3D printed fuel for small hybrid rocket engines

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- Rešerši metod 3D tisku a materiálů pro 3D tisk
- Návrh vhodného materiálu, metody tisku a tvaru pro 3D tištěné palivové zrno
- Rešerši alternativního využití 3D tisku pro výrobu palivových zrn

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jaromír Kučera, ústav letadlové techniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jaromír Kučera
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, 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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod dohledem svého vedoucího práce a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje.

V Praze

9. 6. 2021

.....

HAIS Viktor

Poděkování

Tímto děkuji Ing. Kučerovi za přínosné konzultace, klidné vedení práce a povzbuzování v další práci jak radami, tak návrhy na zlepšení.

Taktéž děkuji kolegovi Vítězslavu Putnovi za příjemný čas strávený u testovacího stanoviště.

Chtěl bych poděkovat i svému blízkému okolí za trpělivost, kterou prokázalo při poslouchání již několikrát vyřčených zajímavostí, na které jsem při průběhu své práce narazil.

Název práce:

3D tištěné palivo pro malé hybridní raketové motory

Autor: Viktor Hais

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jaromír Kučera
Ústav letadlové techniky, Fakulta strojní,
České vysoké učení technické v Praze

Bibliografické údaje: počet stran: 64

počet kapitol: 5

počet obrázků: 37

počet tabulek: 16

Abstrakt: Tato práce se zabývá využitelností 3D tisku pro výrobu palivových zrn pro hybridní raketové motory. V rámci práce byla provedena validace navržených řešení pro tisk palivových zrn a stanovena doporučení pro budoucí testování.

Klíčová slova: 3D tisk, hybridní raketový motor, ASA, PLA, PA12

Title:

3D printed fuel for small hybrid rocket engines

Author: Viktor Hais

Abstract: This thesis deals with exploitability of 3D printing for manufacturing fuel grains for hybrid rocket engines. Within thesis the validation of proposed solutions for 3D printing fuel grains took place, as well as determining recommendations for future testing.

Key words: 3D printing, hybrid rocket engine, ASA, PLA, PA12

Seznam symbolů použitých v textu

značka	jednotka	název
F_{MAX}	[N]	maximální tah
h_L	[mm]	výška vrstvy
I_S	[N · s · kg ⁻¹]	specifický impuls
m_k	[g]	konečná hmotnost vzorku/váha zbytků
m_p	[g]	počáteční hmotnost vzorku
O/F	[1]	poměr okysličovadla k palivu
p_0	[MPa]	počáteční tlak v nádrži na okysličovadlo
#	[-]	číslo vzorku
$\bar{\#}$	[-]	aritmetický průměr
ν	[%]	spalnost
ABS	[-]	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ASA	[-]	Acrylic Styrene Acrylonitrile
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing
DLP	[-]	Digital Light Processing
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
FFF	[-]	Fused Filament Fabrication
HDPE	[-]	High-Density Polyethylene
HIPS	[-]	High Impact Polystyrene
HRM	[-]	hybridní raketový motor
MSLA	[-]	maskovaná stereolitografie
PETG	[-]	Polyethylene Terephthalate modified with Glykol
PLA	[-]	Polyactic Acid

PP	[-]	Polypropylen
RM	[-]	raketový motor
SLA	[-]	stereolitografie
SLS	[-]	Selective Laser Sintering

Obsah

1	Úvod	10
2	Raketové motory	11
2.1	Na tuhé palivo	11
2.2	Na kapalné palivo	11
2.3	Hybridní raketové motory	12
2.3.1	HRM kolegy Putny	13
2.3.2	Paliva pro HRM	13
2.3.2.1	Polymerní paliva	14
2.3.2.2	Paliva na bázi pryskyřic	14
2.3.2.3	Paliva na bázi parafinů	15
2.3.3	Průřezová charakteristika palivových zrn	16
3	3D tisk	17
3.1	Druhy 3D tisku	18
3.1.1	FDM/FFF	18
3.1.2	Fotopolymerace	19
3.1.3	SLS	21
3.1.4	Porovnání metod 3D tisku	23
3.2	Materiály pro 3D tisk	24
3.2.1	PLA (FDM/FFF)	24
3.2.2	ABS (FDM/FFF)	24
3.2.3	PETG (FDM/FFF)	25
3.2.4	ASA (FDM/FFF)	25

3.2.5	Nylon (FDM/FFF, SLS)	26
3.2.6	PP (FDM/FFF)	26
3.2.7	Flexibilní materiály (FDM/FFF)	26
3.2.8	HIPS (FDM/FFF)	27
3.2.9	Kompozitní materiály (FDM/FFF)	27
3.2.10	Resiny (SLA, MSLA, DLP)	27
3.3	Možnosti využití 3D tisku pro malé HRM	28
3.3.1	Tisk palivových zrn	28
3.3.2	Formy pro odlévání palivových zrn	31
3.3.3	Výztuhy pro parafinová palivová zrna	34
3.3.4	Nepřímé využití	35
4	Experimentální část	37
4.1	3D tištěná paliva	37
4.1.1	Fáze 1 - Konvenční vs aditivní výroba	38
4.1.1.1	ASA	38
4.1.1.2	Nylon PA6	39
4.1.1.3	Nylon PA12	40
4.1.1.4	PLA	41
4.1.1.5	HDPE	42
4.1.1.6	Zhodnocení	42
4.1.2	Fáze 2 - Ovlivňující parametry	43
4.1.2.1	Výška vrstvy 0,12mm	43
4.1.2.2	Výška vrstvy 0.3mm	44
4.1.2.3	Zhodnocení	44
4.1.3	Fáze 3 - Tvar zrna	45
4.1.3.1	Loukoť Děrovaná	45
4.1.3.2	Loukoť	47
4.1.3.3	Spirála	48
4.1.3.4	Zhodnocení	49
4.1.4	Fáze 4 - Finále	50

4.1.4.1	ASA, loukoť	50
4.1.4.2	Zhodnocení	51
4.2	Optimalizace 3D tisku	53
4.3	Odlévání parafinových zrn	53
4.4	Zhodnocení experimentální části	55
5	Závěr	56

1 Úvod

3D tisk je v současnosti dynamicky rozvíjející se výrobní metoda. Její rozvoj má na svědomí zvyšování dostupnosti aditivní výroby i pro studenty, kterým se otevírají nové technologické postupy produkce.

3D tisk představuje potenciál pro zdokonalení výkonů studentských hybridních raketových motorů, protože umožňuje i pro malé rozměry palivových zrn vytvářet tvarově složité průřezové charakteristiky, které při správném návrhu mohou ovlivnit výkon HRM.

Práce si klade za cíl prozkoumat využití 3D tisku pro oblast výzkumných hybridních raketových motorů, zejména pak při tvorbě palivových zrn.

2 Raketové motory

Raketové motory (dále RM) se řadí mezi tzv. reaktivní pohony, tedy pohony fugující na Newtonově třetím pohybovém zákoně - zákonu akce a reakce. RM existuje několik druhů, od spalovacích přes nukleární po iontové. Představme si základní principy fungování několika druhů spalovacích RM. [14]

2.1 Na tuhé palivo

Raketové motory na tuhé palivo (obr. 2.1) mají palivo i okysličovadlo namíchané v předem určeném poměru v palivovém zrnu, kde se obě látky nachází v pevném skupenství. To umožňuje poměrně přesnou predikci časového vývoje tahu, znemožňuje však regulovat tah motoru během jeho činnosti. Smíšení okysličovadla s palivem již při výrobě vede k nutnosti opatrného zacházení s vyrobeným palivovým zrnem.[14]

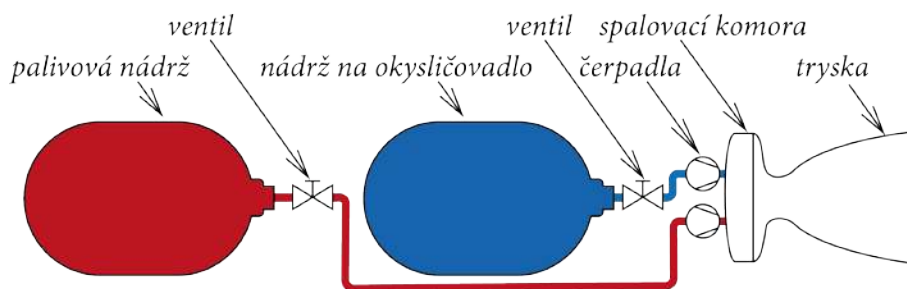


Obrázek 2.1: Schéma RM na tuhé palivo [27] [úprava autor]

2.2 Na kapalné palivo

Raketové motory na kapalné palivo (obr. 2.2) vynikají možností operativní úpravy poměru okysličovadla k palivu (dále O/F) a pohodlnou regulací tahu motoru. Stejně tak umožňují přerušit a znovu obnovit chod motoru. Jsou však díky své komplex-

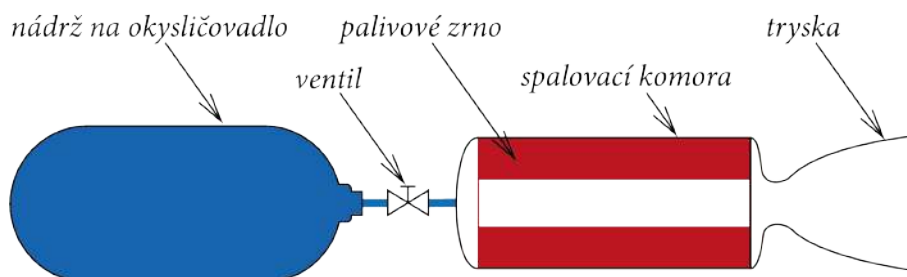
nosti nákladné na výrobu a údržbu - kromě ventilů uzavírajících nádrže musí být vybavené i čerpadly, která okysličovadlo i palivo dopravují do spalovací komory. Ta je zpravidla vybavena regenerativním chlazením, protože k hoření dochází i u jejích stěn.[14]



Obrázek 2.2: Schéma RM na kapalné palivo [24] [úprava autor]

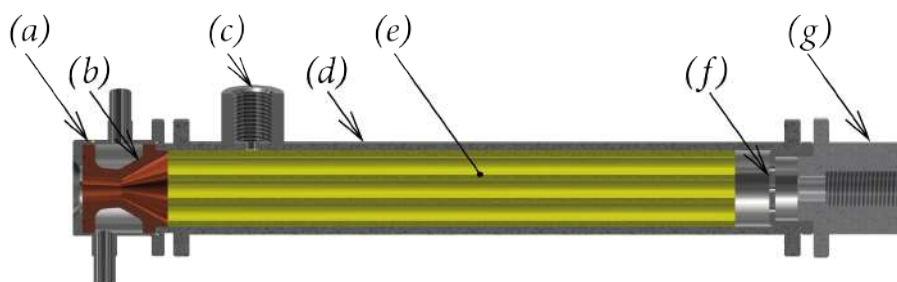
2.3 Hybridní raketové motory

Hybridní raketové motory (dále HRM) mají jednu ze složek, ať už okysličovadlo nebo palivo, v pevné fázi a druhou v kapalné fázi (obr. 2.3). Drtivá většina HRM uchovává v pevném skupenství palivo. Poměr O/F je nekonstantní a závisí mj. na tlaku v nádrži s okysličovadlem. HRM jsou na výrobu méně nákladné, než RM na tekuté palivo, protože k chodu nevyžadují žádných čerpadel, nenabízí však takovou variabilitu při regulování tahu. Zároveň se mohou chlubit vyšší bezpečností díky skupenství paliva a jeho oddělení od okysličovadla.[14]



Obrázek 2.3: Schéma hybridního RM [26] [úprava autor]

2.3.1 HRM kolegy Putny



Obrázek 2.4: Řez CAD modelem HRM kolegy Vítězslava Putny [render autor]

Raketový motor zkonstruovaný Vítězslavem Putnou (obr. 2.4), který sloužil k měření experimentální části, je označován jako MK8. Sestává z měděné trysky (b), která je umístěná v ochranném návleku (a), kterým prochází chladící médium. Ve spalovací komoře (d) se na vizualizaci nachází šestikanálové palivové zrno (e). Ke spalovací komoře je přidělaná dvojice šroubení. První je umístěné kolmo na osu spalovací komory a slouží k připevnění tlakové měrky (c). Druhé, zadní šroubení (g), je využíváno k připojení nádrže s oksyličovadlem a od spalovací komory ho oddaluje jednoduchý injektor (f). Ochranný návlek i zadní šroubení jsou ke spalovací komoře připevněny šesticí šroubů.

2.3.2 Paliva pro HRM

Klíčovým parametrem ovlivňujícím návrh palivových zrn pro HRM je regresní rychlost paliva. Regresní rychlost je veličina definovaná jako rychlost, se kterou se palivo v pevném skupenství mění na plyn. V některých zdrojích se nazývá rychlostí hoření, což je však poněkud nesprávný pojem, neboť k přímému hoření dochází u RM na tuhé palivo. Korektními a užívanými alternativami k tomuto pojmu jsou mj. rychlost pyrolýzy, sublimační rychlost nebo ablační rychlost. K hoření totiž nedochází na povrchu palivového zrna, ale v mezní vrstvě, která se tvoří nad povrchem palivového zrna. [7]

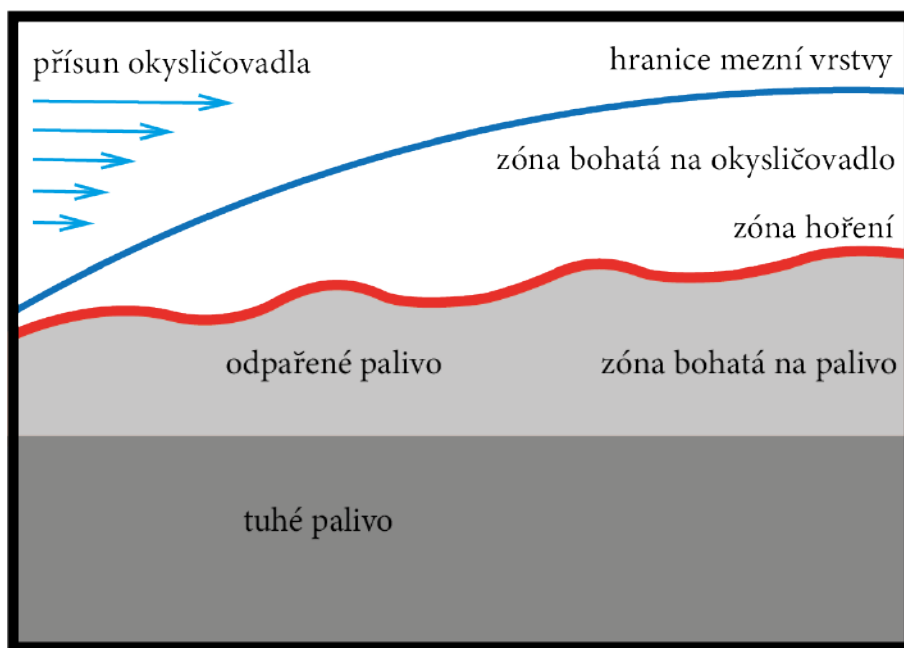
Zajímavým parametrem paliva je i jeho hustota, neboť Ciolkovského rovnice (2.1) dává při určování změny rychlosti do poměru hmotnost rakety před a po provedení manévru. [21]

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_{\text{počáteční}}}{m_{\text{výsledná}}}; \quad (2.1)$$

Vyšší hustota paliva je tedy pro pohyb rakety přínosem.

2.3.2.1 Polymerní paliva

Polymerní paliva jsou konvenčním zástupcem paliv pro hybridní raketové motory. Typickým zástupcem těchto paliv je HTPB, který se užívá například v rodině suborbitálních raketoplánu SpaceShipTwo.[5] Při hoření polymerních paliv (obr. 2.5) dochází k pyrolýze pevného palivového zrna, tedy sublimaci spojené se změnou struktury látky. Paliva patřící do této skupiny se vyznačují snadnou výrobou a dobrou mechanickou odolností. [10][19]



Obrázek 2.5: Mechanismus hoření většiny polymerních paliv [10][úprava autor]

2.3.2.2 Paliva na bázi pryskyřic

Jak již bylo řečeno, významnou veličinou pro návrh palivových zrn je regresní rychlost. V poslední době probíhají experimenty s palivy na základě pryskyřic, které se samy o sobě právě vysokou regresní rychlostí vyznačují. Jejich další nespornou výhodou je možnost při výrobě do paliva přimíchat další aditiva, například

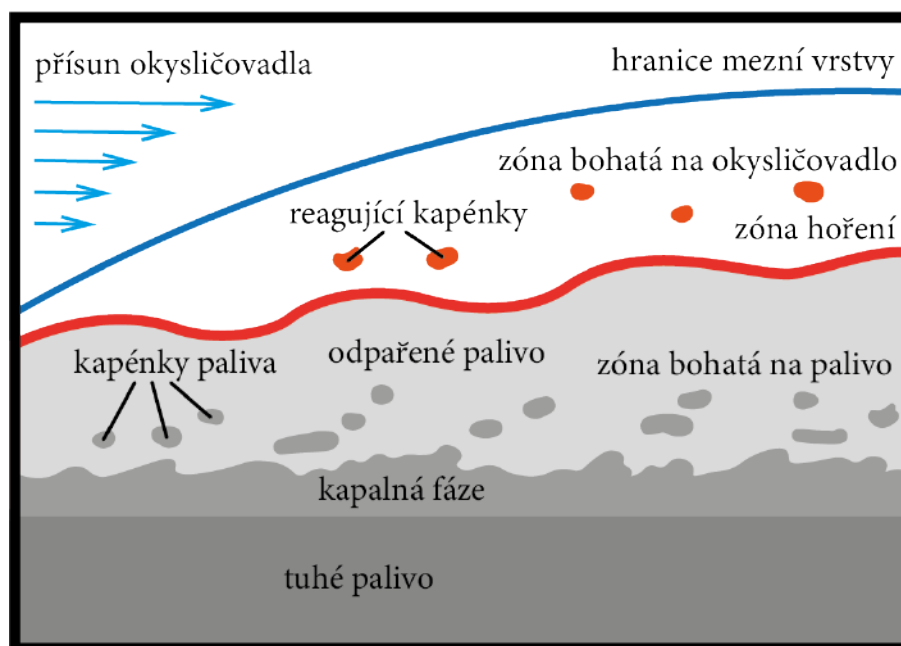
okysličovadla, což může vést ke zvýšení tahu. Vlastnosti těchto paliv lze však ovlivnit už jen poměrem mezi pryskyřicí a tvrdidlem, takže se stejnými složkami, pouze s jiným poměrem, lze dosáhnout odlišných výsledků. [19]

2.3.2.3 Paliva na bázi parafinů

Paliva na bázi parafinů skýtají oproti pryskyřičným a polymerním řadu výhod. Kromě nízké ceny a vysoké regresní rychlosti nabízí zejména netoxičnost a s ní spojenou bezpečnost. Řada výhod je však vykoupena hlavní nevýhodou - křehkostí paliva. Ta může krom potíží při manipulaci způsobit i praskliny v palivovém zrně při procesu tuhnutí. [10]

Parafinová paliva mají mírně odlišný mechanismus hoření oproti polymerním nebo pryskyřičným palivům, jak je zřejmé z obrázku 2.6. V mezní vrstvě nedochází k přímému zplyňování paliva, nýbrž k postupnému přechodu přes kapalnou fázi. Z té se oddělují kapénky, které reagují v zóně bohaté na okysličovadlo. Dochází tedy zároveň k hoření odpařeného paliva i poletujících kapének, což přispívá k vysokým regresním rychlostem. [7]

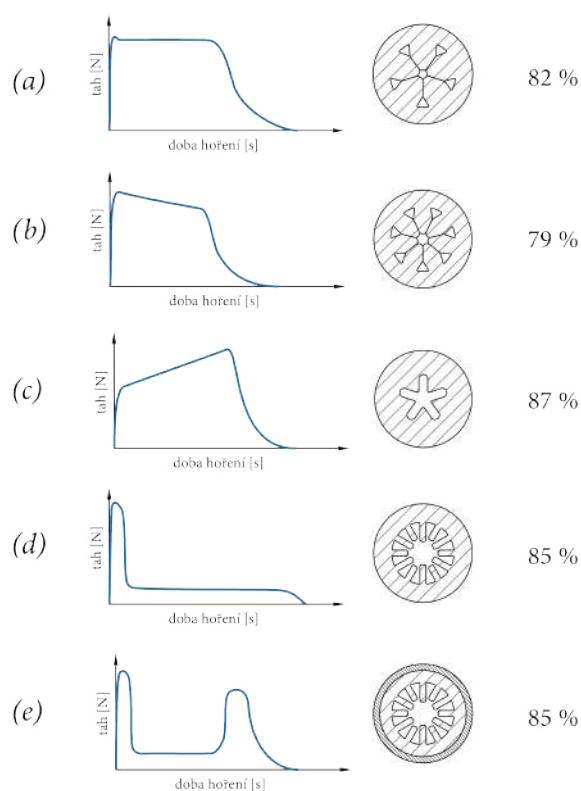
Velmi slibným zástupcem těchto paliv jsou paliva založená na parafinu SASOL 0907. [10]



Obrázek 2.6: Mechanismus hoření nezbedného parafinu [10][úprava autor]

2.3.3 Průřezová charakteristika palivových zrn

U palivových zrn pro HRM a RM na tuhá paliva je průřezová charakteristika určující pro časový průběh tahu. Jelikož obě zmíněné skupiny RM mají velmi omezenou nebo žádnou možnost regulování tahu za chodu motoru, je správný návrh tvaru zrna zásadní pro správný průběh mise. V raketových motorech na tuhá paliva je tím, že zrno obsahuje palivo i okysličovadlo, možné udržet poměr O/F konstantní, a tím udržet i konstantní regresní rychlost paliva. Odhadování časového průběhu tahu je proto u těchto motorů snazší a prověřené, jak je patrné z obrázku 2.7. [4]



Obrázek 2.7: Přehled vlivu počátečního tvaru palivového zrna pro RM na tuhá paliva na průběh tahu s informativní hodnotou prostorového využití spalovací komory. Hustota šrafování roste s regresní rychlostí paliva [4] [úprava autor]

U hybridních raketových motorů ale není O/F poměr konstantní, regresní rychlost se proto mění a takto jednoznačný přehled vlivu tvaru zrna na tah není možné stanovit. Vždy bude kromě tvaru zrna záviset i na objemu okysličovadla v nádrži a tlaku ve spalovací komoře. Všeobecně se však dá říci, že s plochou hoření roste i tah motoru.

3 3D tisk

3D tisk zažívá v posledních letech zásadní boom. Až do roku 2009 držela patent na (mezi amatérskými tiskaři) nejrozšířenější metodu 3D tisku, FDM, americká společnost Stratasys. Po skončení zmiňovaného patentu se 3D tisk, do té doby finančně nákladný a dostupný pouze pro větší firmy, začal rozšiřovat díky větší konkurenci na trhu i mezi laickou veřejností. Velkou zásluhu na tom má projekt RepRap, který představil světu ideu sebereplikujících 3D tiskáren, tedy tiskáren, které tisknou součástky na své klony. Z idey RepRapu vyrostl i jeden z nejznámějších výrobců 3D tiskáren na světě – Prusa Research. V pražských Holešovicích se momentálně nachází tisková farma s několika stovkami tiskáren, které si tisknou své vlastní díly. [12]

Po rozvoji FDM tisku se svého rozletu dočkal i VAT polymerový tisk, například DLP. Metoda, poprvé popsána roku 1987 v současné době těží z rozvoje displejů s vysokým rozlišením. Při DLP tisku se materiál, který je na bázi vytvrditelné pryskyřice, spéká vrstvu po vrstvě většinou UV zářením. K vytvrzování byly zprvu používány projektory emitující světlo správné vlnové délky, které ale v posledních letech mohly být nahrazeny právě LCD displeji vysokého rozlišení. Při MSLA tisku se pak displej používá jako maska, která umožňuje průchod UV světla pouze do míst, kde je zapotřebí. [22]

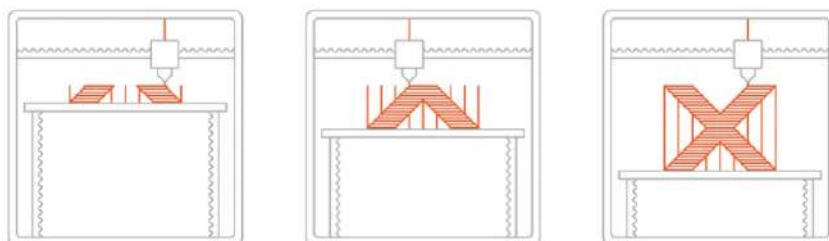
Díky překotnému vývoji elektrických komponent se tiskárny nejen těchto zmíněných metod v posledních letech staly oblíbeným doplňkem dílny nejednoho domácího kutila.

3.1 Druhy 3D tisku

Představíme si hlavní metody 3D tisku, které jsou svou cenou dostupné pro širokou veřejnost a mají potenciál být využité pro potřeby vývoje, validace či chodu studentských hybridních raketových motorů.

3.1.1 FDM/FFF

Fused Deposition Modeling (FDM) neboli Fused Filament Fabrication (FFF) je metoda prostorového tisku s využitím termoplastů. Jedná se o jednu a tu samou metodu, jen samotný název Fused Deposition Modeling si nechala zapatentovat společnost Stratasys, FFF je tedy alternativní označení, které však široká veřejnost příliš nepoužívá.[12] Materiál se v pevném skupenství (nejčastěji formou tiskových strun, poslední dobou se však začíná prosazovat i tisk z granulátu) protlačí vyhřívanou tryskou, ve které dojde k jeho změknutí. Tisková hlava s tryskou se pohybuje, jak je zřetelné na obrázku 3.1, po předem určené trase nad tiskovou podložkou, která zpravidla bývá také vyhřívána, a nechává za sebou stopu v podobě vytlačeného materiálu, který následně opět tuhne, čímž vzniká pevný objekt. Tisková stopa zpravidla sestává ze stěn, jak jsou označovány krajní linie tisku, udávající tvar výrobku, spodních a vrchních vrstev, plnicích stejnou roli jako stěny, pouze v horizontálním směru, a vnitřní výplně. Ta může nabývat mnoha tvarů a je generována automaticky CAM softwarem, označovaným jako slicer. [28]



Obrázek 3.1: Schéma FFF/FDM tisku[28]

Problém této metody v jejím nejrozšířenějším provedení je prostý fakt, že nemá-li tiskárna (jako že většina komerčně dostupných tiskáren nemá, protože na vyhřívání

komory má patent Stratasys[12]) vyhřívanou komoru, ve které k tisku dochází, stihne předchozí vrstva vychladnout pod teplotu skelného přechodu, při které dochází ke změně vnitřní struktury materiálu. Jednotlivé vrstvy výrobku mezi sebou tedy nemají takovou soudržnost, jakou by měl výrobek vyrobený z totožného materiálu alternativní cestou, například odléváním. Zmíněnou anizotropnost výtisků lze minimalizovat například zřízením vytápěné komory, což ale přináší problémy s chlazením tiskové hlavy a krokových motorů. Ty jsou sice řešitelné, ale za vynaložení nemalých finančních prostředků. Alternativou budiž vytvrzování (žihání) již vytištěného modelu, které se dá provést v běžné domácí troubě. Pokud však není prováděno za pomoci formy (například ze dřeva), je třeba počítat s drobnou změnou rozměrů modelu po vytvrzování. Tisk touto metodou je vhodný pro rozměrnější výtisky, u kterých není třeba dosahovat přílišných detailů, orientační hodnoty přesností jsou kromě jiných informací k vidění v tabulce 3.1. Testováním mechanických vlastností FDM/FFF tištěných objektů se ve své bakalářské práci [15] věnoval Bc. Jakub Szekely.[28]

FDM tisk může pro správné vytištění modelu vyžadovat podpěry, což vede k vyšší spotřebě materiálu.

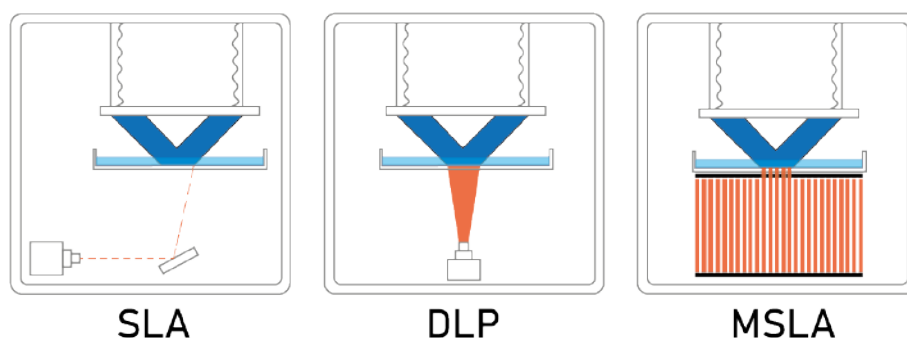
Rozměrová přesnost	$\pm 0.5\%$ (tolerance ± 0.5 mm)
Výška vrstvy	$\approx 0,2$ mm
Výhody	možnost tisku jednoho modelu z více barev či materiálů, vhodné pro rozměrnější výtisky
Nevýhody	vysoké výšky vrstev, při snaze o vysoké detaily nákladnější tisk, než pomocí fotopolymerizačních metod

Tabulka 3.1: Přehled vlastností FFF/FDM tisku

3.1.2 Fotopolymerace

Fotopolymerizace je proces 3D tisku, kde je fotopolymerní pryskyřice (dále, vzhledem k ustálenému označování mezi tiskařskou komunitou, označovaná i jako resin), umístěná v nádobce s průhledným dnem. Pod dnem nebo nad vrchem nádobky se nachází zdroj světla správné vlnové délky, který vytvrzuje pryskyřici, která se

vrství na tiskovou podložku. Neoficiálním standardem mezi tiskárnami tohoto typu je fotopolymerní pryskyřice vytvrditelná UV světlem o vlnové délce 405nm. Nejrozšířenější tři podoby fotopolymerizace jsou stereolitografie (SLA), maskovaná stereolitografie (MSLA) a Digital Light Processing (DLP) (obr 3.2). [28]



Obrázek 3.2: Schéma druhů fotopolymeračního tisku [6][úprava autor]

SLA používá k vytvrzování pryskyřice laserový zdroj světla, jehož paprsek je s pomocí pohyblivého zrcadla dopravován na potřebné lokace. Rozlišení tedy záleží na šířce paprsku. MSLA používá zdroj světla, který osvítl celou tiskovou plochu, v tom mu však brání LCD obrazovka. Ta zprůhlední své pixely vždy jen na potřebných místech, kde má k vytvrzení dojít. Rozlišení tiskárny (tab. 3.2) je závislé na rozlišení maskovací obrazovky. [28]

DLP tisk využívá jako zdroj polymerizačního světla projektor. V poslední době dochází k nahrazování projektoru jakožto zdroje světla LCD obrazovkami, což umožňuje celkové zmenšení rozměrů stroje a jeho zlevnění. Ač jde pouze o nahrazení jednoho zdroje světla obdobným, bývá občas takový typ tisku označován jako LCD tisk. V mé bakalářské práci se ale budu držet souhrnného označení DLP tisk. Rozlišení DLP tisku je pokaždé závislé na rozlišení zdroje světla, ať jím je projektor nebo LCD obrazovka. [28]

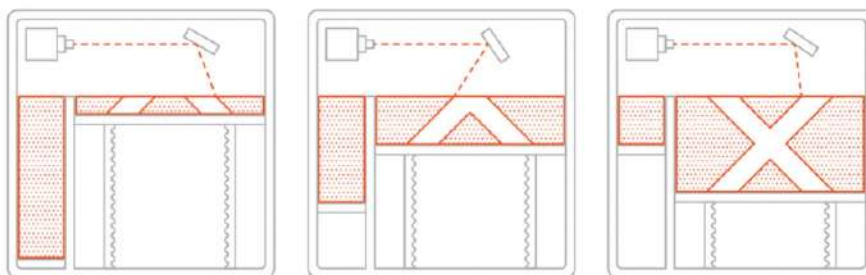
Výhodou MSLA a DLP tisku oproti SLA (ale i FDM/FFF) tisku je rychlost, s jakou nabývá výrobek své výsledné podoby, protože nedochází k tisku po trase paprsku/tiskové hlavy, ale po celých vrstvách najednou.

Rozměrová přesnost	$\pm 0.5\%$ (tolerance ± 0.15 mm)
Výška vrstvy	$\approx 0,02$ mm
Výhody	rozlišení tisku, schopnost dosáhnout vysoké úrovně detailů
Nevýhody	křehkost, nevhodné pro mechanické díly

Tabulka 3.2: Přehled vlastností fotopolymeračního tisku

3.1.3 SLS

Selective Laser Sintering (SLS) je formát aditivní výroby, kde se do tiskové vany nanese tenká vrstva (zpravidla 0,1mm) práškového materiálu přehřátého na teplotu jen o něco málo nižší než je teplota tavení daného materiálu. Na tuto vrstvu začne cíleně mířit laserový paprsek (obr. 3.3), který jednotlivé částice zahřeje, což zajistí spékání sousedních práškových částic k sobě – odtud i název celé metody. Selective Laser Sintering by šlo přeložit jako Selektivní Spékání Laserem. Poté, co laser dokončí svou práci na jedné vrstvě se na tiskovou vanu nanese nová vrstva práškového materiálu a celý proces se opakuje. Nespěčený prach zůstává až do konce celého tiskového běhu na svém místě a až po ukončení tisku se odsává zpět do zásobníku. Během tisku tak nespěčený materiál může sloužit jako podpora pro další vrstvy, což je nespornou výhodou (tab. 3.3) této metody.[28]



Obrázek 3.3: Schéma SLS [28]

Rozměrová přesnost	$\pm 0.3\%$ (tolerance ± 0.3 mm)
Výška vrstvy	$\approx 0,1$ mm
Výhody	vhodné pro mechanicky namáhané a pohyblivé díly, nevyžaduje podpěry, výtečné mechanické vlastnosti
Nevýhody	vysoká cena metody, podobných mechanických vlastností lze dosáhnout FDM/FFF tiskem při správném nastavení

Tabulka 3.3: Přehled vlastností SLS tisku

3.1.4 Porovnání metod 3D tisku

	FDM/FFF	fotopolymerace	SLS
Rozměrová přesnost	$\pm 0.5\%$ (tolerance ± 0.5 mm)	$\pm 0.5\%$ (tolerance ± 0.15 mm)	$\pm 0.3\%$ (tolerance ± 0.3 mm)
Výška vrstvy	$\approx 0,2$ mm	$\approx 0,02$ mm	$\approx 0,1$ mm
Výhody	možnost tisku jednoho modelu z více barev či materiálů, vhodné pro rozměrnější výtisky	rozlišení tisku, schopnost dosáhnout vysoké úrovně detailů	vhodné pro mechanicky namáhané a pohyblivé díly, výtečné mechanické vlastnosti
Nevýhody	vysoké výšky vrstev, při snaze o vysoké detaily nákladnější tisk, než pomocí fotopolymerizačních metod	křehkost, nevhodné pro mechanické díly	vysoká cena metody, podobných mechanických vlastností lze dosáhnout FDM/FFF tiskem při správném nastavení

Tabulka 3.4: Přehled vlastností různých druhů 3D tisku

3.2 Materiály pro 3D tisk

Tato sekce obsahuje popis rozšířených materiálů pro 3D tisk. Zkratky v závorkách za názvy způsobů tisku, ve kterých je možné je využít. Teploty tiskové hlavy a podložky se vztahují k FDM/FFF tisku a jedná se o přibližné hodnoty, zmiňované čistě pro představu čtenáře. Pro teploty tisku nad 240 °C je většinou zapotřebí finančně nákladnější vybavení. Konkrétní teploty tisku se liší výrobce od výrobce.

3.2.1 PLA (FDM/FFF)

PLA (Polylactic acid) je polyester z rostlinných materiálů, který je biologicky rozložitelný. Jedná se o nejjednodušší materiál na tisk s nízkým bodem tání (okolo 175 °C), a tak je právě kvůli svým tiskovým vlastnostem a nízké ceně oblíben zejména mezi začínajícími tiskaři. Zároveň při tisku neuvolňuje toxické výpary. Hodí se zejména k tisku pohledových modelů, tedy objektů, u kterých jde o vzhled, nikoliv o mechanické vlastnosti. Výtisky z PLA není vhodné umísťovat do venkovního prostředí, jelikož není odolný vůči vyšším teplotám (při 60 °C dochází k měknutí materiálu) a UV záření. [1][25]

Základem tohoto materiálu je škrob z kukuřice, cukrové třtiny či řepy. PLA je opravdu recyklovatelným materiálem, jak se dozvíte na propagačních letáčkách takřka všech výrobců filamentu, ovšem pouze v průmyslových kompostárnách, ve kterých teploty šplhají přes 80 °C. Kompostování v domácích podmínkách se nedoporučuje, neboť nejen, že se materiál nerozloží, ale navíc hrozí kontaminace půdy plastovými mikročásticemi. [1][25]

Doporučená teplota trysky: 215 °C první vrstva, 210 °C ostatní vrstvy

Doporučená teplota podložky: 60 °C

3.2.2 ABS (FDM/FFF)

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) je materiál vhodný k technickým aplikacím, například tisku mechanicky namáhaných dílů. Tisk ABS je ovšem zrádný v silném kroucení v průběhu tisku a zejména v uvolňování toxických látek v podobě

výparů. Stále se řadí mezi cenově méně náročné materiály, mimo tiskařskou oblast se ABS používá například k výrobě LEGO kostek nebo výrobě dílů do automobilového průmyslu. Má však nevýraznou odolnost proti UV záření, a proto se nedoporučuje pro venkovní aplikace.[1][25]

Doporučená teplota trysky: 255 °C

Doporučená teplota podložky: 100 °C, větší objekt vyžaduje vyšší teplotu

3.2.3 PETG (FDM/FFF)

PETG (Polyethylene Terephthalate modifikovaný Glykolem) je materiál kombinující většinu výhod PLA a ABS. Nabízí vysokou houževnatost, slušnou tepelnou odolnost a mechanickou pevnost při zachování přívětivé ceny a snadné tisknutelnosti. PETG začíná měknout při cirká 80 °C, vydrží tedy i většinu venkovních aplikací. Jak by název mohl vypovídat, jedná se o materiál příbuzný PET, tedy materiálu nejznámějšího pro výrobu lahví pro uskladnění tekutin. Oproti základnímu PET (který je taktéž tisknutelný, ovšem podstatně obtížněji a bez žádných benefitů) je modifikovaný přidáním glykolu – odtud tedy písmeno G v názvu materiálu. Glykol upravuje vlastnosti PET pro menší křehnutí a snazší tisk. [1][25]

Doporučená teplota trysky: 230 °C první vrstva, 240 °C ostatní vrstvy

Doporučená teplota podložky: 85 °C první vrstva, 90 °C ostatní vrstvy

3.2.4 ASA (FDM/FFF)

ASA (Acrylic Styrene Acrylonitrile) je považován za nástupce ABS a odstraňuje, nebo alespoň zmírňuje většinu jeho nedostatků. V porovnání se svým předchůdcem uvolňuje při tisku méně škodlivých (a zapáchavých) výparů, lépe odolává UV záření, má zvýšenou teplotní odolnost (začíná měknout až při 93 °C) a je nenáročnější na tisk. To vše ho činí ideálním kandidátem pro tisk technických součástí či součástí pro venkovní použití. Výhodnou vlastností ASA je rozpustnost v acetonu, čehož se dá využít k vyhlazování výtisku či zvýšení soudržnosti mezi vrstvami.[25]

Doporučená teplota trysky: 260 °C

Doporučená teplota podložky: První vrstva – 105 °C, ostatní vrstvy – 110 °C.

3.2.5 Nylon (FDM/FFF, SLS)

Nylon (Polyamid) je resistantní materiál využitelný hlavně při tisku mechanicky namáhaných dílů, jakými mohou být i ozubená kola, jelikož nepodléhá tak silné abrazi, jako ostatní materiály. Při správném tisku se vyznačuje skvělou adhezí mezi vrstvami. Nylon má však své silné stránky vyvážené silnými nedostatky. Svou silnou hygroskopičností, tedy schopností pohlcovat vlhkost (až 10 % své hmotnosti během 24 hodin), se činí náročným na skladování, které by mělo probíhat ve vzduchotěsné nádobě se sušícím aparátem nebo pohlcovačem vlhkosti. Mimo to se při tisku silně kroutí, k dostání tedy často nebývá ve své čisté podobě, ale s přidanými sloučeninami, omezujícími kroutivost. Vyrábí se v několika variantách, například PA6 či PA12.[1][25]

Doporučená teplota trysky: 250 °C

Doporučená teplota podložky: 90 °C

3.2.6 PP (FDM/FFF)

PP (Polypropylen) je lehký a houževnatý materiál. Jeho hlavní devizou je ale chemická odolnost, kterou vykazuje vůči zásadám, kyselinám a organickým rozpouštědlům. Navíc je vhodný pro styk s potravinami, cenově se ovšem řadí k náročným materiálům. Mimo to nelze opomenout jeho mizernou přilnavost k tiskové ploše.[25]

Doporučená teplota trysky: 220 °C

Doporučená teplota podložky: 100 °C

3.2.7 Flexibilní materiály (FDM/FFF)

O mechanických vlastnostech flexibilních materiálů vypovídá mnohé už označení jejich kategorie. Tu obvykle dělíme na TPE (Thermoplastic Elastomer) a TPU (Thermoplastic Polyurethane), i když právě ono rozdělení je mírně sporné. Ve své podstatě je totiž TPU jakýmsi podtypem TPE, jak by se dalo odvodit z jejich anglických názvů, neboť polyuretan je elastomer. Kromě názvu se však liší i tvrdostí, což je zásadní parametr – čím tvrdší je flexibilní materiál, tím snáze se tiskne, ovšem je méně flexibilní, a tím jde lehce proti podstatě svého využití.[1][25]

Doporučená teplota trysky: 230 - 245 °C (v závislosti na tvrdosti filamentu a značce).

Doporučená teplota podložky: 60 - 75 °C (v závislosti na velikosti objektu, větší modely obvykle vyžadují vyšší teplotu)

3.2.8 HIPS (FDM/FFF)

HIPS (High Impact Polystyrene) je kaučukem obohacený polystyren. Pro své materiálové vlastnosti snese přirovnání s ABS, má však nižší smrštitivost. Hlavní výhodou tohoto materiálu je rozpustnost v běžně dostupném ředidlu, d-limonenu – hodí se tak zejména pro tisk podpěr složitých struktur modelů tištěných z jiných materiálů. Hotový výtisk se pak jednoduše vloží do lázně z d-limonenu a podpory se rozpustí. [1][25]

Doporučená teplota trysky: 220 °C

Doporučená teplota podložky: 110 °C

3.2.9 Kompozitní materiály (FDM/FFF)

Jako kompozitní se označují filamenty zpravidla na bázi PLA, do kterých je přimíchávaný kovový, dřevěný nebo třeba uhlíkový prášek. Oproti základnímu materiálu, tedy většinou už tak dost nesoudržnému PLA, se vyznačuje horší vzájemnou přilnavostí vrstev a tím pádem i nevalnou mechanickou odolností celého výtisku. Slouží tak prakticky výhradně jako materiál k tisku designových výrobků, kde slouží jako imitace daného materiálu. V posledních letech se rozmáhá i výroba filamentu s elektrickou vodivostí (aditivem bývá uhlík), který však snese jen nižší proudy, nebo feromagnetického filamentu.[1][25]

Doporučená teplota trysky: 190-220 °C (záleží na typu filamentu)

Doporučená teplota podložky: 60 °C

3.2.10 Resiny (SLA, MSLA, DLP)

Kapalné pryskyřice jsou materiály citlivé na světelné vlnění, které je, jedná-li se o správné vlnové délky, zpravidla 405nm, vytvrzuje (dochází k tunutí resinů).

To však na seznam zdrojů vytvrzovacího světla řadí i sluneční záření, což je fakt, který je nutné vzít v úvahu při manipulaci s resiny a obsluhování SLA/MSLA/DLP tiskárny. [25]

Hlavním rozdílem oproti tiskovému materiálu pro FDM/FFF tisk je neexistence různých materiálů. Resinů se sice na trhu nachází několik druhů, jedná se však vždy pouze o ten samý základní materiál, fotopolymerní pryskyřici, který je vylepšován aditivami, ať už sloužícími ke změně vizuálních nebo mechanických vlastností hotového výrobku. [25]

„Resiny jsou obvykle složeny ze tří složek:

1. Jádru resinu (monomery and oligomery)
2. Fotoiniciátory - molekuly reagující na UV světlo, které zahajují proces tuhnutí
3. Aditiva - přísady, které mění barvu a vlastnosti resinu“ [25]

Resiny vytváří nepříjemné výpary, a i při styku s pokožkou mohou způsobit reakci těla. Při práci s nimi je třeba nosit ochranné vybavení a postupovat velice opatrně. [25]

3.3 Možnosti využití 3D tisku pro malé HRM

3.3.1 Tisk palivových zrn

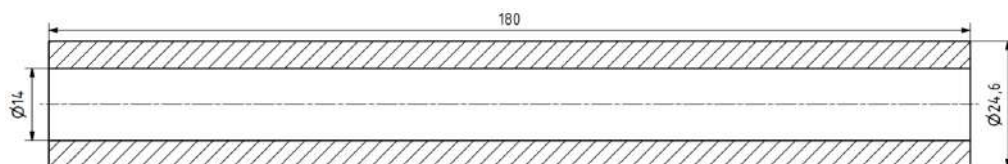
Cílem testování tištěných paliv bylo ověřit, zda jsou 3D tištěná paliva přínosná pro malé hybridní raketové motory a zda dokáží konkurovat konvenčně vyráběným palivům. Každý typ paliva byl zkoušen třemi vzorky. Testování 3D tištěného paliva bylo rozděleno do několika fází:

1. Porovnání 3D tištěných paliv s konvenčně vyráběnými palivy
2. Ověření ovlivnění chodu motoru rozdílnou výškou vrstvy
3. Experimentální testování tvarů zrna
4. Finální test

„Vítěze“ daných částí, tedy materiál/tvar/výška vrstvy určené pro pozdější testování ve fázi 4 určil maximální dosažený tah zjištěný po vyhlazení naměřených dat. Pokud byla maxima naměřená maxima obdobná, rozhodovala o vítězi dané

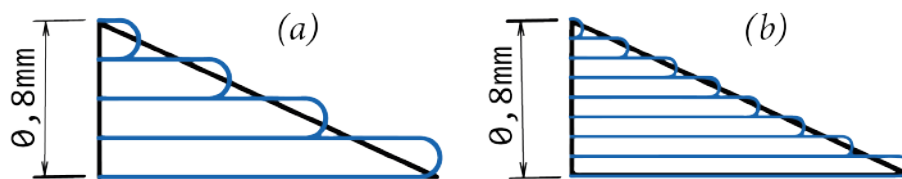
části další kritéria, jako například spalnost, průměrný specifický impuls nebo reprodukovatelnost testů.

V první fázi bylo zkoumáno, nakolik se 3D tištěná paliva mohou měřit s palivy soustruženými z tyčových polotovarů. Pro testy byly na základě práce [9] vybrány materiály PLA, ASA a Nylon pro jejich naměřené regresní rychlosti. Podle uvedené studie se jako nejslibnější jeví ASA, který je těsně následován nylonem. Poměrně překvapivě se ve stejné studii umístilo kompozitní PLA s hliníkovým prachem, který je sám o sobě velice hořlavý a byl uvažován jako přísada do pryskyřičných paliv, až za čistým PLA. Konkrétní typ nylonu ve studii není specifikován, bylo proto rozhodnuto o otestování typů PA6 a PA12. Všechny vzorky byly tištěny se stejnou výškou vrstvy 0,3mm a pro eliminování ovlivňujícího parametru barviva byly tištěny v přirozených barvách daného materiálu (jedinou tvorbu tvořil materiál ASA, který v jiné než černé barvě nebyl dostupný). Z konvenčně vyráběných paliv byly k testování v první fázi vybrány ty vyrobené z materiálu HDPE. Všechny vzorky byly pro nastavení stejných podmínek ve tvaru trubky s rozměry uvedenými na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Rozměry zrna [autor]

Druhá část testování byla zaměřena na významný ovlivňující parametr 3D tištěných výrobků - výšku vrstvy. Jak je patrné z obrázku 3.5, výška vrstvy ovlivňuje výsledný tvar výrobku. Při tisku svislých či pouze mírně nakloněných stěn palivových zrn by však tento parametr nemusel tvořit významný rozdíl v povrchu stěn. Výška vrstvy je přitom nepřímo úměrná času tisku, což může v případě, že se prokáže zanedbatelný vliv výšky vrstvy na tahovou křivku znamenat významnou časovou úsporu při tisku. Pro ověření hypotézy bylo rozhodnuto o otestování vzorků z PLA stejného tvaru jako ve fázi jedna, jen s výškou vrstvy 0,12mm. Ty pak budou porovnány se vzorky PLA z první části.



Obrázek 3.5: Vliv výšky vrstvy na povrch tištěného objektu. Výška vrstvy (a) je 0,2mm, výška vrstvy (b) je 0,1mm. [29][úprava autor]

Faktorem, ovlivňujícím tah motoru, by mohla být i barviva obsažená ve filamentech. Vliv barviv však není obsažen v této závěrečné práci a jeho výzkum by si vyžádal významné finanční a časové zdroje.

Ve třetí části byly zkoumány 3 tvary zrn. Spirála (na obrázku 3.6 vlevo), děrovaná loukoť (uprostřed) a loukoť (vpravo). Tvar zrn byl určen experimentálně s důrazem na maximalizování ploch hoření a demonstraci schopností 3D tisku. Například spirála, vzniklá rotací dvou kružnic o průměru 7 mm okolo osy válce na rameni 5 mm s roztečí 30 mm, nabízí počáteční plochu hoření $10107,05 \text{ mm}^2$. Kdyby zmíněné dvě kružnice nevytvořily tvar zrna šroubovitou rotací, ale prostým přímým pohybem (například by do tyče byly vyvrtány dvě díry), byla by počáteční plocha hoření $7912,81 \text{ mm}^2$. Pouhou změnou trajektorie kružnic tedy došlo k nárůstu plochy hoření o 27 %. Zbylá dvě zrna, loukoť a loukoť děrovaná, byla vytvořena pomocí stejného náčrtku, ale u děrované loukotě došlo k propojení jednotlivých kanálků a tedy zvýšení počáteční plochy hoření. To by dle odhadů mělo vést k rychlejšímu odhoření materiálu a vzniku jediné plochy hoření. Všechny tvary zrn byly navrženy tak, aby se minimalizovalo riziko zhroucení se středových částí do sebe, které by mohlo vést k uspání trysky motoru.



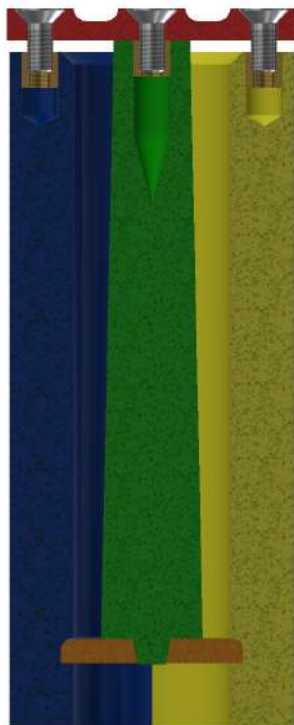
Obrázek 3.6: Průřezy zrn testovaných ve fázi 3 [autor]

Čtvrtá fáze byla vyhrazena pro test jediného typu zrna, vzniklého na základě již

dříve uvedených kritérií z materiálu vybraném ve fázi 1, s výškou vrstvy z fáze 2 a tvarem z fáze 3.

3.3.2 Formy pro odlévání palivových zrn

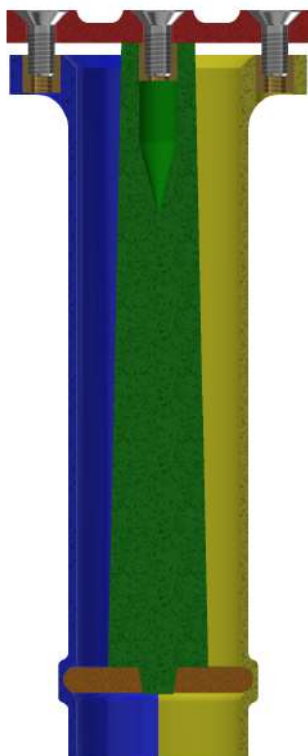
Nepřímou metodou užití 3D tisku k výrobě palivových zrn může být výroba forem pro jejich odlévání. Tento postup je vhodný zejména pro výrobu zrn na základě resinů nebo parafinů. Pro tyto potřeby byla navržena jednoduchá forma (obr. 3.7) pro gravitační odlévání optimalizovaná pro výrobu 3D tiskem. Sestává ze dvou symetrických částí pláště (na vizualizaci zbarvené modře a žlutě), mezi které se vloží dno formy (oranžově) a tato sestava se zafixuje pomocí sady šroubů rozmístěných po celé výšce formy, aby došlo k dokonalému utěsnění spojů. Do obvodové části formy se vloží její jádro (zeleně), které se svým středícím kolíkem zasune do otvoru ve dně formy. Jádro je nakonec zaaretováno proti nežádoucím pohybům pojistnou deskou (červeně). Šroub, kterým je pojistná deska spojena s jádrem, plní středící funkci, není tedy nutné ho příliš utahovat, naopak oba krajní šrouby vyvíjejí přítlak, aby se jádro nevysunulo ze dna formy.



Obrázek 3.7: Řez CAD modelu formy na odlévání palivových zrn [render autor]

Závitová spojení s pojistnou deskou musí být pevná a prostorově nenáročná, bylo proto rozhodnuto o použití tepelně lisovaných závitových vložek. V prostorách, které to umožňovaly, bylo dosaženo spojení pomocí matic zapuštěných do pozičních děr. Jádru formy je, kvůli nutnosti ho z výsledného odlitku vyjmout, kuželovité se sklonem cca $1,5^\circ$. Pro cenovou náročnost i materiálovou odolnost byl vybrán tisk metodou FFF. Vysoká výška vrstvy, dosažitelná touto metodou, nekoresponduje s nutností dokonale hladkých stěn formy, jinak by hrozilo např. zaseknutí jádra formy v již hotovém odlitku. Volba materiálu tedy musí vzít v potaz i jeho schopnost projít post processingem. V úvahu připadají zejména materiály vyhladitelné rozpouštědly, jako například ABS (aceton), PETG (toluen) nebo ASA (toluen). Alternativně je možné pro jádro formy, které vyžaduje hladkost ze všech součástí formy nejvíce, zvolit jiný typ tisku. V úvahu připadá SLS nebo DLP tisk. Obě metody mají výrazně nižší výšku vrstvy, než FFF tisk. Před odléváním musí být na vnitřní stranu formy aplikován separátor, tedy látka, která usnadní vyjmutí odlitku, ideálně doporučený výrobcem odlévané látky. Výrobce pryskyřice k odlévání též vydává doporučení k maximální výšce vrstvy odlévané najednou. Zrno nemůže být vzhledem k potřebě kuželovitosti jádra formy odléváno vcelku, forma má tedy pouze poloviční výšku, než jakou má mít finální palivové zrno, a tak se celý proces odlévání musí dělat nadvakrát.

Vytvrzování pryskyřice je exotermická reakce, při níž je množství uvolněného tepla závislé na poměru pryskyřice s vytvrzovadlem. Pryskyřičná směs se, pokud dojde k dodržení všech postupů doporučených výrobcem, odlévá za teploty přibližně odpovídající teplotě samotné pryskyřice před smísením s vytvrzovadlem, konstantně však dochází k zahřívání tuhnoucí hmoty. [13] Zpětně proto muselo dojít k optimalizaci tvaru formy (3.8) pro účely odlévání pryskyřice, aby se mohla forma při odlévání umístit do chladícího média, ve kterém by k vytvrzování docházelo. Optimalizace spočívala v odebrání materiálu z vnějších částí pláště, aby došlo k eliminaci výplňového (a tedy vzduchu plného) prostoru mezi vnitřní a vnější stěnou výtisku.



Obrázek 3.8: Řez CAD modelu formy na odlévání palivových zrn po odlehčení [render autor]

Pro dosažení optimálních vlastností palivových zrn založených na parafinech je však nutné materiál před odléváním zahřát na poměrně vysokou teplotu, při které je pak i odléván. Například pro parafin SASOL 0907 byla zjištěna optimální teplota 110°C, na kterou musel být zahřátý po dobu 20 minut, než došlo k úplnému rozpuštění všech granulí parafinu. [10] Vzhledem k tomu, že PETG začíná měknout při 80 °C, nebylo by zcela vhodné zatěžovat z něj vytištěnou formu vyplněním materiálem, který tuto hranici o pár desítek °C překračuje. Řešením daného problému by mohlo být vytištění požadovaného tvaru zrna (patričné výšky, i u této metody musíme, z obdobných důvodů jako u tištěné formy, sáhnout k rozdělenému zrn) a z něj vytvořit silikonový negativ. Ten poslouží pro pozdější odlévání. Silikon má výbornou teplotní i mechanickou odolnost, proto by z něj vyrobená forma měla ustát i opakované odlévání zrna bez závažné deformace.

3.3.3 Výztuhy pro parafinová palivová zrna

Paliva založená na parafinech mají obří potenciál díky své vysoké regresní rychlosti. Trpí však na křehkost, která vede k nutnosti extrémní opatrnosti při manipulaci s nimi, aby zrna nedošla poškození. Již od prvních výzkumů jejich možného využití přichází výzkumníci s možnostmi vyztužení hotového palivového zrna. Ze slibných metod zmiňme zejména výztuhu jutovou tkaninou nebo 3D tištěnou strukturou. [17] [3]

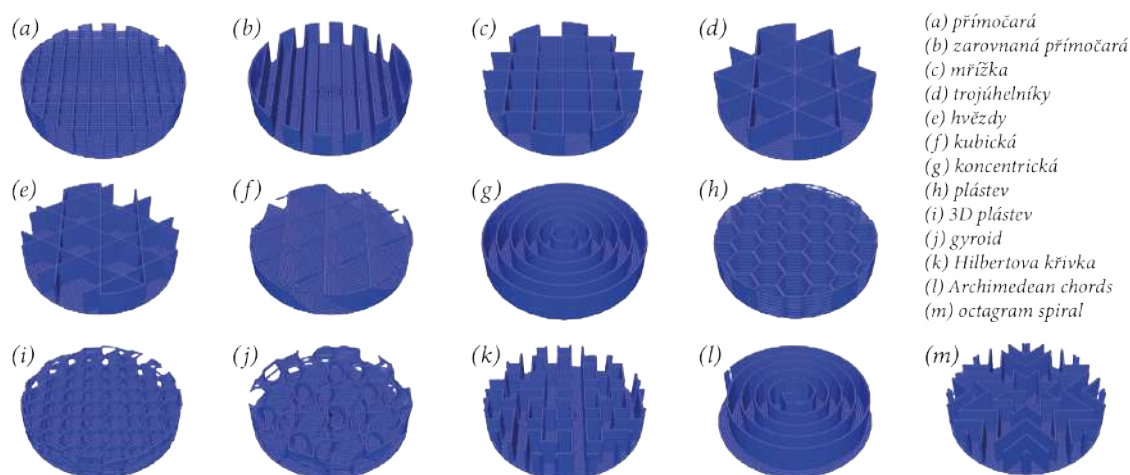
Jutová textilie vyniká nízkou plošnou hustotou $270 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ a vysokou nasákavostí. Ověřený postup výroby počítá s nasáknutím jutové textilie rozehrátým voskem a následným omotáním nasáklé textilie okolo hliníkové trubky, která má vnější průměr totožný s požadovaným vnitřním průměrem palivového zrna. Počet omotání trubky pak určuje vnější průměr palivového zrna. [17]

Využití jutové textilie má nespornou výhodu ve své materiálové nenáročnosti, protože k výrobě zpevněného zrna je zapotřebí pouze běžně dostupných materiálů. Tady ale výčet výhod zmíněné metody končí. Na opačnou miskou vah musíme položit náročnou manipulaci, kdy je třeba omotávat ještě ne zcela ztvrdlou (a tím pádem ne zcela vychladlou) kompozitní strukturu okolo tyče, jistou neexaktnost při určování vnějšího průměru palivového zrna, nemožnost výroby složitějších vnitřních tvarů zrna a v neposlední řadě je nutné nezapomínat, že v radiálním směru nedošlo v palivovém zrnu k takřka žádnému zpevnění. Všechny zmiňované nedostatky při použití jutové tkaniny jako výztuhy řeší aplikování 3D tištěné struktury pro zpevnění zrna.

Nejjednodušší tvorba 3D tištěné výztuhy paliva vede přes vymodelování požadovaného tvaru zrna, jeho vložení do CAM software, nastavení počtu stěn, spodních i vrchních vrstev na nulu a zvolení správného typu výplně. Tím dojde k tisku pouze výplňové struktury v hranicích požadovaného tvaru. Typ výplně je nutné volit podle několika parametrů:

1. musí měnit svou strukturu ve všech 3 osách
2. musí umožnit parafinu zatéct do všech požadovaných prostor
3. musí dosahovat co nejvyšší měrné pevnosti

Používaný CAM software, PrusaSlicer 2.3.0, je založený na programu SLic3r a nabízí tak stejné druhy výplně, jako jsou uvedené na obr. 3.9.



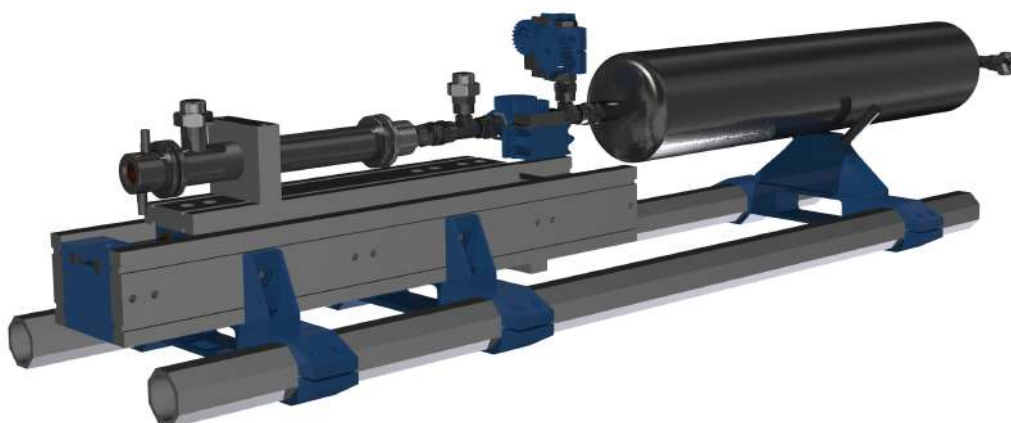
Obrázek 3.9: Typy výplně v CAM programu SLIC3R [23] [úpravy autor, Bc. Marek Hais]

Všechna tři kritéria splňuje nejlépe výplň (j) označovaná jako gyroid. [3] [15] Alternativou k užívání generovatelné výplně by bylo přímé modelování struktury, které by umožnilo mít větší kontrolu nad výsledným tvarem.

Takto připravenou výztuž lze umístit do silikonové formy ze sekce 3.3.2 s aplikovaným separátorem a zalít parafinem.

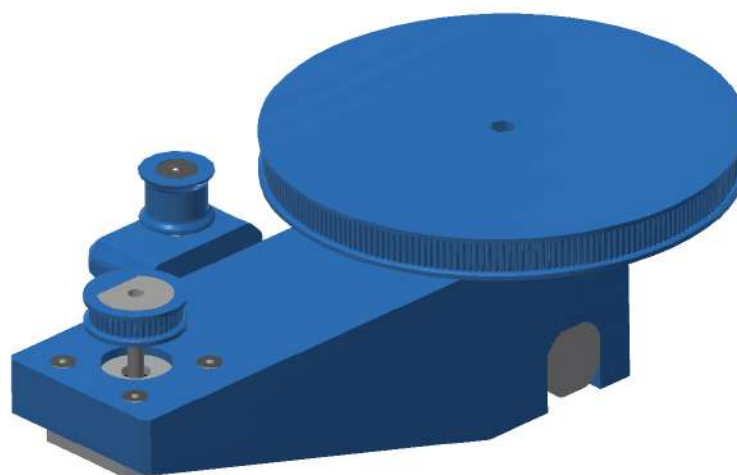
3.3.4 Nepřímé využití

Přínos 3D tisku pro výrobu palivových zrn není jediným možným využitím aditivní výroby v dané oblasti. Validace motoru MK8 proběhla na testovacím stanovišti (3.10) navrženém v kooperaci s Vítězslavem Putnou. Jako základ posloužilo několik typů hliníkových profilů, které byly ve funkční celek spojeny na míru navrženými 3D tištěnými součástkami (na vizualizacích modře). Aditivní výrobou stvořené součástky byly použity taktéž k upevnění měřicího tenzometru.



Obrázek 3.10: Model testovacího lože [render autor]

Všechny ventily na trase vedení okysličovačla byly vybaveny armaturou, která umožňovala ovládání ventilů na dálku. Každý ventil, který je součástí RM, byl napojen přes ozubený převod, sloužící ke zvýšení krouticího momentu motoru, na servomotor. Hlavní ventil (obr. 3.11) umístěný u tlakové lahve, ze které byla plněna nádrž RM, nebyl ovládán pomocí ozubených kol, ale pomocí řemenic typu GT2. Po trase vedení řemene byla umístěna napínací kladka pro zajištění správného chodu systému. Vzdálené ovládání podstatně zvyšuje bezpečnost celého testovacího procesu.



Obrázek 3.11: Soustava hlavního ventilu s krokovým motorem a řemenicemi [render autor]

Díky užití technologie FDM tisku bylo možné rychle provádět úpravy na testovacím stanovišti a pracovat tak na vylepšování testovacího stanoviště a jeho bezpečnosti s minimálními finančními náklady a významnou časovou úsporou.

4 Experimentální část

4.1 3D tištěná paliva

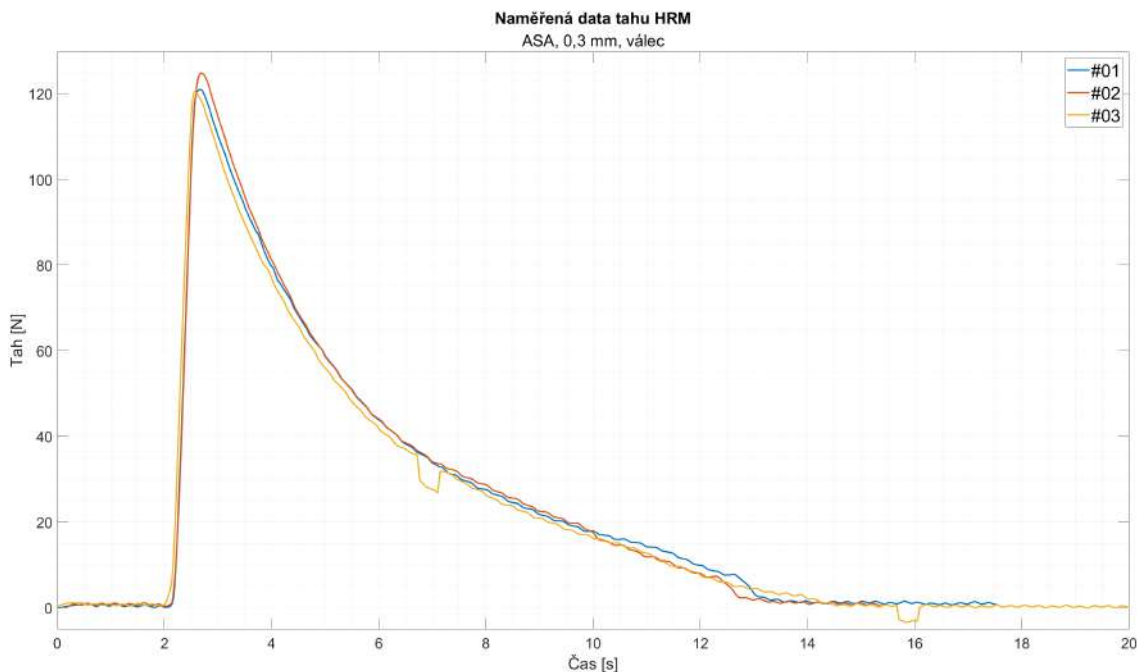
Pro každý typ palivového zrna byly kvůli získání statistického vzorku otestovány tři totožné vzorky. Při jednotlivých testech byla snaha o dodržení totožných podmínek. Počátek testů byl identický. Do spalovací komory byl z bezpečnostních důvodů puštěn předfuk kyslíku, po časovém odkladu byl přiveden proud do zápalnice, která byla umístěna u injektoru ve zbytcích základního materiálu paliva (většinou kusů filamentu), což vedlo k jejímu zažehnutí. Toto umístění bylo nezbytné zejména při testování zrn komplexních geometrií, neboť zajišťovalo zažehnutí všech kanálů. Po ukončení testu a vychladnutí motoru došlo k odšroubování trysky a inspekci trysky i spalovací komory, případně k sesbírání zbytků paliva.

Pro všechny testovací vzorky platí, že uváděné hodnoty hmotností, a tudíž i spalností, je nutné brát s rezervou. Při současné konfiguraci a umístění testovacího stanoviště není možné spolehlivě nalézt veškeré zbytky po zkušebním běhu motoru, a proto jsou zejména hodnoty hmotností po testu silně orientační.

Pro potřeby vizuálního porovnávání výkonů různých typů materiálů, výšek vrstvy či tvarů zrn bylo využito reprezentativních vzorků daných zrn k vytvoření křivek trendů tahových charakteristik příslušných typů zrn. Číselné hodnoty, které jsou vzájemně porovnávány, jsou pak čistým aritmetickým průměrem daných hodnot jednotlivých typů zrn.

4.1.1 Fáze 1 - Konvenční vs aditivní výroba

4.1.1.1 ASA



Obrázek 4.1: Průběh testů zrn z materiálu ASA [graf autor]

Vzorky z materiálu ASA věrně kopírují své časové průběhy tahu (obr. 4.1). Zuby u zrna č. 3 jsou čistě chybou měřící aparatury.

#	$m_p[g]$	$m_k[g]$	$\nu[\%]$	$p_0[MPa]$	$F_{MAX}[N]$	$I_S[N \cdot s \cdot kg^{-1}]$
01	57.2	0.8	98.60	4.7	120.97	1439.18
02	57.0	1.1	98.07	4.9	124.76	1435.15
03	57.1	0.9	98.42	4.8	120.61	1388.83
$\bar{\#}$	57.10	0.93	98.37	4.8	122.11	1421.05

Tabulka 4.1: Parametry vzorků ASA, 0,3 mm, válec

Vzorky z materiálu ASA se vyznačují (tab. 4.1) vynikající spalností. Při testování dokonce všechny zbytky po hoření opustily prostor spalovací komory, čímž by dle Ciolkovského rovnice (2.1) přispěly k zvýšení přírůstku rychlosti, jednalo-li by se o pohyb rakety ve vesmíru.

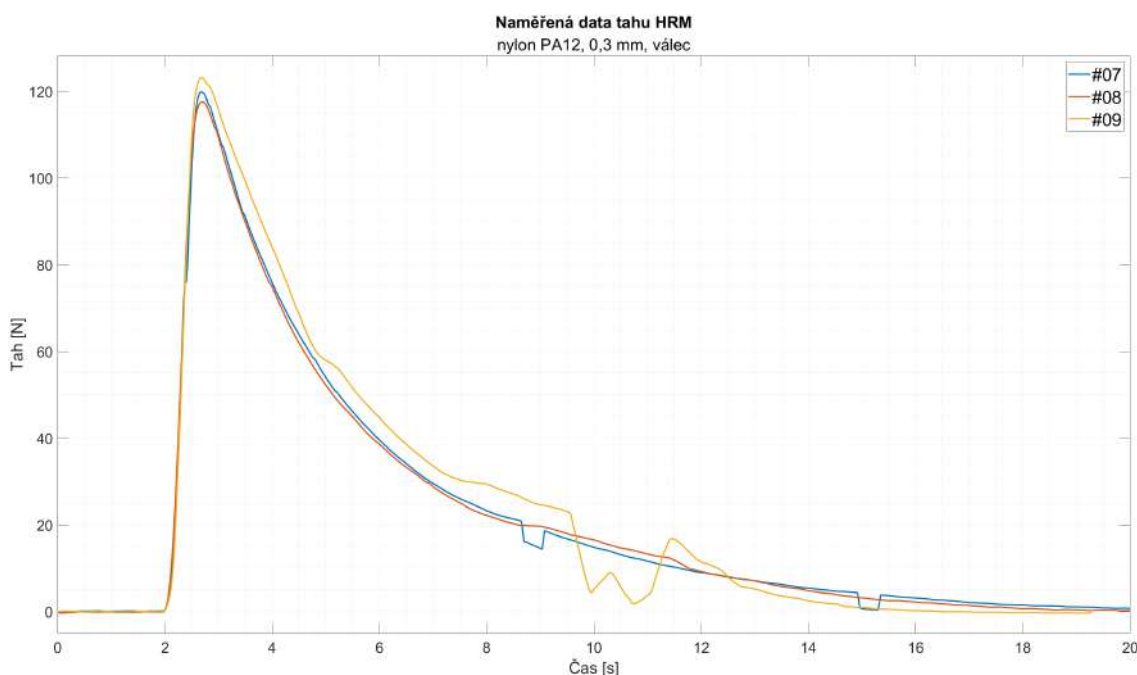
4.1.1.2 Nylon PA6



Obrázek 4.2: Průběh testu zrna #06 [koláž autor]

Po testu prvního vzorku (#06) z nylonu PA6 bylo vzhledem k destrukci motoru rozhodnuto o vyřazení tohoto materiálu z dalšího testování. Původní hypotéza přikládala prohoření tlakové měrky materiálovým vlastnostem. Vzorky z nylonu PA6 musely být kvůli tisknutelnosti tištěny z materiálu s příměsí snižující krouživost materiálu při tisku. Složení této přísady však výrobce neuvádí, není tedy možné určit její vliv na hoření materiálu. Po zpětné analýze dat z měření časově předcházejícímu testování materiálu ASA však není možné vyloučit ani chybu měřicí aparatury. Data z tlakové měrky u trysky totiž vykazují stupňující se nepřesnost měření, pravděpodobně tedy došlo k její postupné degradaci vedoucí až k jejímu zničení. Tlakové měrka se uvolnila ze svého šroubení, čímž došlo k otevření kanálu pro průchod plamene.

4.1.1.3 Nylon PA12



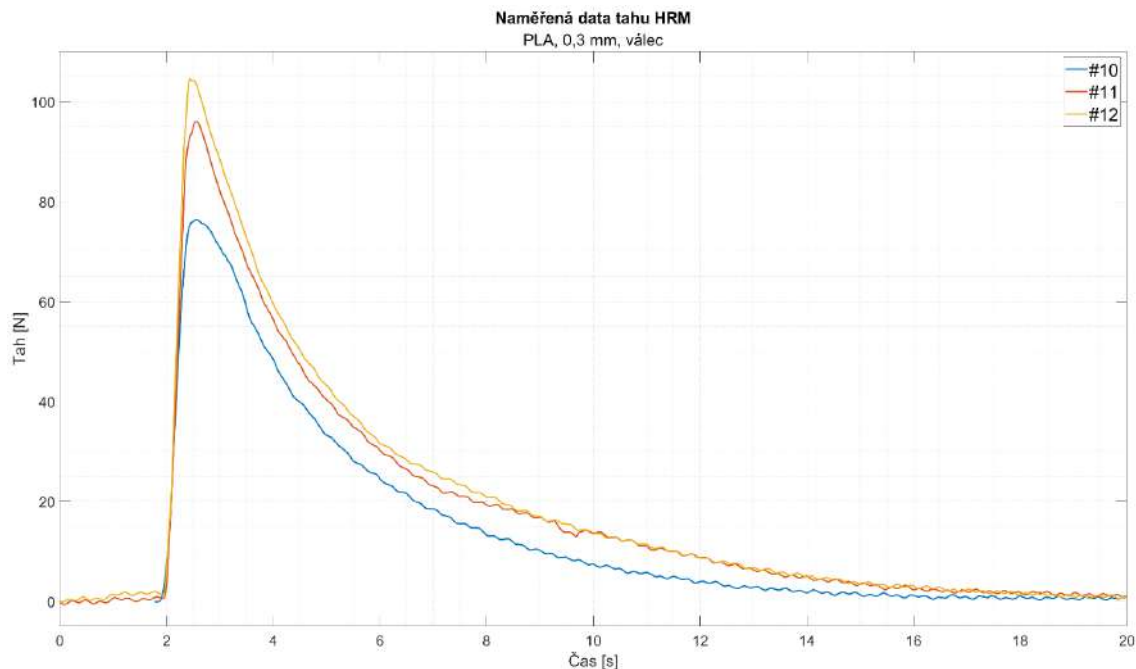
Obrázek 4.3: Průběh testů zrn z materiálu nylon PA12 [graf autor]

Zatímco zrna 7 a 8 vykazují (obr. 4.3) podobně hladký průběh testu (zuby u vzorku 7 jsou způsobeny chybou měřicí aparatury), vzorek č. 9 vykazuje ve svém chování odchylky od trendu tohoto typu vzorků. Přibližně v páté vteřině testu je možné vidět, že tahová křivka tohoto zrna na krátký okamžik zpomalila svůj pokles, což má za následek "odskočení" této křivky od zbylých. Je možné, že toto chování bude souviset s vyšším počátečním tlakem v nádrži s okysličovadlem, jak je k vidění v tabulce 4.2. Alternativním vysvětlením je chyba v tenzometrickém článku. V okolí desáté sekundy od počátku zážehové sekvence došlo k dvojímu přicpání trysky, což objasňuje propady tahu v daném čase.

#	m_p [g]	m_k [g]	ν [%]	p_0 [MPa]	F_{MAX} [N]	I_S [N · s · kg ⁻¹]
07	52.4	7.6	85.50	5.1	119.88	1455.14
08	52.6	3.3	93.73	5.0	117.60	1410.44
09	52.6	4.3	91.83	5.4	123.16	1490.95
$\bar{\#}$	52.53	5.07	90.35	5.2	120.22	1452.18

Tabulka 4.2: Parametry vzorků nylon PA12, 0,3 mm, válec

4.1.1.4 PLA



Obrázek 4.4: Průběh testů zrn z materiálu PLA [graf autor]

#	$m_p[g]$	$m_k[g]$	$\nu[\%]$	$p_0[MPa]$	$F_{MAX}[N]$	$I_S[N \cdot s \cdot kg^{-1}]$
10	68.4	29.1	57.46	4.9	76.41	939.77
11	68.5	13.9	79.71	4.7	96.05	1178.73
12	68.4	12.8	81.29	5.1	104.62	1246.30
$\bar{\#}$	68.43	18.60	72.82	4.9	92.36	1121.60

Tabulka 4.3: Parametry vzorků PLA, 0,3 mm, váleček

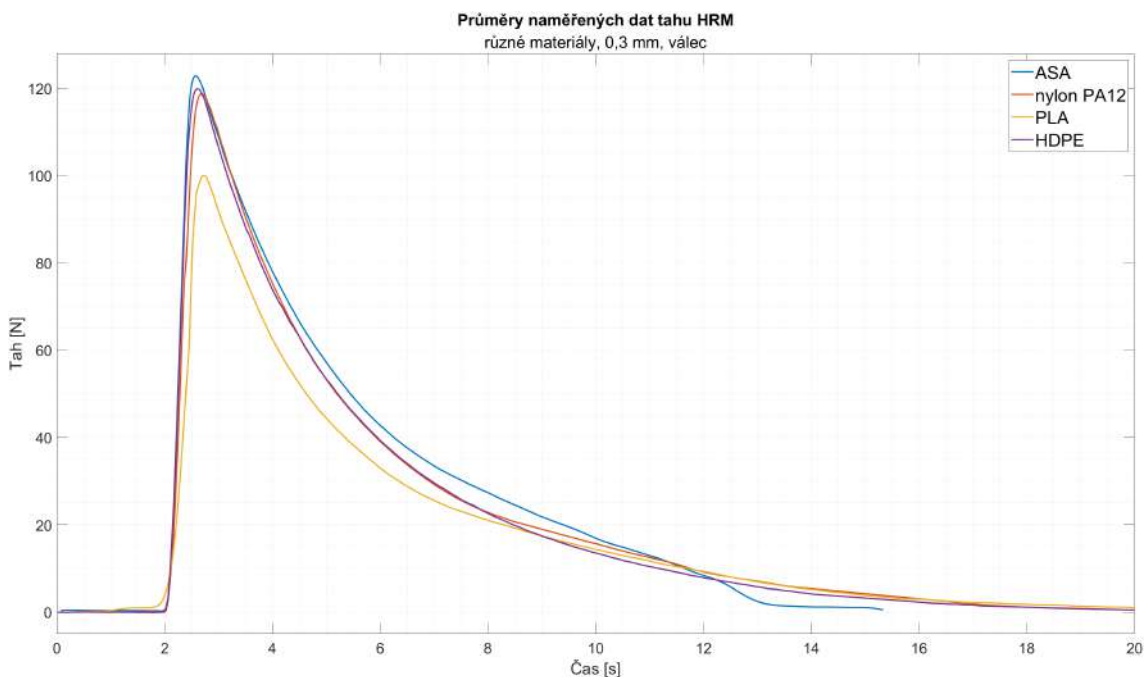
Všechny 3 vzorky tohoto typu zrna sdílí stejný trend tahové křivky (obr. 4.4), pouze u zrna č. 10 tahová křivka nedosahuje obdobných hodnot, jako u ostatních zrn. Toto zrno neprohořelo až ke krajům, ale zachovalo si celistvost vnějšího povrchu, což se odráží i na nízké spalnosti konkrétního vzorku (tab. 4.3). Je možné, že došlo ke zborcení zrna a přiškrcení průchodu oksylichovadla.

4.1.1.5 HDPE

Vzorky HDPE, použité pro porovnání aditivní a konvenční výroby, otestoval v rámci své práce "Vývoj a validace hybridního raketového motoru" kolega Vítězslav Putna. Jelikož nejsou předmětem mé práce, neuvádím jejich konkrétní parametry či tahové křivky, které jsou k dohledání v [11], sekce 4.2.

Průměrné parametry a graf trendu chování tohoto vzorku jsou ke zhlédnutí v tabulce 4.7 a na obrázku 4.5.

4.1.1.6 Zhodnocení



Obrázek 4.5: Trendy tahových křivek vzorků z fáze 1 [graf autor]

Z výše uvedeného grafu 4.5 je zřejmé, že si jsou materiály ASA, nylon PA12 a HDPE svým chováním velice podobné. PLA oproti ostatním materiálům dosahuje zhruba třičtvrtinových výkonů.

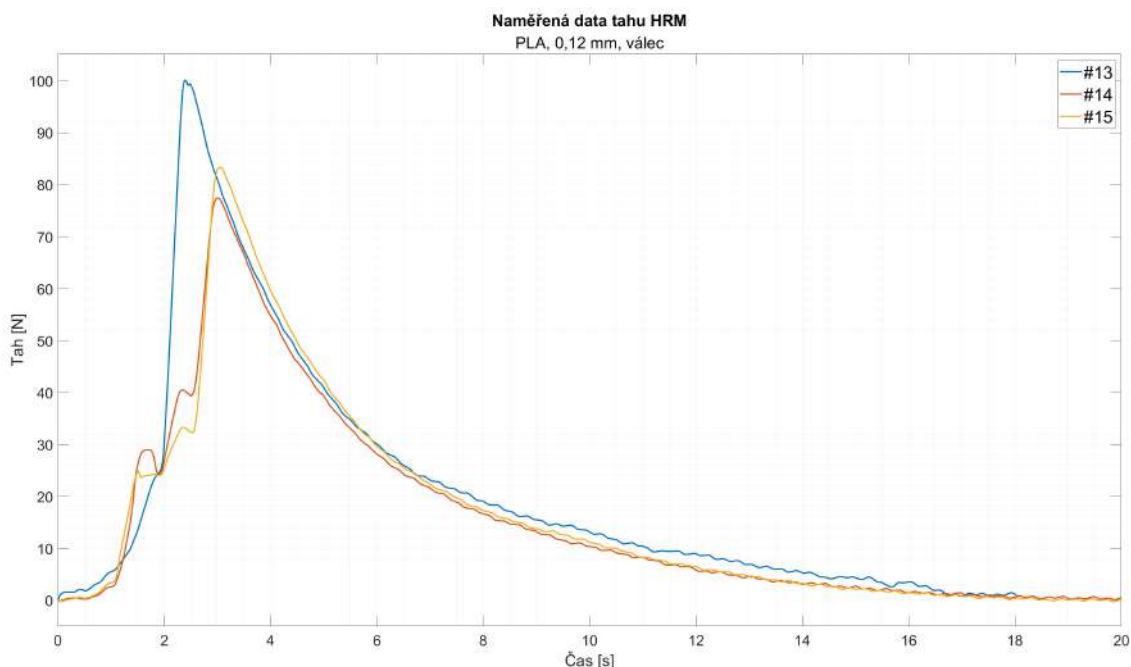
materiál	$\overline{m_p}[g]$	$\overline{m_k}[g]$	$\overline{v}[\%]$	$\overline{p_0}[MPa]$	$\overline{F_{MAX}}[N]$	$\overline{I_S}[N \cdot s \cdot kg^{-1}]$
ASA	57.10	0.93	98.37	4.8	122.11	1421.05
nylon PA12	52.53	5.07	90.35	5.2	120.22	1452.18
PLA	68.43	18.60	72.82	4.9	92.36	1121.60
HDPE	53.01	16.51	68.85	5.1	119.63	1475.09

Tabulka 4.4: Průměrné parametry první fáze

Za vítěze první fáze byl určen materiál ASA. Má sice drobně nižší průměrný specifický impuls (tab. 4.4), než nylon PA12, disponuje ale vyšším průměrným maximem tahu a spalností. Testy vzorků z ASA navíc prokázaly vysokou míru reprodukovatelnosti.

4.1.2 Fáze 2 - Ovlivňující parametry

4.1.2.1 Výška vrstvy 0,12mm



Obrázek 4.6: Průběh testů zrn o výšce vrstvy 0,12 mm [graf autor]

Tento typ zrna má nízkou reprodukovatelnost a nepředvídatelnost ve svém chování (obr. 4.6). Zrna 14 a 15 mají podobnou tahovou křivku, jejíž náběh ale nemá opod-

statnění ve tvaru zrna. Zatímco zrno 13 zanechalo roztavené zbytky, což vedlo k jeho nadprůměrné spalnosti (tab. 4.5), čísla 14 a 15 vykazují známky zrna zborceného do sebe, obdobně, jako zrno 10 (PLA, 0,3 mm, válec).

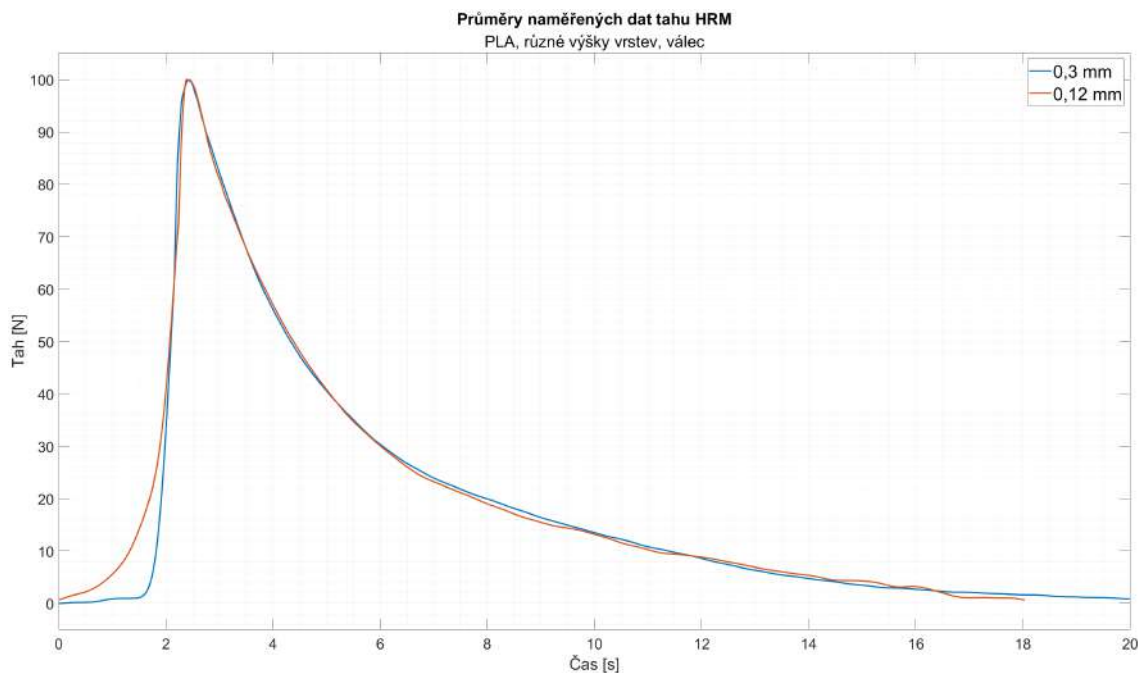
#	$m_p[g]$	$m_k[g]$	$\nu[\%]$	$p_0[MPa]$	$F_{MAX}[N]$	$I_S[N \cdot s \cdot kg^{-1}]$
13	69.7	13.8	80.20	5.0	100.16	1222.50
14	69.4	18.8	72.91	5.0	77.41	1047.32
15	69.6	15.2	78.16	4.7	83.36	1064.16
$\bar{\#}$	69.57	15.93	77.09	4.9	86.97	1111.33

Tabulka 4.5: Parametry vzorků PLA, 0,12 mm, válec

4.1.2.2 Výška vrstvy 0.3mm

K porovnání výšek vrstvy byla za výšku vrstvy vybrána již testovaná zrna 10-12, jejichž naměřené hodnoty je možné vidět v sekci 4.1.1.4.

4.1.2.3 Zhodnocení



Obrázek 4.7: Trendy tahových křivek vzorků z fáze 2 [graf autor]

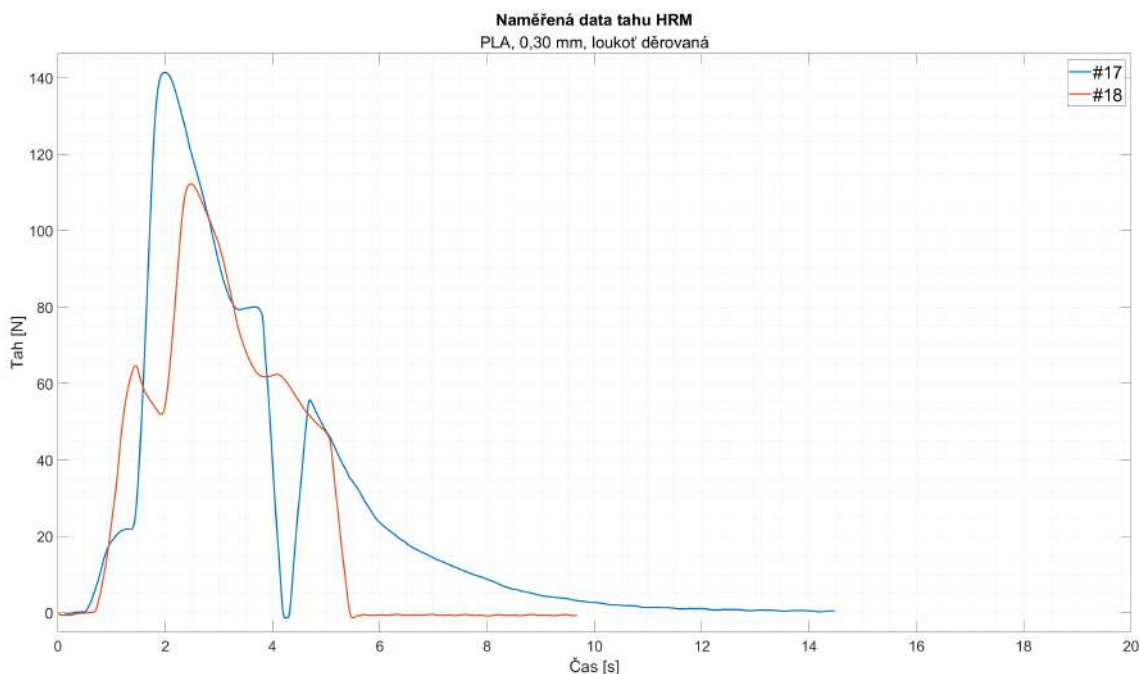
Trendy tahových křivek (obr. 4.7) pro různé výšky vrstev vypadají takřka totožně. I na základě následující tabulky 4.6 je zřejmé, že výška vrstvy není výrazným ovlivňujícím faktorem, pokud jde o tah raketového motoru. Naopak průměrný výrobní čas pro výšku vrstvy 0,12 mm je 2.43násobný oproti výšce vrstvy 0,3 mm. Je tedy zbytečné investovat strojový čas do tisku nižší výšky vrstvy, jelikož neposkytuje žádnou markantní výhodu.

výška vrstvy	$\overline{m_p}[g]$	$\overline{m_k}[g]$	$\overline{v}[\%]$	$\overline{p_0}[MPa]$	$\overline{F_{MAX}}[N]$	$\overline{I_S}[N \cdot s \cdot kg^{-1}]$	$\overline{t_t}[s]$
0.3 mm	68.43	18.60	72.82	4.9	92.36	1121.60	223.67
0,12 mm	69.57	15.93	77.09	4.8	86.97	1111.33	542.67

Tabulka 4.6: Průměrné parametry druhé fáze

4.1.3 Fáze 3 - Tvar zrna

4.1.3.1 Loukoť Děrovaná



Obrázek 4.8: Průběh testů zrn tvaru loukoť děrovaná [graf autor]

Vinou chyby programu MATLAB nebyla uložena data vzorku č. 16. Tahové křivky zrn 17 a 18 (obr. 4.8) neukazují na dobrou reprodukovatelnost, lze na nich

však pozorovat vliv tvaru zrna, který způsobuje jistou schodovitost. U obou vzorků došlo k ucpání trysky. U zrna 17 šlo o dočasné ucpání chvíli po 4. sekundě, u zrna 18 se jednalo o definitivní ucpání.

#	$m_p[g]$	$m_k[g]$	$\nu[\%]$	$p_0[MPa]$	$F_{MAX}[N]$	$I_S[N \cdot s \cdot kg^{-1}]$
16	68.3	2.1	96.93	N/A	N/A	N/A
17	68.1	2.5	96.33	4.9	141.34	1177.16
18	67.5	2.5	96.30	4.8	112.16	913.61
$\overline{\#}$	67.97	2.37	96.52	4.85	126.75	1045.38

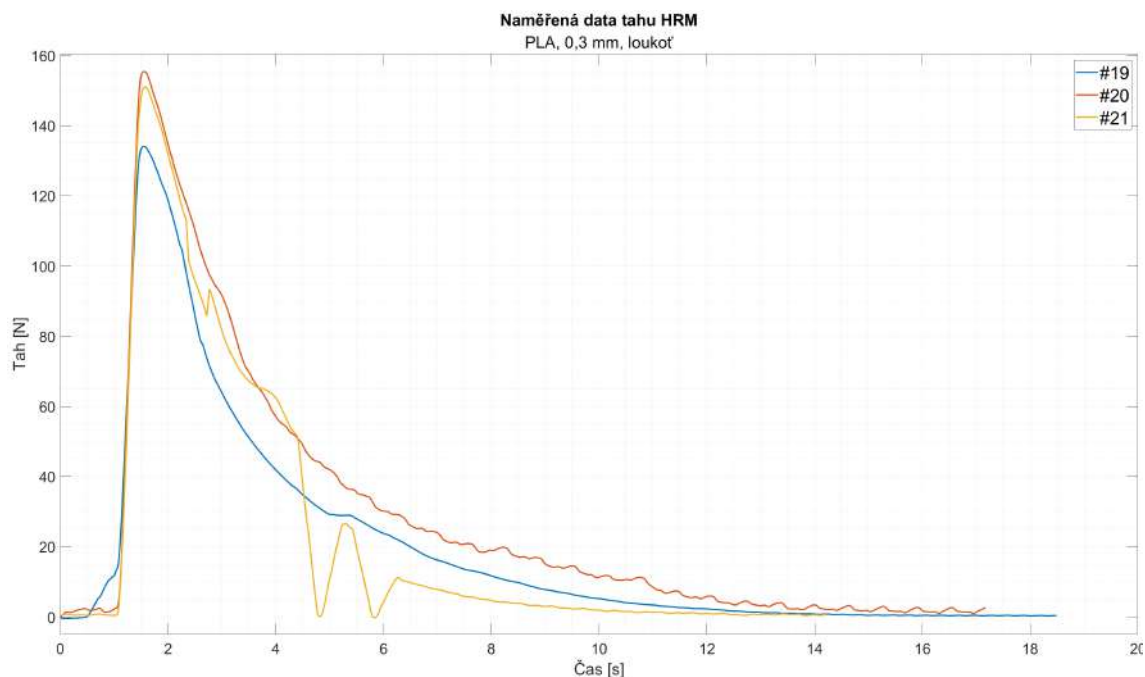
Tabulka 4.7: Parametry vzorků PLA, 0,3 mm, loukoť děrovaná

Zrna tohoto tvaru vykazují (tab. 4.7) papírově vysokou spalnost, její reálné hodnoty ale budou o něco nižší. Jak je patrné z následující fotografie, test tohoto typu zrna zanechává residua materiálu v širokém okolí trysky, je tedy pravděpodobné, že k pozdější analýze nebyly sesbírané veškeré pozůstatky.



Obrázek 4.9: Zanesení trysky po testu zrna 17 [foto autor]

4.1.3.2 Loukoť



Obrázek 4.10: Průběh testů zrn tvaru loukoť [graf autor]

Vzorky tohoto tvaru zrna vykazují shodný trend tahové křivky (obr. 4.10), jen u zrna č. 19 nedosahuje tak vysokých hodnot. To může být způsobeno výrazně nižším (tab. 4.8) počátečním tlakem v nádrži na oksličovadlo. U vzorku 21 došlo po čtvrté sekundě v krátkém sledu k dvojímu krátkodobému ucpání trysky. Jiné propady tahových křivek jsou čistě chybou měřící aparatury.

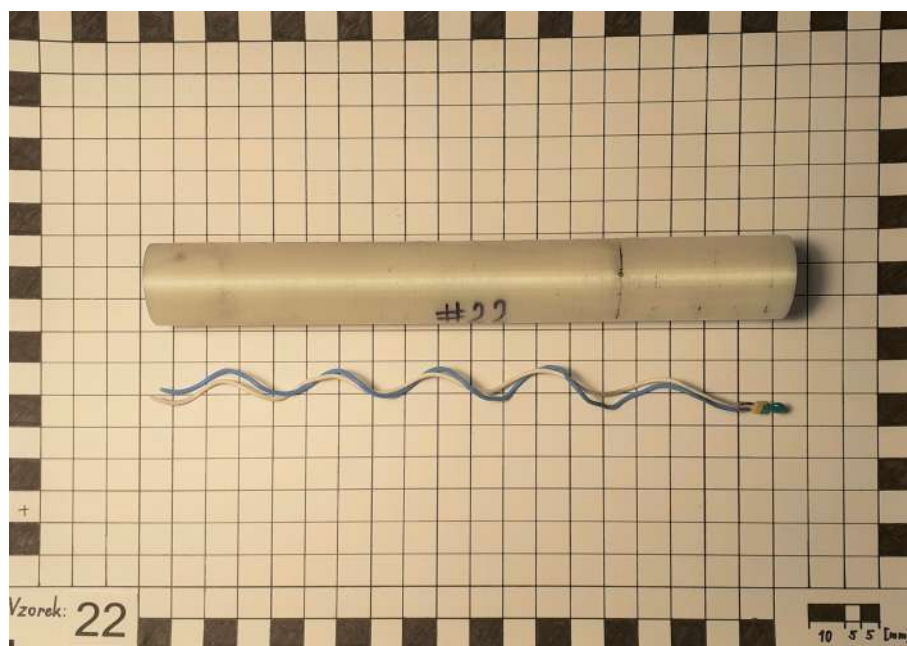
#	$m_p[g]$	$m_k[g]$	$\nu[\%]$	$p_0[MPa]$	$F_{MAX}[N]$	$I_S[N \cdot s \cdot kg^{-1}]$
19	76.2	3.0	96.06	4.7	134.06	1120.16
20	76.3	3.2	95.81	5.3	155.43	1493.23
21	76.5	2.9	96.21	5.6	151.02	1071.52
$\bar{\#}$	76.33	3.03	96.03	5.2	146.83	1228.30

Tabulka 4.8: Parametry vzorků PLA, 0,3 mm, loukoť

Tvar loukoť vykazuje podobné hodnoty spalností, jako tvar loukoť děrovaná. Ze stejných důvodů je ale potřeba přistupovat k těmto hodnotám opatrně.

4.1.3.3 Spirála

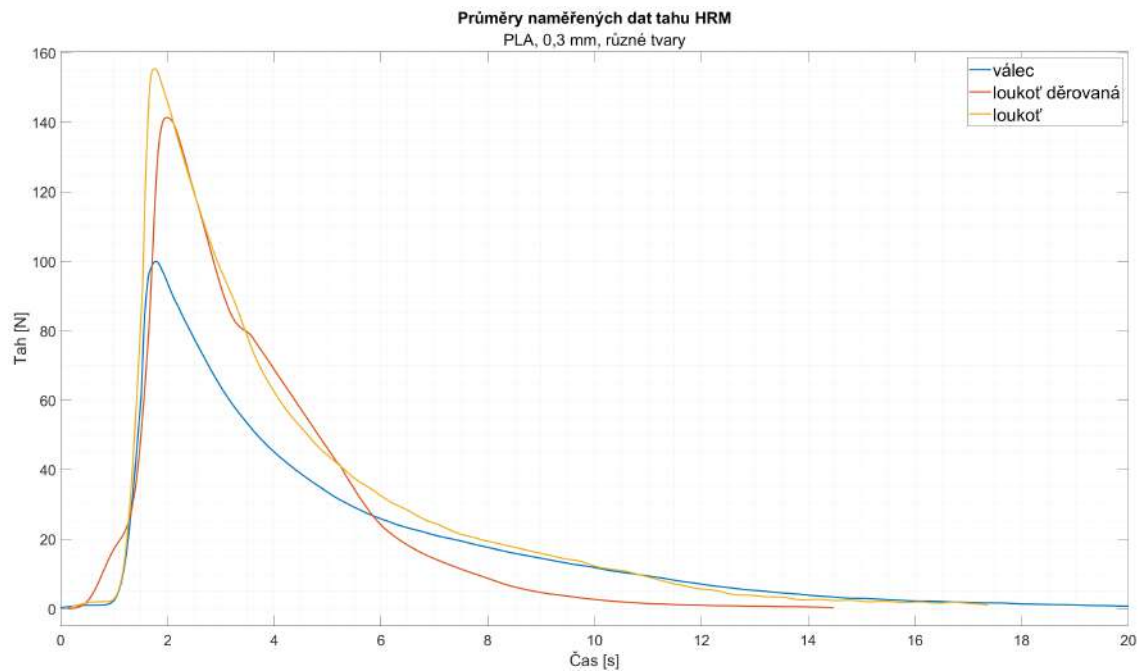
Po několika neúspěšných pokusech o zažehnutí zrn tohoto typu bylo rozhodnuto o jejich vyřazení z testování. Prozkoumáním pozůstatků neúspěšných pokusů o zážeh (obr. 4.11) vyšlo najevo, že proud okysličovadla, který se pouští do spalovací komory zlomek sekundy před samotným zážehem, přetrhl u trysky kabely vedoucí k zápalnici, která se tak ani nestihla zažehnout. K přetržení pravděpodobně došlo kvůli tomu, že se samotná zápalnice vzpříčila ve spirálovitém kanálu zrna.



Obrázek 4.11: Zrno 22 po neúspěšných pokusech o zažehnutí spolu s jednou ze zážehnic [foto autor]

Problematika by se dala řešit zvýšením stoupání šroubovic, což by však šlo proti smyslu vzniku této geometrie, nebo překonstruováním motoru tak, aby se zápalnice vkládala ze strany injektoru.

4.1.3.4 Zhodnocení



Obrázek 4.12: Trendy tahových křivek vzorků z fáze 3 [graf autor]

Změna tvaru zrna zřetelně ovlivňuje tahovou křivku (obr. 4.12) v pozitivním smyslu. Vyšší maximum tahu tvaru loukoť oproti loukotí děrované je pravděpodobně způsobené menším objemem spalovacích kanálů, které vedly k vyšším hodnotám poměru O/F.

tvar	$\overline{m}_p[g]$	$\overline{m}_k[g]$	$\overline{v}[\%]$	$\overline{p}_0[MPa]$	$\overline{F}_{MAX}[N]$	$\overline{I}_S[N \cdot s \cdot kg^{-1}]$
válec	68.43	18.60	72.82	4.9	92.36	1121.60
loukoť děrovaná	67.97	2.37	96.52	4.85	126.75	1045.38
loukoť	76.33	3.03	96.03	5.2	146.83	1228.30

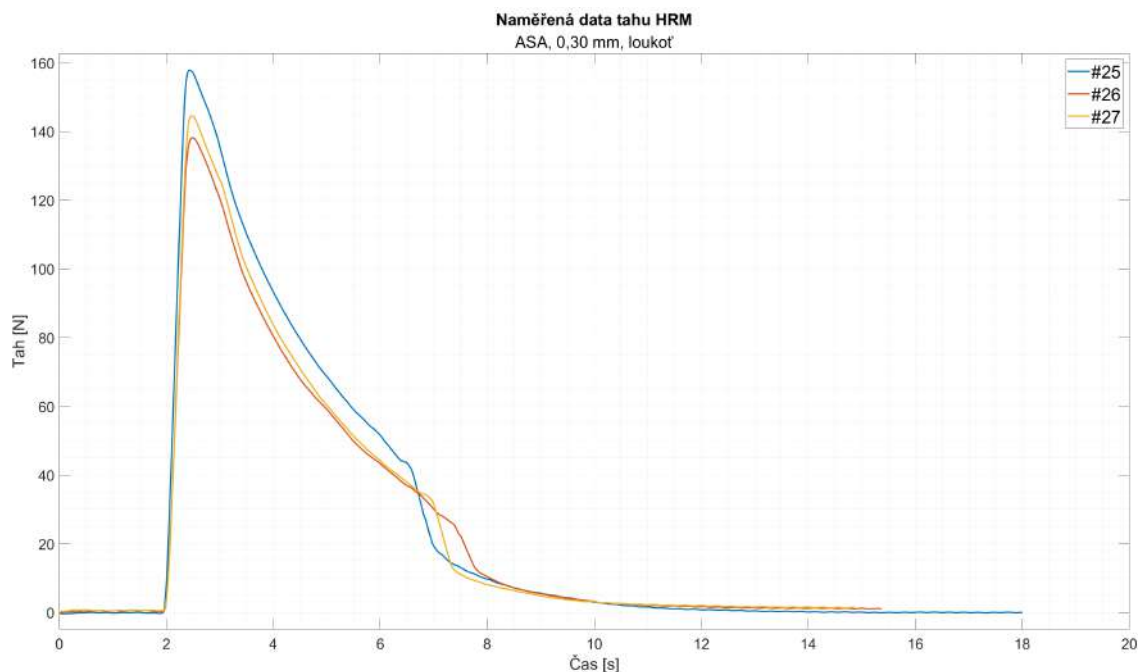
Tabulka 4.9: Průměrné parametry třetí fáze

Tvar zrna zjevně ovlivňuje časový vývoj tahu, stejně jako spalnost, a to směrem k vyšším hodnotám (tab. 4.9). Nejperspektivněji se jeví tvar loukoť, který má nejvyšší průměrné maximum v tahu, které ale mohl ovlivnit vyšší průměrný počáteční tlak v nádrži. Neoddiskutovatelnou výhodou tohoto tvaru je pak reprodukovatelnost testů.

4.1.4 Fáze 4 - Finále

4.1.4.1 ASA, loukoť

Zrno kombinující poznatky z prvních třech fází experimentální části naplnilo očekávání.



Obrázek 4.13: Průběh testů zrna z materiálu ASA, tvar loukoť [graf autor]

Tahové křivky tohoto typu zrna (obr. 4.13) si odpovídají. Po sedmé vteřině je na všech patrný strmý propad tahu. V těchto okamžicích došlo patrně k dohoření zbytků paliva, a následný pozvolný pokles zbytku tahu je generovaný již jen vypouštěním zbytku oxidovačidla.

#	$m_p[g]$	$m_k[g]$	$\nu[\%]$	$p_0[MPa]$	$F_{MAX}[N]$	$I_S[N \cdot s \cdot kg^{-1}]$
25	65.4	0.0	100.00	5.2	157.73	1400.01
26	65.5	0.0	100.00	5.1	138.09	1265.40
27	65.4	0.0	100.00	5.1	144.49	1285.05
$\bar{\#}$	65.43	0.00	100.00	5.2	146.77	1316.82

Tabulka 4.10: Parametry vzorků ASA, 0,3 mm, loukoť

Z tabulky 4.10 je zřejmé, že oproti původnímu tvaru zrna z ASA došlo k navýšení

průměrného tahu z 122.11 N na 146.77 N. Zvýšila se také spalnost, neboť nebyly nalezeny velké kusy zbytků.



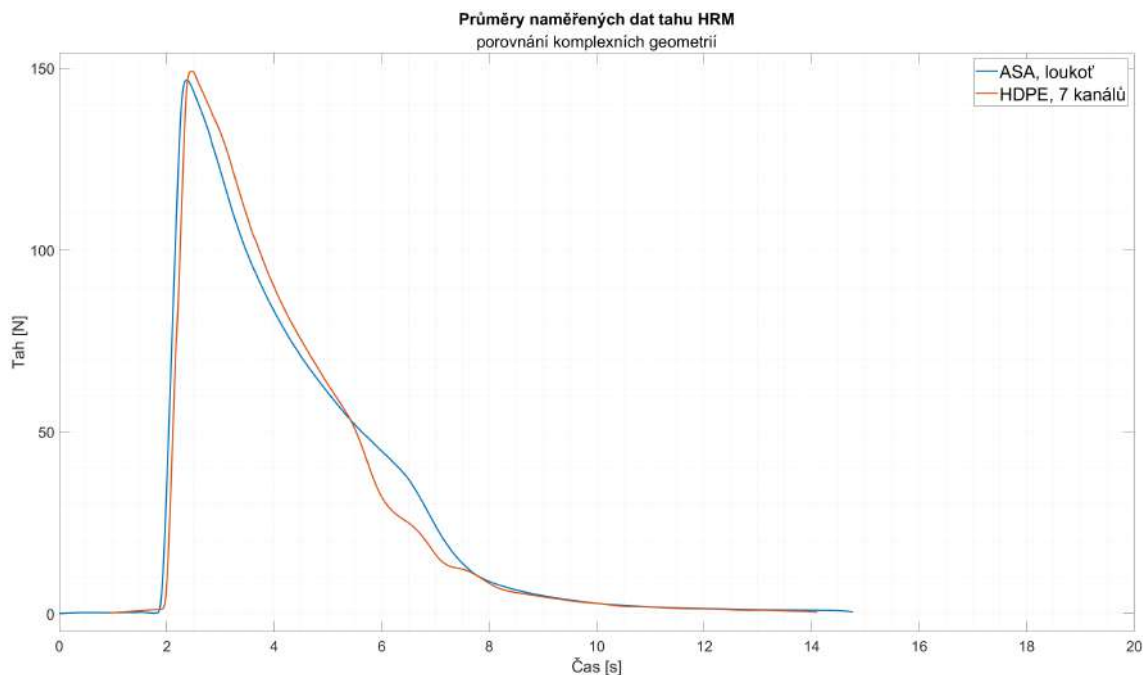
Obrázek 4.14: Zbytky po zrnech ASA [foto autor]

Pro tyto testy byla před plamen motoru umístěna plechová deska pro zachytávání malých zbytků paliva. Po otestování všech 3 vzorků byla plechová deska prozkoumána, a na jejím povrchu byly objeveny malé částičky zrn. Vybranou část kontolní plechové desky můžete vidět na obrázku 4.14. Tento typ testů by bylo zajímavé zopakovat s vysokofrekvenční kamerou kvůli analýze plamenu, protože částičky zbytků obsahují patrné stopy vrstev tisku. Mechanismus hoření tohoto materiálu je hodný dalšího zkoumání.

4.1.4.2 Zhodnocení

Zrna ze sekce 4.1.4.1 byla porovnána se sedmikanálovým zrnem z HDPE. Data z testů těchto vzorků pochází obdobně jako data jednonálového HDPE z práce kolegy Putny [11], sekce 4.3.

Tahové křivky (obr. 4.15) porovnávaných typů zrn jsou si velice podobné, a to včetně rychlého poklesu tahu po šesté vteřině testovací sekvence. Je-li hypotéza o dohoření paliva platná i pro zrna z HDPE, poukazuje to na možnost zvětšení motoru či zmenšení nádrže na okysličovadlo.



Obrázek 4.15: Trendy tahových křivek vzorků z fáze 4 [graf autor]

materiál, tvar	$\overline{m}_p[g]$	$\overline{m}_k[g]$	$\overline{\nu}[\%]$	$\overline{p}_0[MPa]$	$\overline{F}_{MAX}[N]$	$\overline{I}_S[N \cdot s \cdot kg^{-1}]$
ASA, loukoť	65.43	0.00	100.00	5.2	146.77	1316.82
HDPE, 7 kanálů	46.10	1	97.83	5.2	157.51	1595.82

Tabulka 4.11: Průměrné parametry čtvrté fáze

Zrna z materiálu ASA, tvaru loukoť nabízí nižší průměrný maximální tah i průměrný specifický impuls, než sedmikanálové zrno z HDPE, mají ovšem vyšší spalnost (tab. 4.11). Průměrný počáteční tlak v nádrži byl pro oba porovnávané typy zrn podobný, nemělo by se tedy jednat o ovlivňující parametr.

4.2 Optimalizace 3D tisku

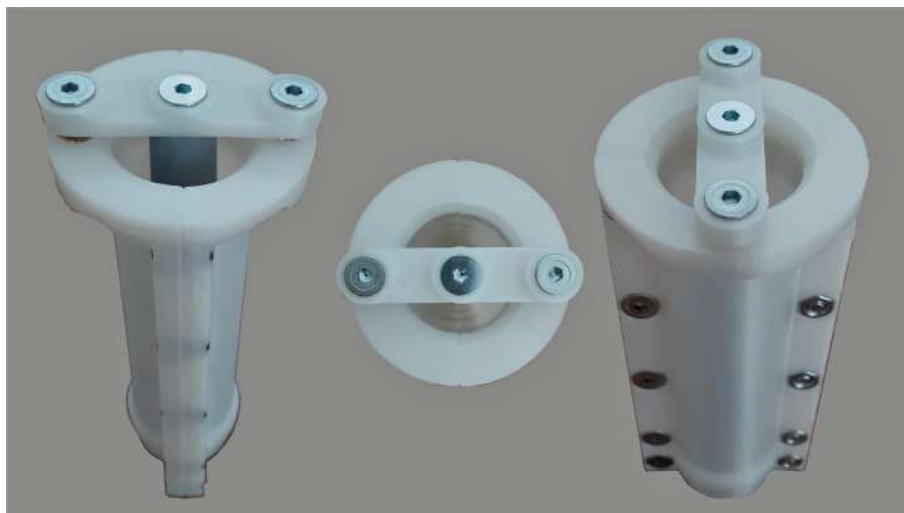


Obrázek 4.16: Konektor zrn před a po konstrukční úpravě [render autor]

Při tisku zrn z na tisk náročných materiálů, jakými jsou ASA a nylon PA12, se ukázalo, že původní konektor zrn je z těchto materiálů prakticky nevytisknutelný. Muselo tedy dojít ke změně (obr. 4.16) jeho rozměrů na maximální rozměry, které dovozovaly komplexní geometrie zrn, aniž by do nich konektor zasahoval. Pro výšku konektoru se stala limitující geometrie spirála, zbylé rozměry určoval zejména tvar loukoť.

4.3 Odlévání parafinových zrn

V rámci experimentální fáze této práce byl proveden pokus s odléváním parafinu do formy na pryskyřičná paliva, jehož účelem bylo ověřit, zda je tento typ formy opravdu nevhodný pro odlévání parafinu. Tisk formy proběhl z materiálu PLA, jen její jádro bylo vyrobeno na resinové tiskárně. Forma lícovala (obr. 4.17) a při testech nedocházelo k úniku odlévaného materiálu.



Obrázek 4.17: Sestavená forma [foto autor]

Při prvním testu byla forma až po okraj umístěna do nádoby se studenou vodou. Natavený parafin ale zatekl jen do přibližně poloviny formy, než ztuhl.

Pro druhý pokus proto bylo rozhodnuto o odlévání do formy umístěné mimo nádoby s vodou, a o jejím vložení do chladicího média ihned po ukončení odlévání. V tomto případě už parafin zatekl až na dno formy. Došlo však ke zkroucení jádra formy (obr. 4.18), což mělo za následek rozlomení parafinového zrna (obr.4.19) při pokusech o vyjmutí jádra. Vnější plášť formy, i přes to, že byl vytištěn z teplotně nepřilíživého PLA, přečkal experiment bez známek poškození.

Prokázala se tedy nevhodnost tohoto typu formy pro odlévání parafinu, který vyžaduje pozvolně chlazenou formu. Pro odlévání pryskyřičných paliv by však tato forma mohla vyhovovat.



Obrázek 4.18: Jádro formy na odlévání parafinových zrn po provedení experimentu [foto autor]



Obrázek 4.19: Rozlomené parafinové zrno [foto autor]

4.4 Zhodnocení experimentální části

Vzorky z PLA se bez ohledu na výšku vrstvy či geometrii vyznačují nesympatickým chováním vůči testovacímu stanovišti, neboť zanechávají své kusy natavené na stěnách komory, trysky i širokého okolí, po každém testu vzorku z PLA je tedy nutná důkladná údržba a očista testovací aparatury. Pro další experimenty bylo rozhodnuto tento materiál neužívat.

Při testech bylo ověřeno, že výška vrstvy není ovlivňující parametr pro palivová zrna vyrobená pomocí aditivní výroby. Naopak tvar zrna má vliv na výkony motoru.

3D tištěná paliva vykazují podobné výkony, jako paliva vyrobená konvenčním způsobem. Ta jsou však již vzhledem k omezeným možnostem výroby na hranici komplexnosti tvaru zrn, což je oblast, ve které 3D tištěná paliva nabízí prostor pro zlepšování, a je proto vhodné pokračovat v jejich zkoumání za využití nabytých znalostí a zkušeností.

5 Závěr

V rámci této práce byla vypracována rešerše třech typů 3D tisku. Tyto konkrétní metody byly vybrány pro svou dostupnost pro studenty, jelikož jejich pořízení není finančně nákladné, nebo k nim studenti mají přístup v rámci univerzity.

Po sérii komplexních experimentů byl také vybrán nejlepší materiál, výška vrstvy a tvar pro výrobu palivového zrna 3D tiskem. Za nejlepší materiál byl ze zkoušených vybrán ASA, nicméně slibné výsledky vykazoval i nylon PA12. Bylo prokázáno, že výška vrstvy není výkonnostně ovlivňujícím parametrem pro 3D tištěná palivová zrna. Při tisku palivových zrn je tedy možné výšku vrstvy podřídít pouze limitům 3D tiskárny, což vede ke zkrácení výrobního času. Naopak tvar zrna má velký vliv na průběh tahové křivky a vede i k ovlivnění spalnosti paliva. 3D tištěná paliva prokázala svůj potenciál, když obstála v konkurenci běžných, konvenčně vyráběných paliv. V průběhu experimentální fáze bylo nutné sáhnout k drobným konstrukčním úpravám palivových zrn tištěných po částech.

Pro případnou následnou práci by bylo vhodné vylepšit zejména ovládání hlavního ventilu tak, aby pro počátek testů byl v nádrži na okysličovadlo pokaždé stejný tlak.

Byla prozkoumána možnost alternativního využití 3D tisku pro potřeby výroby palivových zrn. Velký potenciál skýtá 3D tisk zejména v oblastech výztuh pro parafinová zrna a výroby forem pro odlévání paliv. Ve druhé jmenované oblasti byl nad rámec zadání proveden pokus, který lze hodnotit jako napůl úspěšný. Prokázal totiž, že 3D tisk lze využít k výrobě forem, bude však zapotřebí optimalizace při výběru materiálu, jelikož došlo k drobnému tepelnému poškození jádra formy.

Aditivní výroba se ukázala být příslibem pro malé hybridní raketové motory, který je hodný dalšího výzkumu.

Seznam tabulek

3.1	Přehled vlastností FFF/FDM tisku	19
3.2	Přehled vlastností fotopolymeračního tisku	21
3.3	Přehled vlastností SLS tisku	22
3.4	Přehled vlastností různých druhů 3D tisku	23
4.1	Parametry vzorků ASA, 0,3 mm, válec	38
4.2	Parametry vzorků nylon PA12, 0,3 mm, válec	40
4.3	Parametry vzorků PLA, 0,3 mm, válec	41
4.4	Průměrné parametry první fáze	43
4.5	Parametry vzorků PLA, 0,12 mm, válec	44
4.6	Průměrné parametry druhé fáze	45
4.7	Parametry vzorků PLA, 0,3 mm, loukoť děrovaná	46
4.8	Parametry vzorků PLA, 0,3 mm, loukoť	47
4.9	Průměrné parametry třetí fáze	49
4.10	Parametry vzorků ASA, 0,3 mm, loukoť	50
4.11	Průměrné parametry čtvrté fáze	52
5.1	Parametry testovaných vzorků	64

Seznam obrázků

2.1	Schéma RM na tuhé palivo [27] [úprava autor]	11
2.2	Schéma RM na kapalné palivo [24] [úprava autor]	12
2.3	Schéma hybridního RM [26] [úprava autor]	12
2.4	Řez CAD modelem HRM kolegy Vítězslava Putny [render autor] . . .	13
2.5	Mechanismus hoření většiny polymerních paliv [10][úprava autor] . . .	14
2.6	Mechanismus hoření nezbedného parafinu [10][úprava autor]	15
2.7	Přehled vlivu počátečního tvaru palivového zrna pro RM na tuhá paliva na průběh tahu s informativní hodnotou prostorového využití spalovací komory. Hustota šrafování roste s regresní rychlostí paliva [4] [úprava autor]	16
3.1	Schéma FFF/FDM tisku[28]	18
3.2	Schéma druhů fotopolymeračního tisku [6][úprava autor]	20
3.3	Schéma SLS [28]	21
3.4	Rozměry zrna [autor]	29
3.5	Vliv výšky vrstvy na povrch tištěného objektu. Výška vrstvy (a) je 0,2mm, výška vrstvy (b) je 0,1mm. [29][úprava autor]	30
3.6	Průřezy zrn testovaných ve fázi 3 [autor]	30
3.7	Řez CAD modelu formy na odlévání palivových zrn [render autor] . .	31
3.8	Řez CAD modelu formy na odlévání palivových zrn po odlehčení [render autor]	33
3.9	Typy výplně v CAM programu SLIC3R [23] [úpravy autor, Bc. Marek Hais]	35
3.10	Model testovacího lože [render autor]	36

3.11	Soustava hlavního ventilu s krokovým motorem a řemenicemi [render autor]	36
4.1	Průběh testů zrn z materiálu ASA [graf autor]	38
4.2	Průběh testu zrna #06 [koláž autor]	39
4.3	Průběh testů zrn z materiálu nylon PA12 [graf autor]	40
4.4	Průběh testů zrn z materiálu PLA [graf autor]	41
4.5	Trendy tahových křivek vzorků z fáze 1 [graf autor]	42
4.6	Průběh testů zrn o výšce vrstvy 0,12 mm [graf autor]	43
4.7	Trendy tahových křivek vzorků z fáze 2 [graf autor]	44
4.8	Průběh testů zrn tvaru loukoť děrovaná [graf autor]	45
4.9	Zanesení trysky po testu zrna 17 [foto autor]	46
4.10	Průběh testů zrn tvaru loukoť [graf autor]	47
4.11	Zrno 22 po neúspěšných pokusech o zažehnutí spolu s jednou ze zážehnic [foto autor]	48
4.12	Trendy tahových křivek vzorků z fáze 3 [graf autor]	49
4.13	Průběh testů zrna z materiálu ASA, tvar loukoť [graf autor]	50
4.14	Zbytky po zrnech ASA [foto autor]	51
4.15	Trendy tahových křivek vzorků z fáze 4 [graf autor]	52
4.16	Kontektor zrn před a po konstrukční úpravě [render autor]	53
4.17	Sestavená forma [foto autor]	54
4.18	Jádro formy na odlévání parafinových zrn po provedení experimentu [foto autor]	54
4.19	Rozlomené parafinové zrno [foto autor]	55

Literatura

- [1] BATES-GREEN, K a T HOWIE. Materials for 3D printing by fused Deposition [online]. Lynnwood WA, 2017 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: [http : //www.materialseducation.org/educators/matedu – modules/docs/Materials_in_FDM.pdf](http://www.materialseducation.org/educators/matedu-modules/docs/Materials_in_FDM.pdf). Studijní podklad. Edmonds Community College.
- [2] BATH, Andrew. Performance Characterization of Complex Fuel Port Geometries for Hybrid Rocket Fuel Grains [online]. Logan, Utah, 2012 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://digitalcommons.usu.edu/etd/1381>. Diplomová práce. Utah State University.
- [3] BISIN, Riccardo, Christian PARAVAN, Sebastiano ALBERTI a Luciano GALFETTI. A new strategy for the reinforcement of paraffin-based fuels based on cellular structures: The armored grain — Mechanical characterization. Acta Astronautica [online]. 2020, 176, 494-509 [cit. 2021-04-15]. ISSN 00945765. Dostupné z: [doi:10.1016/j.actaastro.2020.07.003](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.07.003)
- [4] FLEEMAN, Eugene L. Tactical Missile Design,. Druhé vydání. USA: AIAA, 2006. ISBN 1563477823.
- [5] FOUST, Jeff. SpaceShipTwo Bounces Back to Rubber Fuel. SPACENEWS [online]. [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: <https://spacenews.com/virgin-galactic-switching-back-to-rubber-fuel-for-spaceshiptwo/>
- [6] FREY, Scott. Laser SLA vs DLP vs Masked SLA 3D Printing Technology. The Ortho Cosmos [online]. 2017 [cit. 2021-6-9]. Dostupné z:

<https://theorthocosmos.com/laser-sla-vs-dlp-vs-masked-sla-3d-printing-technology-compared/>

- [7] KUO, Kenneth K. a Martin J. CHIAVERINI, ed. Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion [online]. Reston ,VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007 [cit. 2021-6-9]. ISBN 978-1-56347-703-4. Dostupné z: doi:10.2514/4.866876
- [8] MAZZETTI, Alessandro, Laura MEROTTO a Giordano PINARELLO. Paraffin-based hybrid rocket engines applications: A review and a market perspective. Acta Astronautica [online]. 2016, 126, 286-297 [cit. 2021-04-15]. ISSN 00945765. Dostupné z: doi:10.1016/j.actaastro.2016.04.036
- [9] MCFARLAND a ANTUNES. Small-Scale Static Fire Tests of 3D Printing Hybrid Rocket Fuel Grains Produced from Different Materials. Aerospace [online]. 2019, 6(7) [cit. 2020-12-15]. ISSN 2226-4310. Dostupné z: doi:10.3390/aerospace6070081
- [10] PISCITELLI, F., G. SACCONI, A. GIANVITO, G. COSENTINO a L. MAZZOLA. Characterization and manufacturing of a paraffin wax as fuel for hybrid rockets. Propulsion and Power Research [online]. 2018, 7(3), 218-230 [cit. 2021-04-14]. ISSN 2212540X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jprr.2018.07.007
- [11] PUTNA, Vítězslav. Vývoj a validace hybridního raketového motoru. Praha, 2021. Bakalářská Práce. České Vysoké Učení Technické v Praze.
- [12] SERTOGLU, Kubi. STRATASYS HEATED BUILD CHAMBER FOR 3D PRINTER PATENT US6722872B1 SET TO EXPIRE THIS WEEK. 3D Printing Industry [online]. 2021 [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/stratasys-heated-build-chamber-for-3d-printer-patent-us6722872b1-set-to-expire-this-week-185012/>
- [13] SHNAWA, Hussein Ali. Curing and thermal properties of tannin-based epoxy and its blends with commercial epoxy resin. Polymer Bulletin [on-

- line]. 2021, 78(4), 1925-1940 [cit. 2021-04-15]. ISSN 0170-0839. Dostupné z: doi:10.1007/s00289-020-03192-6
- [14] SUTTON, George P a Oscar BIBLARZ. Rocket Propulsion Elements: An Introduction to the Engineering of Rockets. Osmé vydání. Wiley, 2010. ISBN 0471838365.
- [15] SZEKELY, Jakub. Nákladový Prostor Letounu Soutěžní Kategorie SAE - Regular Class. Praha, 2020. Bakalářská Práce. České Vysoké Učení Technické v Praze.
- [16] ŠONKA, Ivan. 3D Printed Fuel Grain of Hybrid Rocket Engine. Praha, 2018. Bakalářská práce. České Vysoké Učení Technické v Praze.
- [17] TRAN, Karolina, Dominik ZDYBAL, Agata ZWOLAK, Bartosz WYCISZIEWSKIZ a Aleksander GRUZIUK. High-Regression Rate Fuels For Hybrid Rocket Motors. Krakov, 2017. EUCASS.
- [18] WALKER, Sean D. High Regression Rate Hybrid Rocket Fuel Grains with Helical Port Structures [online]. Logan, Utah, 2015 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://digitalcommons.usu.edu/etd/4618>. Diplomová práce. Utah State University.
- [19] WHITMORE, Stephen A., Sean D. WALKER, Daniel P. MERKLEY a Mansour SOBBI. High Regression Rate Hybrid Rocket Fuel Grains with Helical Port Structures. Journal of Propulsion and Power [online]. 2015, 31(6), 1727-1738 [cit. 2020-12-15]. ISSN 0748-4658. Dostupné z: doi:10.2514/1.B35615
- [20] 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? Svet Hardware [online]. 21.2.2019 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>
- [21] Ciolkovského rovnice. Kosmo.cz [online]. [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: shorturl.at/goDQ4
- [22] The History of 3D Printing. All That 3D [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.allthat3d.com/3d-printing-history/>

- [23] Infill Pattern Options In Slic3r. Allevi3D [online]. 2020 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.allevi3d.com/infill-options-in-slic3r/>
- [24] Liquid Rocket Engine. NASA [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/lrockth.html>
- [25] Průvodce Materiály. PRUSA RESEARCH [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [26] Schematics of Hybrid Rocket Engine. Research Gate [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-Hybrid-Rocket-Engine-fig3344085977>
- [27] Solid Rocket Engine. NASA [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/lrockth.html>
- [28] The Types of 3D Printing Technology in 2020. ALL3DP [online]. 2020 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- [29] Vše o tryskách s různým průměrem. PRUSA RESEARCH [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruzny-m-prumerem/>

Přílohy

#	Tvar	Materiál	Barva materiálu	Výrobce materiálu	h_L [mm]	Tištěno	m_p [g]	m_k [g]	ν [%]	p_0 [MPa]	F_{MAX} [N]	I_S [$N \cdot s \cdot kg^{-1}$]	Poznámka
01	válec	ASA	Jet Black	Prusament	0,30	Per partes	57,2	0,8	98,60	4,69	120,97	1439,18	
02	válec	ASA	Jet Black	Prusament	0,30	Per partes	57	1,1	98,07	4,86	124,76	1435,15	
03	válec	ASA	Jet Black	Prusament	0,30	Per partes	57,1	0,9	98,42	4,81	120,61	1388,83	
04	válec	Nylon PA6	Natural Low Warp	Spectrum	0,30	V celku	63,1	netestováno	N/A	N/A	N/A	N/A	Výřazeno z testů
05	válec	Nylon PA6	Natural Low Warp	Spectrum	0,30	V celku	63,2	netestováno	N/A	N/A	N/A	N/A	Výřazeno z testů
06	válec	Nylon PA6	Natural Low Warp	Spectrum	0,30	V celku	63,1	nezjištěno	N/A	N/A	N/A	N/A	Exploze
07	válec	Nylon PA12	natural	Print With Smile	0,30	Per partes	52,4	7,6	85,50	5,10	119,88	1455,14	
08	válec	Nylon PA12	natural	Print With Smile	0,30	Per partes	52,6	3,3	93,73	4,99	117,60	1410,44	
09	válec	Nylon PA12	natural	Print With Smile	0,30	Per partes	52,6	4,3	91,83	5,39	5,39	1490,95	
10	válec	PLA	natural	Gembird	0,30	V celku	68,4	29,1	57,46	4,90	76,41	939,77	
11	válec	PLA	natural	Gembird	0,30	V celku	68,5	13,9	79,71	4,70	96,05	1178,73	
12	válec	PLA	natural	Gembird	0,30	V celku	68,4	12,8	81,29	5,05	104,62	1246,30	
13	válec	PLA	natural	Gembird	0,12	V celku	69,7	13,8	80,20	4,97	100,16	1222,50	
14	válec	PLA	natural	Gembird	0,12	V celku	69,4	18,8	72,91	5,02	77,41	1047,32	
15	válec	PLA	natural	Gembird	0,12	V celku	69,6	15,2	78,16	4,39	83,97	1064,16	
16	loukoť	derovaná	PLA	natural	0,30	V celku	68,3	2,1	96,93	N/A	N/A	N/A	data ztracena
17	loukoť	derovaná	PLA	natural	0,30	Per partes	68,1	2,5	96,33	4,88	141,34	1177,16	
18	loukoť	derovaná	PLA	natural	0,30	V celku	67,5	2,5	96,30	4,67	112,16	913,61	
19	loukoť	PLA	natural	Gembird	0,30	V celku	76,2	3	96,06	4,73	134,06	1120,16	
20	loukoť	PLA	natural	Gembird	0,30	Per partes	76,3	3,2	95,81	5,34	155,43	1493,23	
21	loukoť	PLA	natural	Gembird	0,30	Per partes	76,5	2,9	96,21	5,58	151,02	1071,02	
22	spirála	PLA	natural	Gembird	0,30	V celku	81,4	netestováno	N/A	N/A	N/A	N/A	Nepodařilo se zapálit
23	spirála	PLA	natural	Gembird	0,30	Per partes	82,6	netestováno	N/A	N/A	N/A	N/A	Nepodařilo se zapálit
24	spirála	PLA	natural	Gembird	0,30	Per partes	82,2	netestováno	N/A	N/A	N/A	N/A	Nepodařilo se zapálit
25	loukoť	ASA	Jet Black	Prusament	0,30	Per partes	65,4	0	100,00	5,24	157,73	1400,01	Zbytky nenalezeny
26	loukoť	ASA	Jet Black	Prusament	0,30	Per partes	65,5	0	100,00	5,12	138,09	1265,40	Zbytky nenalezeny
27	loukoť	ASA	Jet Black	Prusament	0,30	Per partes	65,4	0	100,00	5,15	144,49	1285,05	Zbytky nenalezeny

Tabulka 5.1: Parametry testovaných vzorků