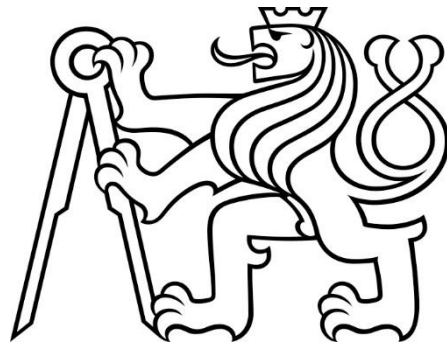


**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**JAKUB-JAN
OCHEC**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ochec** Jméno: **Jakub-Jan** Osobní číslo: **495458**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv drsnosti povrchu na účinnost dýzových segmentů vyrobených aditivními technologiemi

Název bakalářské práce anglicky:

On the Effect of Surface Roughness of Additively Manufactured Nozzle Segments

Pokyny pro vypracování:

Aditivní technologie (AM) jsou slibnou výrobní technologií pro expanzní stroje zejména v decentralizované energetice. Kromě jiných specifíků plastových aditivních technologií (nízká provozní teplota stroje, nízká přesnost výtisků, horší mechanické vlastnosti), je 3D tisk spojen s relativně vysokou drsností povrchu v takzvaném 'as-printed' stavu, tedy bez dodatečných povrchových úprav.

Student ve své závěrečné práci provede analýzu právě vlivu drsnosti povrchu na účinnost dýzových segmentů vyrobených aditivními technologiemi (metodou 3D tisku) s cílem aplikaci v decentralizované energetice pro nízkoteplotní expanzní stroje.

Bakalářská práce se bude konkrétněji skládat z následujících částí:

- rešerše dostupných metod plastových aditivních technologií se zaměřením na aplikaci v energetice a na dosahované parametry drsnosti povrchu
- rešerše v předchozí době provedených studií a analýz vlivu drsnosti povrchu na účinnost lopatkových strojů při využití AM
- návrh experimentu pro měření účinnosti trysek a izolaci problému vlivu drsnosti
- provedení experimentálního měření na vybraných materiálech a tryskách vyrobených vybranými technologiemi 3D tisku na trati se stlačeným vzduchem a expanzí do okolní atmosféry
- vyhodnocení experimentálního měření a zhodnocení vlivu drsnosti povrchu na účinnost expanze v trysce
- závěrečná doporučení

Seznam doporučené literatury:

- [1] V. Novotny, J. Spale, B. B. Stunova, M. Kolovratnik, M. Vitvarova, and P. Zikmund, "3D printing in turbomachinery: Overview of technologies, applications and possibilities for industry 4.0," in Proceedings of the ASME Turbo Expo, 2019, vol. 6, doi: 10.1115/GT2019-91849.
- [2] A. Garg, A. Bhattacharya, and A. Batish, "On Surface Finish and Dimensional Accuracy of FDM Parts after Cold Vapor Treatment," Mater. Manuf. Process., vol. 31, no. 4, pp. 522–529, Mar. 2016, doi: 10.1080/10426914.2015.1070425.
- [3] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," Compos. Part B Eng., vol. 143, no. December 2017, pp. 172–196, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Špale ústav energetiky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **02.06.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**

Ing. Jan Špale
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a článků uvedených v seznamu informačních zdrojů této práce.

V Praze dne.....

.....

Jakub-Jan Ohec

Anotační list

Jméno autora:	Jakub-Jan Ocheč
Název BP:	Vliv drsnosti povrchu na účinnosti dýmových segmentů vyrobených aditivními technologiemi.
Anglický název:	On the Effect of Surface Roughness of Additively Manufactured Nozzle Segments
Akademický rok:	2022/2023
Ústav/Obor:	Ústav energetiky/Energetika a procesní technika
Vedoucí BP:	Ing. Jan Špale
Bibliografické údaje:	Počet stran: 70 Počet obrázku: 20 Počet tabulek: 12 Počet příloh: 27
Klíčová slova:	Lavalova dýza, drsnost povrchu, účinnost, aditivní technologie, 3D tisk, zkušební trať
Keywords:	Laval nozzle, surface roughness, efficiency, additive technology, 3D printing, test track
Anotace:	Tato práce se zaměřuje na porovnání účinnosti modelu Lavalovy trysky vyrobené z rozdílných materiálů pomocí 3D tisku. Je zde hodnocen vliv drsnosti povrchu a typu materiálu na její účinnost. V praktické části jsou popsány postupy měření účinnosti trysky, porovnání způsobů měření tahu trysek a měření drsnosti povrchu. V závěru jsou prezentovány výsledky měření a rozebírán jejich význam pro aditivní technologie v energetickém průmyslu.
Abstract:	This work is focused on comparing the performance of a Laval jet model made from different materials using 3D printing. The effect of surface roughness and material type on its efficiency is evaluated. The practical part describes the jet efficiency measurement procedures, comparison of jet thrust measurement methods and surface roughness measurements. Finally, the measurement results are presented and their relevance to additive technologies in the energy industry is discussed.

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat Ing. Janu Špalovi za trpělivé, vstřícné a profesionální vedení mé bakalářské práce, pečlivou formulaci tématu, cílů práce a cenné rady, které mi pomohly utvořit její finální podobu.

Obsah

1/ Úvod	9
2/ Teoretický přehled.....	10
2/1 Lavalova dýza	10
2/2 Zdroje ztrát trysky.....	11
2/3 Použité aditivní technologie v energetice	12
2/4 Základní rozdělení metod aditivních technologií.....	14
2/4/1 Technologie FDM/FFF	14
2/4/2 Technologie MJF	14
2/4/3 Technologie SLA.....	15
2/4/4 Technologie SLS	16
2/5 Materiály a jejich vlastnosti	17
2/5/1 Vlastnosti materiálu PLA (FFF/FDM)	18
2/5/2 Vlastnosti materiálu ASA (FFF/FDM)	19
2/5/3 Vlastnosti materiálu ASA-S (FFF/FDM)	19
2/5/4 Vlastnosti materiálu PETG (FFF/FDM)	19
2/5/5 Vlastnosti materiálu PA 12 (MJF).....	20
2/5/6 Vlastnosti materiálu Ridig4000 (SLA).....	20
2/5/7 Vlastnosti materiálu Grey (SLA)	20
2/5/8 Vlastnosti materiálu PA 12 (SLS).....	20
3/ Praktická část.....	22
3/1 Způsob měření účinnosti a popis zařízení.....	22
3/2 Návrh Lavalovy trysky	23
3/3 Postup a vývoj měření účinnosti Lavalovy trysky	29
3/3/1 Postup měření I. váhy	29
3/3/2 Postup měření II. váhy	30
3/3/3 Postup měření III. siloměrem.....	32
3/4 Porovnání způsobů měření tahu trysek.....	33
3/5 Měření drsnosti povrchu Ra	34
3/5/1 Drsnoměr	34
3/5/2 Konfokální mikroskop	35
3/6 Porovnání vlivu drsnosti povrchu na účinnost dýzy pomocí drsnoměru.....	39
3/7 Porovnání vlivu drsnosti povrchu na účinnost dýzy pomocí konfokálního mikroskopu.	40
4/ Závěr	42

Zdroje:.....	44
Seznam obrázků:.....	47
Seznám tabulek:.....	48
Seznám Příloh:	48
Příloha:.....	50

Seznam symbolů a zkratek

Q_v	[m ³ /h]	Objemový tok
T	[K]	Termodynamická teplota
κ	[-]	Poissonův poměr
r	[J/Kg.K]	Měrná plynová konstanta
c_p	[J/kg.K]	Měrná teplotná kapacita
c	[m/s]	Rychlost
p	[Pa]	Tlak
β	[-]	Tlakový poměr
\dot{m}	[Kg/s]	Hmotnostní průtok
ρ	[Kg/m ³]	Hustota
A	[m ²]	Plocha průřezu
v	[m ³ /kg]	Měrný objem
h	[J/Kg]	Entalpie
s	[J/Kg.K]	Entropie
Ma	[-]	Machovo číslo
η	[%]	Účinnost
F	[N]	Síla
R_a	[μ m]	Střední aritmetická odchylka profilu
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
FDM/FFF	Fused deposition modeling/Fused filament fabrication	
MJP	Multi Jet Fusion	
SLA	Stereolitografie	
SLS	Selective Laser Sintering	
UV	Ultrafialové záření	
ORC	Organický Rankinův cyklus	
1	Stav na vstupu	

- * Kritický bod
- 2 Stav na výstupu

1/ Úvod

Cílem práce je porovnání účinnosti modelu Lavalovy trysky vyrobené z jednotlivých materiálů pomocí různých metod 3D tisku a zhodnocení skutečného vlivu na účinnost při rozdílné drsnosti povrchů. Můžeme teoreticky předpokládat, že lepší drsnost povrchu bude mít i vyšší účinnost. Z tohoto hlediska porovnávám naměřené účinnosti s jednotlivými drsnostmi povrchu. Na účinnost může mít vliv nejen samotná drsnost, ale také způsob tisku a typ materiálu.

Pro porovnání byly vybrány metody 3D tisku FDM, MJP, SLA a SLS. Jedná se o nejběžnější a nejdostupnější metody používané v současné době pro 3D tisk. Díky 3D tisku můžeme velice snadno měnit tvar a rozměry trysky. Můžeme ji měnit flexibilně podle aktuálních potřeb a za rychlejší čas než u konvenční výroby.

Výraz 3D tisk se v produktovém kontextu používá k popsání technologií, díky kterým vzniká produkt přímo z digitálních dat. Mnoho dílů je ve skutečnosti už nyní přímo vyráběno těmito technologiemi, takže již není možné je označovat pouze jako prototypy. Ostatní výrobní procesy vyžadují detailní analýzu geometrie dílů k rozhodnutí, v jakém pořadí budou různé části dílu vyhotoveny, jaké nástroje a přípravky budou použity.

Motivací této práce je zhodnotit a následně pomoci zlepšovat účinnost trysek vyráběných na 3D tiskárnách a zjistit, jaký skutečný vliv má drsnost povrchu trysky na její účinnost. Tato práce může mít dopad na aditivní technologie používané v energetickém průmyslu. Například v energetických systémech ORC, kde mohou být použity turboexpandery vyrobené aditivní technologií pro nízkoteplotní části [1]. Aditivní technologie využívají plastové polymery, kovové slitiny, kompozity a další materiály, které mají využití v mnoha oborech, a to nejen v energetice, ale například také v letectví, automobilovém průmyslu nebo kosmickém vývoji.

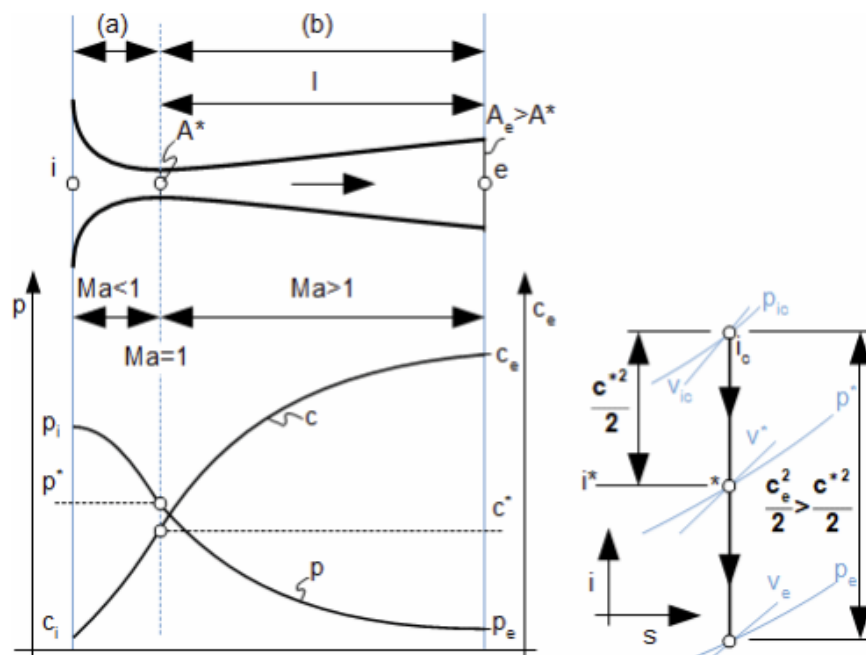
2/ Teoretický přehled

2/1 Lavalova dýza

Lavalovu trysku, známou také jako konvergentně-divergentní trysku, vynalezli nezávisle na sobě německý inženýr a vynálezce Körting v roce 1878 a švédský vynálezce de Laval v roce 1888 pro použití v parních turbínách. Tryska se skládá ze dvou částí: konvergentní a divergentní. V konvergentní části se plocha průřezu trysky zužuje, zatímco v divergentní části se plocha průřezu rozšiřuje [2].

Tryska se také často nazývá dýza. Jedná se o kanál plynule se měnící průřezem. Proudění média tryskou je děj, při kterém dochází ke snížení tlaku média a zvýšení rychlosti [3].

Aby se zvýšila účinnost expanze plynu za hranicí kritického průřezu trysky, je třeba za nejužší částí trysky vytvořit vhodný kanál. Toho se dosahuje samotnou konstrukcí Lavalovy trysky, která má za nejužším průřezem rozšiřující se kanál, jak je znázorněno na obrázku 1. Diagram Lavalovy trysky má stejný tvar jako konvergující trysky a platí pro něj rovněž rychlostní rovnice s tím rozdílem, že plyn během expanze překonává kritické parametry [3].



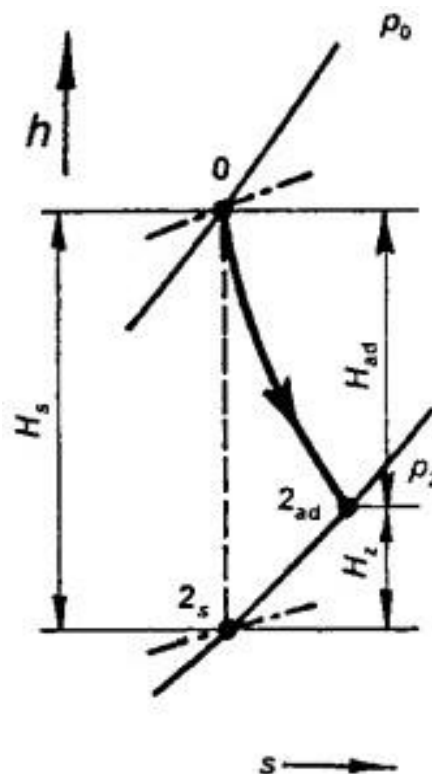
Obrázek 1 - Charakteristika ideální Lavalovy trysky [3]

Charakteristiky ideální Lavalovy trysky ukazují, že v konvergentní části trysky je rychlost proudu podzvuková (Machovo číslo $Ma < 1$), v kritickém průřezu se rychlost rovná rychlosti zvuku ($Ma = 1$) a v divergentní části je rychlost nadzvuková ($Ma > 1$) [3].

2/2 Zdroje ztrát trysky

V případě expanze trysky dochází u média k odevzdání části své energie ve formě tepla vnitřním třením plynu a také třením mezi plynem a stěnami trysky. Tím se snižuje výsledná kinetická energie. Dále se při proudění vytvářejí víry, ve kterých se přeměňuje tlaková energie na kinetickou a naopak. Tato transformace vede k nevratným ztrátám spojených s nárůstem entropie [3].

Na obrázku 2 je zakreslená expanze tryskou, kde veličina H_s [J.kg⁻¹] je nazývána izoentropický spád (expanze pro ideální plyn). Avšak adiabatický průtok u reálného plynu se třením vede po integrační cestě $0 - 2_{ad}$, která většinou není známa bez důkladného měření. Je však známo, že koncový stav se nachází v bodě 2_{ad} ležící na izobaře $p_e = konst.$, kterému náleží podle II. Termodynamického zákona pro nevratné děje měrná entropie $s_{ad} > s_{2s}$ [4].



Obrázek 2 – Expanze tryskou [4]

2/3 Použité aditivní technologie v energetice

Tato část je zde zahrnuta z toho důvodu, abychom si mohli vytvořit ucelený obraz o stávajícím výzkumu, který se touto nebo podobnou tematikou již zabývá. Uvádím zde tři příklady publikovaných prací, které se zabývají aditivní technologií v energetice se zaměřením vlivu drsnosti povrchu na účinnost.

Výzkum s názvem *The Profile Loss of Additive Manufactured Blades for Organic Rankine Cycle Turbines*, jehož autory jsou Leander Hake, Felix Reinker, Robert Wagner, Stefan aus der Wiesche a Markus Schatz, ve kterém zkoumali profilové ztráty aditivně vyráběných lopatek pro turbíny s organickým Rankinovým cyklem. Studie byla provedena s využitím zkušební sekce v aerodynamickém tunelu s uzavřenou smyčkou pro organické páry. Experiment používal jako pracovní médium per fluorovaný keton Novec 649 a suchý vzduch. Zkušební část obsahovala dvoustupňovou kontrakční zónu, přičemž druhá konstrukce byla vytvořena trojrozměrnou tryskou založenou na technologii aditivní výroby selektivním laserovým tavením (SLM), která umožňuje změnu trojrozměrného průřezu z kruhového na obdélníkový. Experimenty byly prováděny ve dvou variantách, s povrchovou úpravou a bez ní. V rámci experimentu byl měřen hmotnostní tok, rychlost otáček kompresoru, celková entalpie a tlaky pomocí Pitotovy sondy. V závěru studie autoři zjistili, že další úprava povrchu výrazně snižuje ztráty profilu dokonce i při relativně vysokém Reynoldsově čísle. Zároveň poukázali na to, že zbytková drsnost má velký vliv na ztráty profilu v nižším rozsahu podzvukových rychlostí [5].

Diplomová práce s názvem *Design and Cold-air Tests of a Single-stage Axial Micro Turboexpander for an ORC Power System*, jejíž autorem je Ing. Jan Špale, se zaměřuje na ověření koncepce aditivní výroby mikro turboexpandéru, který pracuje se studeným vzduchem a na návrh turboexpandéru pro použití v mikrogenerační jednotce s organickou kapalinou na základě naměřených hodnot. Pro určení účinnosti mikro turboexpandéru byly měřeny tyto hodnoty – hmotnostní tok, teplota, tlak a průtočná rychlost v zařízení, ve kterém byl mikro turboexpandér umístěn. Experiment zahrnoval také ovlivnění účinnosti mikro turboexpandéru přesností tisku, mechanických vlastností a drsností povrchu. Pro výrobu dílů byly použity aditivní technologie, jako jsou SLA, SLS, FFF/FDM, DMLS a MJF. Autor práce upozorňuje na to, že výsledný vliv drsnosti povrchu na tištěných mikro turboexpandérech na jejich účinnost nebyl průkazný [1].

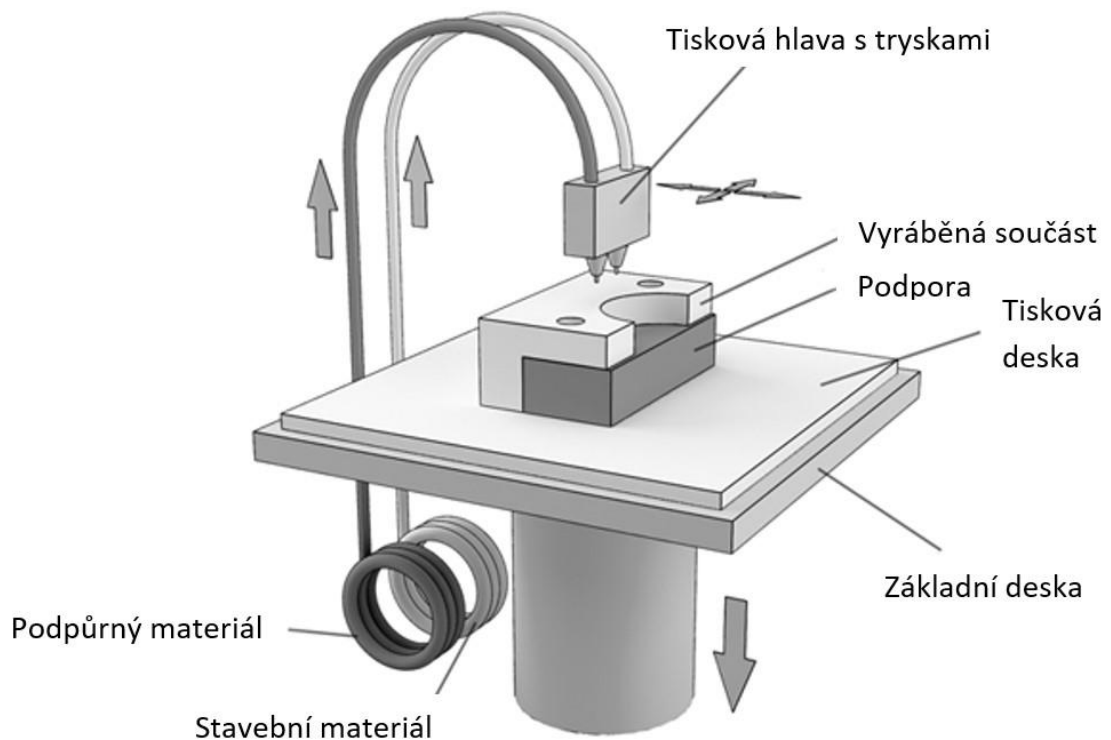
Výzkum s názvem *Design and test a converging and de Laval nozzle using additive manufacturing*, jehož autoři jsou Mingtai Chen, Ruksana Baby, Seth Dillard, Yi Tsung Lee a Srinath Ekkad, se zaměřuje na návrh a testování konvergujících a de Lavalových trysek pomocí aditivní výroby s použitím materiálu ABS. Cílem studie je zkoumat vliv drsnosti povrchu trysek na jejich výkon a analyzovat vztah mezi geometrií trysky a tvorbou rázových vln. Pro výrobu zařízení byla použita 3D tiskárna Stratasys F170 a trysky byly tištěny z materiálu ABS. Důležitým prvkem bylo měření drsnosti povrchu trysek pomocí rentgenové mikropočítačové tomografie XRM-CT. Měření účinnosti trysek bylo prováděno pomocí Pitotovy trubice, která získávala údaje o rychlosti média. Vzduch byl použit jako pracovní médium během měření. Experimentální výsledky byly porovnávány s analytickými řešeními a simulacemi pomocí CFD. Závěr studie naznačuje, že drsnost povrchu 3D tištěných trysek, vyrobených pomocí aditivní výroby s použitím ABS vlákna, nemá významný vliv na výkon toků trysky při vysokých Reynoldsových číslech. Experimentální výsledky pro konvergující trysku dobře korespondují s analytickými řešeními, zatímco pro de Lavalovu trysku se ukázalo, že rovnice poměru analytické plochy nedokáže předpovědět vznik rázových vln. Autoři výzkumu upozorňují na to, že aditivní výroba může úspěšně přispět k výrobě trysek, ale je nezbytné optimalizovat geometrii trysky pro dosažení lepšího výkonu [6].

Z těchto výzkumů je patrné, že je v této oblasti ještě mnoho neznámého. Tato bakalářská práce se snaží tomuto tématu přispět se zaměřením na profilové ztráty dílů lopatkových strojů vyrobených aditivními technologiemi.

2/4 Základní rozdělení metod aditivních technologií

2/4/1 Technologie FDM/FFF

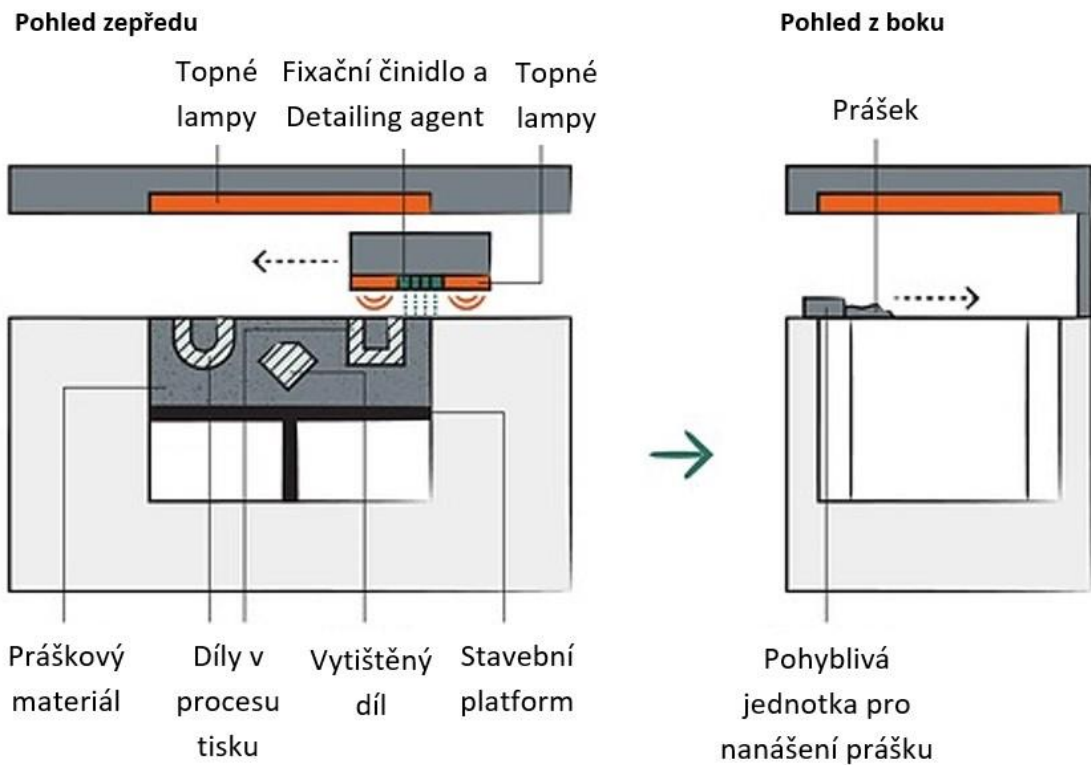
FDM/FFF (Fused deposition modeling/Fused filament fabrication) je v dnešní době nejrozšířenější technologie 3D tisku (Průša). Roztavený materiál se ve formě tenkého vlákna nanáší na pracovní stůl pomocí trysky. Nanášení probíhá po vrstvách. Materiál využívaný pro výrobu modelu je ve formě struny (filamentu). Struny jsou vyráběny z termoplastických materiálů nejčastěji ABS a PLA [7] (viz obrázek 3).



Obrázek 3 - Popis principu tisku aditivní technologie FDM/FFF [8]

2/4/2 Technologie MJF

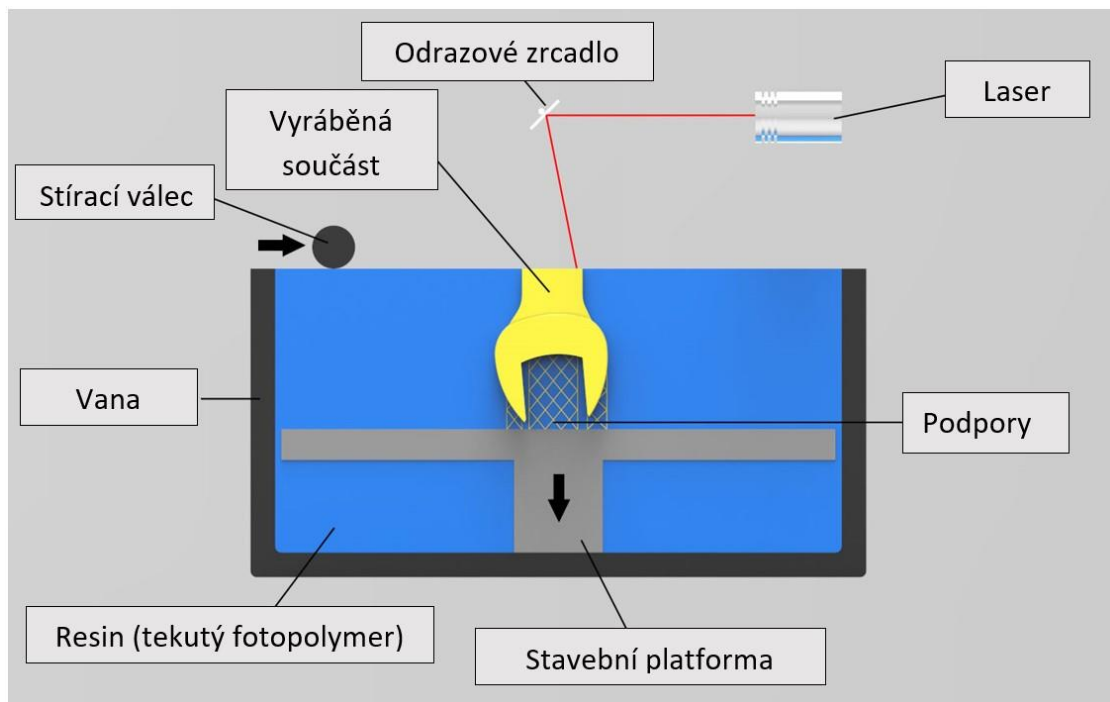
MJF (Multi Jet Fusion) je technologie schopná vytvořit nejen různobarevný model, ale i model o několika různých tuhostech. Práškový materiál je nanášen na stavební podložku a na nanosenou vrstvu je přiváděno pojivo. Práškový materiál je spolu s pojivem okamžitě zatvrzován pomocí UV světla. Technologie využívá výhradně materiál polyamid PA 12. Tím je však omezená variabilita možností požadovaných vlastností materiálu (viz. obrázek 4) [9].



Obrázek 4 - Popis principu tisku aditivní technologie MJF [9]

2/4/3 Technologie SLA

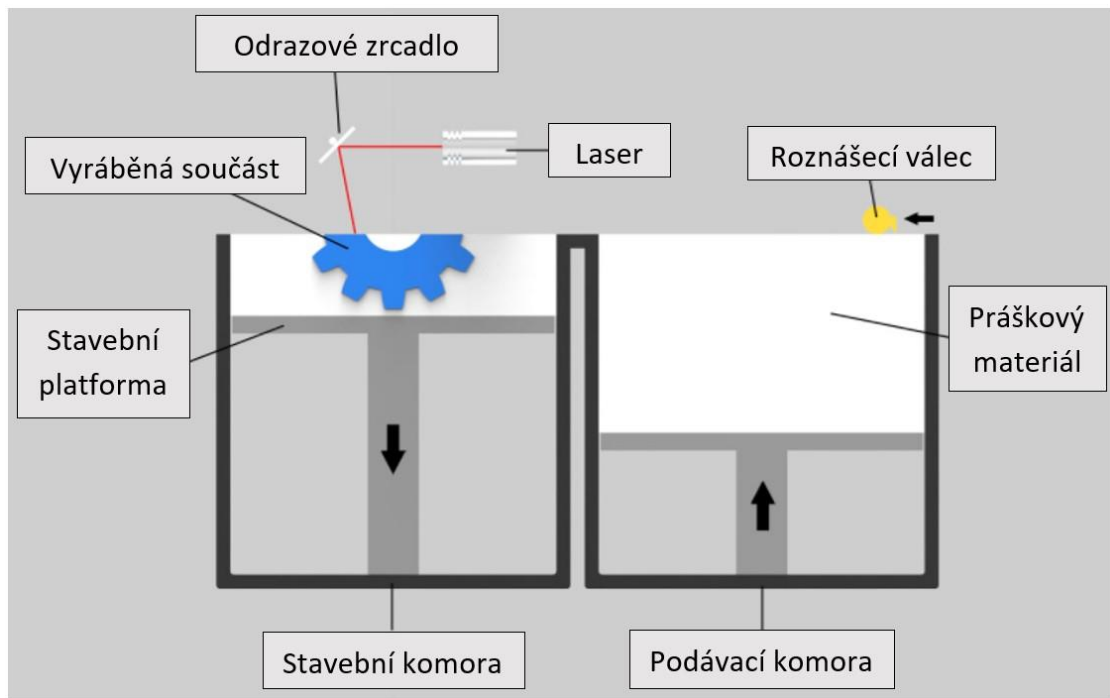
SLA (Stereolitografie) je nejstarší technologie 3D tisku, která se používá již od roku 1987, kdy byla prodána první 3D tiskárna využívající tuto technologii. Při SLA tisku se jako vstupní materiál používá fotocitlivá polymerní pryskyřice (fotopolymer) ve stavu tekutiny. Tato pryskyřice je postupně vytvrzována vrstvu po vrstvě pomocí UV laserového paprsku. Laser vykreslí na povrch pryskyřice požadovaný tvar, který následně ztuhne. Poté se celá stavební platforma spustí o vrstvu níže a povrch se znovu pokryje novou vrstvou pryskyřice. Tento proces se opakuje tak dlouho, dokud není 3D díl vytištěn. Během tisku je často nutné použít podpěry, které zabraňují ztrátě stability v důsledku gravitace nebo bočního tlaku. Podpěry se obvykle odstraňují po dokončení tisku. Díly vyrobené pomocí metody SLA jsou izotropní, hladké a vykazují vysokou přesnost (viz obrázek 5) [10] [11].



Obrázek 5 - Popis principu tisku aditivní technologie SLA [11]

2/4/4 Technologie SLS

SLS (Selective laser sintering) technologie využívá k výrobě 3D součástí modelu práškový materiál, který je zapékán pomocí tepelné energie vyvinuté laserovým paprskem. Prášek je rovnoměrně rozptýlen z podávací komory do stavební komory, kde je následně laserem spékán. Tento proces se opakuje vrstvu po vrstvě, dokud není model dokončen. SLS technologie umožňuje vytvářet výtisky z plastů, kovů či keramiky (viz obrázek 6) [10].



Obrázek 6 - Popis principu tisku aditivní technologie SLS [12]

2/5 Materiály a jejich vlastnosti

Níže uvedená tabulka 1 uvádí výběr technologií aditivní výroby využité pro tisk modelu Lavalovy trysky. Dále u jednotlivých technologií jsou uvedeny typy výrobních strojů, materiálů, parametry tisku a fyzikální stav materiálu. Výběr materiálu byl proveden na základě vlastností vhodných pro tento experiment. Ne všechny dostupné materiály mohou být úspěšně použity a také námi vybrané materiály se mohou během testu ukázat jako nevhodné. Kvalitu a také vhodnost 3D tisku může ovlivňovat samotná metoda 3D tisku, výrobce tiskárny a použitý materiál. Při různých kombinacích tak můžeme teoreticky získat i různé výsledky.

Tabulka 1 - Využití aditivní technologie výroby a materiály pro tento experiment

Technologie aditivní výroby	3D tiskarna	Komerční název materiálu	Název materiálu	Vrstva tisku/Pvrchové úpravy	Stav materiálu
FDM/FFF	Prusa i3 MK3S+	PLA	Polylactic acid	0,1 mm (Průměr trysky 0,4 mm)	Pevný stav (ve formě struny)
		ASA	Akrylonitril-styren-akryl	0,1 mm (Průměr trysky 0,4 mm)	
		ASA-S		0,1 mm/Vyhlazení povrchu (Průměr trysky 0,4 mm)	
		PETG	Polyethylentereftalátu s glykolem	0,1 mm (Průměr trysky 0,4 mm)	
MJF	HP MJF 5200	PA 12	Nylonový polymer	0,08 mm (Rozlišení tisku 1200 dpi)	Ve formě prášku
SLA	Form 3L	Rigid4000	Pryskyřice plněná sklem	0,05 mm	Na bázi kapaliny
SLA	Form 3L	Grey	Pryskyřice	0,05 mm	Na bázi kapaliny
SLS	Formlabs Fuse 1	PA 12	Nylonový polymer	0,11 mm	Ve formě prášku

Následující kapitoly popisují vlastnosti jednotlivých materiálů využitých pro tisk Lavalovy trysky v rámci experimentu této práce. Je nutné zmínit, že materiál PA 12 byl použit pro výrobu metodami MJF a SLS. Tyto dvě aditivní metody výroby se liší zejména zdrojem tepla, který je více popsán v kapitole "Základní rozdělení metod aditivních technologií". Z mechanického hlediska jsou tyto metody srovnatelné v pevnosti dílu, avšak výroba pomocí metody MJF je více izotropní, což znamená, že vytištěný díl má stejné fyzikální vlastnosti ve všech směrech [13].

Technické listy od výrobce uvádějí, že změřené hodnoty tvrdosti materiálů byly získány metodou "Shore D", která se používá k měření tvrdosti povrchu tvrdých gum, plastů a akrylového skla. Princip této metody spočívá v tom, že se zkušební tělíčko s jasně definovanou geometrií vtlačí do zkušební vzorku. Při měření tvrdosti nekovových materiálů je důležité dodržet předepsanou dobu zatížení, aby se zabránilo trvalým deformacím a zkreslení naměřených hodnot, což není tak důležité u kovových materiálů [14]. Výrobce neuvádí tvrdost pro materiály PA 12 (MJF), Rigid4000 (SLA) a Grey (SLA), zatímco pro ostatní materiály jsou naměřené hodnoty tvrdosti uváděny metodou "Shore D".

2/5/1 Vlastnosti materiálu PLA (FFF/FDM)

PLA (Polylactic Acid/Kyselina polymlečná) je termoplastický materiál získávaný z obnovitelných zdrojů, jako je kukuřičný škrob, cukrová třtina, škrobový cukr atd. Jeho pevnost v tahu v horizontálním směru Z činí 51 [MPa] a ve vertikálním směru X,Y činí 59 [MPa], přičemž jeho tvrdost je 81 [-] podle metody "Shore D". Má také nízkou

toxicitu při výrobě, což je výhoda oproti materiálům jako je například ABS. PLA má nižší teplotní odolnost než jiné materiály používané v 3D tisku, například ABS nebo Nylon. Jeho teplota tepelné deformace (1,80MPa) činí 55 [°C]. Je důležité poznamenat, že jako každý plastový materiál, je i PLA náchylný k absorpci vlhkosti, přičemž jeho absorpce vlhkosti za 7 dní činí 0,19 [%] [15]. Další vlastnosti materiálu lze nalézt v technickém listu materiálu od výrobce v příloze č. 7, 8, 9.

2/5/2 Vlastnosti materiálu ASA (FFF/FDM)

ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate/Akrylonitril styren akrylát) je termoplastický materiál. Tento materiál je odolný vůči UV záření a má nízkou toxicitu oproti ABS. ASA má pevnost v tahu v horizontálním směru Z 42 [MPa] a ve vertikálním směru X, Y 45 [MPa], přičemž jeho tvrdost dle metody "Shore D" je 78 [-]. Jeho teplota tepelné deformace činí 86 [°C]. Tento materiál má vysokou teplotní stabilitu v technologii FDM/FFF. ASA je náchylný k absorpci vlhkosti, přičemž jeho absorpce vlhkosti za 7 dní činí 0,17 [%] [15]. Technický list materiálu od výrobce lze nalézt v příloze č. 10, 11, 12.

2/5/3 Vlastnosti materiálu ASA-S (FFF/FDM)

Materiál, který byl aplikován povrchovou úpravou pomocí acetonu, je stejný jako ASA s tím rozdílem, že byla použita povrchová úprava ke snížení drsnosti povrchu. Tento proces však může lehce deformovat geometrii modelu a tím se i mírně lišit od původního návrhu. Z hlediska mechanických vlastností se materiál stává měkčí a je citlivější na rýhy, pokud není s modelem správně manipulováno. Tento způsob úpravy povrchu se doporučuje zejména pro materiály ABS a ASA, protože jiné plastové materiály by se mohly rozpouštět a více se deformovat.

2/5/4 Vlastnosti materiálu PETG (FFF/FDM)

PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified/Kopolymer polyethylentereftalátu glykolu) je termoplastický materiál, který se vyrábí z polymeru PET. Materiál PETG je odolný vůči UV záření. Pevnost v tahu v horizontálním směru Z je 47 [MPa] a ve vertikálním směru X, Y činí 50 [MPa], zatímco jeho tvrdost dle metody "Shore D" je 74 [-]. Tento materiál má také nižší absorpci vlhkosti oproti materiálům ASA a PLA, přičemž jeho absorpce vlhkosti za 7 dní činí 0,10 [%]. Jeho teplota tepelné deformace

(1,80MPa) je 68 [°C] [15]. Další vlastnosti materiálu lze nalézt v technickém listu materiálu od výrobce v příloze č. 13, 14, 15.

2/5/5 Vlastnosti materiálu PA 12 (MJF)

PA 12 (Nylon) je termoplastický materiál s dobrou chemickou odolností vůči olejům, tukům, alifatickým uhlovodíkům a zásadám. Tento materiál je UV stabilní a odolný vůči povětrnostním podmínkám. Jeho mez pevnosti v tahu při maximálním zatížení v horizontálním směru Z dosahuje 48 [MPa], zatímco ve vertikálním směru X a Y dosahuje také 48 [MPa]. Teplota tepelné deformace při tlaku 1,82 [MPa] v osách X a Y činí 95 [°C], zatímco v ose Z dosahuje teplota deformace hodnoty 106 [°C]. Při tlaku 0,45 [MPa] je teplotní deformace v osách X, Y a Z 175 [°C]. Tyto hodnoty ukazují, že teplotní deformace závisí na tlaku, což se liší od materiálů vyráběných metodou FFF/FDM, kde při stejně stanoveném tlaku se teplota deformace mění pouze o jednotky stupňů Celsia nebo se nemění vůbec [16]. Technický list materiálu od výrobce lze nalézt v příloze č. 16.

2/5/6 Vlastnosti materiálu Ridig4000 (SLA)

Rigid4000 je pryskyřice plněná sklem. Materiál má mez pevnosti v tahu po vytvrzení 69 [MPa]. Teplota tepelné deformace při tlaku 1,8 [MPa] je 60 [°C]. Při tlaku 0,45 [MPa] je teplotní deformace 77 [°C] [17]. Technický list materiálu od výrobce lze nalézt v příloze č. 17.

2/5/7 Vlastnosti materiálu Grey (SLA)

Grey je pryskyřice. Materiál má mez pevnosti v tahu po vytvrzení 65 [MPa]. Teplota tepelné deformace při tlaku 1,8 [MPa] je 58 [°C]. Při tlaku 0,45 [MPa] je teplotní deformace 73 [°C] [17]. Technický list materiálu od výrobce lze nalézt v příloze č. 18.

2/5/8 Vlastnosti materiálu PA 12 (SLS)

Materiál PA 12 (Nylon) má podobné vlastnosti jako PA 12 (MJF), což je dlouhodobá stabilita a dobrá chemická odolnost. Jeho mez pevnosti v tahu dosahuje 48 [MPa]. Teplota tepelné deformace při tlaku 1,8 [MPa] je 86 [°C]. Jeho tvrdost dle metody "Shore D" je 75 [-] [18]. Technický list materiálu od výrobce je v příloze č. 19.

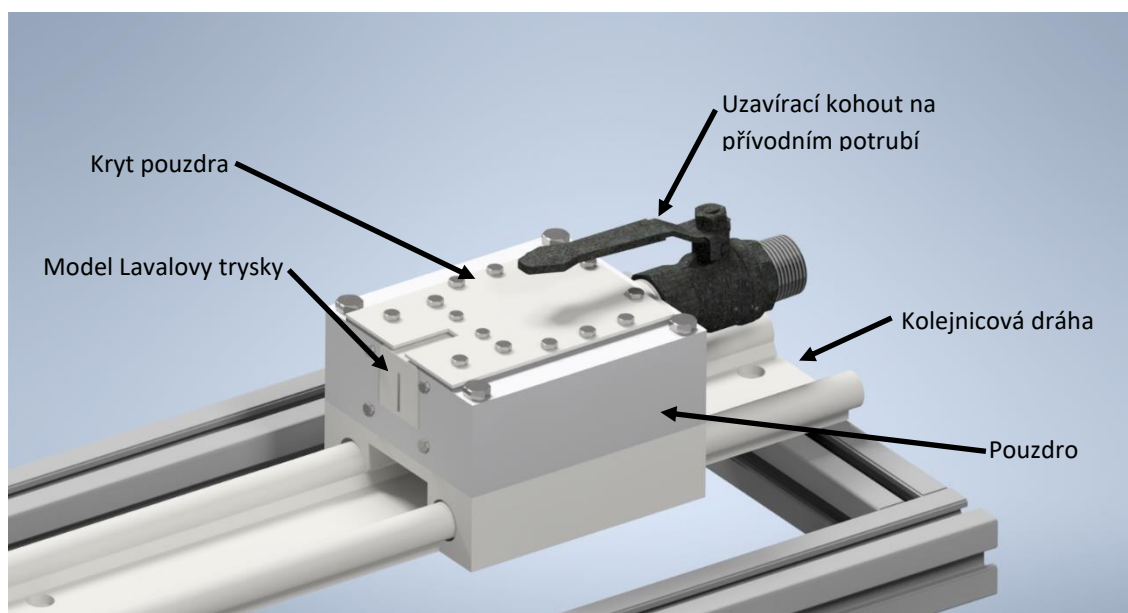


Obrázek 7 - Jednotlivé výtisky Lavalovy trysky: 1 - materiál ASA (FFF/FDM), 2 - materiál ASA-S (FFF/FDM), 3 - materiál PA 12 (MJF), 4 - materiál Rigid4000 (SLA), 5 - materiál PLA (FFF/FDM), 6 - materiál PETG (FFF/FDM), 7 - materiál Grey (SLA) a 8 - materiál PA 12 (SLS).

3/ Praktická část

3/1 Způsob měření účinnosti a popis zařízení

Zamýšlený způsob měření účinnosti Lavalovy trysky je měřicí zařízení tahu trysky, které zaznamenávalo změnu tahové síly pro jednotlivé trysky s rozdílným součinitelem tření. Vzduch se přiváděl přívodním tlakovým potrubím pod konstantním tlakem na model Lavalovy trysky, který byl vložený do pouzdra. Pouzdro umožňovalo výměnu jednotlivých modelů z rozdílných materiálů. Tlaková trubka byla před pouzdrům opatřena uzavíracím kohoutem. Konstrukce pouzdra byla upravena a zkonstruována podle předem definované nosné konstrukce s ohledem na maximální těsnost. Tlakový vzduch vycházející z trysky tlačil pouzdro umístěné na kolejnici na váhu. Nosná konstrukce zařízení byla již předem definována stávajícím zařízením v laboratoři. Popis zařízení je uveden na obrázku 8.



Obrázek 8 - Popis experimentální tratě

3/2 Návrh Lavalovy trysky

V první fázi projektu bylo nutné navrhnout Lavalovu trysku pomocí teoretického výpočtu. Z vypočtených rozměrů byl navrhnut tvar trysky pro experimentální měření vlivu drsnosti povrchu vyrobený pomocí aditivních technologií. Podle tvaru a rozměrů trysky byl navrhnut i zbytek experimentální trati pro měření účinnosti.

V konstrukční části dýzy předpokládáme, že nedochází k výměně tepla mezi vnějším prostředím a médiem, což považujeme za adiabatický děj. Při výpočtu neuvažujeme o třecích ani dalších ztrátách. Pro výpočet byly použity tyto hodnoty: teplota okolí t_1 , vstupní tlak p_1 z kompresoru (ATMOS SE 80), měrná tepelná kapacita c_p vzduchu, Poissonův poměr κ , měrná plynová konstanta r a objemový tok Q_v (viz tabulka 2).

Tabulka 2 - Zadané hodnoty pro výpočet

	Hodnota	Jednotky
Q_v	80	[m ³ /h]
t_1	20	[°C]
κ	1,4	[-]
r	287	[J/Kg.K]
c_p	1004,5	[J/Kg.K]
c_1	30	[m/s]
p_1	1	[MPa]

Tento výpočet popisuje výpočet Lavalovy trysky s konvergentně-divergentním tvarem, který pracuje s nadkritickým tlakovým spádem. Kritický tlakový spád je určen následujícím vzorcem:

$$\beta^* = \frac{p^*}{p_1} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0,528 \quad (3.1)$$

kde β^* je kritický tlakový poměr, p^* je tlak v kritickém průřezu, p_1 je vstupní tlak a κ je Poissonova konstanta (izoentropický mocnitél). Pro tlakový poměr β platí:

$$\beta = \frac{p^2}{p_1} = 0,101 \quad (3.2)$$

Aby se jednalo o Lavalovu trysku, musí být splněna podmínka:

$$\beta < \beta^* \quad (3.3)$$

kde β je skutečný tlakový poměr. Pokud je tato podmínka splněna, pak se jedná o nadkritický tlakový spád, což znamená, že v dýze se v nejužším průřezu dosáhne kritických hodnot a v tomto místě dosáhneme i maximálního průtokového množství

vzduchu po celé délce dýzy [19]. Pro navrhovaný výpočet dýzy (za předpokladu beze ztrát) lze použít následující vzorce. Indexy jsou pro vstupní část 1, kritickou část * a výstupní část 2.

Hmotnostní tok ve vstupní a výstupní části trysky lze spočítat rovnicí kontinuity:

$$\dot{m}_1 = A_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 = A_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 = \dot{m}_2 \quad (3.4)$$

Kde \dot{m}_1 a \dot{m}_2 jsou hmotnostní toky ve vstupní a výstupní části trysky, A_1 a A_2 jsou plochy vstupní a výstupní části, ρ_1 a ρ_2 jsou hustoty ve vstupní a výstupní části c_1 a c_2 jsou rychlosti ve vstupní a výstupní části. Pro navržení dýzy je potřeba určit plochu průřezu trysky, kde dosadíme známou hodnotu objemového průtoku a zjistíme hmotnostní tok. Známe objemový průtok média, kterým bude dýza protékat a potřebujeme zjistit hmotnostní tok. Proto dosadíme objemový průtok do níže uvedené rovnice [4] [20].

$$Q_v = A_1 \cdot c_1 \quad (3.5)$$

$$\dot{m}_1 = Q_v \cdot \rho_1; \quad \dot{m}_2 = Q_v \cdot \rho_2; \quad \dot{m}_* = Q_v \cdot \rho^* \quad (3.6)$$

Z této rovnice vyjádříme plochu vstupní a výstupní části:

$$A_1 = \frac{\dot{m}_1}{\rho_1 \cdot c_1}; \quad A_2 = \frac{\dot{m}_2}{\rho_2 \cdot c_2} \quad (3.7)$$

Hustota vzduchu na vstupu, výstupu a v kritickém místě vyjádříme ze stavové rovnice:

$$\rho_1 = \frac{p_1}{r \cdot T_1}; \quad \rho_2 = \rho_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}}; \quad \rho_* = \frac{\rho_2}{\left(\frac{p_2}{p^*}\right)^{\frac{1}{\kappa}}} \quad (3.8)$$

Rychlost na výstupu z trysky lze vypočítat následovně:

$$T_{2,iz} = \frac{T_1}{\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}}} \quad (3.9)$$

Rychlost na výstupu lze spočítat následující rovnicí:

$$c_{2,iz} = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2)} \quad (3.10)$$

Rychlost v kritickém místě lze vypočítat podle následující rovnice:

$$c^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa + 1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1}} \quad (3.11)$$

Tlak v kritickém místě vypočítáme podle rovnice:

$$p^* = p_1 \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (3.12)$$

Vypočet měrného objemu pro vstupní část, určíme ze stavové rovnice:

$$v_1 = \frac{r \cdot T_1}{\rho_1} \quad (3.13)$$

Průřez v kritickém místě lze spočítat pomocí rovnice:

$$A^* = \frac{v_1}{\rho_1 \cdot \left(\frac{p^*}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa \cdot p_1}{\kappa + 1} \cdot \frac{1}{\rho_1}}} \quad (3.14)$$

V tabulce 3 jsou uvedeny vstupní hodnoty jako teplota, tlak, rychlost, hustota, hmotnostní průtok a plocha průřezu.

Tabulka 3 - Výsledky výpočtu na vstupu do trysky

	Hodnota	Jednotky
T_1	293,15	[K]
p_1	1000000	[Pa]
c_1	30	[m/s]
ρ_1	11,89	[Kg/m ³]
m_1	0,26	[Kg/s]
v_1	0,084	[m ³ /kg]
A_1	740,74	[mm ²]

Tabulka 4 uvádí vypočtené hodnoty v kritickém místě, kde je Machovo číslo rovno jedné.

Tabulka 4 - Výsledky výpočtu v kritickém bodě

	Hodnota	Jednotky
p^*	528281,8	[Pa]
c^*	313,3	[m/s]
ρ^*	7,53	[Kg/m ³]
m^*	0,17	[Kg/s]
A^*	35,64	[mm ²]

V tabulce 5 jsou vypočtené výstupní hodnoty jako teplota, tlak, rychlost, hustota, hmotnostní průtok a plocha průřezu.

Tabulka 5 - Výsledky výpočtu na výstupu z trysky

	Hodnota	Jednotky
$T_{2,iz}$	152,41	[K]
p_2	101325	[Pa]
$c_{2,iz}$	531,74	[m/s]
ρ_2	2,32	[Kg/m ³]
m_2	0,051	[Kg/s]
A_2	41,79	[mm ²]

Z vypočtených hodnot jsem mohl pomocí součinu hmotnostního průtoku m_2 a rychlosti vzduchu $c_{2,iz}$ určit teoretickou hodnotu tahu F (3.15) [21].

$$F = m_2 * c_{2,iz} = 0,051477 * 531,74 = \mathbf{27,37 [N]} = \mathbf{2,7 [Kg]} \quad (3.15)$$

Expanze plynu v trysce je ovlivněna ztrátami, které mají vliv na výslednou účinnost trysky. Tyto naměřené účinnosti trysek byly použity na výsledný výpočet hodnot uvedených v tabulce 6.

Reálná teplota plynu po expanzi t_2 byla vypočtena pomocí vztahu:

$$t_2 = T_1 - (T_1 - T_{2,iz}) \cdot \eta \quad (3.16)$$

kde T_1 je počáteční teplota plynu, $T_{2,iz}$ je teplota ideální expanze a η je účinnost trysky. Výpočet entalpie (h) a entropie (s) byl proveden pomocí programu Excel s databází CoolProp, který obsahuje vlastnosti vzduchu pro výpočet. Tabulka 6 obsahuje vypočtené hodnoty jako jsou entalpie před expanzí h_1 , entalpie izoentropická po expanzi $h_{2,iz}$, entropie izoentropická $s_{2,iz}$, entalpie po expanzi h_2 a entropie s_2 .

Pro výpočet rychlosti c_2 po expanzi byl použit následující vztah:

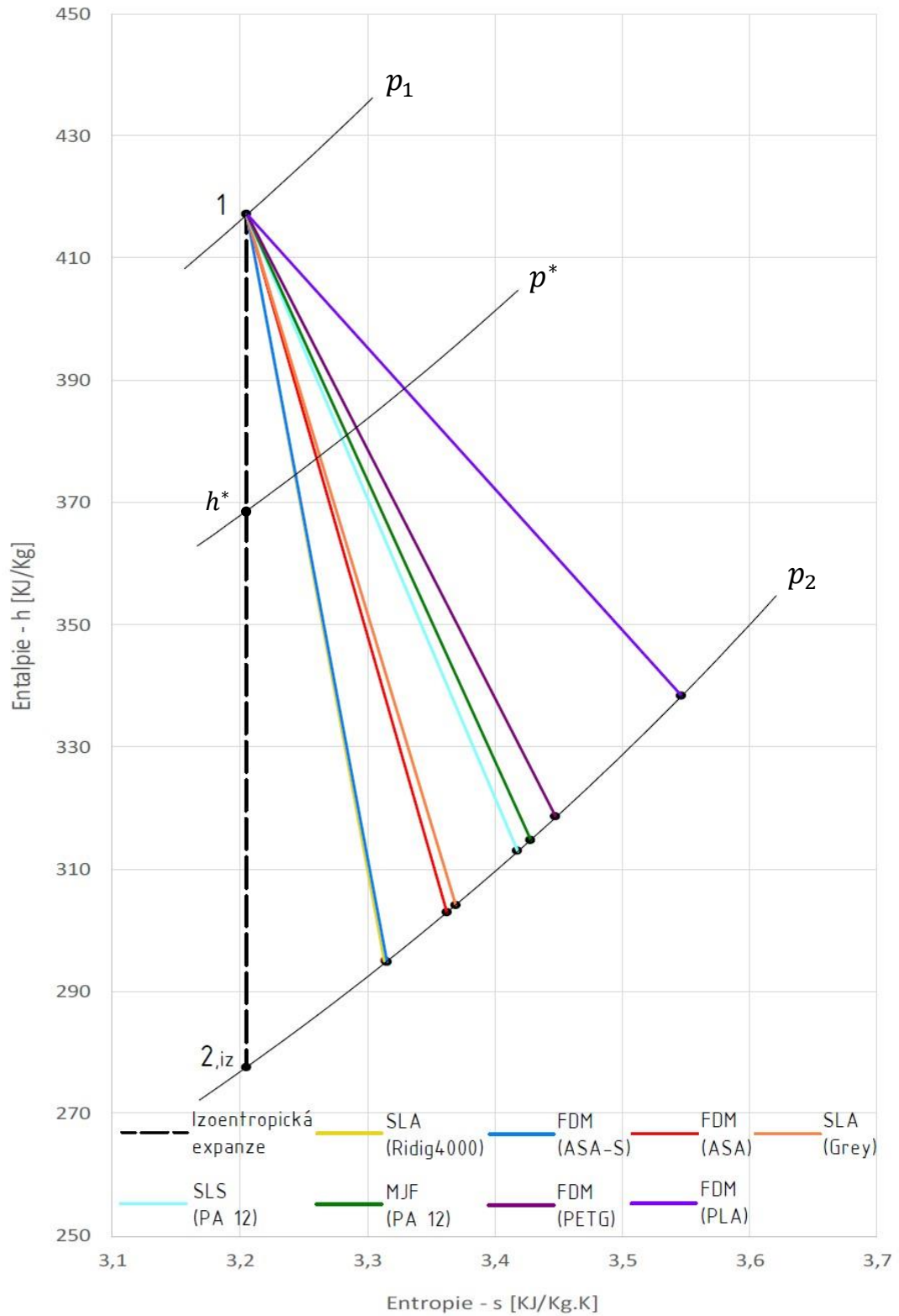
$$c_2 = \sqrt{\frac{(h_1 - h_2) \cdot c_{2,iz}^2}{h_1 - h_{2,iz}}} \quad (3.17)$$

kde $c_{2,iz}$ je rychlost ideální expanze.

Tabulka 6 - Výsledky výpočtu pro jednotlivé materiály

		FDM/FFF				MJF	SLA		SLS
		ASA	ASA-S	PETG	PLA	PA 12	Rigid4000	Grey	PA 12
η	[%]	0,81	0,82	0,71	0,56	0,75	0,88	0,75	0,73
t2	[K]	179,21	178,08	193,84	213,66	188,16	169,85	187,23	189,96
h1	[KJ/Kg]	417,29							
h2,iz	[KJ/Kg]	277,70							
h2	[KJ/Kg]	304,28	303,16	318,79	338,45	313,16	295,00	312,24	314,94
s2,iz	[KJ/Kg.K]	3,20							
s2	[KJ/Kg.K]	3,37	3,36	3,45	3,55	3,42	3,31	3,41	3,43
c2	[m/s]	478,88	481,23	447,41	400,83	459,89	497,98	461,89	455,97

Následující obrázek 9 zobrazuje h-s diagram pro expanzi Lavalovou tryskou. Diagram přehledně ukazuje vypočtenou izoentropickou expanzi s porovnáním expanze tryskou při použití různých materiálů. Stav 1 reprezentuje vstupní stav plynu do trysky, stav 2,iz představuje výstupní stav plynu při izoentropické expanzi. Hodnoty jednotlivých materiálů uvedených na diagramu byly vypočítány na základě naměřené účinnosti. Rozdílné materiály a jejich expanzní křivky jsou barevně rozlišeny a zobrazují nevratné ztráty při skutečné expanzi.



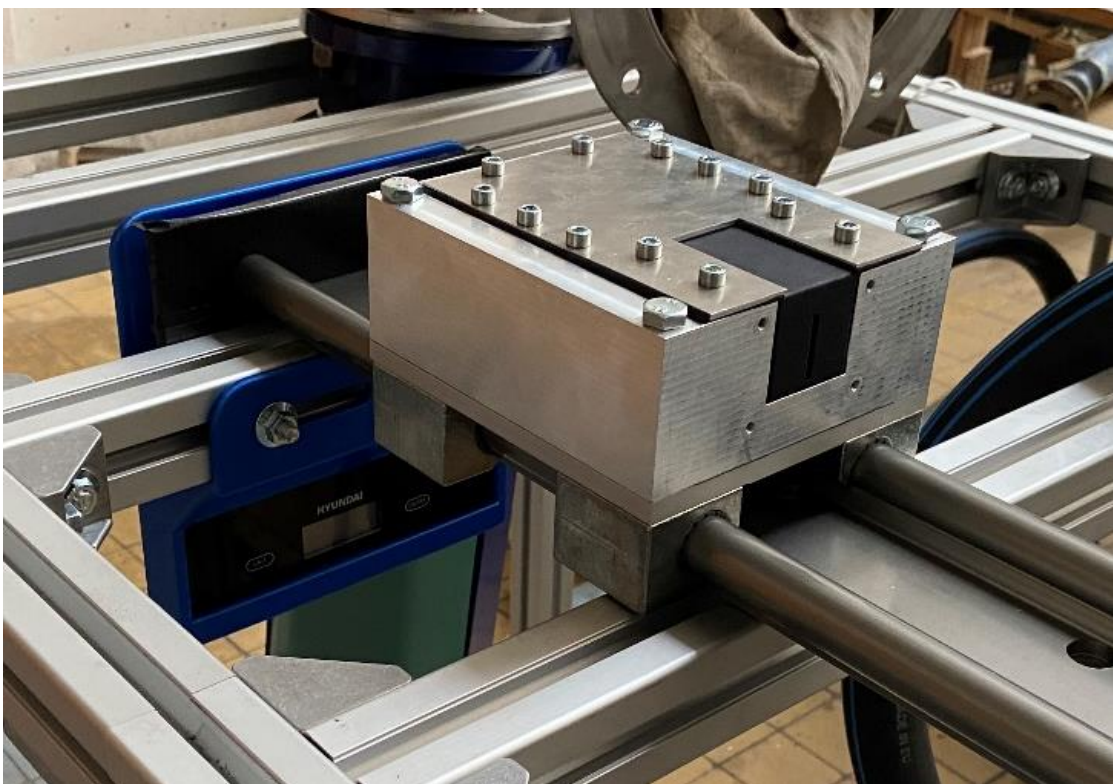
Obrázek 9 – h-s diagram pro jednotlivé trysky z různých materiálů a izentropická expanze 1-2,iz

3/3 Postup a vývoj měření účinnosti Lavalovy trysky

V této kapitole rozebírám výsledky a metodiku experimentálních zkoušek Lavalovy trysky vyrobené aditivní technologií. Po celou dobu měření vstupní hodnoty natlakovaného vzduchu zůstávaly stejné. Pouze se měnil měřicí přístroj pro zlepšení přesnosti měření.

3/3/1 Postup měření I. váhy

První experimentální měření proběhlo na váze Hyundai KVE893B (výrobce neuvádí přesnost měřícího zařízení) upevněné v držáku na kolejnicové dráze (viz obrázek 10).



Obrázek 10 - Měřicí trať s použitím I. váhou

Provedl jsem tři měření každé trysky v měřicím zařízení, přes které jsem pouštěl natlakovaný vzduch o hodnotách $Q_{v'} = 80$ [m³/h] a $p_{2'} = 1$ [MPa]. Toto zařízení následně vytvářelo tah na váhu, ze které jsem vyčetl výslednou působící sílu. Z těchto hodnot jsem provedl aritmetický průměr pro zjištění přesnější hodnoty (viz tabulka 7).

Výsledný tah trysky jsem určil převedením průměrné hodnoty v jednotkách [g] na tahovou sílu F' [N]. Hodnotu rychlosti za tryskou $c_{2'}$ jsem vypočítal pomocí podílu výsledného tahu F' a teoreticky vypočteného hmotnostního průtoku m_2 (3.18).

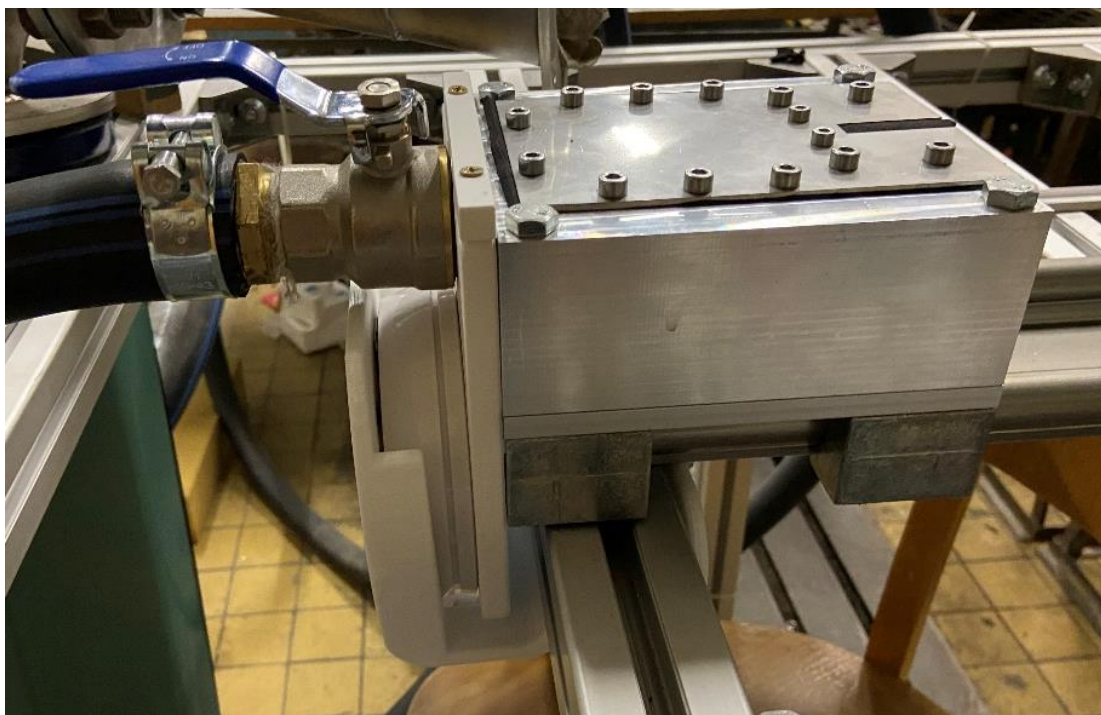
$$c2' = \frac{F'}{m2} \quad (3.18)$$

Tabulka 7 - Výsledky měření jednotlivých trysek I. váhy

Technologie aditivní výroby	Komerční název materiálu	Průměrný vyvozený tah trysky F' [N]	Průměrný vyvozený tah trysky F' [Kg]	Rychlost za tryskou c2' [m/s]	Účinnost trysky [%]
FDM/FFF	ASA	25,28	2,5773	491,16	92,4
	ASA (Smoothing)	25,59	2,6083	497,1	93,5
	PETG	24,61	2,5084	478,0	89,9
	PLA	24,39	2,4865	473,9	89,1
MJF	PA 12	23,48	2,3938	456,2	85,8
SLA	Rigid4000	23,76	2,4217	461,5	86,8
	Grey	22,89	2,3333	444,7	83,6
SLS	PA 12	20,42	2,0819	396,8	74,6

3/3/2 Postup měření II. váhy

Z důvodu velkých odchylek naměřených hodnot jsem upravil experimentální trať ve snaze zpřesnit výsledky. Vzhledem k tomu, že jsem v prvním postupu použil běžně dostupnou váhu, jsem se z důvodu zpřesnění dalšího měření rozhodl ji vyměnit za laboratorní váhu TB01 do hmotnosti 3000 [g] s přesností 0,1 [g] [22]. Změněn byl i úchyt váhy a také byla dodatečně přidána destička, která se opírá o celou zadní část pouzdra. Tato destička měla pomoci k rovnoměrnému rozložení sil na váhu, na kterou je vyvíjen tah z trysky (viz obrázek 11). Také byla provedená úprava horního pouzdra z důvodu předchozí netěsnosti. V současném provedení jsem přidal dva šrouby zapuštěné do trysky a také zapracoval zúžení drážky z důvodu možnosti budoucího měření průběhu proudění v trysce.



Obrázek 11 - Měřicí trať s požitím II. váhy

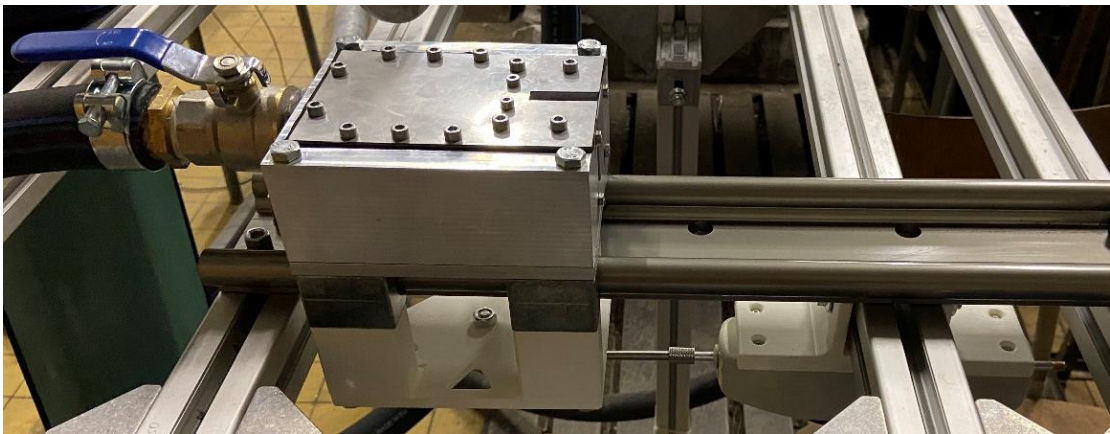
Provedl jsem pět měření každé trysky v měřícím zařízení, přes které jsem pouštěl natlakovaný vzduch o hodnotách $Q_{v'} = 80$ [m³/h] a $p_{2'} = 1$ [MPa]. Toto zařízení následně vyvolávalo tah na váhu, ze kterého jsem vyčetl výslednou působící sílu. Z těchto hodnot jsem provedl aritmetický průměr pro zjištění přesnější hodnoty a následující výpočet jsem provedl stejným postupem jako v prvním měření I. Váhy (viz tabulka 8).

Tabulka 8 - Výsledky měření jednotlivých trysek II. váhy

Technologie aditivní výroby	Komerční název materiálu	Průměrný vyvozený tah trysky F' [N]	Průměrný vyvozený tah trysky F' [Kg]	Rychlost za tryskou c2' [m/s]	Účinnost trysky [%]
FDM/FFF	ASA	14,66	1,49	284,8	53,6
	ASA (Smoothing)	18,73	1,91	363,9	68,4
	PETG	19,09	1,95	370,9	69,8
	PLA	19,69	2,01	382,4	71,9
MJF	PA 12	16,30	1,66	316,6	59,5
SLA	Rigid4000	19,33	1,97	375,6	70,6
	Grey	17,20	1,75	334,2	62,8
SLS	PA 12	18,78	1,91	364,8	68,6

3/3/3 Postup měření III. siloměrem

Předchozí měření vykazovalo stále výchyly ve výsledných hodnotách. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl změnit měřicí laboratorní váhu za siloměr Insize 30 N s přesností $\pm 0,1\%$, určený na tah a tlak [23]. Pro účel měření byla využita pouze možnost měření tahu. Trať byla upravená tak, aby siloměr mohl být umístěn vodorovně se směrem pohybu pouzdra, aby měřil hodnoty kolmo proti pohybu. Z důvodu proudění vzduchu za tryskou bylo nutné instalovat měřicí zařízení na spodní stranu tratě (viz obrázek 12).



Obrázek 12 - Měřicí trať s použitím siloměru

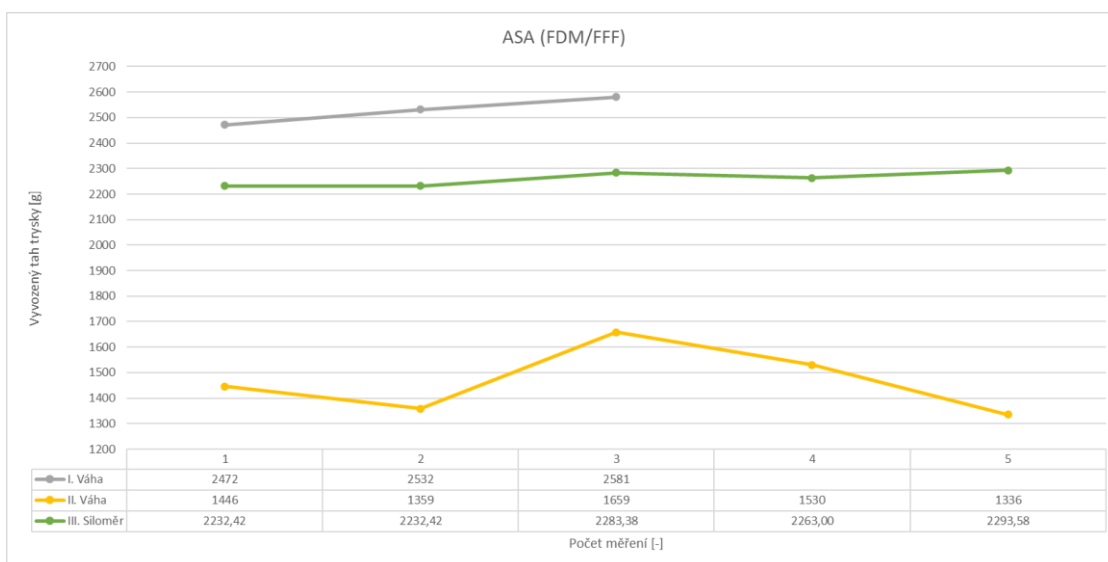
Provedl jsem pět měření každé trysky v měřicím zařízení, přes které jsem pouštěl natlakovaný vzduch o hodnotách $Q_{v'} = 80$ [m³/h] a $p_{2'} = 1$ [MPa]. Toto zařízení následně vyvolávalo tah na siloměr, ze kterého jsem vyčetl výslednou působící sílu. Z těchto hodnot jsem provedl aritmetický průměr. Následující výpočet jsem provedl stejným postupem jako v předchozích měřeních (viz tabulka 9).

Tabulka 9 - Výsledky měření jednotlivých trysek III. siloměrem

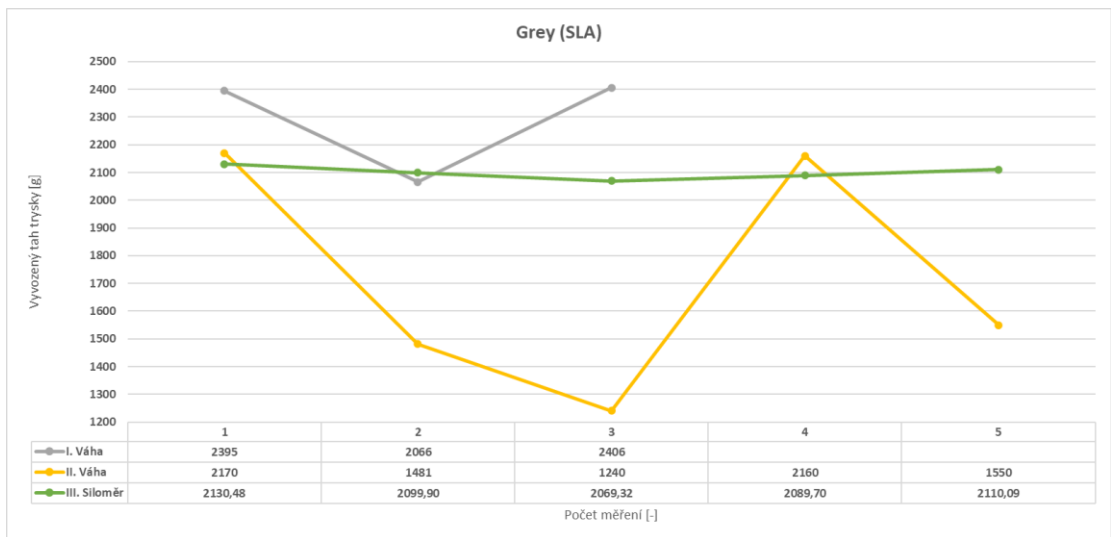
Technologie aditivní výroby	Komerční název materiálu	Průměrný vyvozený tah trysky F' [N]	Průměrný vyvozený tah trysky F' [Kg]	Rychlost za tryskou c2' [m/s]	Účinnost trysky [%]
FDM/FFF	ASA	22,16	2,26	430,5	81,0
	ASA (Smoothing)	22,38	2,28	434,8	81,8
	PETG	19,32	1,97	375,2	70,6
	PLA	15,46	1,58	300,3	56,5
MJF	PA 12	20,42	2,08	396,7	74,6
SLA	Rigid4000	23,98	2,44	465,8	87,6
	Grey	20,60	2,10	400,2	75,3
SLS	PA 12	20,07	2,05	389,9	73,3

3/4 Porovnání způsobů měření tahu trysek

Obrázky 13, 14 znázorňují grafy porovnání měření pomocí běžné váhy, laboratorní váhy a siloměru pro jednotlivé materiály. Z tohoto můžeme usoudit, že měření siloměrem udává nejrovnoměrnější výsledky. Proto výsledky pomocí siloměru využijeme i dále v porovnávání naměřených účinností trysky a drsnosti povrchu trysek. Zbylé grafy jednotlivých materiálů jsou uvedené v příloze č. 1, 2, 3, 4, 5, 6.



Obrázek 13 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál ASA (FDM/FFF)



Obrázek 14 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál Grey (SLA)

3/5 Měření drsnosti povrchu Ra

3/5/1 Drsnoměr

Průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu Ra znamená aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic. Je vyhodnocována na dané měřené délce. Je to parametr, který je nejčastěji uváděn na výrobních výkresech. Nevýhodou měření a výpočtu parametru Ra je necitlivost k extrémním nerovnostem povrchů a rýhám u měřeného profilu [24].



Obrázek 15 - Drsnoměr Insize ISR-C002

Měření drsnosti povrchů bylo prováděno na ploše trysky pomocí drsnoměru Insize ISR-C002 na pěti rovnoměrně rozložených bodech v rozsahu $\lambda_c = 0,25 [mm]$, ze kterých byly vybrány tři nejbližší hodnoty pro vytvoření aritmetického průměru (obrázek 15). Rozsah 0,25 mm byl určen s ohledem na tvar trysky. Chyba měření tohoto drsnoměru se pohybuje v rozsahu 10 % z naměřené hodnoty. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tabulce 10.

Tabulka 10 - Naměřené drsnosti povrchu jednotlivých Lavalových trysek

Technologie	FDM/FFF				MJF	SLA		SLS
Komerční název materiálu	ASA	ASA (Smoothing)	PETG	PLA	PA 12	Ridig4000	Grey	PA 12
Průměrná hodnota Ra [μm]	7,63	0,205	5,361	6,504	2,542	1,109	0,692	3,681

3/5/2 Konfokální mikroskop

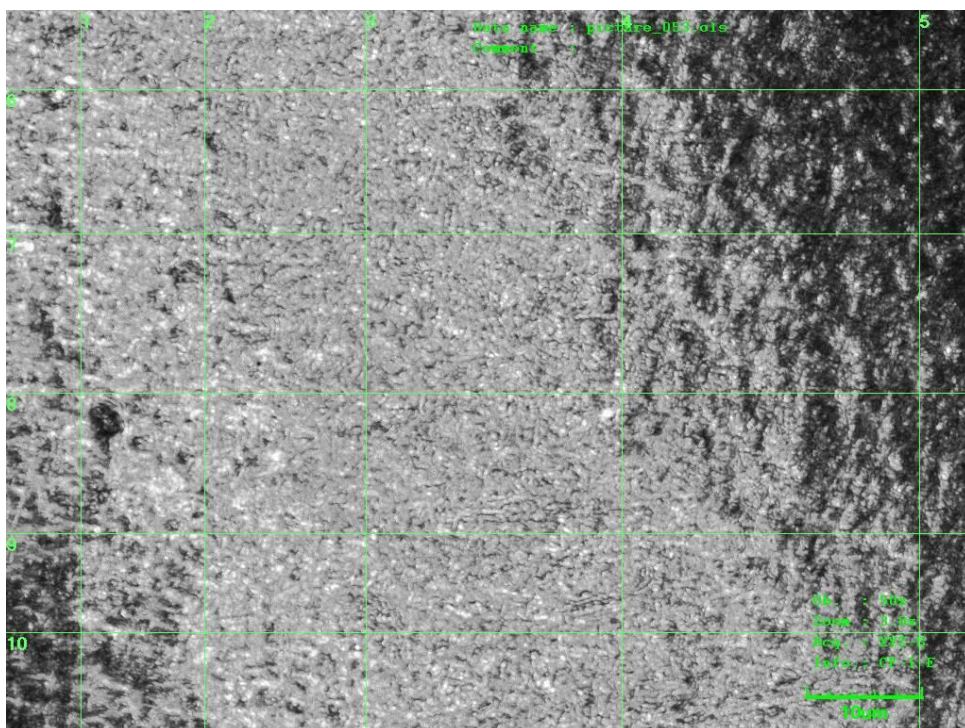
Po provedení měření tahu trysky bylo zjištěno, že naměřené hodnoty neodpovídají drsnosti povrchu měřené vnitřní části trysky drsnoměrem Insize. Z tohoto důvodu bylo provedeno další měření drsnosti povrchu Ra na konfokálním mikroskopu LEXT OLYMPUS 3000 opakovaním měření v osách X, Y, Z s přesností 0,1 μm , který umožňuje získat výrazně přesnější informace o struktuře povrchu trysky. Konfokální

mikroskop zobrazuje ve směru osy Z jednotlivé optické řezy, ze kterých se složí trojrozměrná optická struktura povrchu (viz obrázek 16) [25].



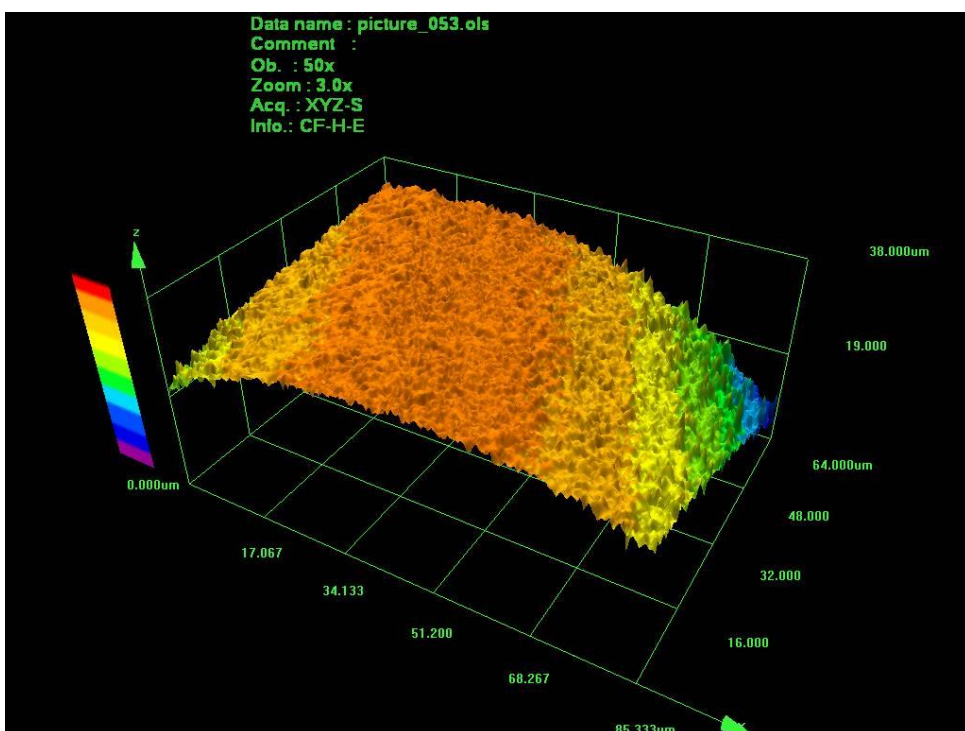
Obrázek 16 - Konfokální mikroskop – LEXT OLYMPUS 3000

Při měření bylo použito zvětšení 3600x. Toto zvětšení ale může u modelu vytištěných na 3D tiskárnách zkreslit skutečnou drsnost povrchu, a to za předpokladu, že materiál výtisku je nanášen ve vrstvách, které vytvářejí rýhy (popřípadě jiné povrchové vady) a které mohou mít vliv na výslednou měřenou hodnotu drsnosti povrchu. Na obrázku 17 zachycuje snímek optický řez materiálu ASA pomocí konfokálního mikroskopu.



Obrázek 17 - Optický řez materiálem ASA

Níže uvedený snímek (viz obrázek 18) ukazuje trojrozměrnou optickou strukturu povrchu, která byla vygenerována konfokálním mikroskopem.



Obrázek 18 - Trojrozměrná optická struktura materiálu ASA

Celkové hodnoty byly zprůměrovány z deseti naměřených hodnot Ra a tyto hodnoty jsou uvedené v tabulce 11. Z výsledků měření lze usoudit, že nejnižší drsnost povrchu

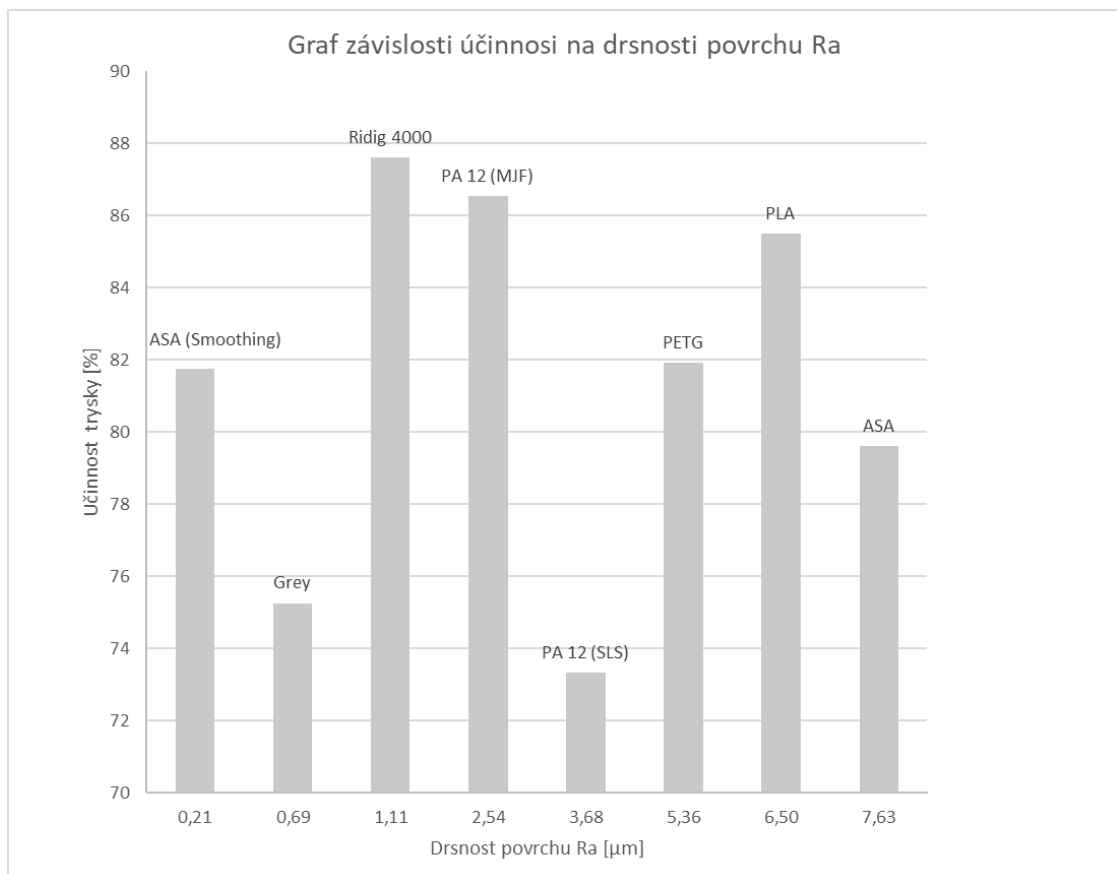
má materiál Rigin4000 (SLA) a nejvyšší drsnost povrchu má materiál PLA (FFF/FDM). Z výsledků také vyplývá, že úprava povrchu materiálu ASA pomocí acetonu vedla ke snížení drsnosti povrchu.

Tabulka 11 - Výsledky měření drsnosti povrchu konfokálním mikroskopem

Technologie	FDM/FFF				MJF	SLA		SLS
Komerční název materiálu	ASA	ASA (Smoothing)	PETG	PLA	PA 12	Ridig4000	Grey	PA 12
Průměrná hodnota Ra [μm]	0,335	0,313	0,585	0,696	0,569	0,266	0,410	0,512

3/6 Porovnání vlivu drsnosti povrchu na účinnost dýzy pomocí drsnoměru

Porovnáním výsledků měření drsnosti povrchu drsnoměrem a účinnosti jednotlivých trysek naměřených siloměrem vyplývá to, že z naměřených hodnot tahem vychází nejlépe účinnost u materiálu Rigid 4000 (SLA) a PA 12 (MJF) a to i přes skutečnost, že se nejedná o nejnižší naměřenou drsnost povrchu. Vysoká úroveň drsnosti povrchu Lavalovy trysky by však měla způsobovat vyšší profilové ztráty (snížení účinnosti), což z naměřených hodnot drsnosti povrchu a účinnosti nevyplývá (viz obrázek 19). Chyba je s velkou pravděpodobností na straně nepřesného měření plochy trysky drsnoměrem. Z tohoto důvodu byly výsledky přeměřeny pomocí konfokálního mikroskopu.



Obrázek 19 – Diagram porovnání drsnosti povrchu při měření drsnoměrem a účinnosti trysek

Hodnoty naměřené drsnosti povrchů v jiných diplomových pracech vycházejí rozdílně i o několik jednotek. Například měření PA 12 (SLS) na drsnoměr Hommel-Etamic T8000 měla naměřenou hodnotu $Ra = 8,5$ [μm], která by odpovídala více mé naměřené účinnosti Lavalovy trysky [26]. Pouze výsledky naměřené u technologie výroby

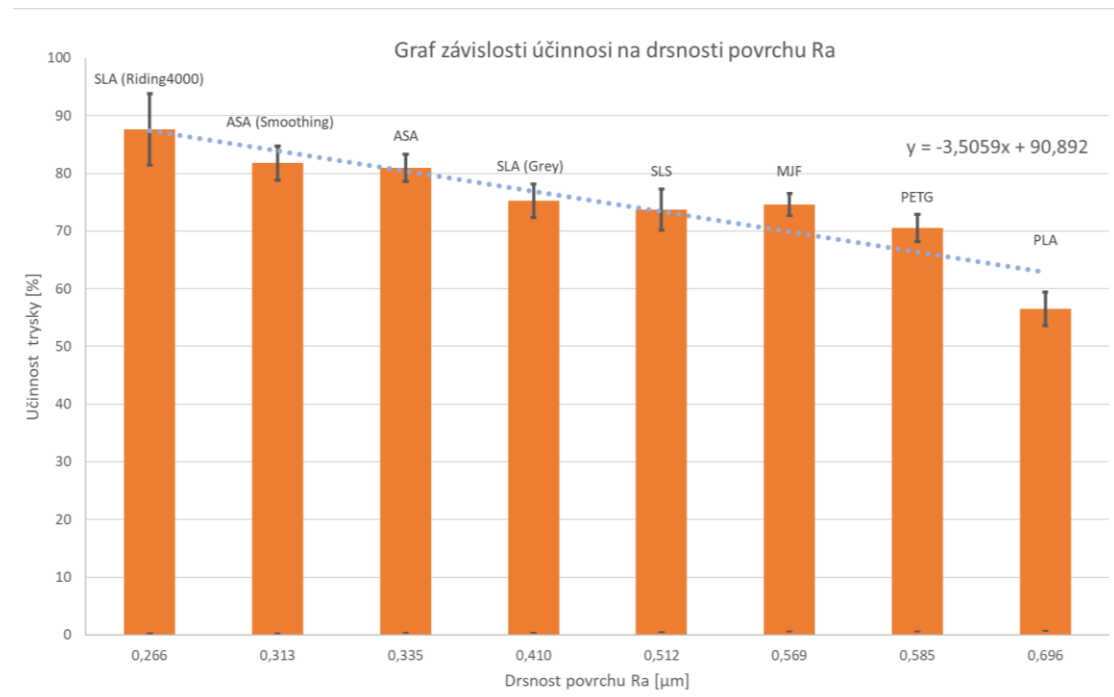
metodou FDM/FFF mají téměř totožné hodnoty. U této technologie zaleží na sklonu tisku vůči ploše 3D tiskárny, která může ovlivnit celkovou drsnost povrchu .

3/7 Porovnání vlivu drsnosti povrchu na účinnost dýzy pomocí konfokálního mikroskopu.

Graf (viz obrázek 20) porovnává účinnost a drsnost povrchu jednotlivých trysek, které byly měřeny pomocí konfokálního mikroskopu a siloměru. V souladu s našimi předpoklady je vyšší drsnost povrchu spojena s vyšší účinností trysky. Z výsledků měření je patrné, že nejslibnější výsledky vykazuje materiál Rigid 4000 vyrobený aditivní technologií SLA. Graf popisuje účinnost η [%] (osa y) v závislosti na drsnosti povrchu R_a [μm] pro jednotlivé dýzy a je proložen lineární regresí, která je vyjádřena rovnicí (3.19).

$$y = -3,5059x + 90,892 \quad (3.19)$$

kde $y = \eta$ [%] a $x = R_a$ [μm]. Podmínka platnosti tohoto vzorce regrese je, že Machovo číslo a Reynoldsové číslo jsou $Ma = 2,15$ [-] a $Re = 763\,393$ [-], které byly vypočteny z teoretických výpočtů na výstupu dýzy.



Obrázek 20 - Diagram porovnání drsnosti povrchu a účinnosti trysek

Graf také zobrazuje tzv. 'error bars', který ukazuje rozsah nejistot měření pro každý materiál. Níže uvedená tabulka 12 uvádí nejistoty naměřených hodnot siloměrem. Výpočet byl proveden kombinovanou standardní nejistotou U.

Tabulka 12 - Nejistoty měření

Materiál	Hodnota	Jednotky
Ridig 4000	$23,98 \pm 0,26$	[N]
ASA (Smoothing)	$22,38 \pm 0,13$	[N]
ASA	$22,16 \pm 0,11$	[N]
Grey	$20,6 \pm 0,14$	[N]
PA 12 (SLS)	$20,07 \pm 0,18$	[N]
PA 12 (MJF)	$20,42 \pm 0,094$	[N]
PETG	$19,31 \pm 0,12$	[N]
PLA	$15,46 \pm 0,19$	[N]

4/ Závěr

V této práci jsem porovnával rozdílné materiály pro výrobu nízkoteplotních expanzních strojů pomocí 3D tisku, které lze uplatnit v decentralizované energetice. Zde, na základě provedené analýzy, bylo zjištěno, že drsnost povrchu má vliv na účinnost dýzových segmentů. Bylo provedeno měření účinnosti trysek z osmi různých materiálů. Z výsledků vyplývá, že materiál s největší účinností je Rigid 4000 s účinností 87,6 [%] a drsností povrchu 0,266. Při porovnání nejhorších a nejlepších výsledků můžeme zhodnotit důležitost volby nejvhodnějšího materiálu. Nejhorší z vybraných vzorků podle naměřených hodnot vyšel materiál PLA s drsností 0,696 a účinností pouze 56 [%]. Nejlépe vyhodnocený materiál má tak účinnost až o 31% vyšší. Domnívám se, že výrazně vyšší účinnost u materiálu s pouze nepatrnou lepší drsností povrchu, je dána určitou změnou geometrie prvku zapříčiněnou způsobem tisku. Může to být způsobeno například vlivem rozdílné roztažnosti materiálu. Přesná příčina tohoto jevu může být ale daleko komplexnější a nebyla v rámci této práce podrobně analyzována. Nejslibnější identifikovaný materiál Rigid 4000 je ale zároveň velice křehký a při požadavcích na větší houževnatost musíme zhodnotit například i tento aspekt. Správná volba materiálu tedy nezáleží pouze na naměřených hodnotách, ale důležité jsou také další parametry, jako houževnatost, oteruvzdornost nebo teplotní odolnost.

Pomocí aditivních technologií lze výhodně ekonomicky vytvářet rychle a levně prototypy, což zahrnuje i dýzové segmenty pro nízkoteplotní expanzní stroje v decentralizované energetice. Na základě výsledků analýzy lze doporučit využití aditivních technologií pro výrobu dýzových segmentů s ohledem na jejich vysokou účinnost. Je však nutné brát v úvahu specifika plastových aditivních technologií, jako je nízká provozní teplota média, nízká přesnost výtisků a horší mechanické vlastnosti než u materiálu vyrobeného konvenčními metodami.

Dále by bylo vhodné provést další výzkum s cílem měřit i průběh tlaku v dýze, neboť toto měření by poskytlo další informace o procesu expanze plynu a umožnilo by vylepšit celkový přehled o účinnosti trysky. Kromě toho by se mohlo zkoumat také využití jiných materiálů a metod aditivních technologií pro výrobu dýzových segmentů, které by mohly dosáhnout ještě lepších výsledků.

Celkově lze říct, že aditivní technologie mají velký potenciál pro výrobu dýzových segmentů pro nízkoteplotní expanzní stroje v decentralizované energetice a jejich využití by mohlo vést ke zrychlení vývoje a zlevnění výroby.

Zdroje:

- [1] ŠPALE, Jan. *Design and cold-air tests of a single-stage axial micro turboexpander for an ORC power system* [online]. Praha, 2020 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/92810>. Diplomová práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Václav Novotný.
- [2] P X Huang a S Yonkers. *An experimental investigation on pulsation & noise reduction by shunt pulsation trap with a nozzle for compressors operating in under-compression* [online]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019 [cit.2023-04-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/335588467_An_experimental_investigation_on_pulsation_noise_reduction_by_shunt_pulsation_trap_with_a_nozzle_for_compressors_operating_in_under-compression
- [3] Jiří Škorpík. Proudění plynů a par tryskami. Transformační technologie [online]. [cit. 23.04.2023]. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/40.html#uvod> <https://www.transformacni-technologie.cz/40.html#uvod>
- [4] NOŽIČKA, Jiří. *Základy termomechaniky* [online]. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008 [cit. 2023-04-20]. ISBN 978-80-01-04022-5.
- [5] IJTPP | Free Full-Text | The Profile Loss of Additive Manufactured Blades for Organic Rankine Cycle Turbines. MDPI - Publisher of Open Access Journals [online]. 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution [cit. 03.05.2023]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2504-186X/7/1/11>
- [6] Frontiers | Design and test a converging and de Laval nozzle using additive manufacturing. Frontiers | Publisher of peer-reviewed articles in open access journals [online]. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpace.2022.951987/full>
- [7] FRIŠ, Daniel. *Vliv procesních parametrů* [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/152202/DP_Fris_Daniel.pdf
- [8] makexyz, LLC 2023. All right reserved [online]. [cit. 24.05.2023]. Dostupné z: <https://www.makexyz.com/printer-services/process/FDM-3D-printing-services>
- [9] Multi Jet Fusion (MJF) | MakerVerse. MakerVerse | Your Platform for Sourcing Industrial Parts [online]. 2023 MakerVerse [cit. 27.04.2023]. Dostupné z: <https://www.makerverse.ai/technologies-mjf>

- [10] Novotný, V, Špale, J, Stunova, BB, Kolovratník, M, Vitvarova, M, & Zikmund, P. "3D Printing in Turbomachinery: Overview of Technologies, Applications and Possibilities for Industry 4.0." *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 6: Ceramics; Controls, Diagnostics, and Instrumentation; Education; Manufacturing Materials and Metallurgy*. Phoenix, Arizona, USA. June 17–21, 2019. V006T24A021. ASME. [cit. 2023-05-20] Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/GT2019-91849>
- [11] SLA – Stereolithography (and DLP, CDLP, CLIP) – Additive Blog. Additive Blog – 3D Printing and Design [online]. [cit. 23.05.2023]. Dostupné z: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/sla-stereolithography-dlp-cdlp-clip/>
- [12] makexyz, LLC 2023. All right reserved [online]. [cit. 24.05.2023]. Dostupné z: <https://www.makexyz.com/printer-services/process/SLS-3D-printing-services>
- [13] MJF vs SLS: Which 3D printing technology should you choose?. Wevolver | Knowledge for engineers [online]. [cit.27.04.2023] Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/mjf-vs-sls-which-3d-printing-technology-should-you-choose>
- [14] Metoda dle Shore. Hanyko - Praha. Zařízení pro zkoušení materiálů [online]. [cit. 27.04.2023]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrdomer-a-jak-se-meri/shore/>
- [15] Prusa Material Table | Prusa Knowledge Base. Prusa Knowledge Base [online]. Prusa Research a.s. [cit. 27.04.2023]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/materials>
- [16] Paarts Additive | 3D tisk na zakázku [online]. [cit. 27.04.2023]. Dostupné z: <https://www.paarts.cz/images/properties/HP-JET-FUSION-PA12-CZ.pdf>
- [17] Compare Formlabs SLA 3D Printer Tech Specs | Formlabs. High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals | Formlabs [online]. Formlabs [cit. 27.04.2023]. Dostupné z: <https://formlabs.com/3d-printers/form-3/tech-specs/#materials-properties>
- [18] PA 12 (SLS) for Laser Sintering | Materialise . 301 Moved Permanently [online]. Copyright Materialise 2023 [cit.27.04.2023]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/industrial/3d-printing-materials/pa12-sls>
- [19] TERMOMECHANIKA 11. Termodynamika proudění. [online]. 2023 ADOC.PUB. All rights reserved. [cit. 24.05.2023]. Dostupné z: <https://adoc.pub/termomechanika-11-termodynamika-proudni.html>
- [20] NOŽIČKA, Jiří, Josef ADAMEC a Blanka VÁRADIOVÁ. *Termomechanika: sbírka příkladů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002 dotisk. ISBN 80-01-02015-0.
- [21] HOFMAN, Martin. *Experimentální stand na měření tahu trysky: Technická práce – Projekt I* [online]. Praha, 2019 [cit. 2023-04-25].
- [22] Digitální váha TB01, 3 kg / 0, 1g, 120 x 106 mm, USB napájení - Váhy Brabec s.r.o.. Váhy Brabec s.r.o. [online]. [cit.2023-04-25] Dostupné z: <https://www.vahybrabec.cz/zeman-tb01-3-kg-0--1g-120-x-106-mm/>

- [23] Siloměr 30/0,2 N INSIZE - INSIZE. E-shop » INSIZE měřidla a měřicí přístroje [online]. [cit. 2023-04-25] Dostupné z: <https://www.insz.eu/silomery/silomer-insize-30-n/>
- [24] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Statistické zpracování experimentálních dat* [online]. Praha: ACADEMIA, 1994 [cit. 2023-05-24]. ISBN 80-85297-56-6. Dostupné z: <https://meloun.upce.cz/docs/books/ucebnice-sken.pdf>
- [25] SERBUS, David. *Ověření metodiky pro měření drsnosti povrchu na konfokálním mikroskopu Olympus LEXT* [online]. Praha, 2018 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79407/F2-BP-2018-Serbus-David-Overeni%20metodiky%20pro%20mereni%20drsnosti%20povrchu%20na%20konfokalnim%20mikroskopu%20Olympus%20LEXT.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. František Tatiček, Ph.D.
- [26] VOTAVA, Bc. Filip. *Možnosti implementace aditivních technologií ve slévárně drobných odlitků* [online]. Plzeň, 2020 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: file:///D:/OneDrive/Desktop/DP_Votava.pdf. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Antonín KRÍŽ, IWE.

Seznam obrázků:

Obrázek 1 - Charakteristika ideální Lavalovy trysky [11].....	10
Obrázek 2 - Expanze tryskou [19].....	11
Obrázek 3 - Popis principu tisku aditivní technologie FDM/FFF [4].....	14
Obrázek 4 - Popis principu tisku aditivní technologie MJF [14].....	15
Obrázek 5 - Popis principu tisku aditivní technologie SLA [5].....	16
Obrázek 6 - Popis principu tisku aditivní technologie SLS [5].....	17
Obrázek 7 - Jednotlivé výtisky Lavalovy trysky: 1 - materiál ASA (FFF/FDM), 2 - materiál ASA-S (FFF/FDM), 3 - materiál PA 12 (MJF), 4 - materiál Rigid4000 (SLA), 5 - materiál PLA (FFF/FDM), 6 - materiál PETG (FFF/FDM), 7 - materiál Grey (SLA) a 8 - materiál PA 12 (SLS).....	21
Obrázek 8 - Popis experimentální tratě.....	22
Obrázek 9 - h-s digram pro jednotlivé trysky z různých materiálů a izoentropická expanze 1-2, iz.....	28
Obrázek 10 - Měřicí trať s použitím I. váhy.....	29
Obrázek 11 - Měřicí trať s použitím II. váhy.....	31
Obrázek 12 - Měřicí trať s použitím siloměru.....	32
Obrázek 13 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál ASA (FDM/FFF).....	33
Obrázek 14 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál Grey (SLA).....	34
Obrázek 15 - Drsnoměr Insize ISR-C002.....	35
Obrázek 16 - Konfokální mikroskop – LEXT OLYMPUS 3000.....	36
Obrázek 17 - Optický řez materiálem ASA.....	37
Obrázek 18 - Trojrozměrná optická struktura materiálu ASA.....	38
Obrázek 19 - Diagram porovnání drsnosti povrchu při měření drsnoměrem a účinnosti trysek.....	39
Obrázek 20 - Diagram porovnání drsnosti povrchu a účinnosti trysek.....	40

Seznám tabulek:

Tabulka 1 - Využití aditivní technologie výroby a materiály pro tento experiment.....	18
Tabulka 2 - Zadané hodnoty pro výpočet.....	23
Tabulka 3 - Výsledky výpočtu na vstupu do trysky.....	25
Tabulka 4 - Výsledky výpočtu v kritickém bodě.....	25
Tabulka 5 - Výsledky výpočtu na výstupu z trysky.....	26
Tabulka 6 - Výsledky výpočtu pro jednotlivé materiály.....	27
Tabulka 7 - Výsledky měření jednotlivých trysek I. váhy.....	30
Tabulka 8 - Výsledky měření jednotlivých trysek II. váhy.....	31
Tabulka 9 - Výsledky měření jednotlivých trysek III. Siloměrem.....	33
Tabulka 10 - Naměřené drsnosti povrchu jednotlivých Lavalových trysek.....	35
Tabulka 11 - Výsledky měření drsnosti povrchu konfokálním mikroskopem.....	38
Tabulka 12 - Nejistoty měření.....	41

Seznám Příloh:

Příloha 1 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál PA 12 (SLS)	
Příloha 2 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál Rodig 4000 (SLA)	
Příloha 3 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál PA 12 (MJF)	
Příloha 4 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál PLA (FDM/FFF)	
Příloha 5 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál ASA - Smoothing (FDM/FFF)	
Příloha 6 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál PETG (FDM/FFF)	
Příloha 7 - Technický list materiálu ASA [15]	
Příloha 8 - Technický list materiálu ASA [15]	
Příloha 9 - Technický list materiálu ASA [15]	
Příloha 10 - Technický list materiálu PLA [15]	
Příloha 11 - Technický list materiálu PLA [15]	
Příloha 12 - Technický list materiálu PLA [15]	

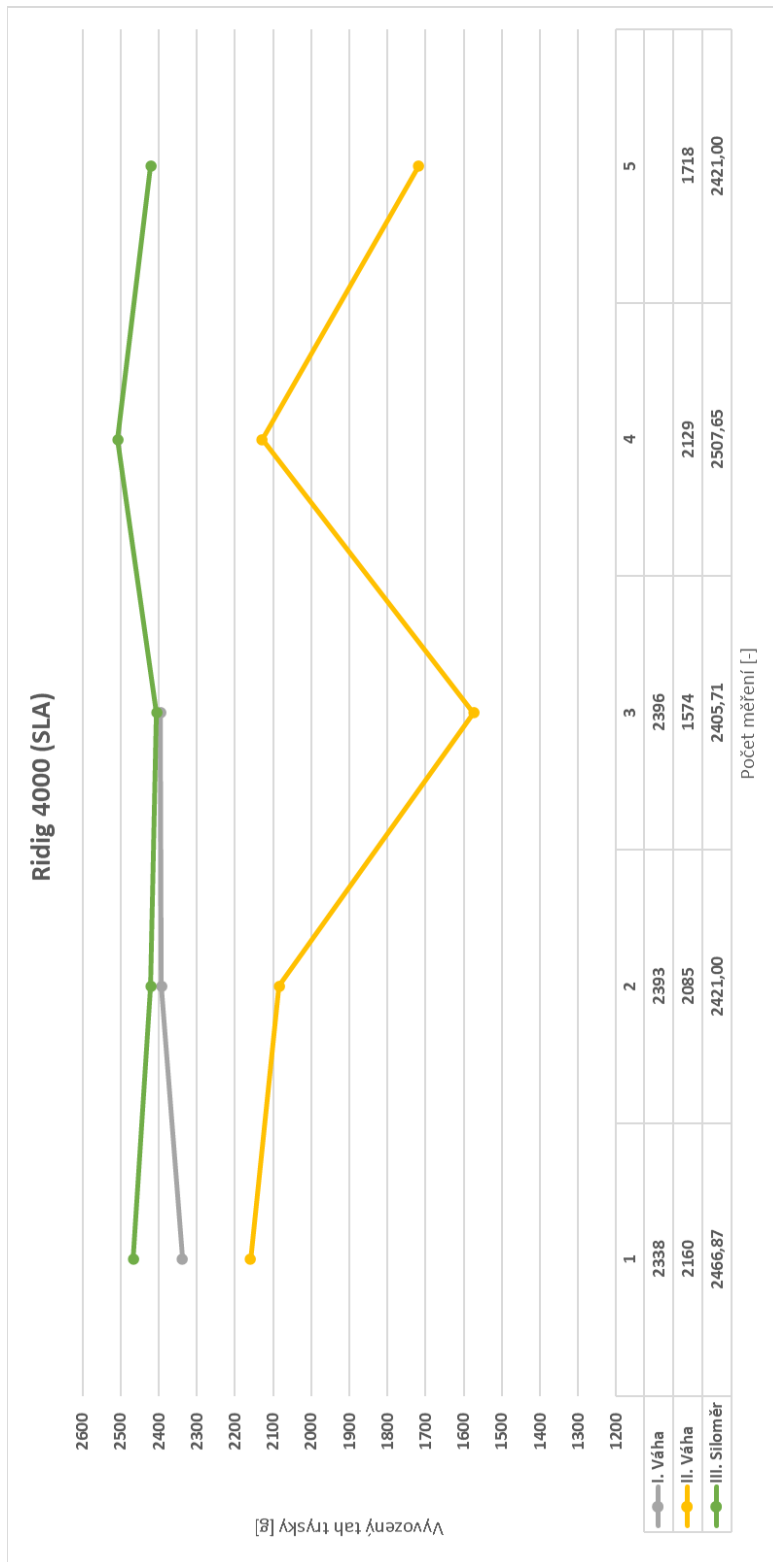
- Příloha 13 - Technický list materiálu PETG [15]
- Příloha 14 - Technický list materiálu PETG [15]
- Příloha 15 - Technický list materiálu PETG [15]
- Příloha 16 - Technický list materiálu PA 12 (MJF) [16]
- Příloha 17 - Technický list materiálu Rigid4000 (SLA) [17]
- Příloha 18 – BP-01-01 - Sestava trati (na CD)
- Příloha 19 - BP-01-02 - Lavalova tryska (na CD)
- Příloha 20 - BP-01-03 – Kusovník sestavy (na CD)
- Příloha 21 - BP-01-04 - Spodní díl nádoby (na CD)
- Příloha 22 - BP-01-05 - Horní pouzdro (na CD)
- Příloha 23 - BP-01-06 – Držák siloměru (na CD)
- Příloha 24 - BP-01-07 – Distanční blok (na CD)
- Příloha 25 - BP-01-08 – Plocha pro zavěšení (na CD)
- Příloha 26 - Sestava trati a příslušné modely (na CD)
- Příloha 27 - Výpočet Lavalovy trysky a naměřené hodnoty (na CD)

Příloha:

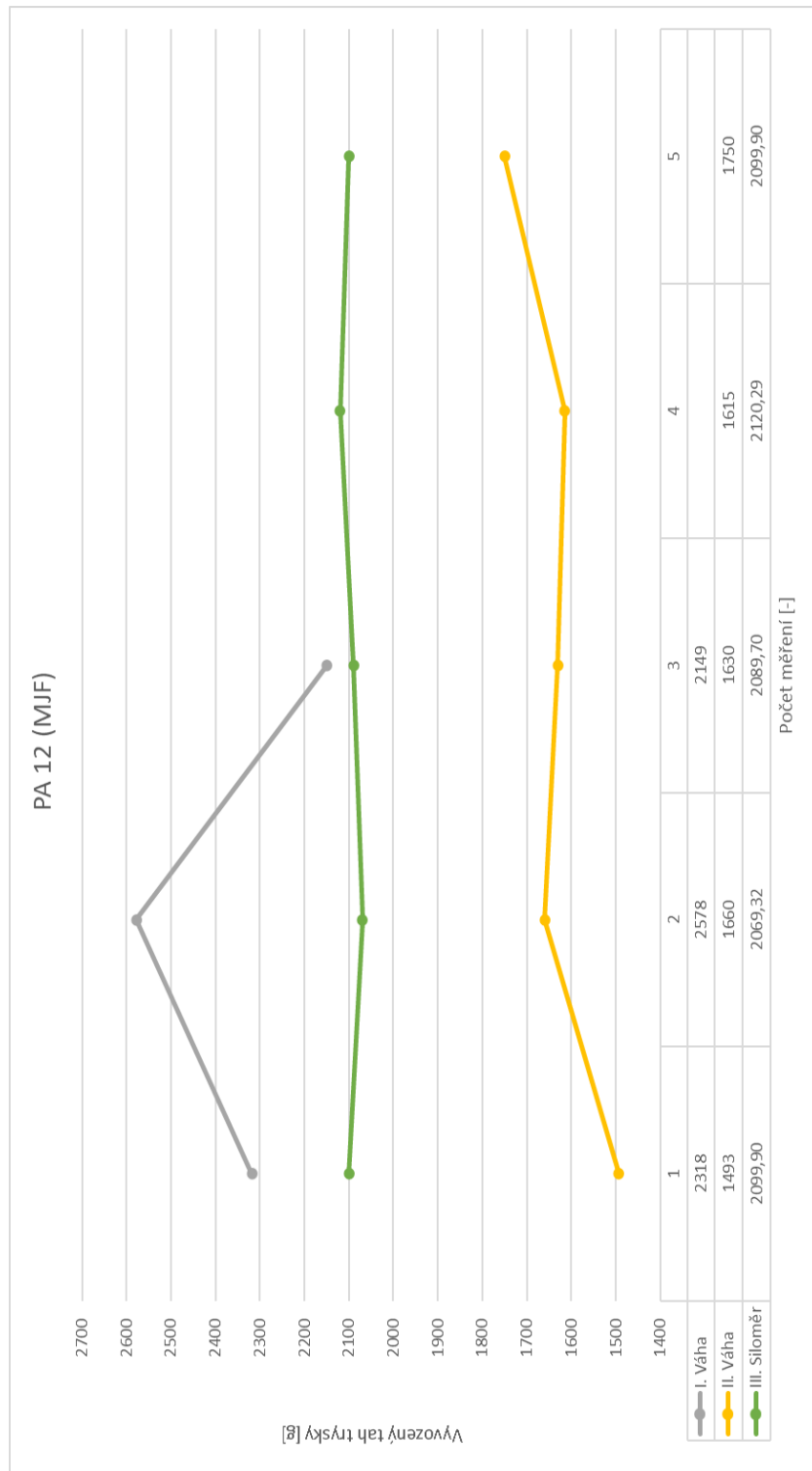
Příloha 1 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál PA 12 (SLS)



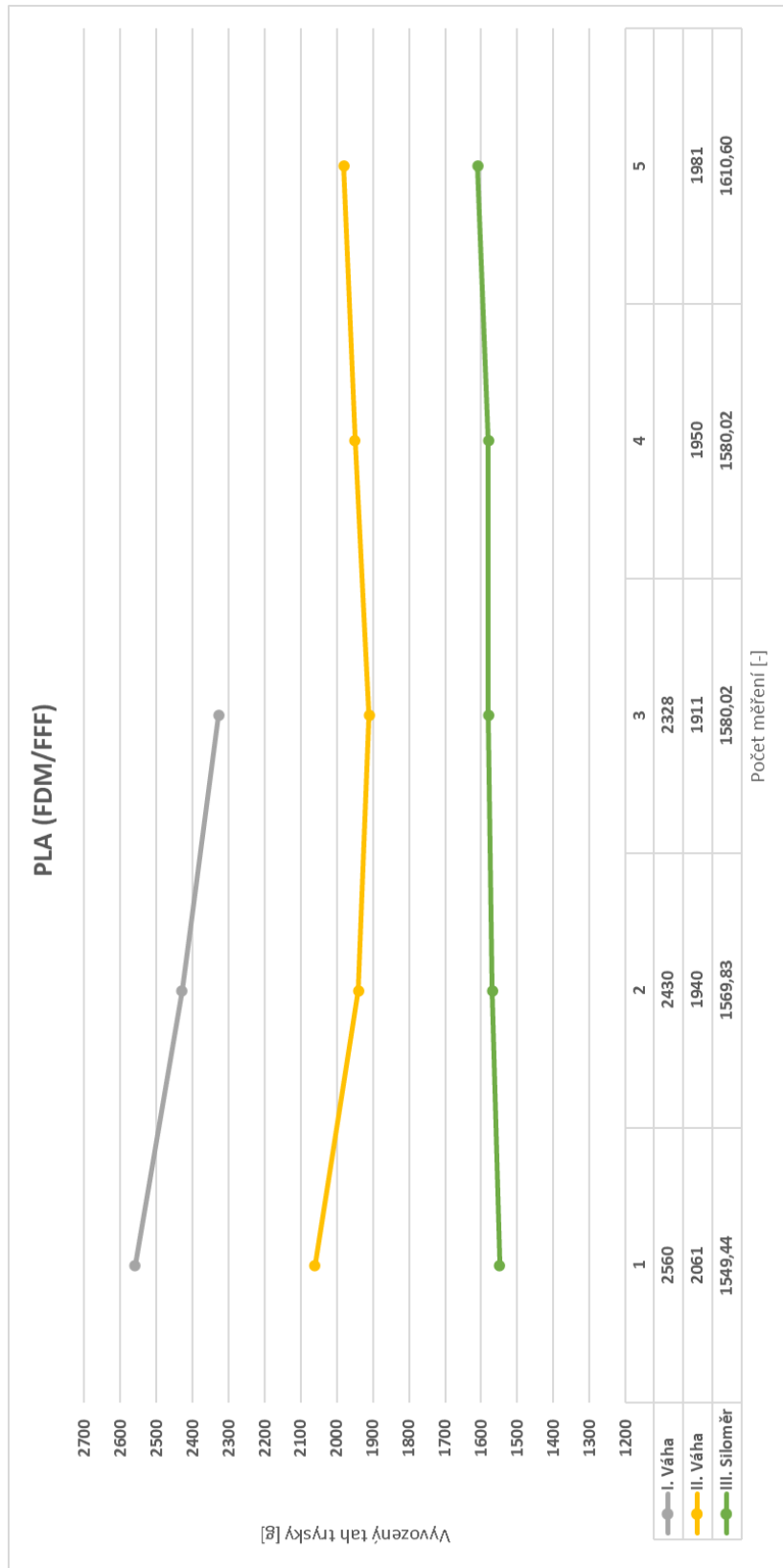
Příloha 2 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál Ridig 4000 (SLA)



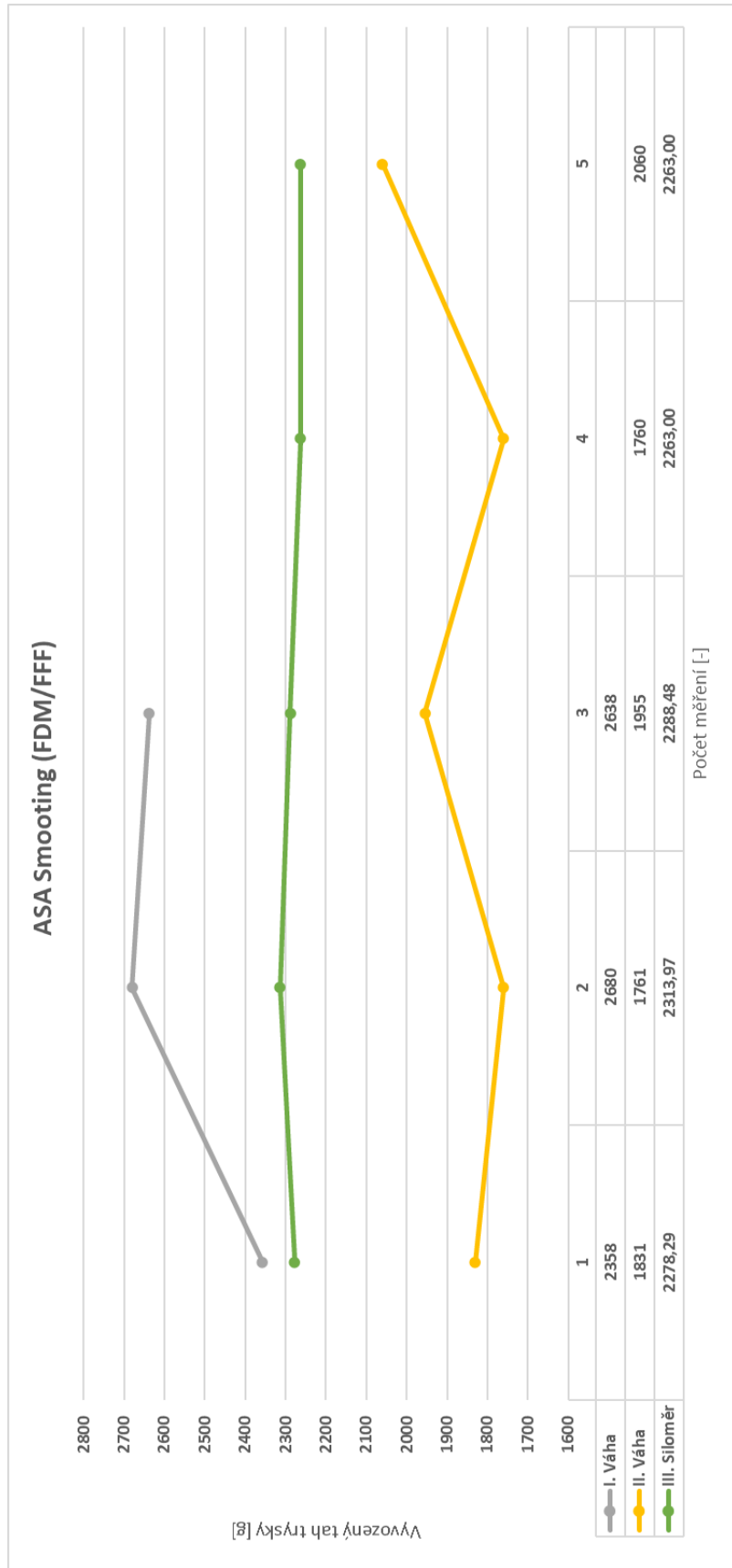
Příloha 3 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál PA 12 (MJF)



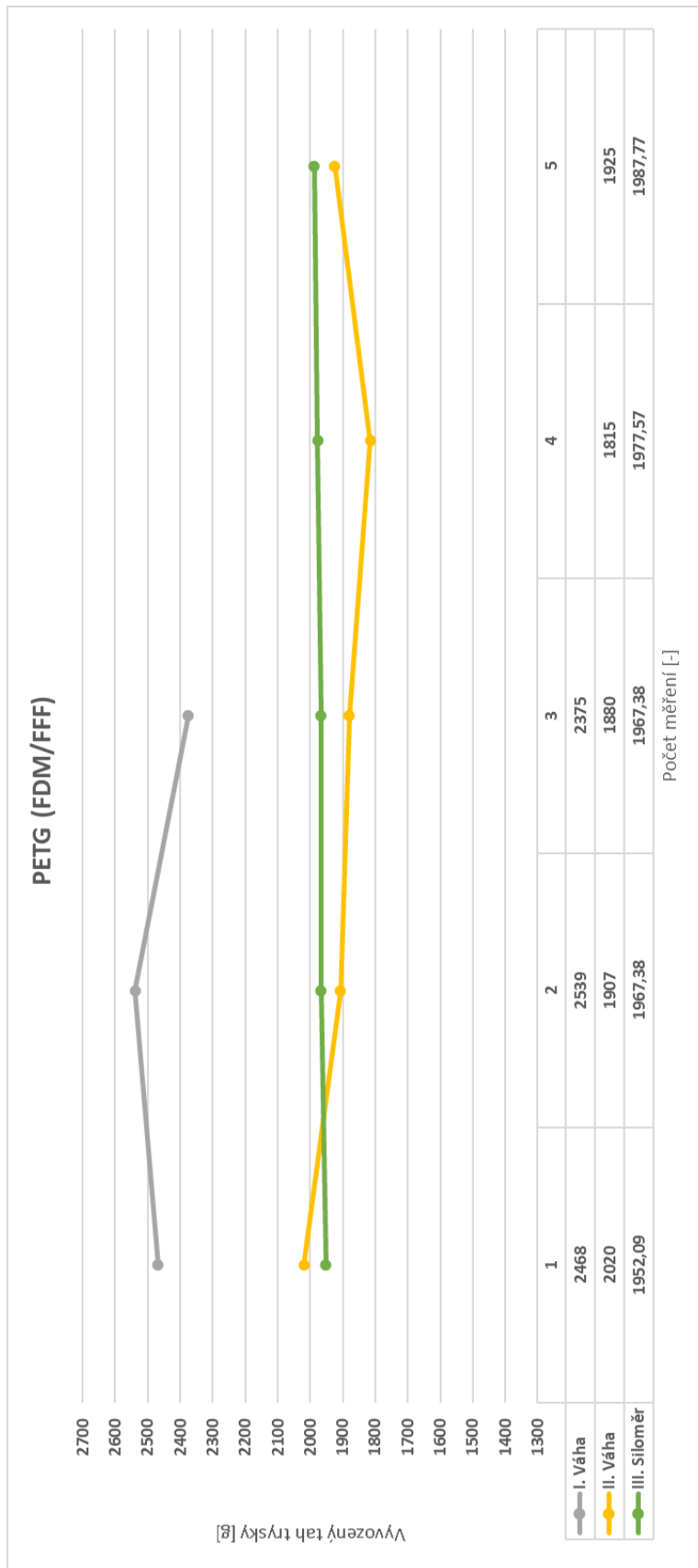
Příloha 4 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál PLA (FDM/FFF)



Příloha 5 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál ASA - Smoothing (FDM/FFF)



Příloha 6 - Diagram porovnání tahu trysek pro materiál PETG (FDM/FFF)



Verze: 1.1
Poslední aktualizace: 16-02-2022

PRUSA
POLYMERS
by JOSEF PRUSA

Technický list
Prusament ASA od Prusa Polymers



Identifikace

Jméno výrobku	Prusament ASA
Chemický název	Akrylonitril-styren-akrylát
Použití	FDM/FFF 3D tisk
Průměr	1,75 ± 0,03 mm
Výrobce	Prusa Polymers a.s., Praha, Česká republika

Doporučená tisková nastavení

Teplota trysky [°C]	260 ± 10
Teplota vyhřívané podložky [°C]	110 ± 5
Rychlost tisku [mm/s]	až 200
Rychlost ventilátoru [%]	30 (0-50*)
Druh podložky	saténový tiskový plát; hladký PEI tiskový plát; zrnitý tiskový plát **
Dodatečné info	Výška obrysu se nastaví na výšku tištěných dílů. Límec o šířce 3 mm (nebo větší) může zlepšit přilnavost hran a rohů větších objektů k tiskové podložce.

* Závisí na geometrii tištěných objektů. Chcete-li vylepšit převisy a přemostění, nastavte v PrusaSliceru chlazení 30 % nebo vyšší. U větších výtisků bez přemostění může vypnuté chlazení přinést lepší výsledky.
** s lepidlem jako separační vrstvou

Typické vlastnosti materiálu

	Typická hodnota	Metoda
MFR [g/10 min](1)	20-24	ISO 1133
MVR [cm ³ /10 min](1)	19-23	ISO 1133
Hustota [g/cm ³]	1.07	ISO 1183
Absorpce vlhkosti za 24 hodin [%](2)	0.16	Prusa Polymers
Absorpce vlhkosti za 7 dní [%](2)	0.17	Prusa Polymers
Teplota tepelné deformace (0,45 MPa) [°C]	93	ISO 75
Teplota tepelné deformace (1,80 MPa) [°C]	86	ISO 75
Mez pevnosti v tahu pro filament [MPa]	40 ± 1	ISO 527
Tvrdost - Shore D	78	Prusa Polymers
Přilnavost mezi vrstvami [MPa]	11 ± 1	Prusa Polymers

(1) 10 kg; 220 °C

(2) 24 °C; vlhkost 22 %

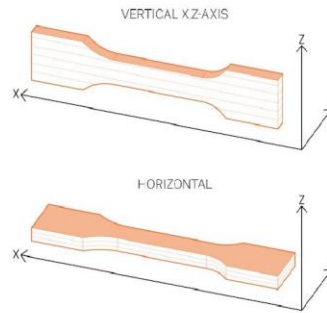
Mechanické vlastnosti 3D tištěných zkušebních vzorků(3)

Vlastnosti \ směr tisku	Horizontální	Vertikální xz	Metoda
Pevnost v tahu [MPa]	42 ± 1	45 ± 2	ISO 527-1
Modul pružnosti v tahu [GPa]	1.6 ± 0.1	1.7 ± 0.1	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	3.4 ± 0.2	3.8 ± 0.2	ISO 527-1
Pevnost v ohybu [MPa]	64 ± 1	69 ± 1	ISO 178
Modul pružnosti [GPa]	2.0 ± 0.1	1.9 ± 0.1	ISO 178
Průhyb na pevnosti v ohybu [mm]	9.0 ± 0.1	9.0 ± 1.0	ISO 178
Rázová pevnost Charpy [kJ/m ²](4)	25 ± 3	38 ± 11	ISO 179-1
Rázová pevnost Charpy (vrub) [kJ/m ²](5)	12 ± 1	15 ± 3	ISO 179-1

(3) K výrobě zkušebních vzorků byla použita 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S. K vytvoření G-code byl použit program Slic3r Prusa Edition v2.0.0 s následujícím nastavením:
Prusament ASA;
Print Settings 0.20 mm FAST (vrstvy 0.20 mm);
Solid Layers Top: 0, Bottom: 0;
Perimeters: 2;
Infill 100 % rectilinear;
Infill Print Speed 200 mm/s;
Nozzle Temperature 265 °C all layers;
Bed Temperature 110 °C all layers;
Ostatní nastavení ponechána na výchozí hodnoty.

(4) Charpyho test (bez vrubu) - směr úderu podle ISO 179-1

(5) Charpyho test (vrub) - směr úderu podle ISO 179-1



Vyloučení odpovědnosti:

Výsledky uvedené v tomto datovém listu jsou pouze pro vaši informaci a srovnání. Hodnoty výrazně závisí na nastavení tisku, zkušenostech obsluhy a okolních podmínkách. Je nutné individuálně zhodnotit vhodnost a možné důsledky použití tištěných dílů. Prusa Polymers a.s. nenesí žádnou odpovědnost za zranění nebo ztráty způsobené použitím materiálu Prusa Polymers. Před použitím materiálu od Prusa Polymers si pozorně přečtěte všechny podrobnosti v dostupném bezpečnostním listu (SDS).

Verze: 1.1
Poslední aktualizace: 16-02-2022

PRUSA
POLYMERS
by JOSEF PRUSA

Technický list

Prusament PLA od Prusa Polymers



Identifikace

Jméno výrobku	Prusament PLA/PLA (směs)
Chemický název	Kyselina polylaktónová
Použití	FDM/FFF 3D tisk
Průměr	1,75 ± 0,02 mm (± 0,03 mm pro směs PLA).
Výrobce	Prusa Polymers a.s., Praha, Česká republika

Doporučená tisková nastavení

Teplota trysky [°C]	210 ± 10
Teplota vyhřívané podložky [°C]	40–60
Rychlost tisku [mm/s]	až 200
Rychlost ventilátoru [%]	100
Druh podložky	hladký PEI tiskový plát; plát s práškovým povrchem; saténový plát
Dodatečné info	Obecně není vyžadován límec

Typické vlastnosti materiálu

	Typická hodnota	Metoda
MFR [g/10 min](1)	9-11	ISO 1133
MVR [cm ³ /10 min](1)	8-10	ISO 1133
Hustota [g/cm ³]	1.24	ISO 1183
Absorpce vlhkosti za 24 hodin [%](2)	0.13	Prusa Polymers
Absorpce vlhkosti za 7 dní [%](2)	0.19	Prusa Polymers
Teplota tepelné deformace (0,45 MPa) [°C]	55	ISO 75
Teplota tepelné deformace (1,80 MPa) [°C]	55	ISO 75
Mez pevnosti v tahu pro filament [MPa]	57 ± 1	ISO 527
Tvrdost - Shore D	81	Prusa Polymers
Přilnavost mezi vrstvami [MPa]	17 ± 3	Prusa Polymers

(1) 2,16 kg; 210 °C

(2) 24 °C; vlhkost 22 %

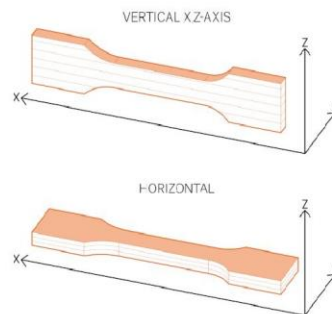
Mechanické vlastnosti 3D tištěných zkušebních vzorků(3)

Vlastnosti \ směr tisku	Horizontální	Vertikální xz	Metoda
Pevnost v tahu [MPa]	51 ± 3	59 ± 2	ISO 527-1
Modul pružnosti v tahu [GPa]	2.3 ± 0.1	2.4 ± 0.1	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	2.9 ± 0.3	3.2 ± 1.0	ISO 527-1
Pevnost v ohybu [MPa]	83 ± 6	99 ± 1	ISO 178
Modul pružnosti [GPa]	3.1 ± 0.1	3.2 ± 0.1	ISO 178
Průhyb na pevnosti v ohybu [mm]	7.4 ± 0.2	8.3 ± 0.2	ISO 178
Rázová pevnost Charpy [kJ/m ²](4)	13 ± 1	14 ± 1	ISO 179-1
Rázová pevnost Charpyho (vrub) [kJ/m ²]	nelze aplikovat	nelze aplikovat	ISO 179-1

Příloha 12 - Technický list materiálu PLA [15]

PRUSA
POLYMERS
by JOSEF PRUSA

(3) K tisku testovacích vzorků byla použita 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3. Pro vytvoření G-codu bylo použito následující nastavení Slic3r Prusa Edition 1.40.0:
Prusament PLA Filament;
Print Settings 0,20 mm FAST (vrstvy 0,20 mm);
Solid Layers Top: 0, Bottom: 0;
Perimeters: 2;
Infill 100% rectilinear;
Infill Print Speed 200 mm/s;
Nozzle Temperature 215 °C all layers;
Bed Temperature 60 °C all layers;
Ostatní parametry jsou nastaveny jako výchozí.
(4) Charpy bezvrubový - Směr úderu podél hrany podle ISO 179-1



Vyloučení odpovědnosti:

Výsledky uvedené v tomto datovém listu jsou pouze pro vaši informaci a srovnání. Hodnoty výrazně závisí na nastavení tisku, zkušenostech obsluhy a okolních podmínkách. Je nutné individuálně zhodnotit vhodnost a možné důsledky použití tištěných dílů. Prusa Polymers a.s. nenesе žádnou odpovědnost za zranění nebo ztráty způsobené použitím materiálu Prusa Polymers. Před použitím materiálu od Prusa Polymers si pozorně přečtete všechny podrobnosti v dostupném bezpečnostním listu (SDS).

Verze: 1.1
Poslední aktualizace: 16-02-2022

PRUSA
POLYMERS
by JOSEF PRUSA

Technický list

Prusament PETG od Prusa Polymers



Identifikace

Jméno výrobku	Prusament PETG
Chemický název	Kopolymer polyethyltereftalátu glykolu
Použití	FDM/FFF 3D tisk
Průměr	1,75 ± 0,02 mm
Výrobce	Prusa Polymers a.s., Praha, Česká republika

Doporučená tisková nastavení

Teplota trysky [°C]	250 ± 10
Teplota vyhřívané podložky [°C]	80 ± 10
Rychlost tisku [mm/s]	až 200
Rychlost ventilátoru [%]	50
Druh podložky	saténový tiskový plát; práškový tiskový plát; hladký PEI plát*
Dodatečné info	Obecně není vyžadován límec

*) s lepidlem jako separační vrstvou

Typické vlastnosti materiálu

	Typická hodnota	Metoda
MFR [g/10 min]	nelze aplikovat	ISO 1133
MVR [cm ³ /10 min]	nelze aplikovat	ISO 1133
Hustota [g/cm ³]	1,27	ISO 1183
Absorpce vlhkosti 24 hodin [%](2,3)	0.07	Prusa Polymers
Absorpce vlhkosti za 7 dní [%](1)	0.10	Prusa Polymers
Teplota tepelné deformace (0,45 MPa) [°C]	68	ISO 75
Teplota tepelné deformace (1,80 MPa) [°C]	68	ISO 75
Mez pevnosti v tahu pro filament [MPa]	46 ± 1	ISO 527
Tvrdost - Shore D	74	Prusa Polymers
Přilnavost mezi vrstvami [MPa]	18 ± 4	Prusa Polymers

(1) 24 °C; vlhkost 22 %

Mechanické vlastnosti 3D tištěných zkušebních vzorků(2)

Vlastnosti\směr tisku	Horizontální	Vertikální xz	Metoda
Pevnost v tahu [MPa]	47 ± 2	50 ± 1	ISO 527-1
Modul pružnosti v tahu [GPa]	1.5 ± 0.1	1.6 ± 0.1	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	5.1 ± 0.1	5.1 ± 0.1	ISO 527-1
Pevnost v ohybu [MPa]	66 ± 2	70 ± 1	ISO 178
Modul pružnosti [GPa]	1.7 ± 0.1	1.6 ± 0.1	ISO 178
Průhyb na pevnosti v ohybu [mm]	9.0 ± 0.1	9.3 ± 0.2	ISO 178
Zkouška vrubové houževnatosti Charpy [kJ/m ²](3)	bez přestávky	bez přestávky	ISO 179-1
Rázová pevnost Charpy (vrub) [kJ/m ²](4)	6 ± 1	3 ± 1	ISO 179-1

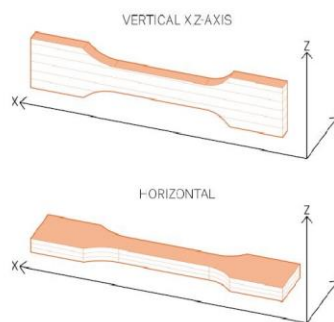
Příloha 15 - Technický list materiálu PETG [15]

**PRUSA
POLYMERS**
by JOSEF PRUSA

(2) K tisku zkušebních vzorků byla použita 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3. K vytvoření G-codu byl použit program Slic3r Prusa Edition 1.40.0 s následujícím nastavením:
Prusament PETG;
Nastavení tisku 0,20 mm FAST (vrstvy 0,20 mm);
Solid Layers Top: 0, Bottom: 0;
Perimeters: 2;
Infill 100% rectilinear;
Print Speed 200 mm/s;
Nozzle Temperature 250 °C all layers;
Bed Temperature 80 °C all layers;
Ostatní parametry jsou nastaveny jako výchozí.

(3) Vrubová houževnatost Charpy, bez vrubu - směr úderu podle ISO 179-1

(4) Zkouška vrubové houževnatosti Charpy - směr úderu podle ISO 179-1



Vyloučení odpovědnosti:

Výsledky uvedené v tomto datovém listu jsou pouze pro vaši informaci a srovnání. Hodnoty výrazně závisí na nastavení tisku, zkušenostech obsluhy a okolních podmínkách. Je nutné individuálně zhodnotit vhodnost a možné důsledky použití tištěných dílů. Prusa Polymers a.s. nenesou žádnou odpovědnost za zranění nebo ztráty způsobené použitím materiálu Prusa Polymers. Před použitím materiálu od Prusa Polymers si pozorně přečtěte všechny podrobnosti v dostupném bezpečnostním listu (SDS).

Příloha 16 - Technický list materiálu PA 12 (MJF) [16]

Technické parametry⁸

Kategorie	Měřený parametr	Hodnota	Metoda
Všeobecné vlastnosti	Teplota tání práškového materiálu (měřeno pomocí DSC)	187 °C	ASTM D3418
	Velikost částic	60 µm	ASTM D3451
	Objemová hmotnost práškového materiálu	0,425 g/cm ³	ASTM D1895
	Hustota	1,01 g/cm ³	ASTM D792
Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu, maximální zatížení ⁹ , XY	48 MPa	ASTM D638
	Pevnost v tahu, maximální zatížení ⁹ , Z	48 MPa	ASTM D638
	Modul pružnosti v tahu ⁹ , XY	1700 MPa	ASTM D638
	Modul pružnosti v tahu ⁹ , Z	1800 MPa	ASTM D638
	Prodloužení při přetržení ⁹ , XY	20 %	ASTM D638
	Prodloužení při přetržení ⁹ , Z	15 %	ASTM D638
	Pevnost v ohybu (při 5 %) ¹⁰ , XY	65 MPa	ASTM D790
	Pevnost v ohybu (při 5 %) ¹⁰ , Z	70 MPa	ASTM D790
	Modul pružnosti v ohybu ¹⁰ , XY	1730 MPa	ASTM D790
	Modul pružnosti v ohybu ¹⁰ , Z	1730 MPa	ASTM D790
	Vrubová houževnatost (zkouška metodou Izod, 3,2 mm, 23 °C), XYZ	3,5 kJ/m ²	ASTM D256 Testovací metoda A
Teplotní vlastnosti	Teplotní deformace (při tlaku 0,45 MPa), XY	175 °C	ASTM D648 Testovací metoda A
	Teplotní deformace (při tlaku 0,45 MPa), Z	175 °C	ASTM D648 Testovací metoda A
	Teplotní deformace (při tlaku 1,82 MPa), XY	95 °C	ASTM D648 Testovací metoda A
	Teplotní deformace (při tlaku 1,82 MPa), Z	106 °C	ASTM D648 Testovací metoda A
Opětovná využitelnost	Podíl nového materiálu pro zajištění stabilní kvality tisku	20 %	
Certifikáty	USP třídy I–VI, splňuje požadavky americké FDA na zdravotnické prostředky určené ke styku s neporušenou kůží, požadavky směrnice RoHS ¹¹ , požadavky REACH, PAHs		

Příloha 17 - Technický list materiálu Rigid4000 (SLA) [17]

RIGID 4000 MATERIAL PROPERTIES DATA

Mechanical Properties	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	UV ³	Green ²	UV ³	Testing Standard
Ultimate Tensile Strength	33 MPa	69 MPa	4786 psi	10007 psi	ASTM D 638-14
Tensile Modulus	2.1 GPa	4.1 GPa	305 ksi	595 ksi	ASTM D 638-14
Elongation at Break	23%	5.3%	23%	5.3%	ASTM D 638-14
Flexural Strength	43 MPa	105 MPa	6236 psi	15229 psi	ASTM D 790-15
Flexural Modulus	1.4 GPa	3.4 GPa	203 ksi	493 ksi	ASTM D 790-15
Notched IZOD	16 J/m	23 J/m	0.3 ft-lbf/in	0.43 ft-lbf/in	ASTM D256-10
Thermal Properties					
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	41 °C	60 °C	105 °F	140 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	48 °C	77 °C	118 °F	170 °F	ASTM D 648-16
Thermal Expansion (0-150°C)	64 µm/m/°C	63 µm/m/°C	36 µin/in/°F	35 µin/in/°F	ASTM E 831-13

¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

² Data was obtained from green parts, printed using Form 3, 100 µm, Rigid 4000 (formerly Rigid v1) settings, without additional treatments.

³ Data was obtained from parts printed using Form 3, 100 µm, Rigid 4000 (formerly Rigid v1) settings and post-cured with a Form Cure for 15 minutes at 80 °C

Solvent Compatibility

Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 hr weight gain, %	Solvent	24 hr weight gain, %
Acetic Acid 5%	0.8	Hydrogen peroxide (3%)	0.87
Acetone	3.3	Isooctane (aka gasoline)	<0.1
Isopropyl Alcohol	0.38	Mineral oil (light)	0.22
Bleach ~5% NaOCl	0.69	Mineral oil (Heavy)	0.15
Butyl Acetate	<0.1	Salt Water (3.5% NaCl)	0.71
Diesel Fuel	<0.1	Sodium Hydroxide solution (0.025% PH 10)	0.68
Diethyl glycol Monomethyl Ether	1.4	Water	0.70
Hydraulic Oil	0.17	Xylene	<0.1
Skydrol 5	1.1	Strong Acid (HCl conc)	5.3

Příloha 18 - Technický list materiálu Grey (SLA) [17]

MATERIAL PROPERTIES DATA

Standard Resins

The following material properties are comparable for Clear Resin, White Resin, Grey Resin, Black Resin, and Color Kit.

	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Green ²	Post-Cured ³	
Tensile Properties					
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa	5510 psi	9380 psi	ASTM D638-14
Tensile Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa	234 ksi	402 ksi	ASTM D638-14
Elongation at Break	12%	6%	12%	6%	ASTM D638-14
Flexural Properties					
Flexural Modulus	1.3 GPa	2.2 GPa	181 psi	320 psi	ASTM D 790-15
Impact Properties					
Notched Izod	16 J/m	25 J/m	0.3 ft-lbf/in	0.46 ft-lbf/in	ASTM D256-10
Thermal Properties					
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	43 °C	58 °C	109 °F	137 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	50 °C	73 °C	121 °F	134 °F	ASTM D 648-16

¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

² Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, Clear settings, without additional treatments.

³ Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Clear settings and post-cured with 1.25 mW/cm² of 405 nm LED light for 60 minutes at 60 °C.

SOLVENT COMPATIBILITY

Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 hr weight gain, %	Solvent	24 hr weight gain, %
Acetic Acid 5%	< 1	Mineral oil (Light)	< 1
Acetone	Sample cracked	Mineral oil (Heavy)	< 1
Bleach ~5% NaOCl	< 1	Salt Water (3.5% NaCl)	< 1
Butyl Acetate	< 1	Skydrol 5	1
Diesel Fuel	< 1	Sodium Hydroxide solution (0.025% PH 10)	< 1
Diethyl glycol Monomethyl Ether	1.7	Strong Acid (HCl conc)	Distorted
Hydraulic Oil	< 1	Water	< 1
Hydrogen peroxide (3%)	< 1	Xylene	< 1
Isooctane (aka gasoline)	< 1		
Isopropyl Alcohol	< 1		

Selective Laser Sintering

PA 12 (SLS)

PA 12 (SLS) is a general-purpose material that offers excellent long-term stability and good chemical resistance, making it suitable for functional prototypes and end-use parts, as well as consumer goods.



MEASUREMENT	VALUE	UNIT	STANDARD
Density	0,95	g/cm ³	N/A
Tensile Strength	48	MPa	DIN EN ISO 527
Tensile Modulus	1650	MPa	DIN EN ISO 527
Flexural Strength	41	MPa	ASTM D790
Flexural Modulus	1500	MPa	DIN EN ISO 178
Impact Strength	4,4	kJ/m ²	DIN EN ISO 180 (Notched, Izod)
Elongation at Break	20	%	DIN EN ISO 527
Hardness	75	Shore D	ASTM D2240
Heat Deflection Temperature 1	86	°C	ASTM D648 (@1.81 MPa)
Melting Temperature	176	°C	DIN EN ISO 11357 (20°C/min)

Actual values may vary with build conditions.

For more information on this material, please visit mtls.am/pa12-sls.