

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie-technologie
 obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řešení problematických míst při návrhu podpůrných konstrukcí AM dílů

Autor: **Martin Porkristl**
Vedoucí práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin PORKRISTL**
Osobní číslo: **S17B0191P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Téma práce: **Řešení problematických míst při návrhu podpůrných konstrukcí AM dílů**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh vlastního řešení
4. Zhodnocení
5. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

- BIAN, Linkan, Nima SHAMSAEI a John USHER. Laser-based additive manufacturing of metal parts: modeling, optimization, and control of mechanical properties. Boca Raton: CRC Press, Taylor Francis Group, [2018]. ISBN 978-1-4987-3998-6.
- CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fourth edition of Rapid prototyping. Hackensack, New Jersey: World Scientific, [2015]. ISBN 978-981-4571-41-8.
- JIANG, Jingchao, Xun XU a Jonathan STRINGER. Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. Journal of Manufacturing and Materials Processing [online]. 2018, 2 (4) [cit. 2019-10-21]. DOI: 10.3390/jmmp2040064. ISSN 2504-4494. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2504-4494/2/4/64>.
- JOHANNES LINDECKE, Peter Nils, Heiko BLUNK, Jan-Philip WENZL, Mauritz MÖLLER a Claus EMMELMANN. Optimization of support structures for the laser additive manufacturing of TiAl6V4 parts. Procedia CIRP [online]. 2018, 74, 53-58 [cit. 2019-10-21]. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.029. ISSN 22128271. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827118308138>.
- LIU, Yang, Zuyu LI, Peng WEI a Shikui CHEN. Generating support structures for additive manufacturing with continuum topology optimization methods. Rapid Prototyping Journal [online]. 2019, 25 (2), 232-246 [cit. 2019-10-21]. DOI: 10.1108/RPJ-10-2017-0213. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/RPJ-10-2017-0213>.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Tímto děkuji vedoucí mé bakalářské práce Ing. Ivaně Zetkové, Ph.D. za ochotu, trpělivost a rady poskytnuté při řešení této práce.

Dále děkuji Ing. Martinu Nozarovi, Ph.D. za rady ohledně nastavení parametrů tisku a Ing. Josefu Machovi za provedení tahové zkoušky vzorků.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Porkristl	Jméno Martin	
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie – technologie obrábění		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetková Ph.D.	Jméno Ivana	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Řešení problematických míst při návrhu podpurných konstrukcí AM dílů		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	39	TEXTOVÁ ČÁST	39	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	Bakalářská práce se zabývá návrhem kritických míst při 3D tisku kovových součástí metodou DMLS na rozhraní plné části a podpurné konstrukce součásti. U napojení podpurných konstrukcí je možno volit několik možných parametrů, jmenovitě výkon laseru, skenovací rychlost, Z-offset a geometrické rozměry napojovacích zubů a mnoho dalších. Praktická část práce je věnována optimalizaci těchto parametrů, tisku testovacích vzorků na 3D tiskárně EOS M290 a jejich testování při zkoušce tahem pro ověření navržených parametrů.
KLÍČOVÁ SLOVA	3D tisk kovů, Aditivní výroba, Materialise Magics, Podpurná konstrukce, EOS M290, Napojování podpurné konstrukce

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Porkristl	Name Martin	
FIELD OF STUDY	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetková Ph.D.	Name Ivana	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Solving of problematic spots during the design of support structures in AM parts		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	39	TEXT PART	39	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION	<p>Bachelor thesis is addressing the design of critical spots during metal 3D printing using DMLS on the interface of the full body and support structure of the part. Several parameters can be selected for the support structure interface, such as laser power, scanning speed, Z-offset, geometrical dimensions of teeth and many more. The practical part of this thesis is dedicated to the optimization of these parameters, printing test parts on EOS M290 3D printer and their tensile testing.</p>
KEY WORDS	<p>3D metal printing, Additive manufacturing, Materialise Magics, Support structure, EOS M290, Interface of support structure</p>

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých zkratk	7
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
1 Úvod.....	10
1.1 Cíl práce.....	10
2 Rozbor současného stavu	11
2.1 Aditivní výroba	11
2.1.1 Druhy AM dle ISO	11
2.1.2 DMLS – direct metal laser sintering	12
2.2 Podpůrné konstrukce	14
2.2.1 Snižování množství PK	14
2.2.2 Typy PK.....	15
2.2.3 Zásady pro návrh PK.....	17
3 Návrh experimentu a jeho realizace	20
3.1 Navázání na předchozí experiment	20
3.2 Návrh testované součásti	21
3.3 Návrh napojení PK.....	21
3.3.1 Vlastnosti ovlivňující pevnost PK.....	21
3.3.2 Návrh rozměrů PK	21
3.3.3 Návrh parametrů tisku	23
3.3.4 Parametry materiálu	24
3.4 Příprava prvního tisku	24
3.4.1 Tiskárna	25
3.4.2 Výsledek prvního tisku.....	26
3.5 Druhý tisk	28
3.5.1 Parametry druhého tisku.....	29
3.5.2 Průběh tisku	30
3.6 Tahová zkouška vzorků	33
3.6.1 Tahová zkouška.....	33
3.6.2 Zkušební zařízení	34
3.6.3 Tahové zkoušky vzorků.....	34
4 Zhodnocení experimentu.....	36
5 Závěr	37
Seznam použité literatury	38

Seznam použitých zkratk

AM	Additive manufacturing	-
PK	Podpůrná konstrukce	-
ISO	International Organization for Standardization	-
RTI	Regionální technologický institut	-
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni	-
3D	Three dimension	-
DMLS	Direct metal laser sintering	-
TZ	Tepelné zpracování	-
SLA	Stereolithography	-
CLIP	Continuous liquid interface production	-
SGC	Solid ground curing	-
DLP	Direct light processing	-
FDM	Fused deposition modelling	-
SLM	Selective laser melting	-
SLS	Selective laser sintering	-
EBM	Electron beam manufacturing	-
3DP	Three dimensional printing	-
IJP	Inkjet printing	-
BPM	Ballistic particle manufacturing	-
DMD	Direct metal deposition	-
LPD	Laser powder deposition	-
LOM	Laminated object Manufacturing	-
SFP	Solid foil polymerization	-
CAD	Computer aided design	-
HRC	Stupeň tvrdosti dle Rockwell C	-

Odvozené fyzikální jednotky

N	Newton	$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
MPa	Megapascal	$\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot 10^6$
GPa	Gigapascal	$\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot 10^9$
mm	Milimetr	$\text{m}\cdot 10^{-3}$
μm	Mikrometr	$\text{m}\cdot 10^{-6}$
W	Watt	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$
kW	Kilowatt	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot 10^3$
V	Volt	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-1}$
J	Joule	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 - Součást vytištěná technologií DMLS - Příruba výfukového potrubí [4]	12
Obrázek 2-2 - Princip DMLS tisku [19]	13
Obrázek 2-3 - Ukázka množství podpor při různých orientacích součásti na platformě [2]	14
Obrázek 2-4 - Ukázka redesignu dílu za účelem snížení množství PK [2]	15
Obrázek 2-5 - Ukázka vlivu průměru děr na kvalitu tisku (díra průměru 8 mm je čtvrtá zprava) [11]	18
Obrázek 2-6 - Ukázka samonosných stěn pod úhlem [11]	18
Obrázek 2-7 - Ukázka převisů u součásti [11]	19
Obrázek 2-8 - Ukázka mostování technologie DMLS [11]	19
Obrázek 3-1 - Parametry PK pro 3D tisk [12]	20
Obrázek 3-2 - Rozměry zkušební vzorku pro tahovou zkoušku	20
Obrázek 3-3 - CAD model vzorku bez PK	21
Obrázek 3-4 - CAD model vzorku s PK	21
Obrázek 3-5 - Parametry PK pro 3D tisk [12]	21
Obrázek 3-6 - Rozložení vzorků na platformě při prvním tisku	24
Obrázek 3-7 - EOS M290 [16]	25
Obrázek 3-8 - Průběh začátku tisku	26
Obrázek 3-9 - Dvojnásobně pálená vrstva PK	27
Obrázek 3-10 - Pálená vrstva perforace (správná)	27
Obrázek 3-11 - Pálená vrstva PK (navíc)	27
Obrázek 3-12 - Začátek selhávání PK	27
Obrázek 3-13 - Kupolovitá dutina na napojení PK	28
Obrázek 3-14 - Platforma prvního tisku	28
Obrázek 3-15 - Rozložení druhého tisku	30
Obrázek 3-16 - Tisk 2, 22:19 h	31
Obrázek 3-17 - Tisk 2, 22:21 h	31
Obrázek 3-18 - Tisk 2, 22:25 h	32
Obrázek 3-19 - Tisk 2, 22:29 h, Foto po zastavení	32
Obrázek 3-20 - Správný vzhled tisku PK	32
Obrázek 3-21 - Diagram s výraznou mezí kluzu (modře) a s nevýraznou mezí kluzu (červeně) [20]	33
Obrázek 3-22 - Zwick/Roell Z250 [17]	34
Obrázek 3-23 - Upnutý vzorek do čelistí zkušebního stroje	34

Seznam tabulek

Tabulka 2-1 - Příklady nejpoužívanějších typů PK [2]	16
Tabulka 3-1 - Hodnoty základních parametrů PK pro 3D tisk [12].....	21
Tabulka 3-2 - Parametry vzorků.....	22
Tabulka 3-3 - Doporučené hodnoty parametrů	23
Tabulka 3-4 - Chemické složení materiálu MS1 [15]	24
Tabulka 3-5 - Mechanické vlastnosti materiálu MS1.....	24
Tabulka 3-6 - Parametry tiskárny EOS M290 [16]	26
Tabulka 3-7 - Parametry druhého tisku	29
Tabulka 3-8 - Parametry Zwick/Roell Z250 [17].....	34
Tabulka 3-9 - Hodnoty z tahové zkoušky	35

1 Úvod

Additive Manufacturing (dále jen AM), jinými slovy 3D tisk, je relativně mladá technologie, které se v současné době dostává velké pozornosti díky jejím výhodám v porovnání s konvenčními metodami výroby. Díky velkému zájmu je tato technologie neustále vylepšována a je dán velký důraz na její kontinuální vývoj, který mimo jiné neustále snižuje poměrně vysoké náklady na výrobu součástí 3D tiskem, čímž se stále otvírají nové možnosti pro využití 3D tisku v praxi, jako je například letecký průmysl nebo kolejová doprava. Aditivní výroba se však využívá i v jiných oborech než jenom strojírenství, našla své místo i v lékařství či při tisku obytných domů.

Tato práce se bude zabývat technologií 3D tisku kovů technologií Direct metal laser sintering (DMLS) se zaměřením na podpůrné konstrukce (dále jen PK).

PK je jeden ze základních prvků 3D tisku využívaných při většině tisků dílů. Tento prvek je při aditivní výrobě velice důležitý díky způsobu, jakým jsou součásti tvořeny. Součásti jsou tvořeny vrstvou po vrstvě - to umožňuje vytvářet tvary složitých geometrií, což je ale vykoupeno tím, že je při výrobě nutno používat PK. Už z principu AM není možno vytvářet vrstvy, které přesahují vrstvy předchozí – vrstvy by byly tisknuty do vzduchu, kde nemají k čemu přilnout. Zároveň PK zabraňují deformaci a zborcení dílu a umožňují také vytvářet převislé geometrie a například díry. Fungují také jako uchycení součástí pro odvod tepla a další funkce.

Ačkoliv je ve světě AM velice hojně využívána, PK je věnováno málo zájmu, a proto je jejich problematika poměrně málo probádaná. [1] [2]

1.1 Cíl práce

Cílem této práce je vyhodnotit napojování používaných PK při DMLS 3D tisku za využití dostupné literatury a zkušeností odborníků ze Západočeské univerzity v Plzni (ZČU), převážně z Regionálního technologického institutu (RTI). Dále bude navržen nejlépe vyhovující způsob napojení PK a vytištění zkušebních vzorků, které budou následně podrobeny zkouškám na ověření funkčnosti napojení struktury k dílu. Vzhledem k tomu, že tato práce vychází a navazuje na diplomovou práci Ing. Adama Sobotníka, tak výsledkem bude návrh nejlepšího napojení PK na součást použitelného pro širokou škálu kovových dílů vyrobených technologií DMLS a posunutí oblasti porušení do středu zkušebního vzorku.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Aditivní výroba

Aditivní výroba, neboli Additive Manufacturing (dále jen AM) je technologie patřící do skupiny moderních technologií sloužících k velmi rychlé tvorbě 3D datových souborů (modelů), prototypů a součástí z nich. Na rozdíl od konvenčních technologií, které v zásadě materiál odebírají, AM, jak už ze svého názvu naznačuje, je založena na tom, že materiál potřebný k výrobě fyzické součásti je přidáván postupně, vrstvu po vrstvě, až je dosaženo požadovaného tvaru. Díky své rychlosti a univerzálnosti bývá také nazývána Rapid Prototyping (RP). [2]

Výhody AM

- Velká univerzálnost tvaru dílů
- Minimalizace odpadního materiálu
- Jednoduchost vytváření vstupních dat
- Možnost vývoje a odladění součásti před zahájením sériové výroby

Nevýhody AM

- Anizotropní vlastnosti vytištěného dílu
- Vyšší pořizovací cena stroje
- Nutnost dílů projít post-processingem (úpravou před dalším použitím)
- Velikost dílu je limitována velikostí pracovní komory stroje

2.1.1 Druhy AM dle ISO

Aditivní výrobou se zabývá norma ISO 17296-1. Dle této normy je možno rozdělit AM do následujících skupin dle jejich principu a využívaného materiálu.

- **Vat photopolymerization** – tato technologie je založena na fotomerizaci (vytvrzení) fotopolymeru. Tento polymer nalitý v zásobníku je selektivně vystavován paprsku světla a tím lokálně vytvrzen. U této technologie jsou používány fotosenzitivní pryskyřice (polymery), někdy nazývané resin.
Technologie využívající tuto metodu jsou např.: Stereolithography (SLA), Continuous liquid interface production (CLIP), Solid ground curing (SGC) a Direct light processing (DLP). [3]
- **Material extrusion** – materiál je nataven a následně selektivně vytlačován skrz trysku a nanášen do vrstev. Tato technologie je nejčastěji využívána pro termoplastické materiály, využívá se ale i pro keramické materiály.
Technologie využívající tuto metodu je např.: Fused deposition modeling (FDM)
- **Powder bed fusion** - práškový materiál je po vrstvách selektivně spékán tepelnou energií. Používány jsou různé materiály - kovové (oceli, chrom, titan, hliník a další), ale i nekovové – vosky, nylon a jiné.
Technologie využívající tuto metodu jsou např.: Selective laser melting (SLM), Selective laser sintering (SLS), Direct metal laser sintering (DMLS) a Electron beam manufacturing (EBM).
- **Binder jetting** – u této technologie je tekuté pojivo lokálně vstříkováno do práškového stavebního materiálu.
Technologie využívající tuto metodu je např.: Three dimensional printing (3DP).

- **Material jetting** – kapičky materiálu jsou lokálně umisťovány na pracovní stůl do vrstev, kde jsou v případě využití fotosenzitivních polymerů následně vytvrzeny UV světlem. Lze využívat i jiné tekuté materiály, které se jednoduše taví a tuhnou. Technologie využívající tuto metodu jsou např.: Inkjet printing (IJP) nebo Ballistic particle manufacturing (BPM).
- **Directed energy deposition** - tepelná energie je využívána k roztavení a spojení materiálů (převážně kovových prášků), které jsou nanášeny do vrstvy. Technologie využívající tuto metodu jsou např.: Direct metal deposition (DMD) a Laser powder deposition (LPD).
- **Sheet lamination** – tato technologie využívá spojování plechů materiálu (např. polopolymerizované fólie nebo speciálního přílnavého papíru). Technologie využívající tuto metodu jsou např.: Laminated object manufacturing (LOM) a Solid foil polymerization (SFP).

Vzhledem k tomu, že tato práce se zabývá technologií DMLS, bylo by vhodné ji trochu přiblížit.

2.1.2 DMLS – direct metal laser sintering

Technologie s názvem Direct metal laser sintering (DMLS) od firmy EOS vytváří kovové díly postupným vrstvením jemných vrstev práškových kovů, kde je materiál roztaven pomocí koncentrovaného paprsku energie, v tomto případě paprsku laseru. Každá vrstva se taví tak, aby přesně zapadala do definované geometrie modelu 3D CAD. Proces umožňuje rychlou výrobu dílců velmi složitých tvarů bez jakýchkoliv nástrojů nebo přípravků a téměř bez odpadního materiálu. DMLS postupně získává pozici výrobní metody pro rychlou a zároveň relativně přesnou výrobu plně funkčních prototypových dílů nebo malých sérií finálních výrobků. [4]



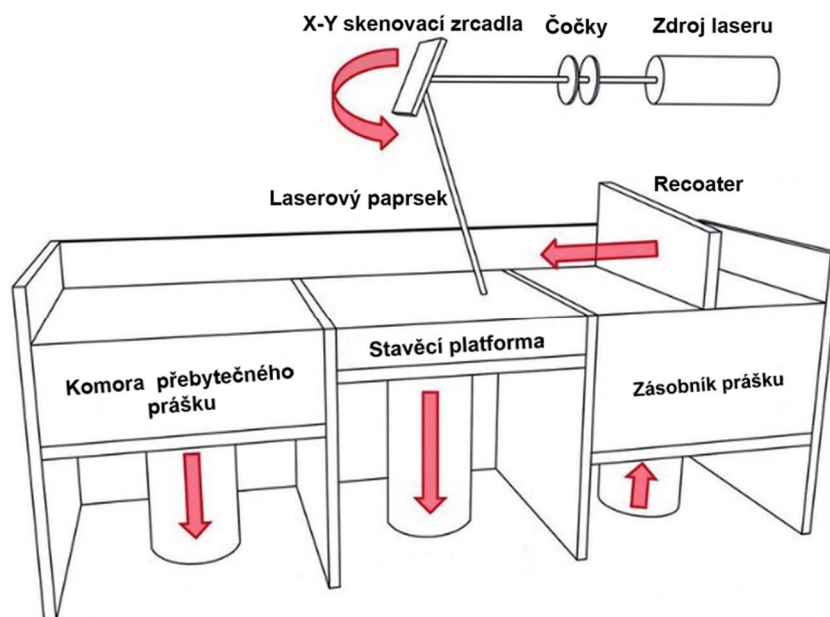
Obrázek 2-1 - Součást vytištěná technologií DMLS - Příruba výfukového potrubí [4]

Na obrázku 2-1 je vidět součást vyrobená technologií DMLS z materiálu Inconel 718.

2.1.2.1 Princip DMLS tisku

Princip fungování je popsán na obrázku 2-2.

Tato technologie spočívá v selektivním spékání prášku. Tenká vrstva tohoto prášku (o tloušťce cca 20 až 80 μm) je nanášena ze zásobníku (Dispenser platform) na stavební platformu (Build platform) pomocí pravítka (Recoator arm, nazýváno i Recoater či Ruler). Následně je prášek spékán laserovým paprskem (Laser beam). Tento paprsek natavuje materiál pouze v místech, kde je řez součásti v současné vrstvě. Po dokončení celého jednoho řezu se stavební platforma (Build platform) posune o jeden inkrement níže (výška jedné vrstvy) a výše uvedený proces se opakuje až do zhotovení celé součásti. Celý tento proces obvykle probíhá v ochranné atmosféře stroje (obvykle argonu či dusíku). Výběr ochranné atmosféry ovlivňuje materiál součásti, ale i typ stroje. Nanesený, ale nevytvrzený prášek kolem součásti a zbylý prášek v zásobníku, který nebyl vystaven laserovému paprsku je následně přesíván a použit pro další výrobu. [5]



Obrázek 2-2 - Princip DMLS tisku [19]

2.1.2.2 **Materiály DMLS**

Vstupním materiálem pro DMLS je, jak již bylo řečeno, kovový prášek. Tento prášek musí být vysoce kvalitní, neboť to výrazně ovlivňuje jakost povrchu, funkčnost a tím i celkovou kvalitu produktu. Výrobce dodává prášky řady materiálů – oceli, titanu (Ti_6Al_4V), hliníku ($AlSi_{10}Mg$) či například Inconelu (IN718) a mnoho dalších. [6]

2.1.2.3 **Postup výroby DMLS**

- Je vytvořen 3D model požadované součásti
- Model (ve formátu .stl) je importován do softwaru (obvykle Materialise Magics)
- Je určena nejvhodnější pozice dílu pro tisk, návrh podpurné konstrukce (je-li třeba) a tloušťka vrstev a další procesní parametry
- Model je v softwaru „nařezán“ do vrstev o tloušťce 0,01 mm a data jsou nahrána do stroje
- Stroj je připraven na tisk – je připraven prášek, ochranná atmosféra a tisková platforma
- Tisk je spuštěn, viz kapitola 2.1.2.1
- Tepelné zpracování součásti
- Post-processing součásti

2.1.2.4 **Post-processing součásti**

Post-processing, neboli dokončování, je velmi důležitá součást každého výrobního procesu metodou DMLS. Po dokončení tisku je vyjmuta platforma s hotovou součástí ze stroje. Nespotebovaný prášek je přeset do zásobníku a znovu použit. Po vyjmutí ze stroje je výrobek s platformou většinou podroben tepelnému zpracování (například žihání nebo vytvrzování). Po TZ jsou odstraněny podpory z výrobku. Ten může být následně ještě dle požadavků například broušen, leštěn, pískován, ale i obráběn konvenčními metodami obrábění (například soustružení, frézování a vrtání) či nekonvenčními (jako je třeba elektroerozivní obrábění). [7]

2.2 Podpůrné konstrukce

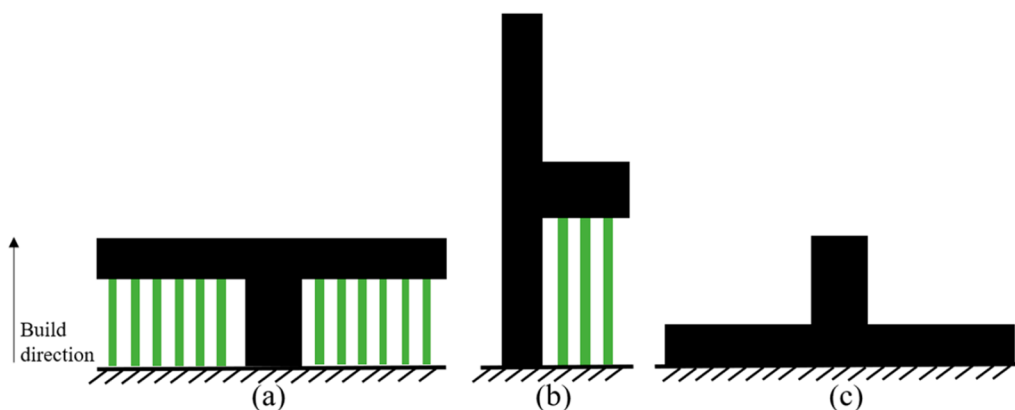
Podpůrné struktury jsou důležité konstrukce využívané během AM a to protože, jak již bylo zmíněno, díky principu jejímu výroby vrstvu po vrstvě není možno tisknout vrstvy do vzduchu, je třeba je tisknout na již existující materiál – podpůrné konstrukce. Typy různých převisů, ať už jde o díry, nebo stěny pod úhlem se vyskytují na většině součástí. Použití PK nám umožní díl vytisknout, ale má i mnoho nevýhod - zvyšuje nám dobu tisku, náklady na materiál či zhoršenou kvalitu povrchu. Je tedy třeba nutno mít na tištěném dílu co nejméně PK. V této kapitole bude uvedeno a vysvětleno, jak je možno tohoto dosáhnout. [2]

2.2.1 Snižování množství PK

V současné době je kladen důraz na to, aby bylo používáno co nejméně PK na dílech, čímž je šetřen materiál i čas pro tisk.

2.2.1.1 Volba orientace součásti

Volba orientace součásti je jeden z důležitých parametrů, který je nutno řešit při tisku – určuje vlastnosti součásti, ale i množství PK. Je to jedna z nejjednodušších variant, jak omezit množství podpor potřebných na vytisknutí dílu – většina součástí není symetrická a může vyžadovat jiné množství PK při různých orientacích. Na následujícím obrázku (2-3) je vidět, jak může orientace součásti ovlivnit množství podpor (zelené čáry) na jednoduché součásti tvaru „T“. V realitě však tiskneme výrazně složitější součásti, u kterých není možno podpůrné konstrukce zcela odstranit změnou orientace součásti. [2]



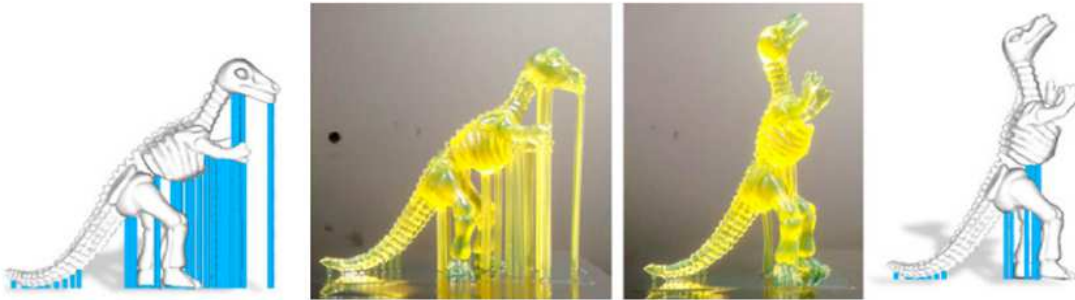
Obrázek 2-3 - Ukázka množství podpor při různých orientacích součásti na platformě [2]

2.2.1.2 Technologie SLS

Technologie SLS, Selective Laser Sintering, je způsob tisku lokálním natavováním polymerního materiálu v prášku. Při tisku pomocí SLS není potřeba využívat PK a to díky tomu, že nespečený prášek funguje jako podpora pro tisk následujících vrstev. Proto je touto technologií možno vytisknout i takové díly, jaké by nebylo možné jiným způsobem vyrobit, ale je nutno počítat s tím, že v dutinách uvnitř součásti se nachází nespečený prášek, pro který je nutno vytvořit díry, kterými půjde vysypat. Jako další výhoda technologie SLS je možnost tisknout součásti jak vedle sebe na platformě, tak i nad sebou. V současné době je tento způsob tisku využíván pouze při tisku polymerů, avšak probíhají výzkumy, aby toto bylo možné začít využívat i u tisku kovů. [8] [9]

2.2.1.3 Změna designu dílu

Jednou z dalších metod jak omezit PK je změna designu dílu. Ideálně je s 3D tiskem již počítáno při návrhu dílu, který by měl být navržen tak, aby šel dobře vytisknout s minimem PK, ale splňoval všechny konstrukční požadavky a požadavky zákazníka. Toto avšak v praxi není vždy možné, protože 3D tisk je obecně využíván na výrobu složitých geometrických součástí, které nejde zjednodušovat. Redesign dílu je tedy vhodnou volbou pouze pro součásti, u kterých není až tak důležitý tvar. [2]



Obrázek 2-4 - Ukázka redesignu dílu za účelem snížení množství PK [2]

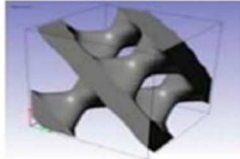
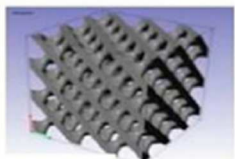
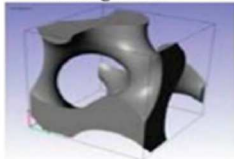
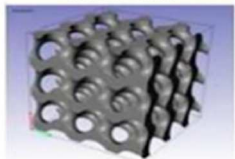
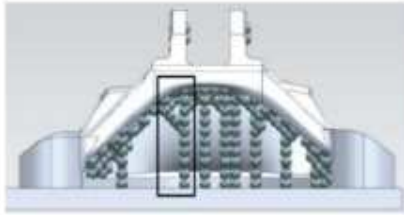


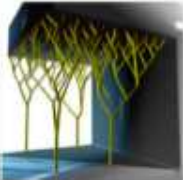


2.2.2 Typy PK

Podpůrné konstrukce se liší dle technologie, která je používána pro AM. Tyto technologie mohou mít i jiné důvody pro využívání PK, jako například FDM, kde jsou podpory využívány pro zvýšení odolnosti proti deformaci a pro možnost tisku vrstev do vzduchu, u aditivní výroby z kovů jsou PK využívány navíc i pro odvod tepla. Toto teplo vzniká během spékání materiálu, a pokud by nebylo alespoň částečně odvedeno, při tuhnutí by se součást mohla nepřiměřeně zkroutit, prohnut, oddělit vrstvy od sebe či porušit. PK jsou taky využívány uvnitř dutých konstrukcí jako výplň pro uspořené materiálu. V následující tabulce (2-1) je zobrazeno několik nejpoužívanějších typů podpor u AM.

Důvody použití PK lze shrnout do následujících bodů:

- Tisknutý materiál lze u technologií jako např. FDM uložit pouze na již existující vrstvy. Díky této vlastnosti je nutno u převisů použít PK, aby byl materiál ve správné výšce a místě.
- Některé typy AM (převážně tisku kovů) při výrobě generují velké množství tepla do výrobku, které je nutné odvést z místa pryč. PK je zde využita jako tepelný odvod zabraňující deformaci součásti.
- V případě, že součást není vyvážená, nebo tiskový prášek či pryskyřice neunesou váhu vytisklých vrstev, jsou PK využity pro stabilizaci těchto vrstev a k jejich pevnému umístění na tiskovou plochu.

Tabulka 2-1 - Příklady nepoužívanějších typů PK [2]

Support Methods	Suitable Techniques	Examples
Lattice support [61]	Metal AM processes	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>A single cell</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>3x3x3 cells</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;">Schwartz diamond</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>A single cell</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>3x3x3 cells</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;">Schoen gyroid</p>
Unit cell support [62]	All processes	 
Honeycomb support [64]	FDM	
Tree-like support [66]	FDM	
Space-efficient branching support [67]	FDM	
Bridge support [68]	FDM	

Nevýhody PK:

- PK je nutné po vytisknutí součásti odstraňovat. V současné době se PK odstraňují většinou manuálně, což zabírá čas, a tedy i zvyšuje náklady.
- K PK je nutno mít přístup, aby je bylo možné odstranit – při návrhu součásti je proto třeba dopředu s tímto počítat.
- Při odstraňování PK se může poškodit povrch součásti.
- Materiál využitý na PK je většinou brán jako odpad a není znova použitelný – je nutno jej poslat na recyklaci. Toto zvyšuje materiálové náklady na díl.
- Přidáním PK k dílu se zvyšuje čas tisku – PK je také nutno vytisknout. Díky tomuto se zvyšují náklady na díl, protože je větší spotřeba energie na díl.
- Při návrhu součásti je nutno brát zřetel na výskyt PK – je nutno také počítat s tvarem a umístěním podpor. Díky tomu se zvětšuje velikost datového souboru součásti. V případě velké složitosti součásti a dalších vložených informací (barvy, materiál a podobné) se může výrazně prodloužit doba zpracování souboru i jeho přenos do tiskárny.
- Při generování souboru .stl (či ekvivalentního) je nutno specifikovat orientaci součásti a umístění PK. To je zpravidla prováděno ručně operátorem tiskárny, čímž opět dochází ke zvyšování nákladů. [2]

2.2.3 Zásady pro návrh PK

Pro co nejjednodušší návrh PK je ideální se na součásti vyhýbat následujícím geometriím:

- Díry velkých průměrů rovnoběžné s tiskovou plochou
- Plochy s malým úhlem převisu
- Skryté plochy, u kterých není možnost jednoduše odebrat PK

Zároveň je třeba navrhnout PK tak, aby využívala co nejméně materiálu. Ačkoliv tato pravidla jsou obecně platná pro všechny technologie tisku, jsou pro návrh dílu velmi svazující, protože součásti reálně tisknuté AM bývají obvykle složitějšího tvaru a tato omezení mohou mít neblahý vliv na jejich výslednou kvalitu. Návrh PK by zároveň měl brát ohled na tisknutelnost součásti, vyváženost, tepelné podmínky a jednoduchost odebrání PK.

Následující pravidla je při návrhu PK vhodné dodržovat:

- PK by měly zabránit deformaci součásti, převážně vnějších částí. U kovových součástí je nutno zohlednit i teplotní a pevnostní zatížení.
- Spojení mezi PK a součástí by mělo být co nejslabší, aby bylo možno vyvinout co nejnižší sílu na oddělení PK od součásti, avšak dostatečné, aby se zamezilo deformaci dílů.
- Dotyková plocha mezi PK a součástí by měla být co nejmenší, aby se zabránilo v co nejvyšší míře poškození povrchu součásti, ale taková, aby bylo zabráněno deformaci součásti.
- Spotřeba materiálu a čas tisku PK by měl být jeden z hlavních faktorů návrhu, stejně jako kompromis mezi těmito náklady a kvalitou výsledného tisku.

V současnosti existuje mnoho programů, které navrhují podpůrné konstrukce, například Slic3r, Autodesk Meshmixer či Repetier pro FDM technologii, pro tisk z kovů například Materialise Magics. Není ovšem známo, který z těchto programů je vhodnější pro tvorbu PK. [10] [2]

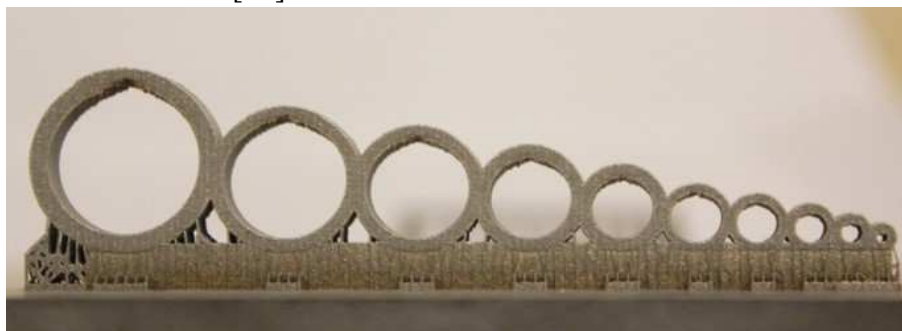
Zároveň je dobré mít v paměti technologičnost konstrukce – už při návrhu součásti brát ohled na to, jakou technologií bude díl vyráběn a konstrukci tomu přizpůsobit, ať už z hlediska funkčních a nefunkčních ploch či odlehčení materiálu při zachování mechanických vlastností.

2.2.3.1 Teplotní zatížení

Během tisku vrstvy je u technologie DMLS nutno úplně lokálně roztavit kovový prášek pro jeho spojení a vytvoření pevné součásti. Při tomto lokálním natavování paprskem laseru vzniká velké množství tepla. Součást následně rychle chladne, přičemž se v tomto místě vytváří tepelné změny, které způsobují to, že se v součásti vytvoří oblasti, které tepelně dilatují. Tyto oblasti vytváří napětí, které může vést k distorzi rozměrů, ohnutí či odtržení součásti od podložky. PK zde pak fungují jako prostředek pro odvedení tepla a jako kotvy držící geometrii součásti k tiskové desce. Jejich použití ale negarantuje, že se součást v pořádku vytiskne, pouze se snižují výše uvedená rizika. [2]

2.2.3.2 Díry

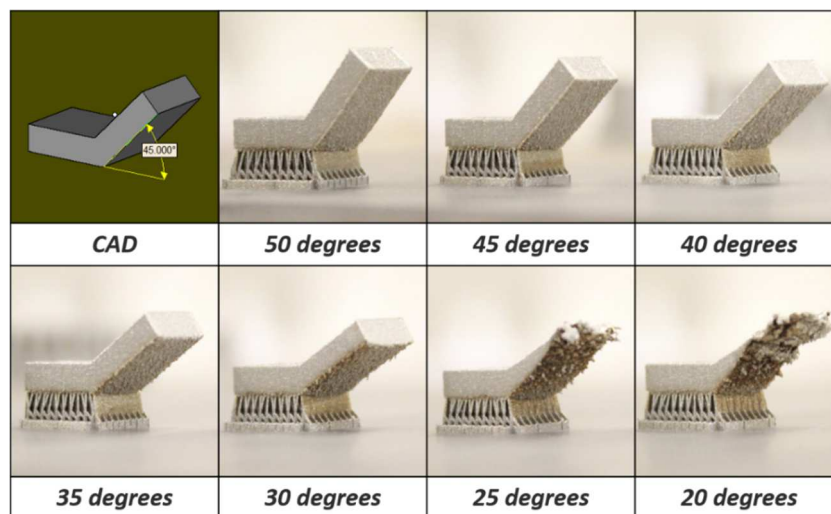
Při tisku součásti je jako jedna z výhod AM uváděna schopnost vytvářet kanály a díry uvnitř součásti, například pro chlazení či snížení váhy součásti. Jako nevhodné pro 3D tisk jsou vodorovně orientované díry o průměru větším než zhruba 8 mm. Podobně jako u struktur bez PK se začne horní okraj díry deformovat. V praxi se toto obchází tím, že se kanály navrhují tvaru kapky nebo kosočtverce. [11]



Obrázek 2-5 - Ukázka vlivu průměru děr na kvalitu tisku (díra průměru 8 mm je čtvrtá zprava) [11]

2.2.3.3 Samonosné stěny pod úhlem

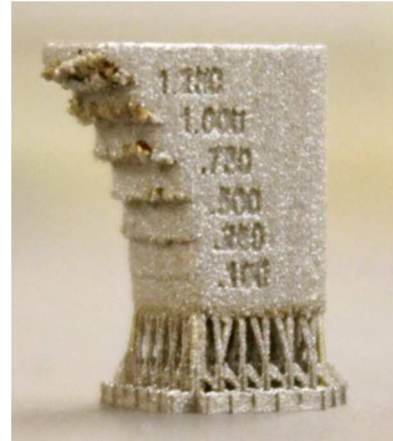
Samonosná stěna pod úhlem označuje stěnu, která svírá úhel menší než 90° s tiskovým plátem. Zde platí, že čím menší tento úhel je, tím se snižuje šance na vyhovující kvalitu součásti. Obecně platí, že úhly menší než 45° není vhodné tisknout bez PK, jak je vidět na následujícím obrázku. Při správném nastavení procesních parametrů toto avšak možné je. [11]



Obrázek 2-6 - Ukázka samonosných stěn pod úhlem [11]

2.2.3.4 Převisy

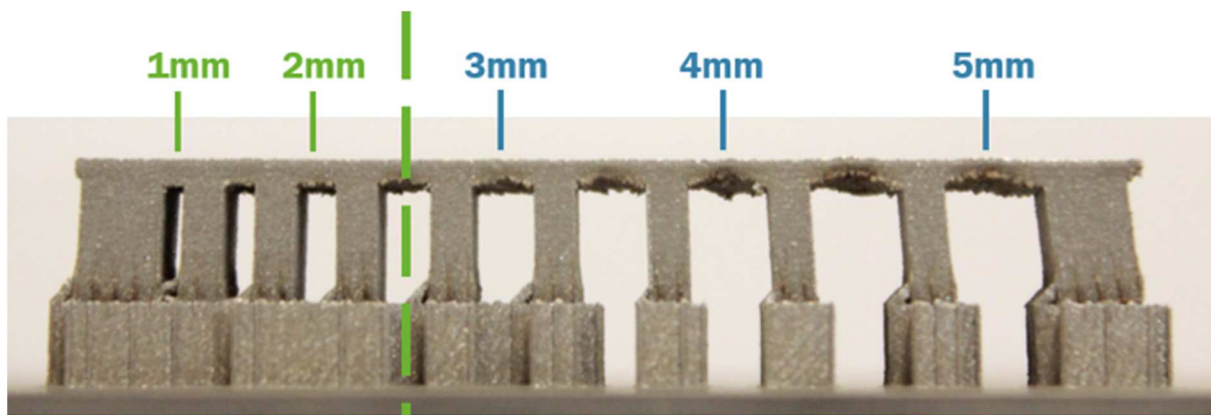
Převís je rozdíl od samonosných stěn pod úhlem tím, že se jedná o náhlou změnu rozměru součásti. Technologie DMLS je v použití převisů značně omezená v porovnání s ostatními technologiemi. Bylo zjištěno, že převisy větší než 0,5 mm vyžadují již PK. Při návrhu součásti s převisy je nutno dbát na to, aby převisy nepřesáhly tento rozměr, protože hrozí výrazné snížení kvality součásti, dokonce i destrukce celé součásti. [11]



Obrázek 2-7 - Ukázka převisů u součásti [11]

2.2.3.5 Mosty

Mostem se v AM označuje rovná plocha rovnoběžná se stavěcí platformou, která je podepřena na svých koncích dvěma nebo více prvky. Pro DMLS je obecně doporučováno používat mosty se vzdáleností maximálně 2 mm. Tato vzdálenost je relativně krátká při porovnání s ostatními technologiemi (například technologie FDM je schopna vytisknout most se vzdáleností až 50 mm, avšak tato technologie pracuje s plasty, ne s kovy), a to z důvodu tepelné dilatace dílu kvůli tepelnému namáhání z rychlého ohřevu a ochlazení součásti. Toto je vidět na obrázku 2-8 – čím větší vzdálenost, tím je větší deformace mostu a horší kvalita povrchu součásti. [11]



Obrázek 2-8 - Ukázka mostování technologie DMLS [11]

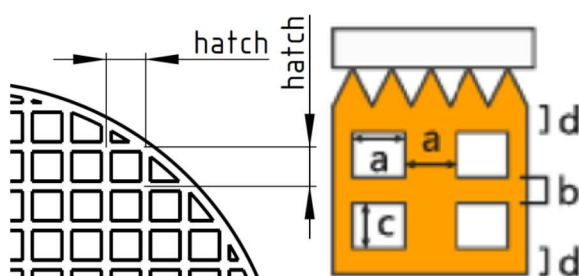
3 Návrh experimentu a jeho realizace

3.1 Navázání na předchozí experiment

Tato kapitola je zaměřena na shrnutí předchozího experimentu provedeným pro diplomovou práci Ing. Adama Sobotníka zpracovanou na Katedře technologie obrábění na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Tato diplomová práce se zabývá vlivem velikosti a tvaru podpůrných konstrukcí na tisknutelnost kovových dílů. V této práci byly navrženy parametry pro doporučené nastavení hodnot PK pro všechny typy ploch.

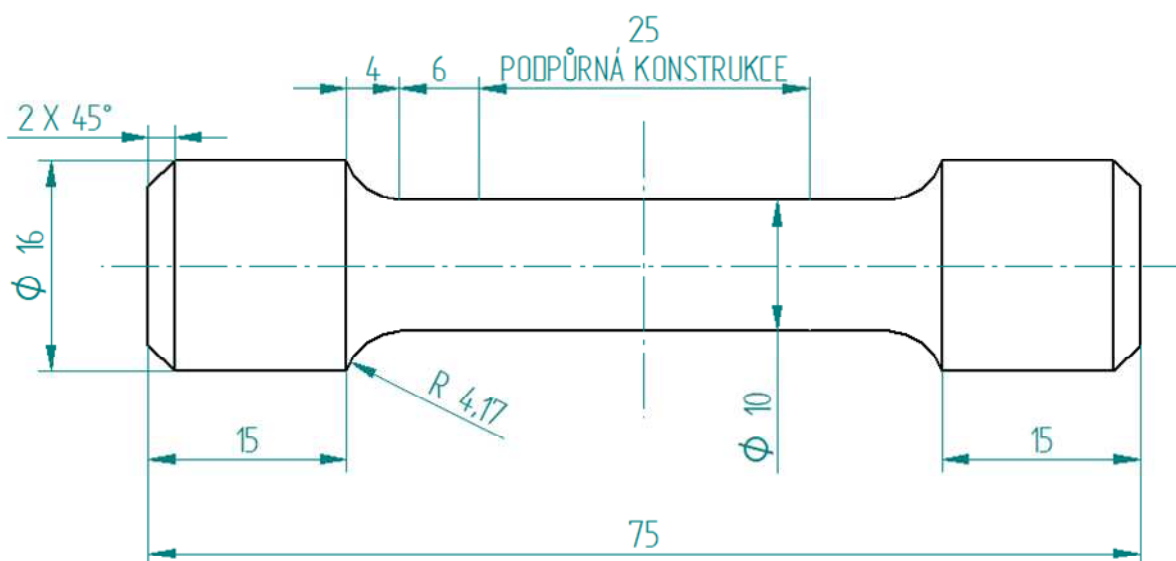
Výsledné hodnoty jsou následující:

„PK typu Block, parametry hatche (rozteč stěn) dle zkušeností operátora v závislosti na podporované ploše (jako tomu bylo doposud) a parametry děrování (perforations): obdélníková díra (rectangular), $a = \text{hatch}/4$; $b = (\text{hatch} - c)$; $c = \text{hatch}/2$; $d = 1$ [mm] viz obrázek níže.“ [12]



Obrázek 3-1 - Parametry PK pro 3D tisk [12]

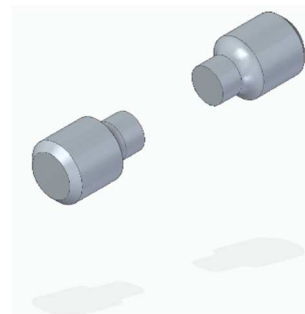
Během experimentu bylo navrženo několik typů PK s různými strukturami a s různými rozměry. Tyto vytisknuté části byly následně podrobeny tahové zkoušce, na které byla testována síla nutná k přetržení. Vzhledem k zaměření práce na typ PK je nutné, aby k porušení došlo v PK. Bohužel, k porušení během tohoto experimentu došlo v místě napojení podpůrné konstrukce k dílu, což nevypovídá o vhodnosti návrhu typu a rozměrů PK. Tato práce navazuje na tuto problematiku a bude se zabývat napojením PK na tisknutý díl. [12]



Obrázek 3-2 - Rozměry zkušební vzorku pro tahovou zkoušku

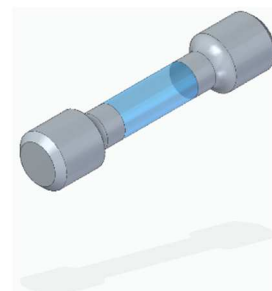
3.2 Návrh testované součásti

Z důvodu použitého měřicího zařízení byly ponechány rozměry upínací části vzorku, na kterém bude následně prováděna tahová zkouška pro ověření výsledků. Rozměry tohoto vzorku jsou na následujícím obrázku. Jediný rozdíl v součástech je, že vzorky Ing. Sobotníka používaly k upnutí do trhačického stroje závity. Závity se ale vytiskly s chybným profilem. Proto je bylo nutno opravit závitovou čelistí, ale bohužel došlo k destrukci PK, která nevydržela tento krouticí moment. Proto nyní navržené vzorky mají válcovou upínací část.



Obrázek 3-3 - CAD model vzorku bez PK

U součásti by byl ideální čtvercový průřez PK pro jednodušší výpočet plochy zubů, byl by i lepší pro tisk, ale nebylo by následně možné provést porovnání s předchozím experimentem. U této struktury, vzhledem k jejímu kruhovému tvaru nebude zároveň i rovnoměrné rozložení sil – vzhledem k tomu, že je většina PK obdélníkového či čtvercového tvaru, obvod PK nebude zcela kulatý – bude tvaru polygonu.



Obrázek 3-4 - CAD model vzorku s PK

3.3 Návrh napojení PK

3.3.1 Vlastnosti ovlivňující pevnost PK

Kromě hlavních možností umožňujících nastavení geometrického tvaru PK, jako například plná/perforovaná, bloková/čárová a dalších, existují další čtyři proměnné, které mají velký vliv na velikost síly, které je schopna PK vydržet. Jsou to tyto následující parametry:

- Tvar zubu – geometrický tvar jednotlivých zubů, které jsou na rozhraní PK/součást.
- Hatching – vzdálenost sousedních stěn ve kterých jsou uspořádány zuby
- Z-Offset – vzdálenost „prorůstání“ PK do součásti
- Teeth synchronization – úprava dotyku zubů

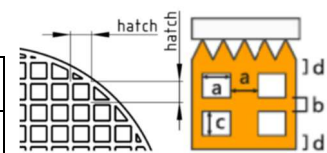
Bylo zjištěno, že tyto parametry, obzvlášť parametry Hatching, Z-Offset a Teeth synchronization mají největší vliv na pevnost PK. [13]

3.3.2 Návrh rozměrů PK

Pro tento experiment byly navrženy konstantní rozměry hatche PK na základě předchozího experimentu, a to střední hodnota, se kterou byl experiment proveden – 0,5 mm. Také byly využity doporučené hodnoty z tohoto experimentu pro hodnoty a, b, c, d. Tyto hodnoty jsou zapsány v následující tabulce:

Tabulka 3-1 - Hodnoty základních parametrů PK pro 3D tisk [12]

Hodnoty	hatch	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]
Doporučené hodnoty		$\frac{h}{4}$	$\frac{h}{2}$	$\frac{h}{2}$	1
Použité hodnoty	0,5	0,125	0,250	0,250	1



Obrázek 3-5 - Parametry PK pro 3D tisk [12]

Pro napojovací vrstvu je vhodné vycházet z těchto hodnot. Pro účely vyhodnocení vhodnosti parametrů napojení jsou navrženy následující vzorky pro ověření, které parametry jsou nejvhodnější pro tisk.

Tabulka 3-2 - Parametry vzorků

Číslo vzorku	hatch [mm]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	Z-offset [mm]	Upper top length [mm]	Lower top length [mm]	Parametry PK [W]/[mm/s]	Vypnutý UpSkin
1	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,16	0,2	0,4	100/850	ne
2	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,20	0,3	0,6	100/850	ne
3	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,24	0,35	0,7	100/850	ne
4	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,32	0,4	0,8	100/850	ne
5	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,16	0,2	0,4	110/930	ano
6	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,20	0,3	0,6	110/930	ano
7	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,24	0,35	0,7	110/930	ano
8	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,32	0,4	0,8	110/930	ano
9	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,16	0,2	0,4	90/760	ano
10	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,20	0,3	0,6	90/760	ano
11	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,24	0,35	0,7	90/760	ano
12	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,32	0,4	0,8	90/760	ano
13	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,16	0,2	0,4	110/850	ano
14	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,20	0,3	0,6	110/850	ano
15	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,24	0,35	0,7	110/850	ano
16	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,32	0,4	0,8	110/850	ano
21	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,16	0,2	0,4	100/850	ano
22	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,20	0,3	0,6	100/850	ano
23	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,24	0,35	0,7	100/850	ano
24	0,5	0,125	0,25	0,25	1	0,32	0,4	0,8	100/850	ano

Jako jeden z důvodů, proč vzorky v experimentu praskaly převážně u spodní napojovací vrstvy, bylo v práci Ing. Adama Sobotníka uvedeno, že nižší parametry laseru (převážně výkon) se snaží provařit do materiálu. [12] [13]

Výše uvedené parametry byly navrženy od hodnoty Z-offset = 0,16 mm. Nižší hodnotu Z-offset není vhodné při tisku použít, protože by mohlo dojít k utržení součásti během tisku například tak, jako se stalo při tisku prvních vzorků v práci Adama Sobotníka.

3.3.3 Návrh parametrů tisku

Při 3D tisku součástí jsou používány následující parametry pro tisk:

- P = Výkon laseru [W]
- v = Rychlost skenování [mm/s]
- t = Tloušťka vrstvy [μm]
- h = Průměr ohniska čočky [μm]

Tyto parametry se v praxi používají pro výpočet parametru Energetic volume density [J/mm^3] – Objemová hustota energie, která se vypočítá následujícím vzorcem: [14]

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad [\text{J}/\text{mm}^3] \quad [14]$$

Doporučené hodnoty dle zkušeností odborníků z RTI:

Tabulka 3-3 - Doporučené hodnoty parametrů

Veličina	Značka	Doporučené hodnoty
E	Objemová hustota energie	25 – 40 J/mm^3
P	Výkon laseru	do 120 W
v	Rychlost skenování	do 7,0 m/s
t	Tloušťka vrstvy	40 μm
h	Průměr ohniska čočky	80 μm

Parametry tisku:

Standardní výkon - Vzorky 1-4:

PK: výkon 100 W; scanning speed 850 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Objem: výkon 285 W; scanning speed 960 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Vyšší výkon - Vzorky 5-8:

PK: výkon 110 W; scanning speed 930 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Objem: výkon 285 W; scanning speed 960 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
pro spodní část vzorků vypnout upSkin vrstvy

Nižší výkon - Vzorky 9-12:

PK: výkon 90 W; scanning speed 760 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Objem: výkon 285 W; scanning speed 960 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
pro spodní část vzorků vypnout upSkin vrstvy

Vyšší výkon - Vzorky 13-16:

PK: výkon 110 W; scanning speed 850 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Objem: výkon 285 W; scanning speed 960 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
pro spodní část vzorků vypnout upSkin vrstvy

Vyšší výkon - Vzorky 21-24:

PK: výkon 110 W; scanning speed 850 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Objem: výkon 285 W; scanning speed 960 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
pro spodní část vzorků zapnout upSkin vrstvy

3.3.4 Parametry materiálu

Vzorky budou tisknuty z materiálu MS-1. V tabulce 3-4 jsou jeho chemické a v tabulce 3-5 mechanické vlastnosti.

Tabulka 3-4 - Chemické složení materiálu MS1 [15]

Prvek	Fe	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	Cu	C	Mn	Si	P	S
Minimum [%]		17	8,50	4,50	0,60	0,05							
Maximum [%]		19	9,50	5,20	0,80	0,15	0,5	0,5	0,03	0,10	0,10	0,01	0,01

Tabulka 3-5 - Mechanické vlastnosti materiálu MS1

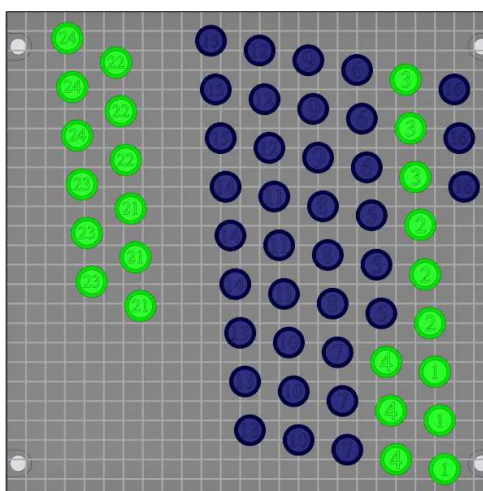
	Ocel spékaná (XY)	Ocel spékaná (Z)	Ocel spékaná po vytvrzení
Pevnost [MPa]	1200 ± 100	1100 ± 150	2050 ± 100
Mez kluzu [MPa]	1100 ± 100	930 ± 100	1990 ± 100
Prodloužení [%]	12 ± 4		4 ± 2
Modul pružnosti [GPa]	150 ± 25	140 ± 25	180 ± 20
Tvrдость [HRC]			50 - 57

3.4 Příprava prvního tisku

Příprava vzorku proběhla v softwaru Materialise Magics a EOSPRINT. Pomocí prvního jmenovaného programu byly vygenerovány podpory a tyto vzorky byly vyexportovány do souborů .cli, které byly následně načteny do programu EOSPRINT. V něm byly nastaveny parametry pro jednotlivé součásti – každý vzorek je tvořen minimálně ze dvou částí, a to těla a podpurných konstrukcí – je to z toho důvodu, že každá tato součást vzorku je vypalována odlišnými parametry. Některé vzorky, jako například sada 21-24 byly složeny z více částí – to proto, že tyto vzorky mají o 3 mm zkrácenou upínací část, aby se ověřilo, že vychladnutí vzorků po tisku objemové části má vliv na pevnost napojení podpurné konstrukce.

Od každého vzorku byly tištěny tři vzorky a to z důvodu opakovatelnosti tahové zkoušky.

Uspořádání těchto vzorků je vidět na obrázku 3-6.



Obrázek 3-6 - Rozložení vzorků na platformě při prvním tisku

Při rozmisťování součástí je třeba dodržovat určitá pravidla:

- Při tisku více než jedné součásti je třeba rozmístit součásti tak, aby nebyly na jedné přímce kolmé na směr pohybu pravítka (na obrázku 3-6 se pravítko pohybuje zprava doleva). Během tisku se díky teplotní roztažnosti může materiál lehce deformovat (přizvednout) a pravítko by se o něj mohlo zastavit. Umístění součástí tak, aby je pravítko překrývalo postupně, tedy zvyšuje spolehlivost tisku. Z tohoto důvodu by se součásti s rovnými plochami měly umisťovat pod úhlem této stěny k pravítku.
- Součásti nejvíce náchylné na přizvednutí by se měly umisťovat co nejdále od začátku pohybu pravítka. Zde to jsou vzorky 5-15. V případě, kdyby došlo k selhání tisku, je možné vzorky vypnout, aby nenarušily tisk vzorků ostatních.
- Na platformu je ochranná atmosféra hnána z horní části (při pohledu na obrázek 3-6). Je tedy nejvýhodnější vzorky umisťovat do horní části platformy.
- Při vkládání součástí na platformu je dobré dodržovat pořadí tisku součástí takové, aby laser součásti tiskl postupně a nemusel přejíždět mezi vzorky.

Tato úloha byla následně ve formátu .eosjob odeslána do tiskárny, kde byl spuštěn tisk, který byl propočten na cca 48 hodin.

3.4.1 Tiskárna

3D tisk vzorků proběhl na tiskárně EOS M290. Tiskárna je umístěna v Laboratoři experimentálního obrábění RTI a je vidět na následujícím obrázku (3-7). Tato tiskárna byla vybavena navíc měřicí stanicí EOS MeltPool a EOS Exposure OT.



Obrázek 3-7 - EOS M290 [16]

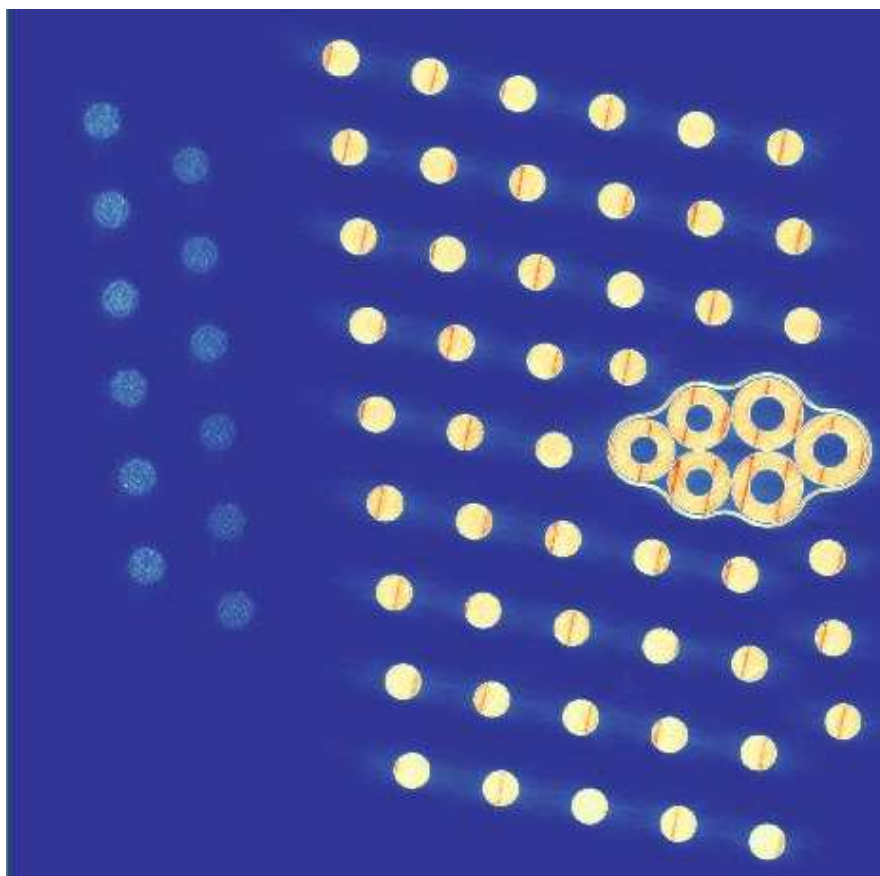
Parametry tiskárny následují v tabulce 3-6. Parametry tisku jsou rozepsány v kapitole 3.3 v tabulce 3-2. Materiálové vlastnosti a složení již byly zmíněny v kapitole 3.3.4 v tabulkách 3-4 a 3-5.

Tabulka 3-6 - Parametry tiskárny EOS M290 [16]

Velikost stavební komory	250 x 250 x 325 mm
Typ a výkon laseru	Yb-fiber laser; 400 W
Přesnost optiky	Čočka F-theta; vysokorychlostní scanner
Rychlost skenování	až 7.0 m/s
Průměr ohniska čočky	100 μm
Příkon / napětí	32 A / 400 V
Spotřeba	max. 8,5 kW/ průměrně 2,4 kW
Váha	1 250 kg
Software	EOSPRINT vč. EOS ParameterEditor, EOSTATE Everywhere, EOSCONNECT Core, Materialise Magics Metal Package a moduly

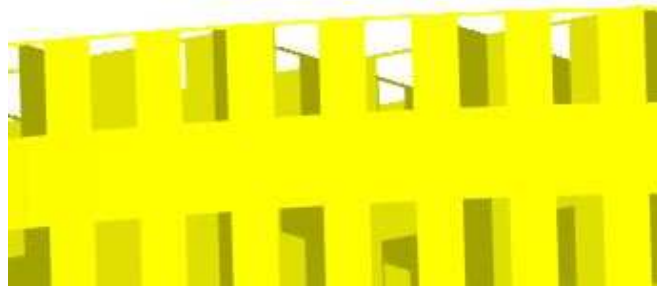
3.4.2 Výsledek prvního tisku

Na obrázku 3-5 je vidět průběh začátku tisku. Vpravo jsou součásti, u kterých je tisknut plný objem, vlevo je vidět tisk PK. Je zde vidět lehké „světélkování“. Toto značí počáteční chybovost tisku.

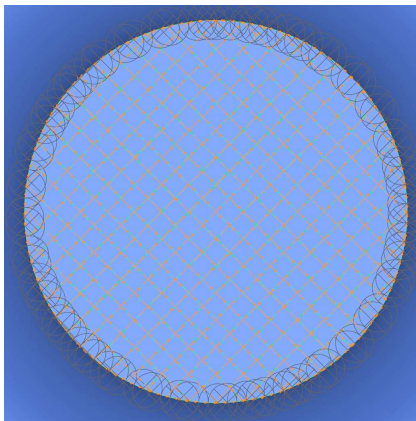


Obrázek 3-8 - Průběh začátku tisku

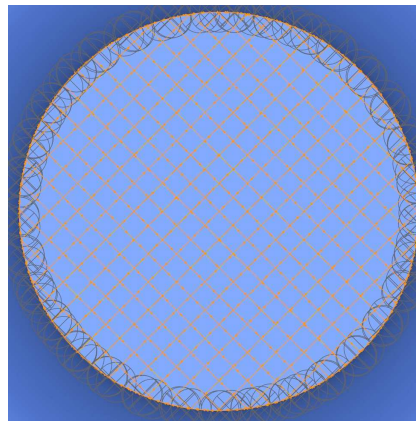
Dále tisk pokračoval až do hodnoty $z = 26,76$ mm u levých dílů a hodnoty $29,76$ mm u pravých dílů. Zde se po 1 mm objevovala anomálie – jedna vrstva byla pálena 2x. Během následného zkoumání bylo zjištěno, že perforace nebyly nastaveny na číslo dělitelné tloušťkou vrstvy ($40\ \mu\text{m}$). To způsobilo, že v jedné vrstvě byla $30\ \mu\text{m}$ perforace a $10\ \mu\text{m}$ PK (obr. 3-9). Software EOSPRINT to vyhodnotil tak, že tuto vrstvu tedy páčil 2x – s perforací a bez (obr. 3-10 a 3-11)



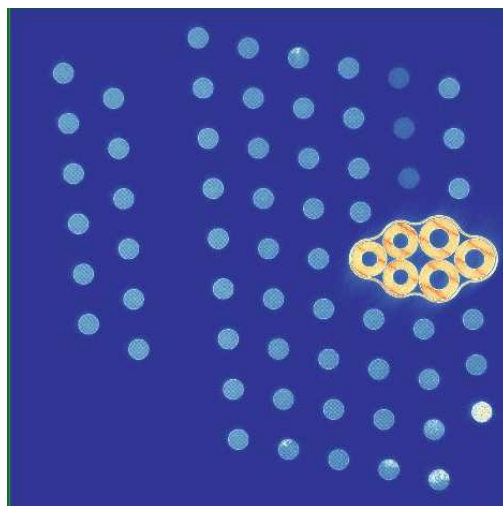
Obrázek 3-9 - Dvojnásobně pálená vrstva PK



Obrázek 3-10 - Pálená vrstva perforace (správná)



Obrázek 3-11 - Pálená vrstva PK (navíc)

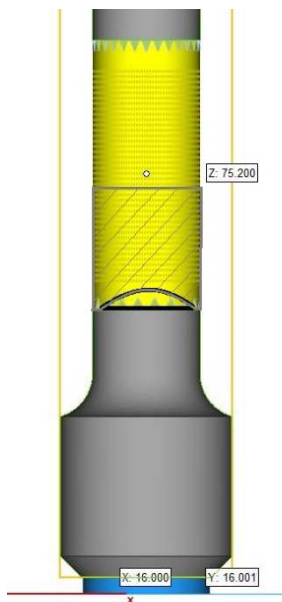


Obrázek 3-12 - Začátek selhávání PK

Ve vrstvě $29,760$ mm avšak začala selhávat i PK u některých dílů (viz obrázek 3-12 vpravo dole).

Díly s těmito selhanými podporami byly vypnuty, avšak protože několikrát došlo k přerušení tisku, začaly díky tomu selhávat další a další díly, až nakonec bylo rozhodnuto tisk ukončit. Pokud by k tomuto přerušování nedošlo, pravděpodobně by tisk alespoň několika vzorků došel. Po vyčištění bylo provedeno přezkoumání – zjistilo se, že u vzorků byly nastaveny nevhodné parametry spodních napojovacích zubů. Díky selhání těchto zubů se začala na vzorcích vytvářet „dutina“ ve tvaru kupole (obr. 3-13). Tato kupole se postupně sice zacelila, avšak vzorky již byly poškozeny a napojení PK na díl bylo tak slabé, že při rostoucí výšce tisku (momentem působícím na napojení PK při přejíždění pravítkem) se PK postupně odlamovaly. Toto je vidět na obrázku 3-14.

Během následného přezkoumání vzorků v software Materialise Magics bylo nicméně objeveno, že parametry připojovacích zubů mohly být navrženy vhodně, avšak v software Magics je ve verzi, která byla použita na generování PK, chyba – ačkoliv byla zapnutá synchronizace zubů na obou stranách PK, Magics synchronizaci provedl pouze na horní straně PK. Tuto chybu Materialise Magics potvrdil a v následující aktualizaci software bude opravena.



Obrázek 3-13 - Kupolovitá dutina na napojení PK



Obrázek 3-14 - Platforma prvního tisku

3.5 Druhý tisk

Na základě zjištěných informací z prvního tisku byly navrženy upravené vzorky pro druhý tisk. Parametry těchto vzorků jsou v tabulce 3-7. U těchto vzorků byly z důvodu nefunkční spodní synchronizace zubů vypnuty spodní napojovací zuby, kromě vzorků 41 - 44, u kterých byly spodní napojovací zuby „zkopírovány“ z horního napojení – součást tak byla tvořena ze čtyř částí – spodní a horní plná část, horní napojení PK se zuby a spodní napojení PK. PK byla vytvořena pouze s horními napojovacími zuby, následně byla vygenerována jako .stl soubor, který byl rozdělen na dvě části, zuby a samotnou blokovou podporu. Výsledná PK byla tedy složena z těchto dvou částí (zuby – PK – zuby), kde část „zuby“ byla jedna součást zrcadlená dle roviny souměrnosti vzorku. To s sebou avšak nese riziko toho, že tyto tři části na sebe dokonale nenačnou – soubor .stl je tvořen z trojúhelníků s danou přesností a vzhledem k tomu, že vnitřní stěny PK jsou o šířce jedné dráhy laseru (40 μm), tak i malá nepřesnost může mít za vliv poškození vzorku.

3.5.1 Parametry druhého tisku

Tabulka 3-7 - Parametry druhého tisku

Číslo vzorku	hatch [mm]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	Z-offset [mm]	Upper top length [mm]	Lower top length [mm]	Parametry PK [W]/[mm/s]	Vypnutý UpSkin	Zuby
1	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,16	0,20	0,40	100/850	ne	Bez zubů
2	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,20	0,30	0,60	100/850	ne	Bez zubů
3	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,24	0,35	0,70	100/850	ne	Horní zuby
4	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,32	0,40	0,80	100/850	ne	Bez zubů
5	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,16	0,20	0,40	110/930	ano	Bez zubů
6	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,20	0,30	0,60	110/930	ano	Bez zubů
7	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,24	0,35	0,70	110/930	ano	Horní zuby
8	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,32	0,40	0,80	110/930	ano	Bez zubů
9	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,16	0,20	0,40	90/760	ano	Bez zubů
10	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,20	0,30	0,60	90/760	ano	Bez zubů
11	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,24	0,35	0,70	90/760	ano	Horní zuby
12	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,32	0,40	0,80	90/760	ano	Bez zubů
13	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,16	0,20	0,40	110/850	ano	Bez zubů
14	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,20	0,30	0,60	110/850	ano	Bez zubů
15	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,24	0,35	0,70	110/850	ano	Horní zuby
16	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,32	0,40	0,80	110/850	ano	Bez zubů
21	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,16	0,20	0,40	110/850	ne	Bez zubů
22	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,20	0,30	0,60	110/850	ne	Bez zubů
23	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,24	0,35	0,70	110/850	ne	Horní zuby
24	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,32	0,40	0,80	110/850	ne	Bez zubů
31	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,24	0,35	0,70	100/850	ne	Bez zubů
32									110/930	ano	Bez zubů
33									90/760	ano	Bez zubů
34									110/850	ano	Bez zubů
41	0,5	0,125	0,75	0,25	1	0,24	0,35	0,70	100/850	ne	Nahore i dole
42									110/930	ano	Nahore i dole
43									90/760	ano	Nahore i dole
44									110/850	ano	Nahore i dole

Parametry tisku:

Standardní výkon - Vzorky 1-4, 31, 41:

PK: výkon 100 W; scanning speed 850 mm·s⁻¹
Objem: výkon 285 W; scanning speed 960 mm·s⁻¹

Vyšší výkon - Vzorky 5-8, 32, 42:

PK: výkon 110 W; scanning speed 930 mm·s⁻¹
Objem: výkon 285 W; scanning speed 960 mm·s⁻¹
pro spodní část vzorků vypnout upSkin vrstvy

Nižší výkon - Vzorky 9-12, 33, 43:

PK: výkon 90 W; scanning speed 760 mm·s⁻¹
Objem: výkon 285 W; scanning speed 960 mm·s⁻¹
pro spodní část vzorků vypnout upSkin vrstvy

Vyšší výkon - Vzorky 13-16, 34, 44:

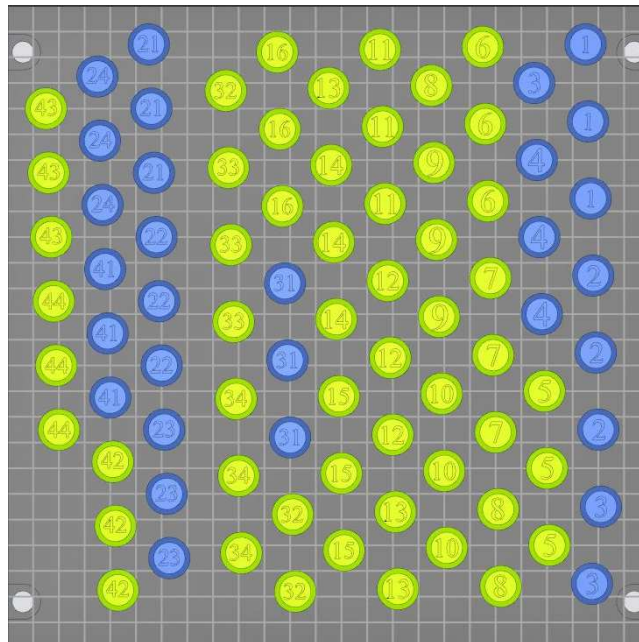
PK: výkon 110 W; scanning speed 850 mm·s⁻¹
Objem: výkon 285 W; scanning speed 960 mm·s⁻¹
pro spodní část vzorků vypnout upSkin vrstvy

Vyšší výkon - Vzorky 21-24:

PK: výkon 110 W; scanning speed 850 mm·s⁻¹
Objem: výkon 285 W; scanning speed 960 mm·s⁻¹
pro spodní část vzorků zapnout upSkin vrstvy

3.5.2 Průběh tisku

Na obrázku 3-15 je vyobrazeno rozložení vzorků pro druhý tisk.



Obrázek 3-15 - Rozložení druhého tisku

Pro druhý tisk byly přidány navíc vzorky 31-34, což jsou vzorky s parametry nejvíce odpovídajícími hodnotám běžně používaných na RTI – Z-offset = 0,24 mm, Upper top length = 0,35 mm a Lower top length = 0,70 mm tisknuté při různých výkonech a skenovací rychlosti.

Vzorky 41 - 44 jsou, jak už bylo zmíněno v kapitole 3.5, vzorky s přípojovacími zuby nahoře i dole generovanými jako zrcadlený soubor .stl. Tisk probíhal bez problémů s keramickým pravítkem až do vrstvy $z = 23,48$ mm, což je místo přechodu mezi tělem a blokovou podporou, kde byl tisk na cca 1 - 2 h pozastaven.

Následně tisk pokračoval až do vrstvy 90 ($z = 27,08$ mm), kde bylo nutné vypnout vzorky 41 – 44, protože přípojovací zuby se nevytiskly dostatečně dobře a pravítko je při nanášení následujících vrstev ohnulo. Toto chování ale bylo lehce očekávané, a to díky tomu, že tyto přípojovací zuby byly vkládány jako .stl soubor, avšak kvůli jeho složitosti se při generování v něm vyskytlo relativně velké množství chyb a také během importu není možné dokonale tyto dva modely spojit tak, jako kdyby tyto zuby byly přímo generované Magicsem. Díky této nemožnosti dokonalého spojení by proto pravděpodobně nastaly i další problémy na dělicích rovinách – EOSPRINT by tyto roviny páčil několikrát v jedné vrstvě.

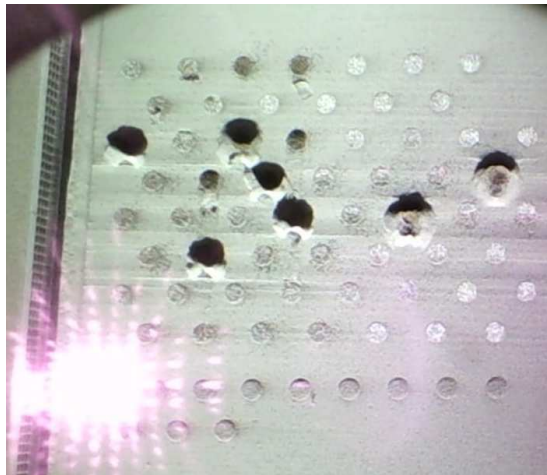
Jako další problémové vzorky se ukázaly po jedné instanci vzorky 3 a 5. Na těchto vzorcích bylo vidět ohnutí PK. Tyto vzorky tedy byly vypnuty a tisk pokračoval dále. Ve vrstvě 711 v 22:30 h ($z = 51,92$ mm) avšak tisk úplně zkolaboval a během několika málo minut se utrhlo několik součástí a poškodilo několik dalších – celkem bylo nutno ráno vypnout 38 vzorků. Na následujících obrázcích je vidět jak by správně tisk měl vypadat (obr. 3-20) a jak vypadal během tisku (obr. 3-16 – 3-18) a po zastavení tisku (3-19). Fotky jsou pořízeny z webkamery umístěné v 3D tiskárně.



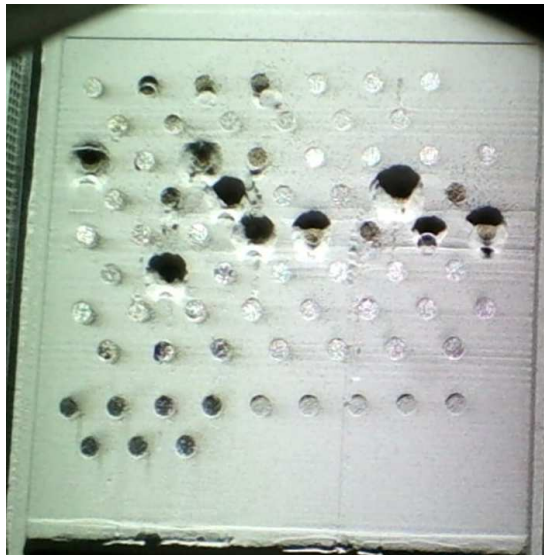
Obrázek 3-16 - Tisk 2, 22:19 h



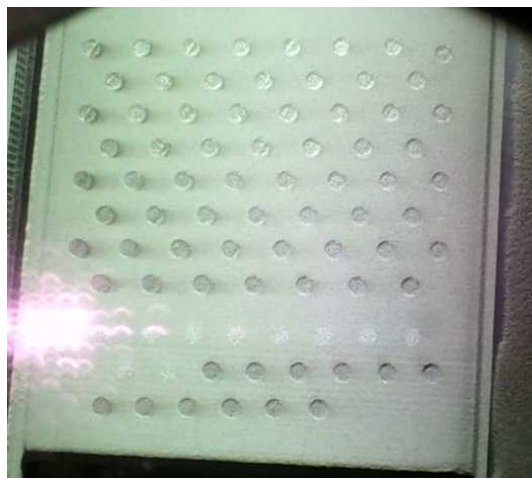
Obrázek 3-17 - Tisk 2, 22:21 h



Obrázek 3-18 - Tisk 2, 22:25 h



Obrázek 3-19 - Tisk 2, 22:29 h, Foto po zastavení



Obrázek 3-20 - Správný vzhled tisku PK

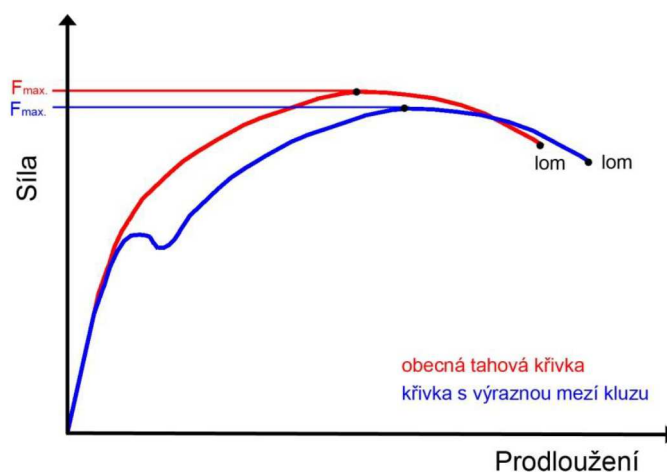
Po vypnutí těchto vzorků už tisk běžel bez problémů. Celkově došlo k vytisknutí 32 vzorků.

3.6 Tahová zkouška vzorků

3.6.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška je jednou ze statických zkoušek materiálu. Touto zkouškou jsou zkoumány mechanické vlastnosti materiálu, převážně mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a kontrakce. Zkouška se provádí dle normy ČSN EN ISO 6892-1 Kovové materiály – Zkoušení tahem. Tato zkouška spočívá v jednoosém namáhání zkušební vzorku za zaznamenávání naměřených hodnot a následném grafickém znázornění závislosti napětí na deformaci nebo zatěžovací síly na prodloužení.

Tahové diagramy kovových materiálů se dělí dle tvaru na dva základní typy: tahový diagram s výraznou mezí kluzu a s nevýraznou mezí kluzu. Tyto diagramy jsou uvedeny na následujícím obrázku.



Obrázek 3-21 - Diagram s výraznou mezí kluzu (modře) a s nevýraznou mezí kluzu (červeně) [20]

- **Mez kluzu**
Mezí kluzu se označuje takové napětí, kde se při konstantní zatěžovací síle začne těleso výrazně prodlužovat.
 - Pro diagramy s výraznou mezí kluzu se určuje hodnota horní meze kluzu (R_{eH} [MPa]) a dolní meze kluzu (R_{eL} [MPa]), kde tyto hodnoty se počítají jako podíl hodnoty zatížení (F_H [N], respektive F_L [N]) k počátečnímu průřezu vzorku (S_0 [mm²]).
 - Pro diagramy s nevýraznou mezí kluzu se určuje smluvní hodnota meze kluzu $R_{p0,2}$ [MPa], která je definována jako hodnota napětí, která způsobí plastickou deformaci o 0,2%.
- **Mez pevnosti**
Mezí pevnosti (R_m) je označováno maximální napětí dosažené v tahovém diagramu, aniž by se porušil vzorek.
- **Tažnost**
Tažností je označováno trvalé prodloužení měrné délky po lomu vzorku vyjádřené v procentech.
 - $A = \frac{L_u - L_0}{L_0} * 100$ [%], kde A je tažnost [%], L_u je konečná měřená délka po lomu [mm] a L_0 je počáteční měřená délka [mm].

- Kontrakce
Kontrakcemi je myšlena největší změna plochy průřezu vzorku, ke které došlo během zkoušky.
 - $Z = \frac{S_u - S_0}{S_0} * 100$ [%], kde Z je tažnost [%], S_u je konečný průřez po lomu [mm^2] a S_0 je počáteční průřez vzorku [mm^2].

3.6.2 Zkušební zařízení

Tahová zkouška vzorků byla provedena na trhacím stroji Zwick/Roell Z250 v laboratořích RTI. Tento stroj je vidět na obrázku 3-22 a jeho parametry jsou vypsány v tabulce 3-8. Deformace vzorků byla snímána během zkoušky extenzometrem MultiXtens.

Tabulka 3-8 - Parametry Zwick/Roell Z250 [17]

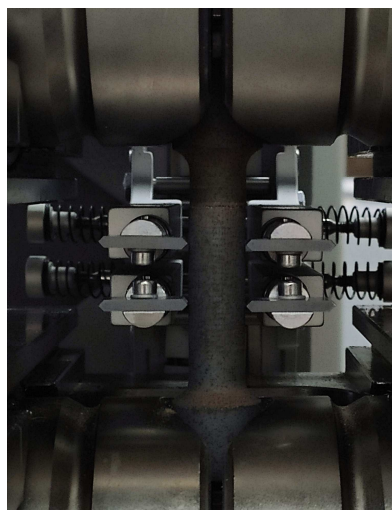
Parametry zařízení	Udávané hodnoty
Maximální síla	250 kN
Výška	2304 mm
Šířka	1531 mm
Výška zkušebního prostoru	1588 mm
Šířka zkušebního prostoru	630 mm



Obrázek 3-22 - Zwick/Roell Z250 [17]

3.6.3 Tahové zkoušky vzorků

Vzorky byly po tisku odříznuty na drátořezu. Následně byly pro trhací zkoušky upínány do trhacího stroje sevřením do čelistí. Počáteční měřená délka nastavená v extenzometru byla nastavena v návaznosti na předchozí práci Ing. Adama Sobotníka stejně, a to na 10 mm. Předpětí vzorku bylo nastaveno na 30 N. Foto upnutého vzorku v čelistích zkušebního stroje je vidět na obrázku 3-23.



Obrázek 3-23 - Upnutý vzorek do čelistí zkušebního stroje

3.6.3.1 Výsledky tahové zkoušky

Tahová zkouška vzorků proběhla úspěšně, ale data zjištěná z těchto zkoušek nebyla dostatečně vypovídající pro zjištění vlivu změny parametrů na pevnost spodního napojení PK.

V tabulce 3-9 jsou vypsané hodnoty tahové zkoušky u vzorků.

Tabulka 3-9 - Hodnoty z tahové zkoušky

Vzorek	F _m [N]	R _m [MPa]
1	749	10
2A	2245	29
2B	375	5
3	2533	32
14	3610	46
15	818	10
21	1020	13
23	1046	13
32	1580	20
33	1261	16
34	516	7

Z naměřených hodnot a i během samotných zkoušek bylo patrné, že většina vzorků byla již během tisku poškozena – vnitřní pnutí během tisku bylo takové, že došlo k porušení PK. Avšak i vzorky, které byly vytištěny bezchybně (např. vzorky 2A, 3 a 14), měly zhruba stejné hodnoty sil potřebných pro přetrhnutí vzorku jako u předchozího experimentu. Z této tahové zkoušky vyplynulo, že největší mez pevnosti v tahu měl vzorek č. 14 – 46 MPa. Bohužel, protože se dobře vytiskl jenom jeden ze tří vzorků č. 14, tuto dosaženou pevnost není možno ověřit na více vzorcích. Tento vzorek je ze série s vyšší objemovou hustotou energie (110 W a 850 mm/s) a s vypnutým upSkinem. Zajímavé na tomto experimentu ovšem bylo to, že i u vzorků, kde byly použity nahoře přípojovací zuby (vzorky 3, 15, 23), které mají výrazně menší plochu napojení než blokové napojení PK, které bylo použito u spodní části vzorku, tak i tyto vzorky se přetrhly v spodním napojení, ne v napojení se zuby. Bohužel z naměřených hodnot u vzorků a i z pohledu lomu vzorku bylo jasné, že spodní napojení PK není zcela připojeno k objemu materiálu, nehledě na provedených změnách parametrů či změně objemové hustoty energie (série 1-3 měla nejmenší, série 13-16 ji měla největší). Tomuto zjištění avšak odporují hodnoty naměřené na sérii 31-34, kde při stejných rozměrových parametrech byla měněna objemová hustota energie. Ta byla u vzorku 34 nejvyšší, přesto tento vzorek dopadl nejhůře. [15]

4 Zhodnocení experimentu

Během tisku bylo zjištěno, že software Magics při generování PK obsahuje chybu, díky které špatně generuje synchronizaci spodních napojovacích zubů. Na tuto chybu byli vývojáři software Materialise Magics upozorněni a chyba bude opravena v následující verzi programu. Další zjištěná věc na těchto vzorcích je ta, že pokud je u vzorků použita perforovaná PK, je nutno nastavovat parametry perforace tak, aby byly rozměry v ose Z dělitelné výškou vrstvy (defaultně 40 μm), jinak software EOSPRINT může některé vrstvy pálit vícekrát – to se stane například tehdy, pokud se v jedné vrstvě vyskytuje jak perforace, tak materiál. Toto chování při tisku může být pro některé aplikace nevhodné a nežádané.

Z hlediska nejvhodnějších hodnot parametrů použitých pro tisk spodního napojení PK je tento experiment nejednoznačný – neukázalo se, že by změna jakéhokoliv z parametrů měla výrazný vliv na mez pevnosti v tahu napojení PK – nejvhodněji se ukázal parametr vzorku 14, avšak vzhledem k tomu, že dobře se vytiskl bez chyby jenom jeden ze tří vzorků, není tato hodnota ověřena více měřeními. Obecně lze avšak říci, že pokud je to u tisku možné, je nejlepší se spodnímu napojení PK na součást vyhnout – při tisku součástí tato napojování způsobovala problémy - buď okamžitým selháním vzorku, nebo selháním vzorku při tisku následujících vrstev, protože tato porušená napojení nezvládla přenést zvyšující se moment vyvolaný při nanášení prášku recoaterem ve vyšších vrstvách.

Výsledné doporučení pro napojení PK:

Pokud je to možné, spodní napojení PK na součást nepoužívat. Jestliže je toto použití nutné, vhodné jsou následující parametry (tyto parametry avšak nejsou ověřeny vícenásobným měřením):

Bez napojovacích zubů, vypnutý upSkin, Z-Offset 0,20 mm, Upper top length 0,30 mm, Lower top length 0,60 mm, výkon laseru 110 W, scanning speed 850 mm/s.

5 Závěr

Práce se věnuje návrhu spodního napojení podpůrných konstrukcí na plnou součást pro 3D tisk součástí z kovu technologií Direct metal laser sintering.

Teoretická část práce je zaměřena na popis a rozbor současného stavu této technologie. Má za cíl seznámit s postupem a technologií tisku, používaných materiálech, podpůrných konstrukcích a jejich pravidlech.

První část práce se věnovala návrhu experimentu, CAD modelu vzorku a parametrů pro tisk. Tyto navržené parametry byly vloženy do programu Materialise Magics, v němž byly vytvořeny soubory čitelné programem EOSPRINT, pomocí kterého byla následně vygenerována samotná data pro tiskárnu. Tento tisk byl spuštěn, avšak v průběhu selhal a musel se vypnout. Z tohoto experimentu přesto byly získány zajímavé a důležité informace týkající se návrhu spodního napojení PK, ale i samotných perforovaných PK.

V druhé části práce byly navrženy další parametry pro druhý tisk součástí. Tyto parametry byly navrženy s ohledem na zjištěné informace z prvního tisku a byly přidány další vzorky pro ověření těchto získaných dat. Z vytištěných vzorků bylo následně vybráno několik nejméně poškozených vzorků, na kterých byly provedena zkouška tahem. Tato zkouška přinesla zajímavá data, například že i v případě, kdy spodní napojení PK nemá nejmenší průřez (u spodního napojení bylo použito blokové napojení, u horního napojení zuby), tak se stále jedná o místo nejslabší a vzorek se přetrhne v něm.

Z výsledků tahové zkoušky vyplynulo, že i přes různě nastavené parametry napojení PK je spodní napojení slabé místo součásti a je nejlepší se mu, pokud je to možné, vyhnout. Pokud toto možné není, je vhodné použít doporučené parametry z kapitoly 4. Tyto parametry je avšak nutné ještě ověřit, protože díky vysoké zmetkovitosti tisku nebylo možné je potvrdit vícenásobným měřením.

Seznam použité literatury

1. Aditivní výroba (3D tisk) přináší vyšší efektivitu a snižuje náklady . *Parker.cz*. [Online] [Citace: 13. 11 2019.] <http://www.parker.cz/aditivni-vyroba-3d-tisk-prinasi-vyssi-efektivitu-a-snizuje-naklady/>.
2. Jingchao Jiang, Xun Xu, Jonathan Stringer. Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. *mdpi.com*. [Online] [Citace: 11. 13 2019.] <https://www.mdpi.com/2504-4494/2/4/64>.
3. Siemens. Siemens Vat photopolymerization. [Online] [Citace: 26. 12 2019.] <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/vat-photopolymerization/53338>.
4. MM. Technologie DMLS - 3D tisk kovů. [Online] [Citace: 26. 12 2019.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-dmls-3d-tisk-kovu.html>.
5. The Direct Metal Laser Sintering Process. [Online] [Citace: 26. 12 2019.] <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=ES&NM=488>.
6. Materialise. 3D tisk kovů DMLS SLM - Technologie tisku a materiály. [Online] [Citace: 12. 26 2019.] <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/3d-tisk-kovu>.
7. Protolabs. Post-Processing for Metal 3D Printing. [Online] [Citace: 26. 12 2019.] <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/post-processing-for-metal-3d-printing/>.
8. Varotsis, Alkaios Bournias. Introduction to SLS 3D Printing. [Online] [Citace: 24. 01 2020.] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/>.
9. Mumtaz, Kamran, Hopkinson, N a Vora, P. A Method to Eliminate Anchors/Supports from Directly Laser Melted Metal Powder Bed Processes. [Online] [Citace: 24. 01 2020.] https://www.researchgate.net/publication/306284109_A_Method_to_Eliminate_AnchorSupports_from_Directly_Laser_Melted_Metal_Powder_Bed_Processes.
10. Autodesk. Autodesk Meshmixer. [Online] [Citace: 26. 01 2020.] <http://www.meshmixer.com/>.
11. Utley, Eric. An Introduction to Designing for Metal 3D Printing. [Online] [Citace: 26. 01 2020.] <https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2017/06/introduction-designing-metal-3d-printing.html>.
12. Sobotník, Adam. *Vliv velikosti a tvaru podpůrných konstrukcí na tisknutelnost kovových dílů*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Strojní, Katedra teorie obrábění. Plzeň, 2019. Diplomová práce.
13. Peter Nils Johannes Lindecke, Heiko Blunk, Jan-Philip Wenzl, Mauritz Möller, Claus Emmelmann. Optimization of support structures for the laser additive manufacturing of TiAl6V4 parts. *sciencedirect.com*. [Online] [Citace: 5. 01 2020.] <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.029>.
14. Hengfeng Gu, Haijun Gong, Deepankar Pal, Khalid Rafi, Thomas Starr, Brent Stucker. Influences of Energy Density on Porosity and Microstructure of Selective Laser Melted 17-4PH Stainless Steel. [Online] [Citace: 01. 04 2020.] https://www.researchgate.net/publication/280114488_Influences_of_Energy_Density_on_Porosity_and_Microstructure_of_Selective_Laser_Melted_17-4PH_Stainless_Steel.

15. EOS. Maraging steel 1. [Online] [Citace: 08. 07 2020.] https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/werkzeugstahl_ms1_cx/ms1/ms-ms1-m280_m290_400w_material_data_sheet_05-14_en.pdf.
16. —. EOS M290. [Online] [Citace: 08. 07 2020.] <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-290>.
17. Zwick/Roell. Zwick/Roell Z250. [Online] [Citace: 17. 07 2020.] <https://www.zwickroell.com/>.
18. Malekipour, Ehsan. A schematic diagram of direct metal laser sintering (DMLS) process. [Online] [Citace: 26. 12 2019.] https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-direct-metal-laser-sintering-DMLS-process-6_fig1_334114846.
19. Ersoy, Kıvılcım & Çelik, Berk. Utilization of Additive Manufacturing to Produce Tools. *researchgate.com*. [Online] [Citace: 08. 07 2020.] https://www.researchgate.net/figure/DMLS-3D-printing-process-9_fig1_337695042.
20. VŠCHT. Teorie. [Online] [Citace: 17. 07 2020.] [http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Mechanické zkoušení kovových materiálů.pdf?redirected](http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Mechanické_zkoušení_kovových_materiálu.pdf?redirected).