



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

3D TISK PLASTŮ PRO VAKUOVÉ APLIKACE

3D PRINTING OF PLASTICS FOR VACUUM APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Machálek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Jan Machálek**
Studijní program: Základy strojíního inženýrství
Studijní obor: Základy strojíního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. David Košťál, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26

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

3D tisk plastů pro vakuové aplikace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jakýkoliv materiál využívaný ve vakuu či ve vesmíru musí splňovat nízké odplynění (odpar). Plasty obecně tuto vlastnost nesplňují, výjimkou jsou jen některé technické plasty jako PEEK či PTFE. S omezením lze nicméně používat i další plasty, typicky ty vhodné pro 3D tisk. Plasty zpracované 3D tiskem ale mohou obsahovat vzduchové kapsy, které se ve vakuu mohou odplyňovat či dokonce explodovat.

Typ práce: strojLAB – konstruování

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je experimentální ověření využitelnosti plastů z 3D tiskáren pro tisk komponent pro vakuovou techniku a nalezení ideálních procesních parametrů pro jejich bezpečné využití.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- přehled problematiky 3D tisku a vakuové techniky,
- příprava vzorků pro 3D tisk s návrhem modifikací pro využití ve vakuu,
- testování ve vakuové komoře.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R. a BUDYNAS, Richard G., VLK, Miloš (ed.). Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. Překlady vysokoškolských učebnic. V Brně: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

ZARETSKY, E. V. Liquid lubrication in space. Tribology International [online]. 1990, 75-93.

JONES, W. R. a M. J. JANSEN. Tribology for space applications. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2008, 222(8), 997-1004. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1243/13506501JET305.

ROBERTS, Emyr, W. (ed.). Space tribology handbook. Online. 5th. Warrington, UK: ESTL, 2013. ISBN N/A. Dostupné z: <http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet94/ROB.pdf>. [cit. 2019-07-01].

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou pórovitosti a odplyňování 3D tištěných součástí vyrobených technologií FDM (Fused Deposition Modeling) pro vakuové aplikace. Rešeršní část práce se věnuje problematice odplyňování materiálů používaných při FDM tisku, zatímco praktická část je zaměřena na analýzu pórovitosti vytištěných součástí pomocí rentgenové počítačové tomografie (CT). Pro experimentální část práce bylo navrženo šest konfigurací tisku s různými typy vnitřní výplně, které byly vytištěny z materiálu Prusament PC Space Grade Black. Následně byly tyto vzorky pomocí CT analýzy vyhodnoceny z hlediska jejich pórovitosti. Výsledky ukázaly, že u zvolených tiskových konfigurací dochází k nejvyšší koncentraci pórů především v oblasti perimetrů, zatímco vliv vnitřní výplně na celkovou pórovitost byl méně výrazný.

KLÍČOVÁ SLOVA

FDM, pórovitost, CT analýza, odplyňování, vakuové aplikace

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the issue of porosity and outgassing of 3D-printed components manufactured using FDM (Fused Deposition Modeling) technology for vacuum application. The theoretical part of the thesis focuses on the issue of outgassing of materials used in FDM printing, while the practical part focuses on the analysis of porosity in printed components using X-ray computed tomography (CT). For the experimental part of the thesis, six printing configurations with different types of internal infill were designed and manufactured from Prusament PC Space Grade Black material. Subsequently, the samples were evaluated using CT analysis in terms of porosity. The results showed that, for the selected printing configurations, the highest concentration of pores occurred mainly in the perimeter regions, while the influence of the internal infill on the overall porosity was less significant.

KEYWORDS

FDM, porosity, computed tomography, outgassing, vacuum applications

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACHÁLEK, Jan. *3D tisk plastů pro vakuové aplikace*. Bakalářská práce. David KOŠTÁL (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2026.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Košťála, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů. Dále také prohlašuji, že při zpracování práce byly využity nástroje umělé inteligence, a to zejména pro jazykovou korekturu textu, stylistické úpravy a kontrolu gramatiky.

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Košťálovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady a připomínky při zpracování práce. Dále děkuji pracovníkům CT laboratoře CEITEC VUT za umožnění CT analýzy vzorků a odbornou pomoc při jejich vyhodnocení.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	12
2.1	3D tisk	12
2.2	Chování plastů ve vakuu	12
2.3	Metoda testování odplyňování materiálů ve vakuu	13
2.4	Materiály pro 3D tisk s provedenými zkouškami	13
2.5	Pórovitost u FDM tisku	14
2.6	Shrnutí	15
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	16
3.1	Analýza problému	16
3.2	Cíl práce	16
4	MATERIÁL A METODY	17
4.1	Testovací vzorky	17
4.1.1	Materiál vzorků	17
4.1.2	Parametry tisku	18
4.2	Kontrolní metoda měření	20
5	VÝSLEDKY	22
5.1	Celkový pohled	22
5.2	Perimetry	23
5.3	Analýza pórovitosti v pravé části vzorků	24
5.4	Analýza pórovitosti v levé části vzorků	26
5.5	Oblast vyvýšení	27
5.6	Kvantitativní vyhodnocení	28
6	DISKUZE	29
7	ZÁVĚR	31
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	32
9	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	34

10	SEZNAM TABULEK	35
11	SEZNAM PŘÍLOH	36

1 ÚVOD

Technologie 3D tisku se v současnosti rozšiřuje do stále většího množství oblastí lidské činnosti, včetně kosmických aplikací. Použití 3D tištěných součástí ve vakuovém prostředí však přináší specifické problémy, které je nutné při návrhu součástí zohlednit. Jedním z hlavních problémů je odplyňování materiálů ve vakuu, které může vést ke změně vlastností materiálu nebo ke kontaminaci okolních součástí.

Dalším významným problémem je pórovitost vznikající při FDM (Fused Deposition Modeling) tisku. Póry vznikají zejména mezi jednotlivými tiskovými drahami a představují uzavřené vzduchové dutiny uvnitř součástí. Tyto defekty mohou negativně ovlivňovat mechanické vlastnosti součástí a ve vakuovém prostředí mohou způsobovat uvolňování uzavřeného plynu a lokální narušení struktury materiálu.

Původním cílem práce bylo otestovat různé materiály používané při FDM tisku z hlediska jejich vhodnosti pro vakuové prostředí. V průběhu řešení práce však došlo k rozšíření dostupných materiálů určených pro vakuové aplikace a zároveň byly publikovány nové studie zabývající se touto problematikou. Z tohoto důvodu byla praktická část práce následně zaměřena na analýzu pórovitosti vytištěných součástí, která představuje další významný problém při použití technologie FDM tisku.

Cílem práce je navrhnout vhodné tiskové strategie pro minimalizaci pórovitosti součástí vytištěných z materiálu Prusament PC Space Grade Black pro vakuové aplikace.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

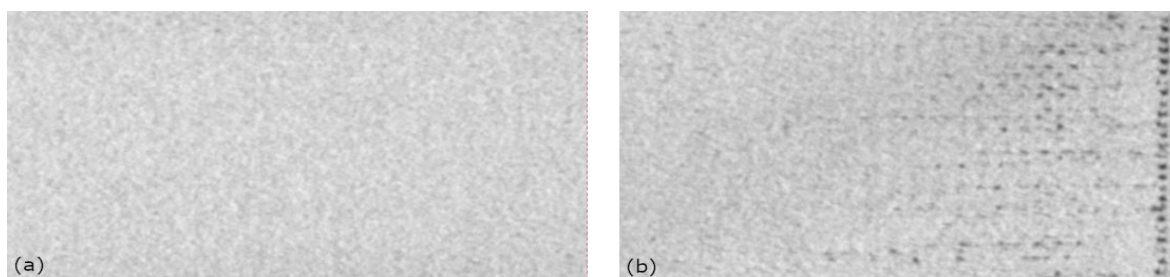
2.1 3D tisk

Technologie 3D tisku dříve označována také jako Rapid Prototyping je výrobní metoda, která se zabývá vytvářením 3D modelů aditivní metodou. To znamená že se materiál přidává vrstvu po vrstvě, dokud se nevytvoří součást, která byla předtím navržena v 3D modelovacím programu. Díky tomu můžeme vytvářet tvarově složité součásti, které by bylo možné vytvořit jinými metodami jen velmi obtížně. Tato metoda však nemá jen výhody, mezi její nevýhody patří například rychlost výroby, kvalita povrchu a omezená velikost. Tato metoda nevyužívá pouze plasty, ale i železné slitiny, beton, čokoládu a mnoho dalšího. [1]

2.2 Chování plastů ve vakuu

Největším problémem plastů ve vakuu je takzvané odplyňování, způsobené radiací, poklesem tlaku a teploty. Odpařují se zbytky plynů, kapalin nebo jiných látek, které se v plastu vyskytovaly před tím, než byl testován. Tento jev není okamžitý, ale jedná se o dlouhodobý proces, který může probíhat pár minut nebo i několik měsíců v závislosti na druhu materiálu a na technologii jeho zpracování. [2]

Kromě odplyňování představuje další komplikaci pórovitost součástí. Při výrobě komponentů může dojít k vytvoření pórů, kapsám, které jsou vyplněny vzduchem. Při vystavení vakuu vzniká velký rozdíl tlaků, který může vést k narušení struktury materiálu. V extrémních případech může dojít k velké změně mechanických vlastností materiálu nebo k lokálnímu narušení součásti. Rozdíl ve struktuře materiálů je znázorněn na Obr. 2-1. [8]



Obrázek 2-1 CT snímky vzorků; (a) bez výskytu pórů; (b) s výskytem pórů

Tento problém nastává hlavně při tiskové metodě FDM, při které je materiál postupně nanášen ve formě jednotlivých vrstev. Nedokonalé spojení sousedních drah a vrstev může vést ke vzniku mikrodutin, jejichž velikost a distribuce závisí na geometrii součásti a tiskových parametrech. [8]

Dalším problémem spojeným s odplyňováním a pórovitostí je také kondenzace uvolněných látek. Ty mohou zkondenzovat na citlivých součástkách, jako jsou senzory nebo optické prvky, což vede ke zhoršení kvality získaných dat. Proto jsou podmínky pro odpařování a pórovitost velmi přísné a každý materiál je před použitím důkladně testován. [3]

2.3 Metoda testování odplyňování materiálů ve vakuu

Zkouška tepelného vakuového odplyňování pro prověřování kosmických materiálů s označením ECSS-Q-ST-70-02C, což je standard European Space Agency (ESA). Tento test se používá pro určení vlastností odplyňování materiálů, které se pak používají při výrobě hardwaru letových a vesmírných plavidel. Všechny materiály, které projdou tímto testem jsou použitelné pro bez posádkové vesmírné aplikace a také pro externí použití obydlí vesmírných systémů. [5]

Minimální parametry odpařování materiálu, které jsou přípustné pro vesmírnou aplikaci jsou: RML <1,0 % (Relative Mass Loss) CVCM <0,10 % (Collected Volatile Condensable Materials). Pokud materiál splňuje tuto podmínku, tak jeho mechanické vlastnosti se nemění natolik, aby to ovlivnilo jeho fungování ve vakuu. [5]

Materiály se testují při dvou teplotách, krátkodobě (v řádu hodin) teplotou větší než 125 °C nebo dlouhodobě (přibližně týden) při teplotě vyšší než 50°C. Tyto hodnoty se ale používají pouze pro materiály, které mají operační teplotu nižší než 50°C. [5]

2.4 Materiály pro 3D tisk s provedenými zkouškami

Materiály užívané v 3D tisku se už delší dobu používají a testují z hlediska jejich chování ve vakuu. Existuje databáze odplyňování materiálů přímo od firmy NASA (National Aeronautics and Space Administration), která obsahuje stanovené hodnoty pro všechny testované materiály.

V této kapitole jsou uvedeny vybrané často používané materiály pro 3D tisk od různých výrobců. Dále je do srovnání zahrnut také moderní materiál Prusament PC Space Grade Black, u kterého byly výrobcem publikovány výsledky testů zaměřeného na odplyňování materiálu.

Tabulka 2-1 Seznam materiálů s provedenými zkouškami odplyňování [6] [10]

Materiál	Zdroj	TML %	CVCM	WVR
PEEK VICTREX 450G903, BLACK	NASA	0,06	0,00	0,04
Igus Iglidur X PEEK High performance polymer	NASA	0,16	0,03	0,08
VICTREX PEEK 150G BROWN	NASA	0,26	0,00	0,14
3D printed PLA (Yellow)	NASA	0,75	0,01	0,30
PLA PLASTIC (MAKERBOT)	NASA	0,56	0,01	0,33
3D printed ABS (Red)	NASA	0,59	0,01	0,25
ABS PLASTIC, 3D PRINTED	NASA	0,94	0,04	0,25
FormLab Rigid 10K, RS-F2-RG10-01; Stiff highly glass-filled resin. Nickel-Copper electroplating on 3D printed resin polymer base material.	NASA	0,02	0,00	0,00
Prusament PC Space Grade Black	Aerospace & Advanced Composites	0,25	0,00	0,13

Dále proběhla studie publikovaná v odborném časopise na platformě ScienceDirect, ve které byly porovnávány nejčastěji používané materiály pro 3D tisk z hlediska jejich chování ve vakuu. V rámci studie byly testovány vzorky tištěné dvěma způsoby, a to FDM a SLA (Stereolithography). [6]

Nejlepších výsledků zde dosáhl Tullomer, ale z nejčastěji používaných materiálu zde výrazně vystupuje materiál PEEK (stejně jako v datech z NASA), dále také materiál COC a FormLab Rigid 10K. Materiály ABS, PET a PLA vykazují naopak vysoké hodnoty odplyňování, a proto nejsou moc vhodné pro vakuové použití. [6]

2.5 Pórovitost u FDM tisku

Technologie FDM představuje jeden z nejrozšířenějších metod 3D tisku, z hlediska vakuových aplikací však není nejvhodnější metodou, kvůli zvýšené pórovitosti výsledných součástí. Výsledná struktura součásti není zcela homogenní, přičemž charakter a distribuce pórů závisí na geometrii součásti, tiskových parametrech a na typu použitého materiálu.

Mezi nejčastější typy pórů patří póry mezi tiskovými drahami (*raster gap voids*), které vznikají v důsledku nedokonalého překrytí extrudovaných vláken. Dalším typem jsou póry způsobené nedokonalým spojením drah (*partial neck growth voids*), tyto defekty vznikají zejména při nízké teplotě trysky nebo při příliš intenzivním chlazení, kdy nedochází k dokonalému spojení materiálu. [8]

Významným problémem jsou také póry vznikající mezi vnitřní výplní a perimetry (*sub-perimeter voids*). Tyto póry vznikají po obvodu stěny, nejčastěji vznikají při nedokonalém navázání vnitřní výplně na vnější stěnu a často se objevují u geometricky složitých tvarů nebo v oblastech ozubení. Z hlediska této práce jsou především důležité póry vznikající ve výplni součásti (*infill voids*), jejichž distribuce silně závisí na typu výplně a trajektorii tiskové hlavy. [8]

Pórovitost může být ovlivněna nejen geometrií součásti a tiskovými parametry, ale také kvalitou použitého filamentu. Například vlhký materiál nebo přítomnost vzduchových bublinek mohou vést ke vzniku pórů uvnitř samotného extrudovaného vlákna (*intra-bead voids*). [8]

2.6 Shrnutí

Původním cílem práce bylo otestování materiálů, které se dají tisknout na běžných tiskárnách jako jsou například tiskárny značky Prusa z kolekce Core one a posoudit jejich vlastnosti ve vakuové komoře. Mezi tyto materiály patří především ABS a PLA, které jsou z hlediska odplyňování méně vhodné pro vakuovou aplikaci než vysoce výkonné materiály jako například PEEK, který ale lze tisknout pouze na specializovaných tiskárnách s vyšší teplotou trysky a podložky. [6] [10]

V průběhu řešení práce byl však uveden na trh nový materiál, Prusament PC Space Grade Black, který je určen k tisku na běžných tiskárnách a také má výborné vlastnosti z hlediska odplyňování porovnatelné s materiálem PEEK. [10]

Tato skutečnost umožnila částečně eliminovat faktor odplyňování a umožnila zaměřit práci na další významný problém spojený s vakuovou aplikací, kterým je pórovitost vznikající při samotném 3D tisku.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Pórovitost je velký problém i u materiálů s nízkým odplyňováním, zejména u aditivní výroby, kde dochází díky vrstvení materiálu ke vzniku malých vzduchových kapes. Při FDM tisku je materiál vytlačován tryskou ve formě vlákna s kruhovým průřezem, což může vést ke vzniku pórů mezi vlákny materiálu. Míra jejich výskytu se dá ovlivnit tiskovými parametry jako je například teplota trysky a podložky, rychlost tisku nebo šířka extruze. Dalším faktorem je také vnitřní struktura výplně (infill), která ovlivňuje dráhu tiskové hlavy při tisku výplně, a to má dopad na celkovou hustotu a vyplnění prostoru.

3.2 Cíl práce

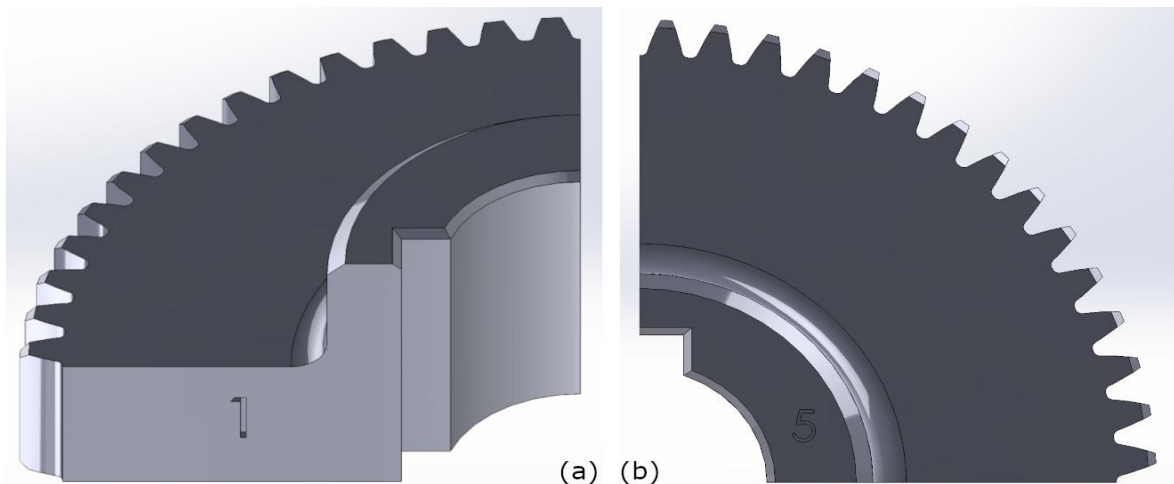
Cílem této práce je identifikovat parametry, které umožní dosáhnout nejnižší pórovitosti 3D tištěných vzorků z materiálu Prusament PC Space Grade Black a následně navrhnout vhodnou testovací metodu pro kontrolu jejich vnitřní struktury. Finálním výstupem práce bude porovnání výsledků vytypovaných tiskových strategií a doporučení pro nastavení tiskových parametrů.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Testovací vzorky

Jako tvar vzorků byla zvolena čtvrtina ozubeného kola s modulem 1 z důvodu jeho tvarové složitosti a zároveň úspory materiálu při výrobě. Kvůli časové náročnosti a přesnosti měření bylo zvoleno šest vzorků. Každý vzorek byl očíslován na stejném místě (viz Obr. 4-2a), s výjimkou vzorku č. 5, u kterého bylo označení umístěno odlišně z důsledku interference s vnitřní strukturou, jak je znázorněno na Obr. 4-2b.

K tisku byla použita tiskárna Prusa CORE One+ s abrazivní tryskou s průměrem 0,4 mm. Vzorky byly tištěny společně a tisk trval 17 hodin a 42 minut, materiálu bylo spotřebováno 18,25 metrů s váhou 52,12 gramů.



Obrázek 4-1 Označení testovaných vzorků; (a) standardní poloha číslování; (b) upravená poloha číslování

4.1.1 Materiál vzorků

Jako tiskový materiál byl zvolen již dříve zmíněný Prusament PC Space Grade Black pro své vlastnosti srovnatelné s plasty používanými ve vesmírném průmyslu. Materiál je abrazivní, a proto je nutné použít tvrzenou trysku. [10]

Jiné materiály jako PEEK vyžadují vysoké teploty tisku a to až 400 °C pro trysku a 140 °C pro podložku. Použitý materiál Prusament PC Space Grade Black vyžaduje nižší teploty, konkrétně 290 °C pro teplotu trysky a 120 °C pro teplotu podložky, což umožňuje jeho použití na běžných tiskárnách, a zároveň přispívá ke snížení nákladů na výrobu kusů pro vakuové aplikace. [11]

4.1.2 Parametry tisku

Pro experimentální měření bylo vytištěno šest zkušebních vzorků, u kterých byly systematicky měněny vybrané tiskové parametry, s cílem posoudit jejich vliv na pórovitost vytištěných součástí. Pro lepší přehlednost jsou vzorky v následujícím textu a tabulkách označeny zkratkami odpovídajícími typu použité výplně. Přehled měněných parametrů jednotlivých vzorků je uveden v Tab. 4-1.

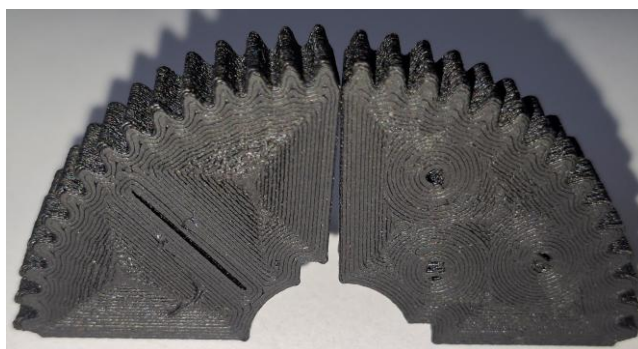
Tabulka 4-1 Proměnné parametry 3D tisku jednotlivých vzorků

Číslo tiskového vzorku	Perimetry	Vzor výplně	Hustota výplně	Vzor výplně horní a dolní vrstvy	Plná výplň každou N vrstvu	Ironing každé vrstvy
PŘ1	3	Přímočarý	100 %	Přímočarý	0	Ne
KON2	4	Koncentrický	100 %	Koncentrický	3	Ne
ARCH3	4	Archimedean chords	100 %	Přímočarý	3	Ne
GYR4	4	Gyroid	20 %	Koncentrický	0	Ne
KON5	4	Koncentrický	35 %	Koncentrický	0	Ne
KON6	4	Koncentrický	100 %	Přímočarý	0	Ano

U vzorku PŘ1 byl zvolen nižší počet perimetrů na základě vizualizace trajektorie tisku v programu PrusaSlicer. Při použití přímočaré výplně docházelo v oblasti ozubení k lepšímu vyplnění úzkých mezer mezi jednotlivými drahami, a proto postačoval nižší počet perimetrů. U ostatních typů výplně bylo nutné počet perimetrů zvýšit, jelikož jejich trajektorie nedokázala oblast ozubení dostatečně vyplnit.

Výplň vzorků s plnou výplní byla zvolena na základě vizuálního porovnání vnitřní struktury z G-kódu vytvořeném v programu PrusaSlicer. U vzorků KON2 a ARCH3 byla aktivována funkce Plná výplň každou N vrstvu z důvodu lepšího vyplnění vnitřní struktury.

Pro zachování nízké hmotnosti 3D tištěných součástí byly připraveny také vzorky s nižší hustotou výplně. U těchto vzorků byla výplň volena podle její schopnosti propojit celý vnitřní objem součásti a umožnit tak odčerpání vzduchu z vnitřního prostoru pomocí odvětrávacích otvorů na spodní straně vzorků (viz Obr. 4-3).

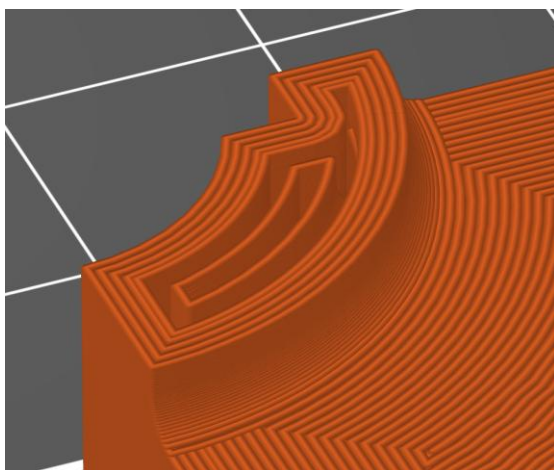


Obrázek 4-2 Spodní část vzorků s částečnou výplní

Po iteraci různých hodnot hustoty výplně byla u vzorku GYR4 zvolena hodnota 20 %, jelikož tato konfigurace poskytovala dostatečné propojení vnitřní struktury při zachování nízké spotřeby materiálu. U vzorku KON5 byla zvolena vyšší hustota výplně z důvodu zajištění lepší soudržnosti vnitřní struktury vzorku.

Vzory výplně horní a dolní vrstvy byl volen podle podobnosti s vnitřní výplní, pro lepší návaznost vrstev.

U vzorku číslo pět se dále projevil problém s vysunutím pro pero s hřídelí, jelikož zvolený vzor výplně nechával tuto oblast špatně propojenou s perimetrem. Z tohoto důvodu byl model dále upraven a toto vysunutí bylo nastaveno jako plná výplň.



Obrázek 4-3 Vnitřní struktura pátého vzorku v oblasti vysunutí pro pero s hřídelí před úpravou

V tabulce 4-2 jsou uvedeny hodnoty násobiče extruze použité při tisku vzorků. Tyto hodnoty byly pro všechny vzorky shodné a nebyly během tisku měněny.

Tabulka 4-2 Parametry násobiče extruze pro jednotlivé typy drah

Typ extruze	Šířka extruze [mm]
Výchozí šířka extruze	0,41
První vrstva	0,40
Perimetry	0,38
Vnější perimetry	0,38
Výplň	0,40
Plná výplň	0,38
Vrchní plné výplně	0,40

Zvolené hodnoty byly stanoveny na základě vizuální iterace provedené v PrusaSliceru. Snížená hodnota násobiče extruze umožňuje vytvoření většího počtu extruzních drah, což vede k vyšší přesnosti tisku a k menším mezerám mezi výplní a perimetrem vzorku.

Tabulka 4-3 Rychlosti tisku pro jednotlivé typy drah

Typ dráhy	Rychlost [mm/s]
Perimetry	70
Malé perimetry	50
Vnější perimetry	50
Výplň	100
Plná výplň	140
Vrchní plné výplně	80

Rychlosti z tabulky 4-3 byly převzaty z přednastavených hodnot softwaru PrusaSlicer a následně upraveny jejich snížením za účelem dosažení lepšího slévání materiálu a snížení pórovitosti vzorků.

Tabulka 4-4 Konstantní parametry tisku

Parametr	Hodnota
Výška vrstvy	0,1 mm
Výška první vrstvy	0,2 mm
Násobič extruze	1,1
Teplota trysky	290 °C
Teplota tiskové podložky	120 °C
Maximální délka kotvy	1000 mm
Přesah pro výplň/perimetry	30 %
Pozice švu	Náhodná
Plné horní vrstvy	5
Plné dolní vrstvy	5

Nastavení teploty a násobiče extruze byla převzata z doporučení výrobce. Hodnoty ovlivňující tvar a výšku vrstev byly nastaveny s cílem zlepšení adheze mezi perimetry a vnitřní výplní a omezení vzniku defektů na jejich rozhraní. [10]

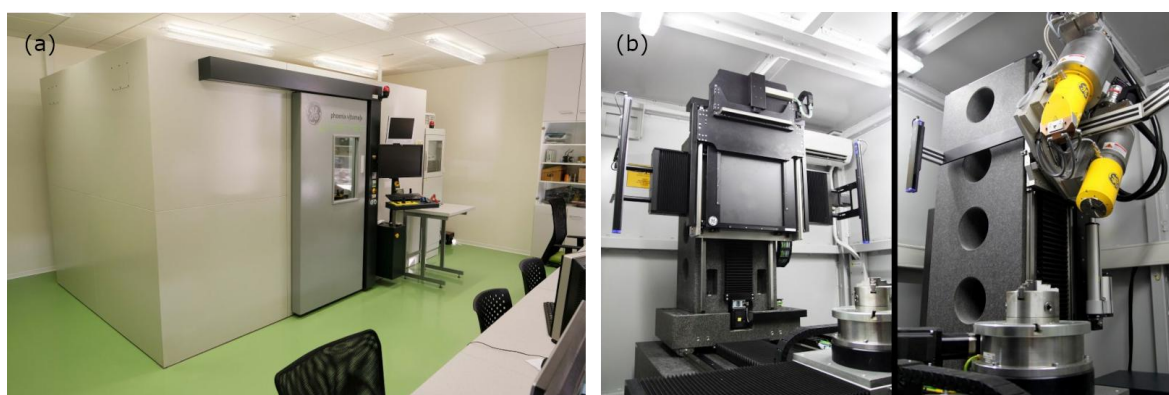
4.2 Kontrolní metoda měření

Návrh měřicí metody představoval jednu z nejsložitějších částí práce. Vzhledem ke komplexnosti zadání bylo obtížné navrhnout jednoduchou a zároveň přesnou metodu měření.

Mezi první zvažované přístupy patřila destruktivní metoda, při které by byl vzorek mechanicky rozdělen a následně analyzován pomocí mikroskopu. Tato metoda byla však zavržena z důvodu možné nepřesnosti měření, jelikož by při rozdělení mohlo dojít k uzavření pórů v místě řezu. Současně by nebylo možné analyzovat celý objem součásti, ale pouze oblast odpovídající vytvořenému řezu.

Další zvažovanou možností byla optická metoda, při níž se měří intenzita světla procházejícího materiálem a na jeho opačné straně se vyhodnocuje míra rozptylu. Tato metoda se však ukázala jako nevhodná pro složitější součásti vyrobené z plného a neprůhledného materiálu. U takového vzorku není možné zajistit dostatečný průchod světla, což znemožňuje použití této metody.

Pro další metody bylo nutné zajistit spolupráci se specializovaným pracovištěm, zabývajícím se experimentálním výzkumem v oblasti rentgenové počítačové tomografie (CT). Konkrétně se jednalo o CT laboratoř výzkumné skupiny Pokročilé instrumentace a metody pro charakterizaci materiálů, která je součástí výzkumného centra CEITEC VUT. Následně byl proveden CT sken vzorků na zařízení Waygate Technologies phoenix v|tome|x L240 (Obr. 4-4). Následně byla provedena analýza pórovitosti v programu myVGL za asistence pracovníků laboratoře. [9]



Obrázek 4-4 CT zařízení Waygate Technologies phoenix v|tome|x L240; (a) celkový pohled na zařízení [9];
(b) vnitřní prostor skenovací komory [9]

5 VÝSLEDKY

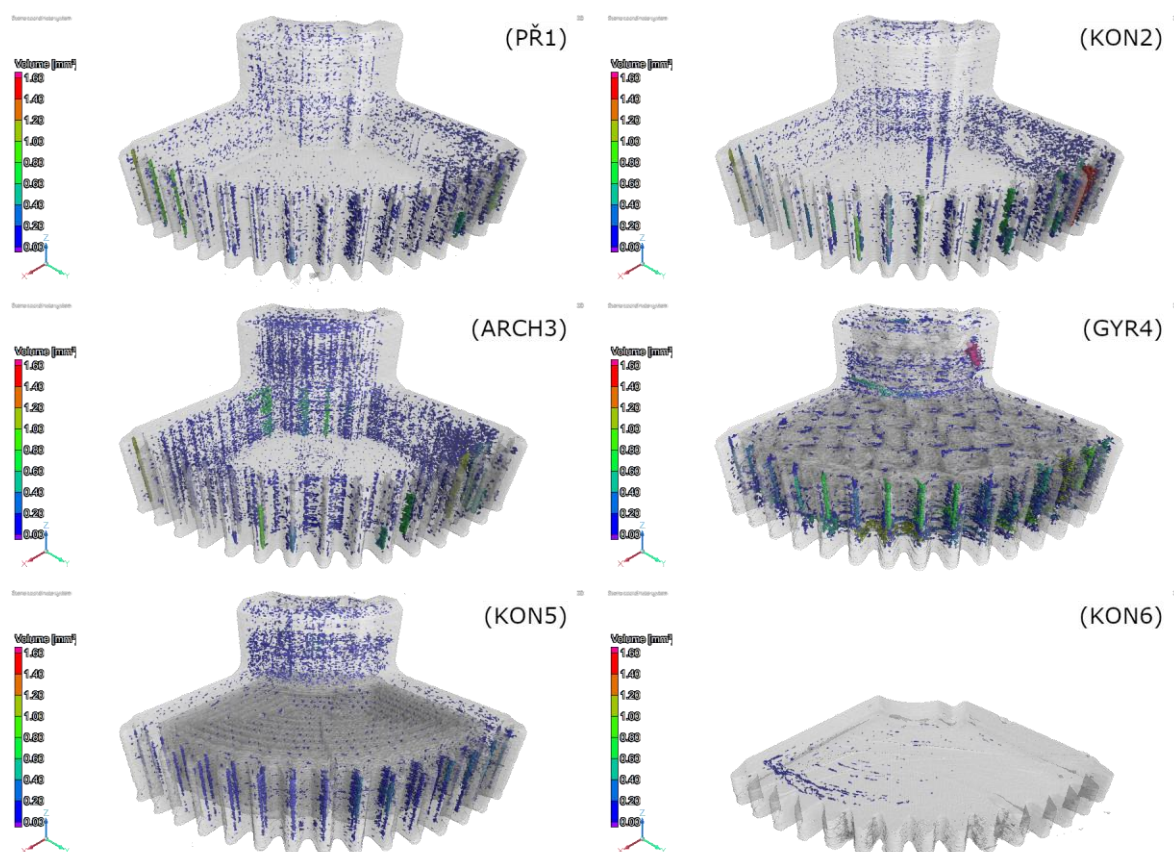
V této kapitole jsou prezentovány výsledky analýzy pórovitosti zkušebních vzorků získané pomocí rentgenové počítačové tomografie. Výsledky zahrnují jak vizualizace vnitřní struktury, tak kvantitativní vyhodnocení pórovitosti jednotlivých vzorků.

Na obrázcích jsou patrné fragmenty mimo analyzovaný model. Tyto fragmenty se nacházejí buď za modelem (znázorněny bílou barvou), nebo zcela mimo něj a nejsou součástí vyhodnocení.

Vzorek KON6 je z důvodu selhání tisku zahrnut pouze pro vizuální porovnání a nebude součástí detailního hodnocení jednotlivých oblastí.

5.1 Celkový pohled

Pro lepší orientaci ve výsledcích je na Obr. 5-1 zobrazen náhled všech testovaných vzorků.



Obrázek 5-1 Oddálený pohled všech vzorků

Z celkových pohledů je patrné, že póry se koncentrují zejména v oblasti perimetrů, konkrétně mezi jednotlivými vrstvami perimetrů, přičemž tento jev však postupně slábne při přechodu mezi perimetrem a vnitřní výplní. Koncentrace pórů je více patrná v pravé části zobrazených vzorků.

V centrální části vzorků s plnou výplní je výskyt pórů výrazně nižší než u stěn, výjimkou jsou vzorky KON2 a ARCH3, u kterých lze pozorovat lokální shluky pórů kolem středu vnitřní výplně.

Všechny vzorky vykazují vyšší pórovitost v oblasti ozubení. Zajímavostí je, že u některých vzorků převažují póry otevřeného charakteru, a tím pádem nejsou součástí analýzy.

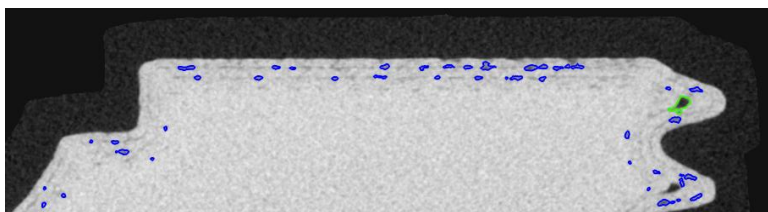
Vzorek ARCH3 vykazuje celkově nejvyšší koncentraci pórů, nejen v okolí perimetrů, ale také ve vnitřní výplni.

Vzorky GYR4 a KON5 vykazují nižší pórovitost v oblasti perimetrů, problémem ale je, že vyšší pórovitost se vyskytuje u přechodu vnitřní výplně a horní vrstvy.

Na Obr. 5-1 je znázorněn vzorek KON6, u kterého během tisku došlo k odtržení vzorku od tiskové podložky a následnému selhání tisku. Přesto byl tento vzorek následně naskenován a v dalších kapitolách je uváděn pro vizuální porovnání. Selhání tisku vzorku KON6 zároveň ovlivnilo kvalitu sousedního vzorku GYR4, u kterého lze pozorovat defekty a zvýšenou pórovitost.

5.2 Perimetry

Perimetry všech vzorků vykazují výrazně vyšší pórovitost než ostatní části vzorků. Tento jev je patrný také v oblasti vyvýšení, kdy se pórovitost koncentruje ve stěnách, zatímco vnitřní výplň vykazuje nižší výskyt pórů. Z obrázku je dále patrné, že se póry ve velké míře nacházejí mezi jednotlivými dráhami perimetrů (viz Obr. 5-2). Tyto póry mají protáhlý charakter a jsou orientované ve směru tisku.

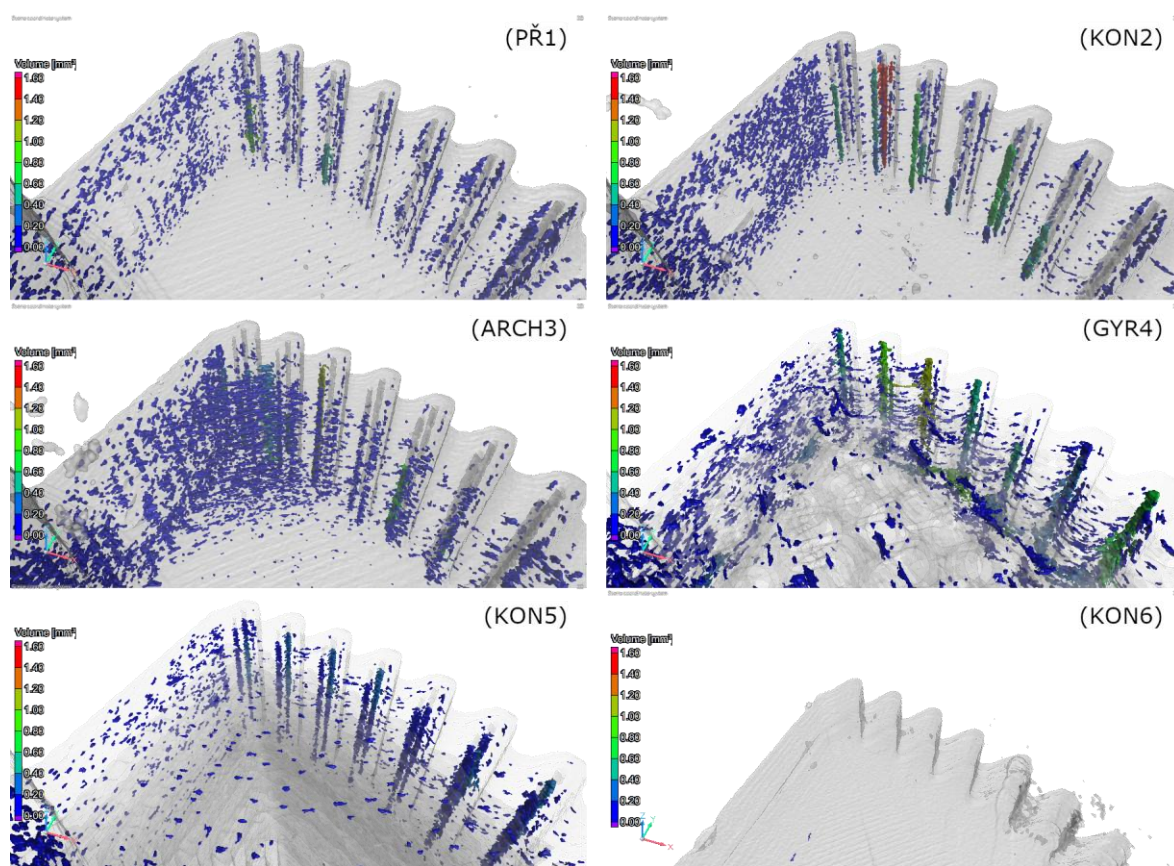


Obrázek 5-2 Řez vzorkem PŘ1 v oblasti perimetrů

V oblasti zubů lze pozorovat, že pórovitost není tvořena pouze většími póry vznikajícími v důsledku geometrie zubů, ale také protáhlými póry mezi sousedními drahami. Tyto póry odpovídají typu *Raster gap voids*, které vznikají v důsledku nedostatečného spojení nebo překrytí sousedních drah. Na CT snímcích jsou tyto defekty patrné opakovaně podél perimetrů, především v oblastech s větším počtem drah perimetrů.

5.3 Analýza pórovitosti v pravé části vzorků

Obr. 5-2 zobrazuje detailnější pohledy pravé části vzorků se zaměřením na rozložení pórů v oblasti perimetrů a ozubení.



Obrázek 5-3 Přiblížení pravé části vzorků

Při přiblížení pravé části vzorků s číselným označením lze detailněji pozorovat charakter pórů v oblasti ozubení a přechodu mezi perimetry a výplní.

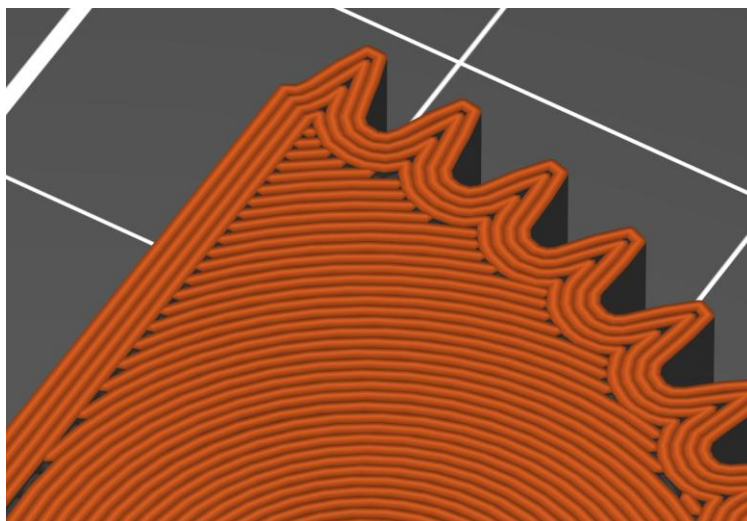
Zvýšená pórovitost je patrná v oblasti ozubení, kde se objevují póry s vyšším objemem vzduchu. U některých vzorků mají tyto póry převážně otevřený charakter, zatímco u ostatních převažují uzavřené póry.

Na rozdíl od ostatních vzorků vykazuje ARCH3 výraznou koncentraci pórů v oblasti přechodu mezi perimetry a výplní. Tyto póry kopírují trajektorii vnitřní výplně a ve zvýšené míře se vyskytují zejména v oblastech, kde dochází k nedostatečnému vyplnění mezer mezi tiskovými drahami.

Vzorek PŘ1 vykazuje nižší pórovitost v oblasti zubů i perimetrů oproti ostatním vzorkům a většina viditelných pórů odpovídá typu *Raster gap voids*. Tyto póry mají převážně protáhlý charakter. V oblasti zubů se často vyskytují póry otevřeného charakteru, a proto nejsou ve větší míře zahrnuty do kvantitativní analýzy pórovitosti.

Ve srovnání se vzorky PŘ1 a ARCH3 představuje KON2 pomyslný střed mezi těmito vzorky. Ve vnitřní výplni vykazuje nízkou pórovitost, zatímco v oblasti perimetrů patří jeho pórovitost k nejvyšším pozorovaným hodnotám.

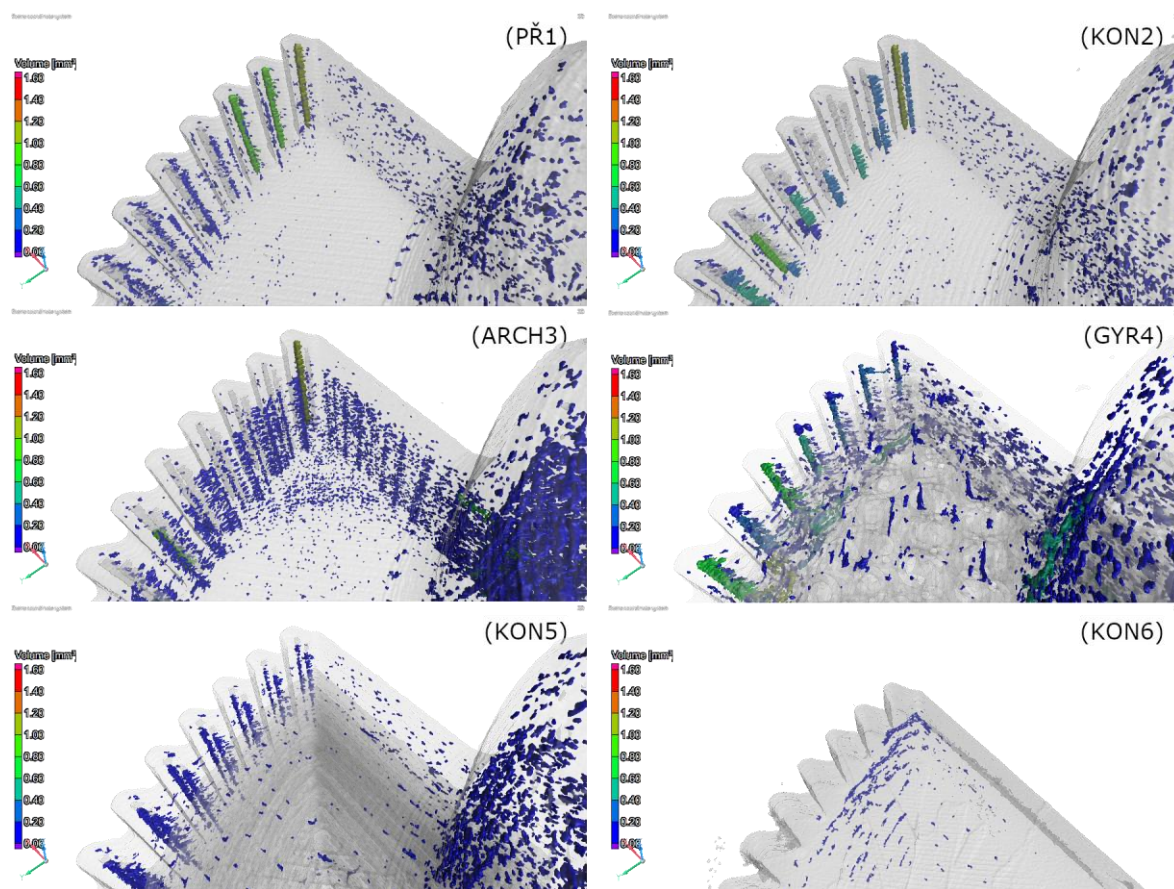
Vzorky GYR4 a KON5 vykazují ve srovnání s ostatními vzorky velmi nízkou pórovitost v oblasti perimetrů. V oblasti ozubení se u vzorku GYR4 opět vyskytují uzavřené póry. Naopak u vzorku KON5 jsou patrné shluky malých pórů po celé výšce zubů. U obou vzorků lze zároveň pozorovat lokální póry v oblasti přechodu mezi horní vrstvou a vnitřní výplní.



Obrázek 5-4 Detail trajektorie výplně vzorku ARCH3

5.4 Analýza pórovitosti v levé části vzorků

Levá část vzorků vykazuje v oblasti stěny bez označení nižší pórovitost perimetrů oproti pravé straně vzorků popsané v předchozí kapitole (viz Obr. 5-5).



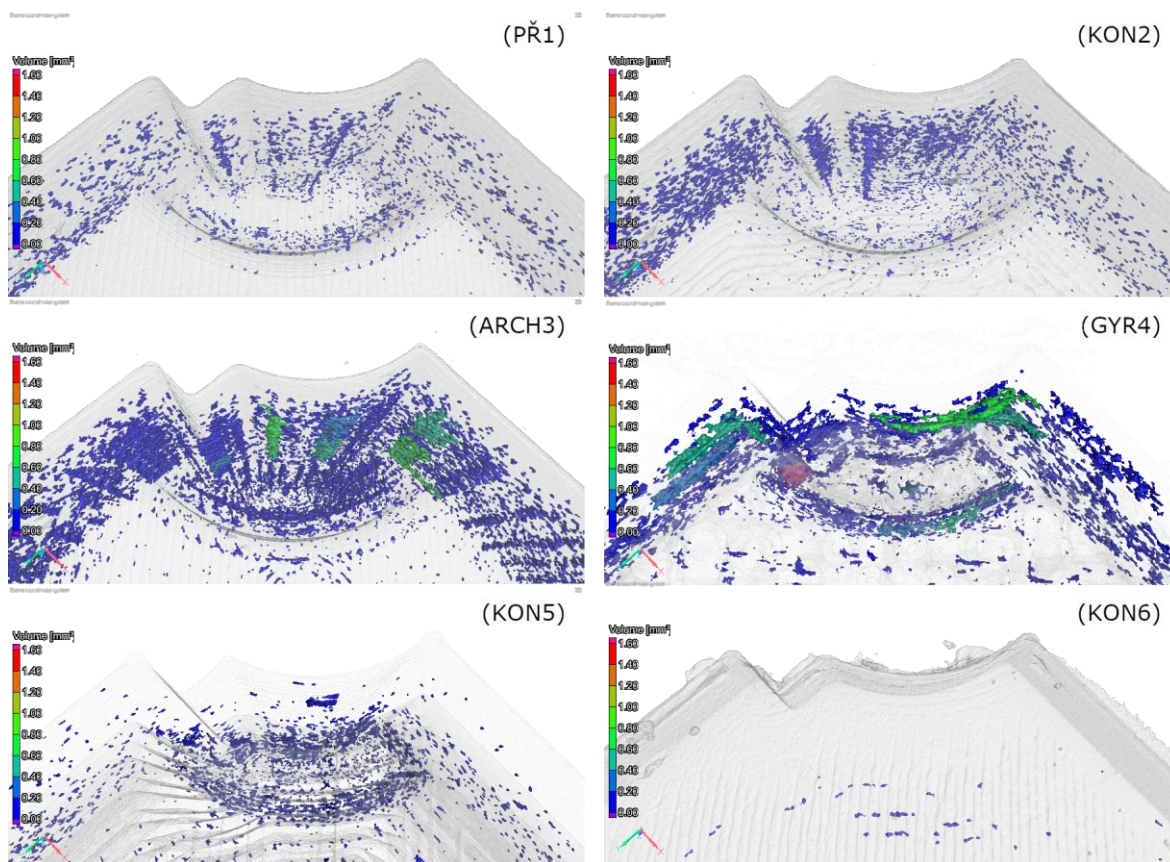
Obrázek 5-5 Přiblížení levé části vzorků

Všechny vzorky na této straně vykazují velmi podobnou úroveň pórovitosti v perimetrech. Výjimkou jsou vzorky ARCH3 a GYR4, u kterých se zvýšená pórovitost koncentruje především v oblasti přechodu mezi vnitřní výplní a perimetry, zatímco samotné perimetry vykazují nižší výskyt pórů obdobně jako u ostatních vzorků.

U vzorku PŘ1 je zajímavé, že póry v krajních zubech mají uzavřený charakter, zatímco ve střední části ozubení převažují otevřené póry. Tento jev se vyskytuje i na pravé části a je spojen se směrem tiskových drah.

5.5 Oblast vyvýšení

Pro detailnější analýzu pórovitosti ve vyvýšené části vzorků byl zvolen pohled ze spodní strany, který umožní lepší vizualizaci vnitřní struktury (viz Obr. 5-6).



Obrázek 5-6 Pohled ze spodní strany na oblast vyvýšení vzorků

Z těchto pohledů je zřejmé, že v místech hran se póry téměř nevyskytují, zatímco ve stěnách mezi jednotlivými hranami lze pozorovat póry po celé výšce stěny. Dalším zajímavým jevem jsou póry nacházející se v oblasti zaoblení a horní vrstvy.

V úzkých oblastech vyvýšení se póry vyskytují pouze v perimetrech, zatímco ve vnitřní struktuře je jejich výskyt minimální.

U vzorku GYR4 lze pozorovat objekt s objemem větším než 1.60 mm^3 . Tento objekt nepředstavuje skutečný pór, ale oddělenou část vnitřní struktury, která se nespojila se zbytkem výplně a byla proto softwarem vyhodnocena jako pór. Také se zde objevují póry s větším objemem (zvýrazněné nazelenalou barvou), a ty jsou způsobeny vadou tisku po selhání vzorku KON6.

5.6 Kvantitativní vyhodnocení

Po vizuálním vyhodnocení vnitřní struktury vzorků jsou v této podkapitole uvedeny kvantitativní výsledky analýzy pórovitosti získané pomocí programu myVGL. Výsledky jsou prezentovány formou tabulky a grafického porovnání jednotlivých vzorků.

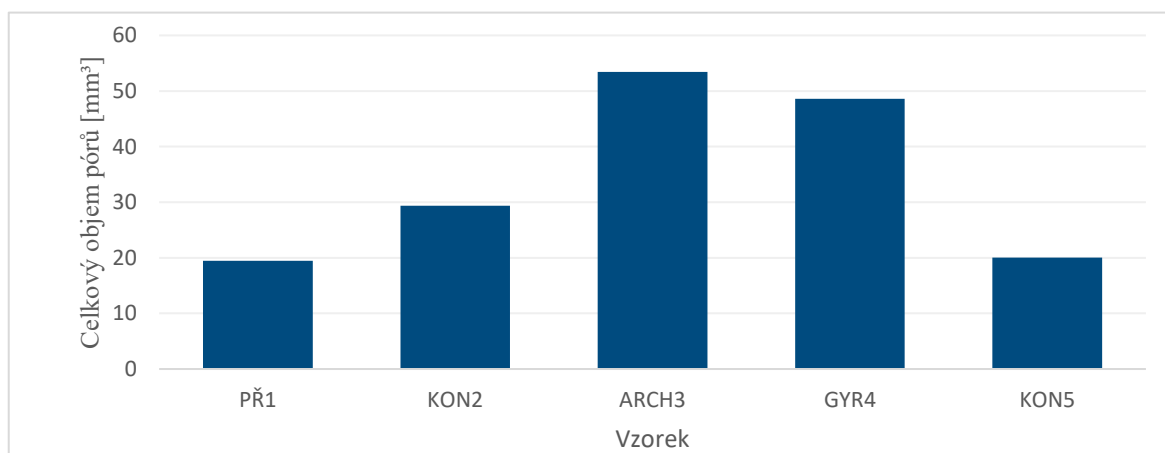
Tabulka 5-1 Kvantitativní vyhodnocení pórovitosti vzorků

Vzorek	Pórovitost %	Počet pórů -	Celkový objem pórů mm ³	Objem materiálu mm ³
PŘ1	0,27	4147	19,47	7212,59
KON2	0,41	4636	29,37	7208,01
ARCH3	0,74	9499	53,42	7162,19
GYR4	1,20	4406	48,62	4009,40
KON5	0,40	4794	20,02	5012,17

Tab. 5-1 uvádí souhrnné výsledky analýzy pórovitosti jednotlivých vzorků. Počet detekovaných pórů byl omezen pomocí prahové hodnoty pravděpodobnosti 0,05, která slouží k odfiltrování nejistých detekcí, tedy případů, kdy není jednoznačné, zda se jedná o skutečný pór.

Nejnižší procentuální pórovitost byla zaznamenána u vzorku PŘ1, který zároveň vykazuje nejnižší celkový objem pórů (viz Obr. 5-7). Naopak nejvyšší hodnoty byly naměřeny u vzorků ARCH3 a GYR4. Přestože vzorek GYR4 vykazuje nejvyšší procentuální pórovitost, největší celkový objem pórů byl zaznamenán u vzorku ARCH3. Tento vzorek zároveň obsahuje více než dvojnásobný počet pórů oproti ostatním vzorkům.

Zajímavé je porovnání vzorků KON2 a KON5. Přestože oba vzorky vykazují podobnou hodnotu procentuální pórovitosti, vzorek KON2 dosahuje výrazně vyššího celkového objemu pórů.



Obrázek 5-7 Grafické porovnání celkového objemu pórů jednotlivých vzorků

6 DISKUZE

V této kapitole jsou diskutovány výsledky analýzy pórovitosti prezentované v kapitole 5, přičemž je blíže vysvětleno, jaké faktory vedly k jejich vzniku.

U všech vzorků, kromě vzorku KON6, se největší koncentrace pórů vyskytovala v oblasti perimetrů, zejména mezi jednotlivými drahami perimetrů. Vnitřní části vzorků vykazovaly výrazně nižší výskyt pórů což naznačuje, že samotná vnitřní výplň není hlavním zdrojem pórovitosti.

Výjimkou je vzorek ARCH3, u kterého se velké množství pórů vyskytuje ve vnitřní výplni. Zvýšená koncentrace pórů se objevuje v oblastech, kde trajektorie výplně Archimedean Chords nevytváří souvislou dráhu, ale skládá se z krátkých navazujících segmentů. V místech napojení těchto segmentů na perimetry vznikají lokální shluky pórů, což pravděpodobně souvisí s jejich napojováním pod ostrým úhlem vůči perimetrům (viz Obr. 5-4).

V oblasti zubů se u většiny vzorků vyskytovaly póry s největším objemem, přičemž některé z nich nebyly zahrnuty do analýzy kvůli svému otevřenému charakteru. Tyto póry byly očekávány již při přípravě G-code, jelikož průměr trysky neumožňoval dostatečné vyplnění úzkých oblastí mezi perimetry v oblasti ozubení.

Zajímavým zjištěním je také vliv typu vnitřní výplně a vzoru horní vrstvy na charakter těchto pórů. U vzorků PŘ1 a ARCH3, které měly přímočarý typ horní výplně, převažovaly v oblasti ozubení póry otevřeného charakteru, zatímco u vzorků KON2 a GYR4, které měly koncentrický typ horní výplně se vyskytovaly uzavřené dutiny s větším objemem. U vzorku KON5 se v oblasti zubů vyskytovali menší lokální póry po celé výšce ozubení. Tento jev pravděpodobně souvisí s charakterem vnitřní výplně, která není přímo spojena s perimetry, ale navazuje pouze na horní vrstvy.

U většiny vzorků lze pozorovat vyšší pórovitost stěny s označením oproti protilehlé straně. Tento jev může souviset jak s orientací vzorku na tiskové podložce, tak s přítomností číselného označení. U vzorku KON5, kde bylo označení přesunuto do horní části modelu, je tento jev stále patrný, avšak ve výrazně menší míře (viz Obr. 5-3 a 5-5).

Při porovnávání vzorků s plnou a částečnou výplní (viz Tab. 5-1 a Obr. 5-7) bylo zjištěno, že počet pórů i jejich celkový objem jsou mezi těmito skupinami vzájemně srovnatelné. Lze však předpokládat, že vzorky s částečnou výplní by mohly vykazovat nižší pórovitost, pokud by nedošlo k ovlivnění výsledků dvěma specifickými faktory. V případě vzorku GYR4 došlo ke zhoršení kvality v důsledku selhání tisku vzorku KON6. U vzorku KON5 se pak zvýšená pórovitost koncentruje v oblasti vyvýšení, kde byla použita plná výplň bez dostatečné podpory. V této oblasti následně docházelo k deformaci horních vrstev a ke vzniku lokálních pórů.

Na základě získaných dat se jako nejlepší konfigurace z hlediska pórovitosti u vzorků s plnou výplní jeví přímočará výplň, která vykazovala nejnižší celkový objem pórů. U vzorků s částečnou výplní bylo nejlepších výsledků dosaženo u koncentrické výplně.

Specifickým případem je vzorek KON6, který i přes selhání tisku vykazuje velmi nízkou pórovitost jak v oblasti zubů, tak i v oblasti perimetrů. Tento výsledek naznačuje, že metoda žehlení jednotlivých vrstev může při vhodném nastavení parametrů výrazně snížit pórovitost vytištěných součástí. Nevýhodou této metody je však výrazné prodloužení doby tisku a zvýšené tepelné zatížení materiálu, které vede ke zhoršení kvality detailních částí vzorku. Přesto lze předpokládat, že po optimalizaci parametrů by mohla tato metoda využitelná i u vzorků s částečnou výplní, pokud by nedocházelo k negativnímu ovlivnění jejich vnitřní struktury.

CT analýza se ukázala jako vhodná metoda pro hodnocení pórovitosti FDM součástí, jelikož umožňuje nedestruktivní analýzu celého objemu vzorku. Nevýhodou této metody jsou však vyšší finanční náklady při rozsáhlejší testování a nutnost využití specializovaného pracoviště a vybavení.

7 ZÁVĚR

Původním cílem práce bylo porovnání materiálů používaných při FDM tisku z hlediska jejich odplyňování ve vakuovém prostředí. V průběhu řešení práce však došlo k rozšíření dostupnosti materiálů určených pro vakuové aplikace a současně byly publikovány nové studie zabývající se odplyňováním materiálů. Z tohoto důvodu byla práce následně zaměřena na analýzu pórovitosti 3D tištěných součástí z materiálu Prusament PC Space Grade Black.

Výsledky analýzy ukázaly, že nejproblematictější oblastí z hlediska vzniku pórů jsou perimetry, kde dochází ke vzniku dutin mezi jednotlivými tiskovými drahami. Dále bylo zjištěno, že typ vnitřní výplně a vzor horních vrstev výrazně ovlivňují charakter pórů v oblasti ozubení. Koncentrický vzor horních vrstev vedl ke vzniku uzavřených dutin, zatímco přímočarý typ podporoval vznik otevřených pórů. Z hlediska celkové pórovitosti dosahovala u vzorků s plnou výplní nejlepších výsledků přímočará výplň, zatímco u vzorků s částečnou výplní byla nejvhodnější výplň koncentrická.

Pro součásti s jednodušší geometrií se jako vhodnější jeví přímočará výplň, zejména v případech, kdy trajektorie tiskových drah vytváří souvislé a plynulé dráhy bez nadměrného množství krátkých přechodů a lokálních zakončení. Tuto skutečnost je vhodné před tiskem zkontrolovat v programu pro přípravu tisku. U součástí, kde přímočará výplň nedokáže zajistit kvalitní vyplnění, je lepší použít koncentrickou výplň, která lépe kopíruje složité tvary, i když může mírně zvýšit celkovou pórovitost.

Pro zachování nízké hmotnosti součásti je vhodné použít částečnou výplň. V takovém případě je však nutné navrhnout odvětrávací otvory umožňující odvod vzduchu z vnitřních částí součástí. Z hlediska pórovitosti se jako vhodná ukázala koncentrická výplň, avšak pro mechanicky více namáhané díly je vhodnější gyroidní výplň.

Další výzkum by se měl soustředit převážně na optimalizaci parametrů perimetrů, zejména šířky extruze, rychlosti tisku, maximální délky kotvy a počtu perimetrů, jelikož tyto parametry pravděpodobně významně ovlivňují vznik pórů mezi jednotlivými tiskovými drahami.

Jako perspektivní metoda se dále jeví žehlení jednotlivých vrstev, protože vzorek KON6 vykazoval i přes selhání tisku velmi nízkou pórovitost. Budoucí práce by se proto mohla zaměřit na optimalizaci parametrů tohoto procesu.

Současně by bylo vhodné experimentálně ověřit mechanické vlastnosti jednotlivých konfigurací a porovnat jejich vztah s pórovitostí.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MATERIALPRO3D. *3D tisk v kostce*. Online. Materialpro3D. C2026. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>. [cit. 2026-02-11].
2. FRANKEL, Henry E. *Effect of Vacuum on Materials*. Online. NASA NTRS. 1969. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19690026573/downloads/19690026573.pdf>. [cit. 2026-02-14].
3. MURACA, R. F. a WHITTICK, J. S. *Polymers for spacecraft application*. Online. NASA NTRS. 1964. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19670030941/downloads/19670030941.pdf>. [cit. 2026-02-14].
4. RADIĆ, Aleksandar; RHODES, Sam a LAMBRICK, Sam Morgan. On the application of components manufactured with stereolithographic 3D printing in high vacuum systems. Online. *Vacuum*. 2025, vol. 232, no. 113809, article 113809, s. 2-4. Licence: c2024. ISSN 0042-207X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113809>. [cit. 2026-02-14].
5. EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). ECSS-Q-ST-70-02C, *Thermal vacuum outgassing test for the screening of space materials*. 3. Noordwijk, Netherlands: ECSS Secretariat, 2008.
6. NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. *Outgassing Database*. Online. NASA. 1993, 2025. Dostupné z: <https://etd.gsfc.nasa.gov/capabilities/outgassing-database>. [cit. 2026-02-15].
7. DOMINGUES, Arthur; MARTÍNEZ-CARBONERES, Ana a CARLSON, Stefan. Evaluation of 3D-printed plastics for Ultra-High Vacuum applications: Outgassing, and residual gas analysis. Online. *Vacuum*. 2025, vol. 233, no. 113970, article 113970, s. 3-4. Licence: c2024. ISSN 0042-207X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113970>. [cit. 2026-02-15].
8. TAO, Yubo; KONG, Fangong; LI, Zelong; ZHANG, Jingfa; ZHAO, Xin et al. A review on voids of 3D printed parts by fused filament fabrication. Online. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021, vol. 233, no. 4860, s. 2-5. Licence: c2021. ISSN 0042-207X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421012448>. [cit. 2026-05-19].
9. CTLAB CEITEC. *Equipment*. Online. CEITEC. C2026. Dostupné z: <https://ctlab.ceitec.cz/equipment/>. [cit. 2026-04-19].
10. PRUSA RESEARCH. *Prusament PC Space Grade Black 850g (NFC)*. Online. Prusa3D. 2025. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-pc-space-grade-black-850g-nfc/>. [cit. 2026-04-15].

11. PRUSA RESEARCH. *3DXTech ThermaX PEEK Natural 500g*. Online. Prusa3D. 2025. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3dxtech-thermax-peek-natural-500g/>. [cit. 2026-04-15].

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

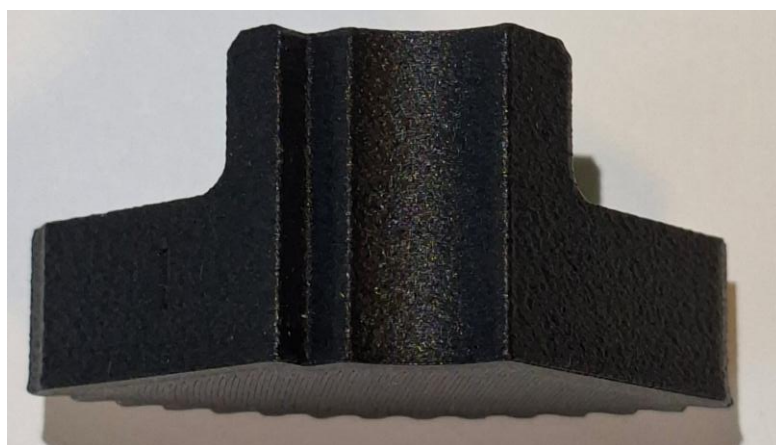
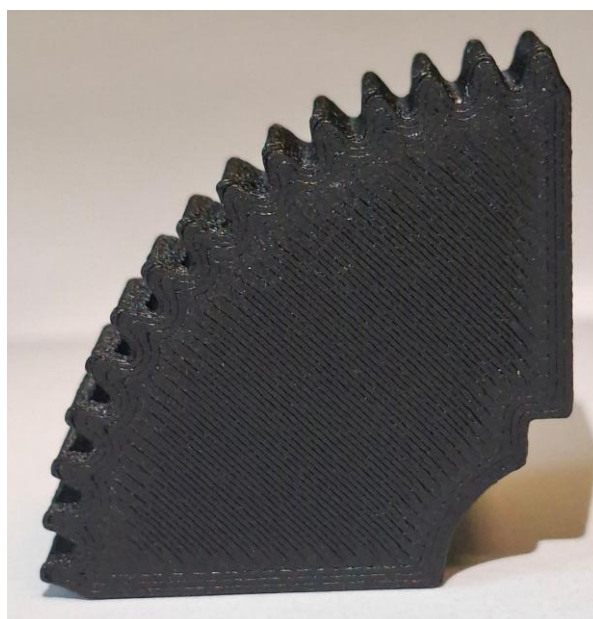
Obrázek 2-1 CT snímky vzorků; (a) bez výskytu pórů; (b) s výskytem pórů	12
Obrázek 4-1 Označení testovaných vzorků; (a) standardní poloha číslování; (b) upravená poloha číslování	17
Obrázek 5-1 Oddálený pohled všech vzorků	22
Obrázek 5-2 Řez vzorkem PŘ1 v oblasti perimetrů	23
Obrázek 5-3 Přiblížení pravé části vzorků	24
Obrázek 5-4 Detail trajektorie výplně vzorku ARCH3	25
Obrázek 5-5 Přiblížení levé části vzorků	26
Obrázek 5-6 Pohled ze spodní strany na oblast vyvýšení vzorků	27
Obrázek 5-7 Grafické porovnání celkového objemu pórů jednotlivých vzorků	28

10 SEZNAM TABULEK

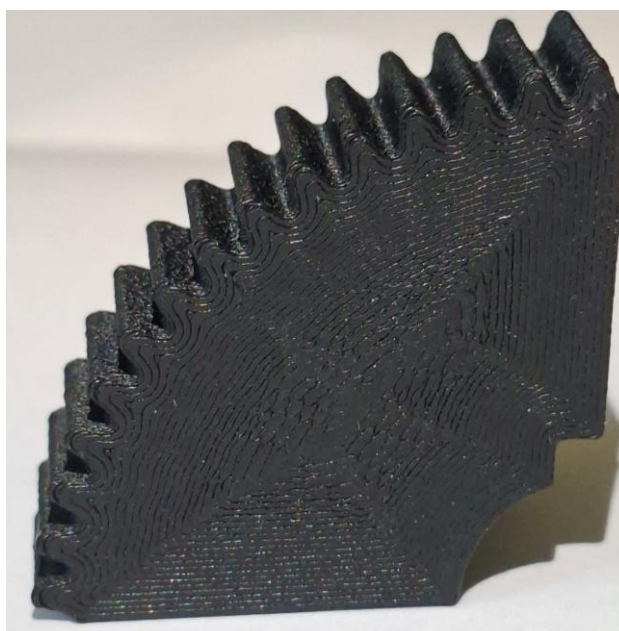
Tabulka 2-1 Seznam materiálů s provedenými zkouškami odplyňování	14
Tabulka 4-1 Proměnné parametry 3D tisku jednotlivých vzorků	18
Tabulka 4-2 Parametry násobiče extruze pro jednotlivé typy drah	19
Tabulka 4-3 Rychlosti tisku pro jednotlivé typy drah	20
Tabulka 4-4 Konstantní parametry tisku	20
Tabulka 5-1 Kvantitativní vyhodnocení pórovitosti vzorků.....	28

11 SEZNAM PŘÍLOH

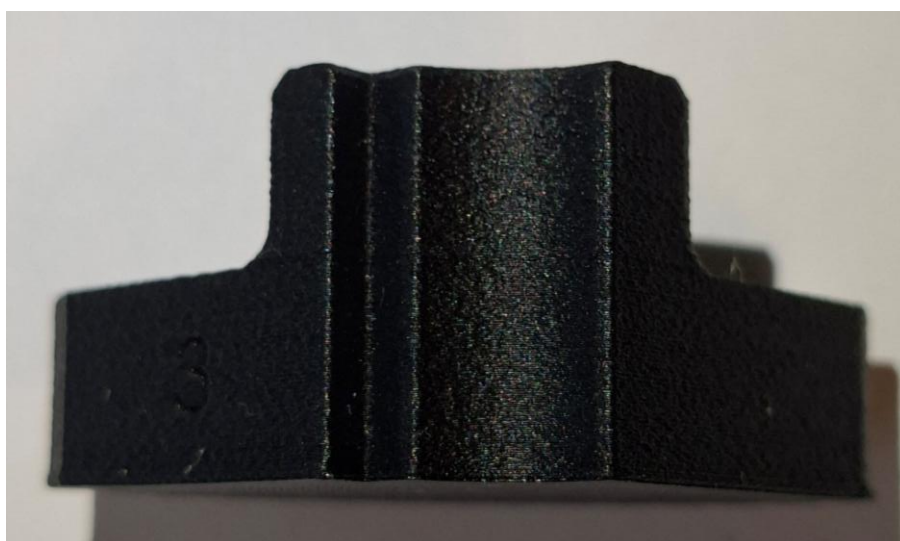
Příloha 1 - Fotografie vzorku PŘ1



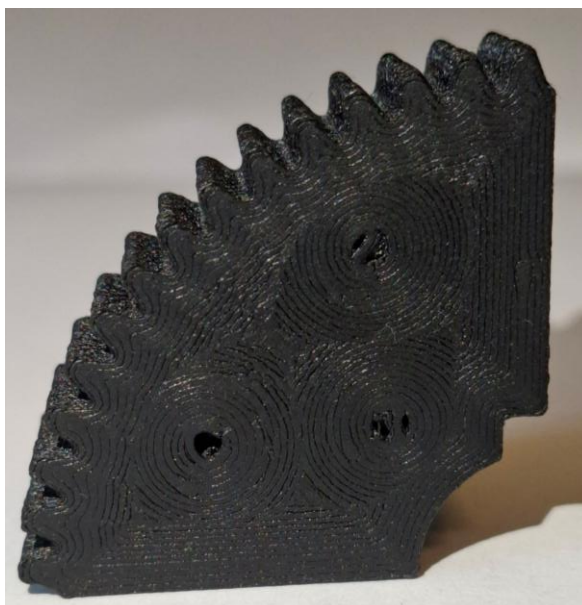
Příloha 2 - Fotografie vzorku KON2



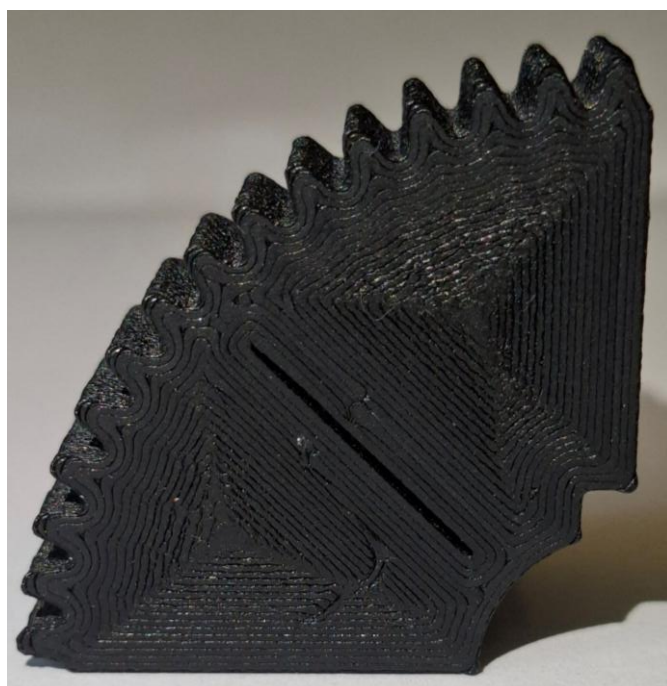
Příloha 3 - Fotografie vzorku ARCH3



Příloha 4 - Fotografie vzorku GYR4



Příloha 5 - Fotografie vzorku KON5



Příloha 6 - Fotografie vzorku KON6

