

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

ADITIVNÍ VÝROBA ODLEHČENÝCH STRUKTUR

Autor: Bc. Ladislav Krejzek

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

PRAHA 2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krejcek** Jméno: **Ladislav** Osobní číslo: **419860**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Aditivní výroba odlehčených struktur

Název diplomové práce anglicky:

Additive manufacturing of lightweight structures

Pokyny pro vypracování:

Rešerše odlehčených struktur, porovnání nejpoužívanějších typů, výhody, nevýhody
Návrh zkušebních těles
Realizace 3D tisku z materiálu AISi10Mg a vyhodnocení vzorků

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Šimota, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **03.10.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.01.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.10.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně a použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Mé poděkování patří vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Šimotovi za odborné vedení, věcné připomínky a ochotu. Dále Ing. Vítu Novákovi za pomoc při ohybové zkoušce. Rád bych také poděkoval své rodině a svým přátelům za podporu při studiu.

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je návrh a výroba různých typů odlehčených struktur metodou DMLS a porovnání s topologicky optimalizovanou konstrukcí, při zkoušce tříbodovým ohybem. První polovina diplomové práce je věnována aditivní výrobě a využití v průmyslových oblastech. Současně je uveden přehled principů jednotlivých aditivních technologií a uvedení do problematiky odlehčených struktur. Další část je věnována nestochastickým buněčným strukturám a topologické optimalizaci. Praktická část diplomové práce se zabývá návrhem a vytvořením odlehčených struktur, které jsou zkoušeny tříbodovým ohybem. Snahou je porovnání výsledků odlehčených struktur s topologicky optimalizovaným tělesem.

Klíčová slova

Aditivní výroba, DMLS, nestochastické struktury, odlehčené struktury

Abstract

The topic of this diploma thesis is to design and produce different types of lightweight structures manufactured by the DMLS method and comparison with topologically optimized construction in a three-point bending test. The first half of this thesis is devoted to additive manufacturing and use in industrial fields. Simultaneously is here an overview of the principles of individual additive technologies and introduction to problems of lightweight structures. The next part is devoted to non-stochastic unit cell structures and topological optimization. The practical part of this thesis is focused on the design and creation of lightweight structures, which are tested by three-point bending. The aim of this work is to compare the results of lightweight structures with topologically optimized construction.

Key words

Additive manufacturing, DMLS, non-stochastic structure, lightweight structures

Obsah

1	ÚVOD.....	10
2	ADITIVNÍ VÝROBA	12
2.1	Historie aditivní výroby	14
2.2	Výhody a nevýhody aditivní výroby.....	14
2.3	Průmyslové využití.....	15
2.3.1	Letecký průmysl a kosmonautika	15
2.3.2	Automobilový průmysl	16
2.3.3	Potravinový průmysl.....	17
2.3.4	Zdravotnický a lékařský průmysl	18
2.3.5	Architektura a stavební průmysl	19
2.3.6	Textilní a módní průmysl.....	20
2.3.7	Elektrický a elektronický průmysl.....	21
3	PŘEHLED TECHNOLOGIÍ ADITIVNÍ VÝROBY	22
3.1	Technologie fotopolymerizace (VatPhotopolymerization).....	23
3.1.1	Stereolithography (SLA).....	24
3.1.2	Digital Light Processing (DLP)	24
3.1.3	Continuous Digital Light Processing (CDLP).....	24
3.2	Technologie extruze materiálu (Material Extrusion).....	25
3.2.1	Fused Deposition Modeling (FDM)	25
3.3	Technologie tryskání materiálu (Material Jetting).....	26
3.3.1	Material Jetting (MJ)	26
3.3.2	NanoParticle Jetting (NPJ).....	27
3.3.3	Drop On Demand (DOD)	27
3.4	Technologie tryskání pojiva (Binder Jetting).....	27
3.4.1	Binder Jetting (BJ).....	27

3.5	Technologie slinování prášků (Powder Bed Fusion)	28
3.5.1	Selective Laser Sintering (SLS).....	29
3.5.2	Multi Jet Fusion (MJF)	29
3.5.3	Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting (DMLS / SLM)	30
3.5.4	Electron Beam Melting (EBM).....	31
3.6	Technologie přímé energetické depozice (Direct energy deposition).....	31
3.6.1	Laser Engineering Net Shape (LENS).....	31
3.6.2	Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM).....	31
3.7	Technologie laminace	32
3.7.1	Laminated Object Manufacturing (LOM)	32
4	ODLEHČENÉ STRUKTURY	33
4.1	Stochastické struktury	33
4.2	Nestochastické struktury	34
4.3	Sandwichové panely.....	35
4.3.1	Hexagonální struktura.....	36
5	PERIODICKÉ BUNĚČNÉ STRUKTURY	37
5.1	Struktury založené na vzpěrách	40
5.1.1	BCC a FCC	40
5.1.2	Rhombic dodecahedron	41
5.1.3	Octet-truss	42
5.2	Struktury popsané matematickou definicí.....	42
5.2.1	Metoda TPMS	42
6	OPTIMALIZACE TOPOLOGIE	45
6.1	Optimalizace dispozice	45
6.2	Zobecněná optimalizace tvaru.....	46
6.2.1	ISE-topologie	46
6.2.2	ASE-topologie	47

6.2.3	ISEP, ISEC, ISECP-topologie	47
7	ZKOUŠKA OHYBEM.....	49
7.1.1	Předmět normy.....	49
7.1.2	Princip normy	49
7.1.3	Zkušební zařízení.....	49
7.1.4	Ohýbací přípravek s podpěrami a trnem.....	50
7.1.5	Zkušební těleso	50
7.1.6	Stanovení úhlu ohybu z měření posunu trnu	51
8	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	52
8.1	Návrh zkušebních vzorků.....	52
8.2	Aditivní výroba zkušebních vzorků	56
8.3	Žihání na odstranění pnutí.....	58
8.4	Odstranění podpor.....	59
8.5	Značení vzorků.....	59
8.6	Zkouška tříbodovým ohybem	61
8.6.1	Rhombic dodecahedron (3 mm ³).....	64
8.6.2	Rhombic dodecahedron (6 mm ³).....	66
8.6.3	Plné těleso	68
8.6.4	Octet truss (6 mm ³).....	70
8.6.5	Octet truss (3 mm ³).....	72
8.6.6	Topologicky optimalizované těleso	74
8.7	Vyhodnocení výsledků.....	76
9	ZÁVĚR.....	79
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	81
11	SEZNAM ZKRATEK.....	90
12	PŘÍLOHY	92

1 ÚVOD

Současná doba na průmysl klade čím dál větší důraz na odlehčování vyráběných součástí. Jednou z nejdůležitějších výrobních oblastí odlehčování je oblast letectví. Trend odlehčování součástí je však také v některých z dalších průmyslových odvětví. V letadlovém průmyslu je však na váhu jednotlivých komponent kladen největší důraz. Odlehčováním jednotlivých součástí, a tím i celého letadla, dochází totiž k přímému snižování vznikajících emisí. Po optimalizaci ostatních faktorů, které ovlivňují velikost emisí, může být snižování celkové váhy stroje jedinou možností, jak emise nadále snižovat. Velký podíl na odlehčení součásti připadá volbě materiálu. Další možností, jak odlehčit vyráběnou součást, je zvolit výrobu neplného tělesa. V tomto případě existují dvě možnosti.

První možností je výroba součástí s využitím topologické optimalizace a tím vytvořit nepravidelnou konstrukci. Do návržení součásti tímto způsobem, je nutné zahrnout náročné výpočty, které jsou realizovány na konkrétní zátěžové podmínky. Dobré pevnostní vlastnosti, těchto jednotlivě topologicky optimalizovaných součástí, je možné zaručit a garantovat pouze v podmínkách, pro které byla tato optimalizace navržena. Nejdůležitější okrajovou podmínkou je způsob a velikost pevnostního namáhání, tedy působení sil v konkrétních místech součásti.

Druhou možností, jak řízeně snížit hmotnost pomocí konstrukce, je užití tzv. odlehčených struktur. Tyto struktury mohou být stochastické či nestochastické. Stochastické, neboli náhodné či nepravidelné struktury, mohou být tvořeny různými technikami. Tato práce se však nepravidelnými strukturami zabývá pouze okrajově.

S příchodem aditivních technologií začal vývoj vytváření pravidelných mřížkových struktur. Za pomocí kombinace určitých konvenčních metod je sice možné vytvořit některé mřížkové struktury, popřípadě sandwichové panely, ale některé struktury vytvořit možné není. 3D tisk otevřel v tomto směru nové možnosti výroby právě těchto mřížkových struktur. Pravidelné mřížkové struktury ve většině případů vycházejí z geometrie krystalových mřížek. Konkrétní struktura a její vlastnosti jsou definovány vždy na jednu buňku. Tato buňka poté může být periodicky použita pro celý objem materiálu dané součásti. Stroje pro aditivní výrobu od různých výrobců mají často některé z těchto mřížkových struktur předdefinovány přímo v softwarech, které jsou určeny pro přípravu a nastavení samotného 3D tisku. Je také možné si vytvořit vlastní strukturu pomocí jakéhokoliv programu na 3D modelování, který má kompatibilní formát souborů se samotným strojem pro 3D tisk.

Pro těleso s využitím mřížkových struktur je k jeho vytvoření potřeba menšího objemu materiálu, než pro těleso, které je objemově zcela vyplněno. Vytvořené těleso s mřížkovou strukturou má logicky nižší hmotnost oproti plnému tělesu. Zároveň si však zachovává vysokou strukturní tuhost. Tyto struktury mohou mít kladný vliv také na absorbování nárazové energie a mohou být navrženy tak, aby lépe izolovaly před vibracemi a hlukem.

Cílem práce je vytvořit rešerši některých používaných mřížkových struktur a vyzkoušet struktury pro aditivní výrobu zkušebních těles. Dále také vytvoření topologicky optimalizovaného tělesa pro porovnání vlastností s vlastnostmi odlehčených zkušebních těles a plného tělesa při zkoušce třibodovým ohybem.

2 ADITIVNÍ VÝROBA

Za aditivní výrobu se považuje výroba technologiemi, u kterých je materiál na sebe po vrstvách postupně nanášen. Aditivní výroba je tedy jednou ze skupin výrobních postupů.

Opačným způsobem vytvoření výrobku je užití subtraktivních technologií, které jsou založeny na principu odebírání materiálu. Mezi subtraktivní technologie patří například obrábění. Subtraktivní výroba je starší a před průmyslovou revolucí byla jednoznačně dominantním způsobem vytváření hotového výrobku.

Další skupinou jsou tzv. formativní neboli tvářecí metody. V tomto případě dochází často k tepelnému a mechanickému namáhání. Do této skupiny patří technologie jako je například lisování, kování a jiné.

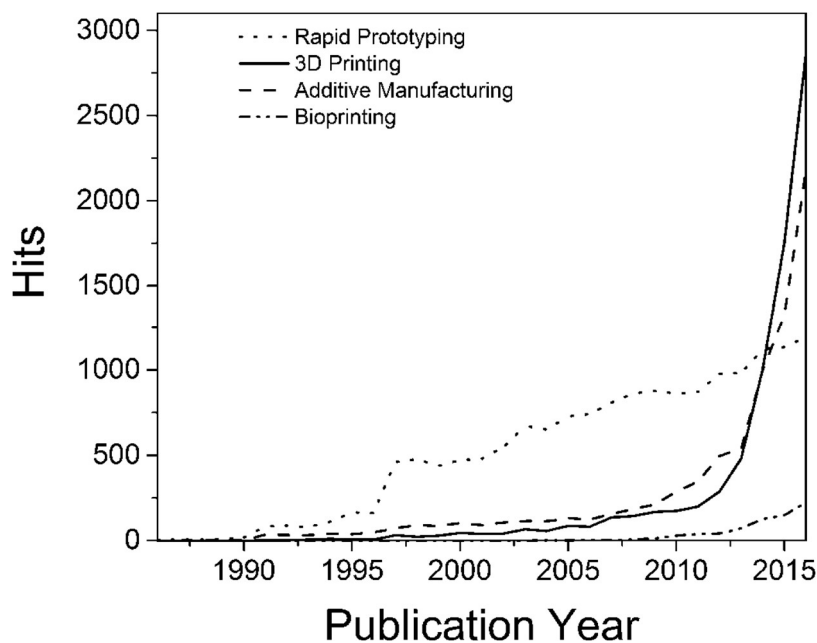
Termín aditivní výroba je často spojován s termínem metody „rapid prototyping“. Rapid prototyping se však využívá v průmyslovém odvětví pro vytváření prototypu. Ten se obvykle používá při testování či zdokonalování do finálního výrobku. Při tvorbě prototypu je největší důraz kladen na rychlost vytvoření a nízkou cenu zhotoveného prototypu. Výsledný výrobek může být vyráběn jiným způsobem než prototyp a proto mohou mít odlišné pevnostní vlastnosti. Ve většině případů prototyp slouží pouze k reprezentaci či vývoji výrobku. Dříve se běžně názvy aditivní výroba a rapid prototyping zaměňovaly. Avšak v posledních letech se více klade důraz na rozlišování těchto názvů, protože je dnes možné pomocí některých metod vyrábět nejen prototypy, ale i hotové výrobky s požadovanými mechanickými vlastnostmi. Aditivní výroba je tedy nadkategorií a spadá do ní právě například rapid prototyping. [1]

Komerčně nejznámějším a nejvíce používaným termínem pro aditivní výrobu se stal pojem - 3D tisk. 3D tisk se používá k vytváření prototypů už více než 20 let. Aditivní výroba nabízí možnost vytvořit nové kategorie geometrií a otevírá nové možnosti designérům, kteří určité nápady na design nemohli dříve realizovat, protože byli omezeni technologií. S příchodem aditivní výroby dochází ke snaze vyrábět výrobky hromadně nejen konvenčními způsoby, ale i právě s pomocí aditivních výrobních technologií. Klade se důraz na snižování hmotnosti, tím snížení potřeby materiálu, ale také na cenu. Jelikož se materiál neodebírá, ale přidává, dochází k vyloučení potřeby dalšího nástroje a výroba bude účinnější, než u technologie odebírání materiálu. Při výrobě aditivními metodami může dojít k redukci materiálových ztrát až o 90%. [2]

Při optimalizaci a změně designu pro aditivní výrobu je možné docílit snížení hmotnosti. Zároveň však s ohledem na velikost a rychlost tisku může dojít k tomu, že optimalizovaný design může mít mnohem vyšší náklady na výrobu. Ve výsledku je tedy možné, že výsledná součást může být násobně dražší, než součást původní. Je proto důležité znát prioritní potřeby zákazníka při výrobě dané součásti.

S otevřením nových možností, v oblasti geometrie součástí, se začalo velmi dobře rozvíjet také mimojiné i pole mřížkových struktur. Mřížkovým strukturám se obecně začala věnovat pozornost především s ohledem na jejich nízkou hmotnost a dobrou mechanickou účinnost.

Zájem o aditivní výrobu se čím dál více zvyšuje už od osmdesátých let dvacátého století až do současnosti. Obrázek č. 1 graficky znázorňuje trend počtu vědeckých publikací a patentů od roku 1985 do roku 2016 a to za pomoci výrazů additive manufacturing (AM) a rapid prototyping (RP). V rámci posledních deseti let také narůstá počet publikací a patentů na poli bioprintingu. Očekává se, že tento růst bude pokračovat a může v blízké době dosáhnout hodnot AM a RP. [3]



Obrázek 1 Výzkum zájmu o rapid prototyping, 3D tisk, aditivní výrobu a bioprinting dle počtu referencí za rok. (data z Web of Science, zpřístupněny 27. července 2017) [3]

2.1 Historie aditivní výroby

První pokusy o 3D tisk a vývoj technologie rapid prototyping jsou zaznamenány v roce 1980. V roce 1981 byla zveřejněna zpráva o tom, že Hideo Kodama z Nagoya Municipal Industrial Research institutu vytvořil systém rapid prototypingu užívající fotopolymery. Kodama byl první, kdo popsal postup výroby po vrstvách a byl předchůdcem pro technologii SLA (stereolithographic apparatus - stereolitografie). Pokusil se podat patentový požadavek, bohužel však v roční patentové lhůtě nedodal úplnou potřebnou specifikaci.

O čtyři roky později se stereolitografii začal zajímat francouzský tým vědců, který však svůj zájem opustil z důvodu nedostatečné obchodní perspektivy. Ve stejné době se o tuto technologii zajímal také Charles Hull, který ji nechal patentovat jako technologii stereolitografie (SLA) v roce 1986. O rok později vytvořil první stereolitografický stroj SLA-1 ve firmě 3D System Corporation. V roce 1988 si Carl Deckard z Texasské Univerzity nechal patentovat další aditivní technologii a to technologii SLS (selective laser sintering). O několik měsíců později si spoluzakladatel Stratasys Inc. podal patent na technologii FDM (Fused Deposition Modeling), což byla třetí z hlavních technologií 3D tisku.

Postupem času došlo k tomu, že 3D tiskárny dokázaly tisknout svoje vlastní díly a přístupnost a cena 3D tisku byla otevřela širší veřejnosti. Výrobní aditivní technologie se dále rozšiřovaly a je jich dnes velké množství. Díky pokroku těchto technologií jsme schopni tisknout z velmi různorodých materiálů. [4] [5]

2.2 Výhody a nevýhody aditivní výroby

Jakákoliv technologie má své výhody, ale také nevýhody. Poté je rozhodující, zda při využití nějaké technologie výhody převyšují nevýhody. Někdy může mít technologie více nevýhod, ale přesto tento postup zvolíme, protože pro nás může být nějaká vlastnost dané technologie klíčová. Jednou z nejdůležitějších výhod aditivní výroby je vysoká flexibilita designu. Díky této technologii je často možné vytvářet velmi složité součásti či produkty, které by běžnými technologiemi nebylo možné vyrobit. Některé složité výrobky je možné vyrobit i pomocí běžných technologií, často však je nutností tento výrobek vyrábět po částech, avšak aditivní výroba umožňuje tyto výrobky vytvořit jako celek. Díky aditivním technologiím je možné tvořit struktury s náročnou topologií. Pro konstruktéry je tato výhoda klíčová v oblasti navrhování konstrukce. Díky této technologii mají velké geometrické možnosti, a to s přijatelnou výslednou cenou za výrobek. Pokud by stejná geometrie byla

vytvořena metodou vstřikování a nejednalo by se o masovou produkci, tak díky ceně výrobní formy by cena celkového produktu byla vyšší. Další velkou výhodou je, že při výrobě aditivní technologií nevzniká téměř žádný odpad a je šetrná k životnímu prostředí. Dokáže tedy ušetřit materiál a tím vynaložené finance. [3] [6]

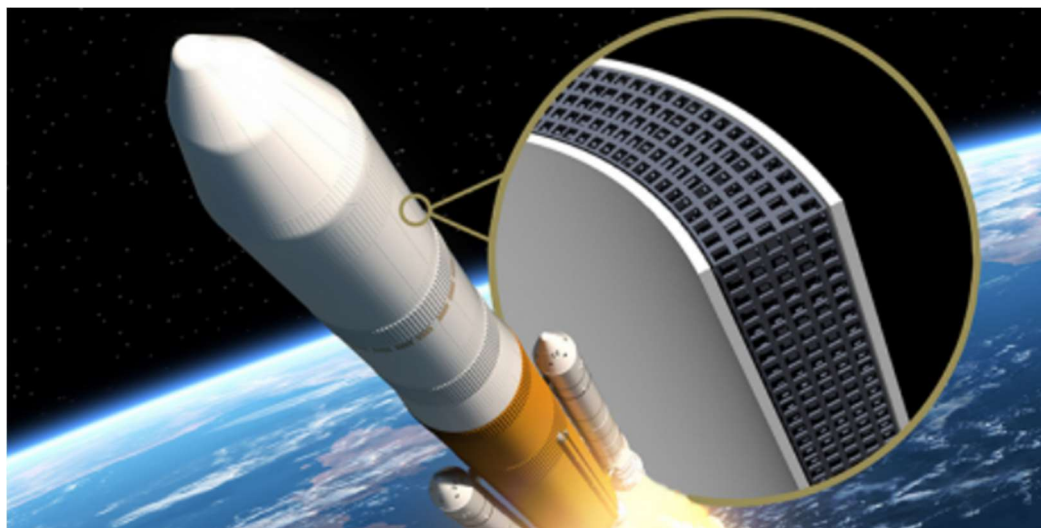
Jednou ze slabin aditivních technologií může být rychlost výroby. Tím, že dochází k nanášení na sebe relativně slabých vrstev, tak může být výroba touto technologií několikanásobně časově náročnější, než výroba stejné součásti běžnými metodami. Protože se nanáší vrstvy v určitém směru, dochází zde k odlišným mechanickým vlastnostem v jednotlivých směrech. Zároveň také dochází ke vzniku napětí mezi jednotlivými vrstvami. Další velkou nevýhodou a omezením je možnost výběru materiálu, kdy může docházet k porozitě a návrh poté nemusí rozměrově odpovídat hotovému výrobku. [3] [6]

2.3 Průmyslové využití

Technologie aditivní výroby se vyvíjí už od osmdesátých let minulého století a postupem času začalo docházet k využívání v nejrůznějších oblastech průmyslu. Technologie aditivní výroby rychle mění tradiční způsob výroby a také celkově každodenního života. Země s rozvíjejícími se ekonomikami začínají formulovat strategie rozvoje, investice a zvyšují úsilí v oblasti výzkumu a vývoje a tím dochází k podpoře industrializace. [7]

2.3.1 Letecký průmysl a kosmonautika

Technologie 3D tisku poskytuje velkou svobodu při výrobě součástí. Jak už bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tak díky aditivní výrobě lze vytvářet díly se složitější geometrií a s nižší hmotností. Je možné tímto způsobem snížit energetickou náročnost a tím může dojít k úspoře paliva. Technologie 3D tisku bývá často využívána k výrobě náhradních dílů některých komponentů pro letectví. U některých částí motoru dochází ke snadnému poškození a je třeba, aby u těchto částí docházelo k pravidelné výměně. [8] [9]



Obrázek 2 Vizualizace použití odlehčených struktur v kosmonautice [grafika: 3Dsculptor / Shutterstock / Jung-Chew Tse]

2.3.2 Automobilový průmysl

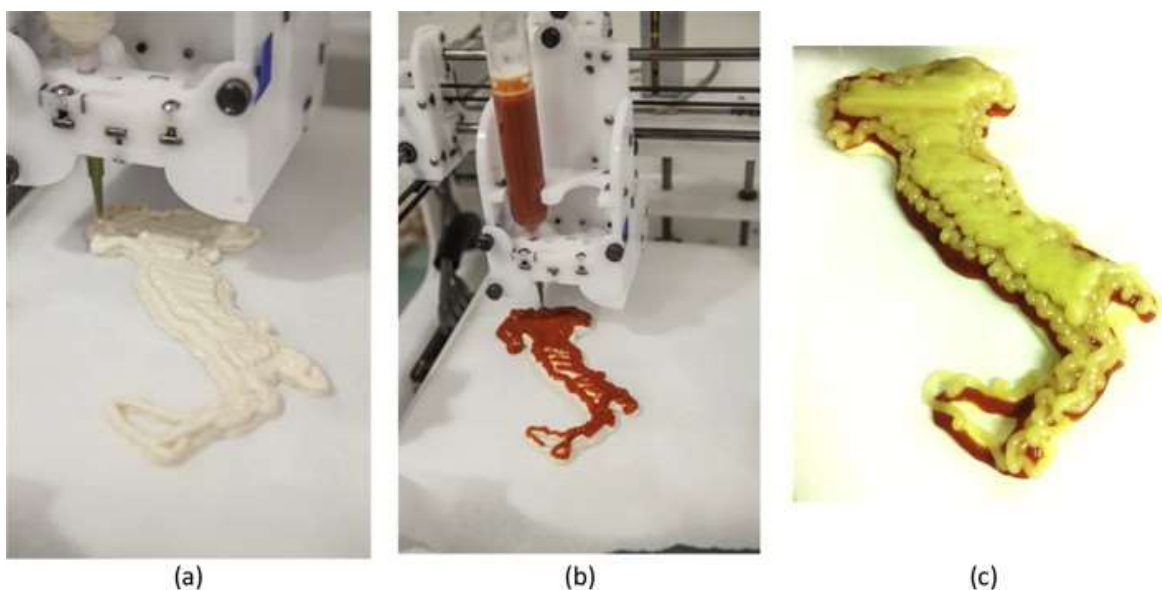
Do dnešní doby se technologie 3D tisku rychle proměňovala z průmyslového využití na využití v oblasti designu a výroby nových věcí. V automobilovém průmyslu technologie 3D tisku vytvořila jevy, díky kterým je možné vytvářet lehčí a složitější tvary během krátkého času. Některým společnostem se podařilo pomocí 3D tisku vyrobit celé automobily či dokonce autobus. Tyto výrobky jsou také velmi dobře recyklovatelné. Díky technologiím 3D tisku je možné vytvářet prototypy či součásti motoru. Je tedy umožněno si díky těmto technologiím vyzkoušet různé alternativy, a to jak při výrobě součástek, tak při vylepšování automobilového designu. Při použití technologie 3D tisku může současně snížit plýtvání a spotřebu použitého materiálu. Je také možné snížit náklady a především čas výroby a tak testovat nové designy ve velmi krátkém čase. [9] [10]



Obrázek 3 Náhled optimalizace designu motoru [11]

2.3.3 Potravinový průmysl

Technologie 3D tisku otevírá dveře nejen strojímu průmyslu, ale také průmyslu potravinovému. Užití aditivní výroby v oblasti potravin má vysoký potenciál. Má však omezenou aplikaci. Klíčovými motivačními faktory pro 3D tisk potravin je přizpůsobení, výroba na vyžádání a geometrická složitost. Potravinový tisk lze demonstrovat například na typických potravinách jako jsou například pizza, těstoviny nebo sušenky. Způsoby umožňující výrobu výrobků na bázi zrn, které jsou tvarově stabilní během procesu vaření, umožňují vyšší věrnost celkovému tvaru výrobku. [12]



Obrázek 4 Zakázková výroba pizzy z těsta (a), omáčky (b) a sýra (c) [12]

2.3.4 Zdravotnický a lékařský průmysl

Tak jako v ostatních průmyslových odvětvích, tak i ve zdravotnickém či lékařském průmyslu, má technologie 3D tisku vysoký potenciál pro budoucnost medicíny. Od svého zavedení se využívá v různých oblastech. Příklady mohou být vytváření anatomických modelů, přizpůsobení zdravotnických prostředků a implantátů či nejnovější vývoj, kterým je tzv. 3D bioprinting. Díky použití počítačové tomografie, magnetické rezonanci a dalších neinvazivních metod zobrazení, bylo lékařům umožněno jasně diagnostikovat stav pacientů a tak léčit s vyšší účinností. Tyto metody se vyvíjely postupně od černobílých 2D snímků k barevným snímkům vytvořených ve třech či ve čtyřech dimenzích (3D a 4D). Tento vývoj byl spojený se vznikem 3D tisku, který dokáže převádět obrazová data z virtuálních modelů na modely fyzické. Návrh virtuálních modelů může být vytvořen v nějakém softwaru CAD a nebo vygenerován z objemových datových souborů například z počítačové tomografie či magnetické rezonance. Při lékařském zobrazování se 3D tisk používá především pro výrobu různých anatomických modelů lidského těla. Fyzická interakce s těmito 3D modely umožňuje lékařům či chirurgům lepší plánování chirurgických zákroků, lépe zákroky demonstrovat a tím zlepšit komunikaci s pacienty. Technologie 3D tisku umožňuje vytvářet různé osobní zdravotnické prostředky a implantáty. Tyto modely obvykle bývají velmi specifické a je třeba zjistit mnoho podrobných informací. Pomocí 3D technologií je možné vytvářet mnoho částí lidského těla. Je možné replikovat přirozenou strukturu pokožky a ta lze použít k testování farmaceutických, chemických či kosmetických produktů a díky tomu není nutné používat pro testování zvířecí kůži. Dalším využitím 3D tisku v lékařství je tisk léků, který může zvyšovat účinnost, velikost a přesnost dávky léčiv. Je také možné vytvořit formu s komplexním profilem uvolňování léčiva. Dalšími oblastmi použití je tisk kostí, tkání a možnost vytisknout modely rakovinových tkání a následně je kontrolovat pro lepší vývoj při výzkumu rakoviny. [9] [13] [14]



Obrázek 5 3D tisknutý anatomický model lidské hlavy [15]

2.3.5 Architektura a stavební průmysl

V oblasti stavebnictví lze technologii 3D tisku použít při tisknutí celé budovy či při vytváření konstrukčních komponentů. 3D tisk budov je stále velmi mladá technologie a v této době zahrnuje mnoho omezení. Existují však velká očekávání a naděje pro budoucnost 3D tisku budov a stavebních prvků. Způsobů a metod tisku ve stavebním průmyslu je vícero. Koncept konturovací metody vytváření umožňuje tisk bytů přímo na místě. Příchod těchto metod si vyžádal nový přístup k architektonickým návrhům a projektování budov. Tato technika vyžaduje také vývoj materiálů, které jsou pro proces 3D tisku vhodné. Vytváření budov se složitým tvarem může být pro architekty jednou z největších výhod 3D tisku. Bude možné vytvářet složité tvary, které nebylo možné vytvářet kvůli omezením spojených s tradičními technikami výstavby. Technologie 3D tisku přináší mnoho výhod oproti tradičním technikám. Jako jsou nižší náklady, šetrnost k životnímu prostředí, úspora času, minimalizace mokrých stavebních procesů, čímž dochází k minimalizaci odpadu a prašnosti. Existuje však stále mnoho faktorů, které je třeba vzít v úvahu. Jako například, že tato vyvíjející se technologie nemůže přejmout pracovní úkoly za tisíce kvalifikovaných pracovníků. Aktuálně je velmi těžké si představit, že by 3D tisk v několika následujících letech dokázal nahradit tradiční způsoby a konstrukci. Spíše budou v tomto průmyslu přítomny obě technologie a bude docházet dále k vyvíjení 3D tisku. [16]

V roce 2018 byl na Dutch Design Week představen a v roce 2019 odzkoušen první inteligentní most MX3D, který byl vytvořen pomocí aditivní technologie. Je vybaven senzorovou sítí a je možné monitorovat a kontrolovat stav mostu v reálném čase. Díky těmto senzorům je možné zachytit a identifikovat potencionální problémy, které nemusí jít na první pohled vidět. Sensory zachycují namáhání, posunutí, vibrace či vlastnosti prostředí jako je kvalita vzduchu a teplota. Most má šířku 2,5 metru a rozpětí 10 metrů. Je vytvořen z nerezové oceli a je umístěn v centru Amsterdamu přes jeden z nejstarších a nejznámějších kanálů Nizozemska Oudezijds Achterburgwal. [17] [18]



Obrázek 6 První inteligentní most vytvořený pomocí aditivní výroby [17]

2.3.6 Textilní a módní průmysl

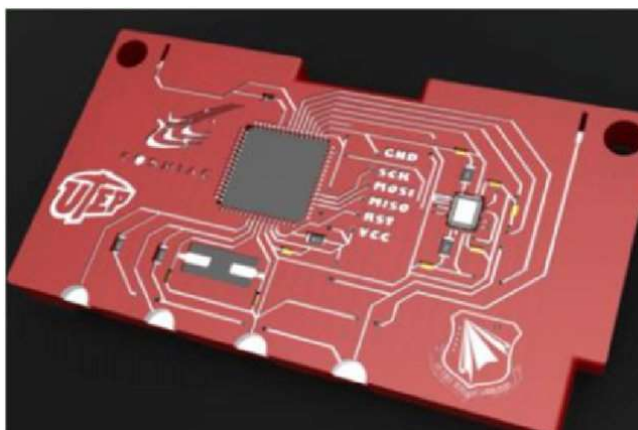
I přesto, že spojení mezi módou a 3D tiskem nemusí vypadat jako přirozené, tak se začíná stávat stále více běžnější záležitostí po celém světě. Firmy, jako jsou například Nike, Adidas a jiné, se snaží rozvíjet hromadnou výrobu 3D-tištěných bot. Již dnes se vyrábějí tištěné boty. Nejčastěji to bývají boty dělané na konkrétní zakázku, ale také sportovní boty či tenisky. Tak jako u ostatních průmyslových odvětví se díky 3D tisku rozšíří možnosti v oblasti designu. Pomocí 3D tisku je možné také tisknout kožené zboží, šperky, hodinky a další módní doplňky. 3D tisk v tomto odvětví napomáhá k velkému rozšíření možností při přizpůsobení produktů a současně dokáže zkracovat celkovou dobu výroby. [19]



Obrázek 7 Sukně vytvořená pomocí 3D tisku [19]

2.3.7 Elektrický a elektronický průmysl

Díky technologickým pokrokům je možné dnes použít technologie 3D tisku také pro elektrický a elektronický průmysl. V současné době jsou již široce využívány pro elektronická zařízení, jako jsou například aktivní elektronické materiály, elektrody a zařízení, které je nutno přizpůsobit. Díky výrobnímu procesu elektrody pomocí modelování depozicí taveniny (FDM – Fused Deposition Modeling) je možné snadno přizpůsobit povrchovou plochu tak, aby co nejlépe vyhovovala konkrétní aplikaci. Ve srovnání s komerčními metodami tedy může být tato možnost přizpůsobení velkou výhodou. Navíc tato technika poskytuje levný a časově efektivní přístup k hromadně vyráběným materiálům. Proces 3D tisku je plně automatizovaný, s vysokým stupněm přesnosti. S velikostí trysky 0,4 mm bylo umožněno dokončit proces tisku 8 elektrod za pouhých 30 minut. [20] [21]

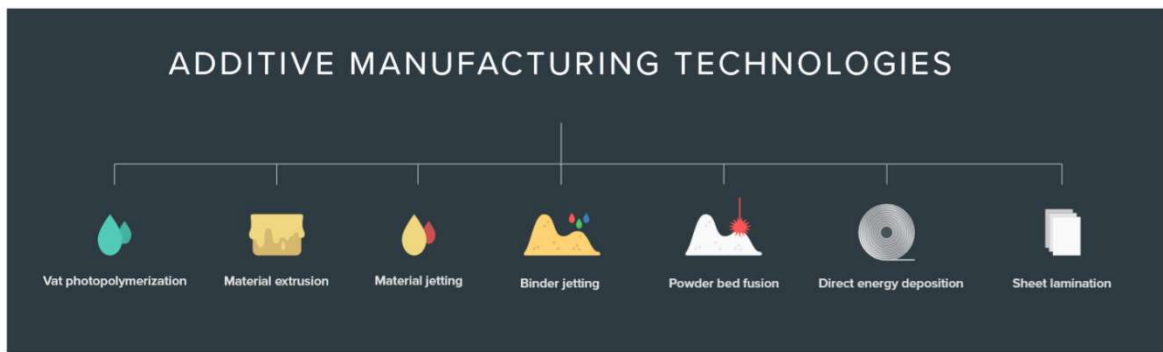


Obrázek 8 Obvodová deska s plošnými spoji vyrobená pomocí 3D tisku [21]

3 PŘEHLED TECHNOLOGIÍ ADITIVNÍ VÝROBY

V úplných počátcích těchto metod existovalo několik společností a institutů, které se zajímaly o vývoj těchto technologií. Z marketingových a patentových důvodů se dnes používá více názvů těchto technologií. Z praktického hlediska však tyto společnosti poukazují na stejnou nebo obdobnou technologii, která jen nese jiný název. Rozdíly mezi metodami často nerozlišují ani dodavatelé těchto technologií. A je to především proto, že existují nejasnosti o rozdílech mezi **DMLS** (Direct Metal Laser Sintering – přímé kovové laserové spékání) a **SLM** (Selective Laser Melting – selektivní laserové tavení). Dále například také **SLS** (Selective Laser Sintering – selektivní laserové spékání), který je obdobou technologie DMLS. Výběr nejvhodnější technologie a procesu aditivní výroby pro konkrétní aplikaci může být obtížný. Dnes již máme velký výběr dostupných technologií a také velký výběr materiálů, které je možné pro výrobu použít. Zvýšily se možnosti 3D tisku realizovat různé kombinace technologií a materiálů, které fungují. Tyto kombinace se však mohou lišit přesností výroby, možnostmi povrchových úprav či v požadavcích na následné zpracování.

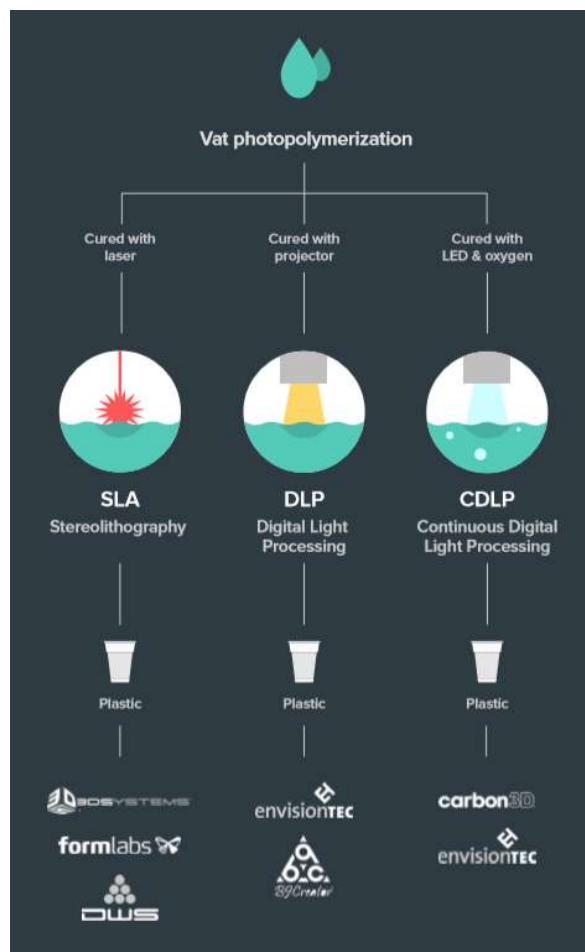
Přestože média začala používat termín 3D tisk jako synonymum pro všechny technologie aditivní výroby, ve skutečnosti existují jednotlivé procesy a technologie, které se od sebe liší způsobem nanášení vrstev. Jednotlivé technologie aditivní výroby lze rozřadit do skupin několika způsoby. Jedním ze způsobů, jak rozdělit technologie aditivní výroby, je dělení dle použitého materiálu. Toto rozdělení lze použít u všech výrobních technologií. Nejčastěji se lze setkat s aditivní výrobou z kovů, keramiky, polymerů, či s kompozity. Dále lze aditivní výrobu dělit právě dle technologie výrobního stroje. Ačkoli se dříve v souvislosti s vývojem výrobku používalo označení rapid prototyping, tak v posledních letech se v tomto odvětví učinily obrovské pokroky a začaly se vytvářet nejen prototypy, ale i hotové výrobky. V roce 2009 technická komise ASTM International tyto procesy definovala jako aditivní výrobu. Byl vytvořen soubor standardů ISO/ASTM 52900-2015, které klasifikují rozsah procesů a technologií aditivní výroby do 7 kategorií. Výbor ASTM F42, který se zabývá právě těmito technologiemi aditivní výroby se schází dvakrát ročně. Stovky odborníků se zde zabývá inovací a růstem v oblasti aditivní výroby. [22] [23] [24] [25]



Obrázek 9 Dělení aditivní výroby dle výrobní technologie [23]

3.1 Technologie fotopolymerizace (Vat Photopolymerization)

Tyto technologie patří k nejstarším aditivním technologiím. Anglický název pro tyto technologie se užívá Vat photopolymerization. Když je fotosenzitivní pryskyřice vystavena světlu s určitou vlnovou délkou, tak dochází k chemické reakci a dochází ke zpevňování. Tyto technologie jsou výborné při výrobě dílů s jemnými detaily a poskytují hladký povrch. [23] [6]



Obrázek 10 Přehled technologií Vat photopolymerization [23]

3.1.1 Stereolithography (SLA)

Stereolitografie patří mezi jednu z nejčastějších a nejstarších metod aditivní výroby. Tuto metodu vyvinul Charles Hull v roce 1984 a stala se prvním komerčním systémem aditivní výroby. K selektivní polymerizaci vytvrditelné pryskyřice použil ultrafialový laser. V procesu stereolitografie je fotosenzitivní pryskyřice v kapalné formě a pomocí dopadu světelného paprsku (laser, UV, atd.) na určité místo, dochází k polymerizaci a ztuhnutí a vytvoří stálou vrstvu. Díky čočkám a zrcadlům, které jsou součástí tohoto systému je umožněno paprskům svítit přesně na konkrétní cíl. Při dokončení vrstvy se vždy držák posune právě o vzdálenost jedné vrstvy a dochází k nanášení další vrstvy až do poslední vrstvy a vytvoření hotového výrobku. V tomto výrobním procesu hraje velkou roli odrazivost materiálu a materiálové vlastnosti. [26] [27] [23] [6]

3.1.2 Digital Light Processing (DLP)

Metoda DLP má téměř shodné postupy při výrobě součástí jako metoda SLA. Hlavním rozdílem je, že DLP používá projekční plátno s mřížkou a najednou ozařuje celou vrstvu. Jelikož může vytvrzovat více míst najednou, je tato metoda rychlejší než SLA. Díky mřížce dojde k ozáření pouze toho místa, které má být zpevňováno. Místo, kde k vytvrzení dojít nemá, je tak chráněno. Jelikož projektor je digitální obrazovka, tak obraz každé vrstvy se skládá z jednotlivých pixelů. Tento systém funguje na principu jedniček a nul. Kdy jednička může představovat zrcadlem odražené světlo a nula světlo absorbované. Tato technologie patří mezi jednu z nejpřesnějších metod aditivní výroby a přesnost se měří řádově v mikrometrech. [23] [28]

3.1.3 Continuous Digital Light Processing (CDLP)

Vývoj metody CDLP, někdy také známé pod jménem CLIP (Continuous Liquid Interface Production), úspěšně zmírnil některou problematiku v oblasti technologie 3D tisku jako je rychlost výroby a kvalita tisknutých dílů. Principem této metody je nepřetržité promítání UV snímků pomocí digitálního světelného projektoru. Tato metoda je velmi podobná metodě DLP. Hlavním rozdílem je, použití propustného filmu, který dokáže propouštět kyslík a tím řízeně ukončit polymerizaci. Tak dochází k vytvoření tenké vrstvy nevytvrzené pryskyřice mezi vytvrzenou vrstvou povrchu a oknem propouštějící kyslík. Tato vrstva se nazývá “mrtvá zóna“ a její rozměry bývají v řádech desítek mikrometrů. Díky mrtvé zóně není nutné vytvářet přechodovou vrstvu a je tedy možné celý proces výroby velmi urychlit. Na rychlosti tisku je závislé rozlišení součástí. [29] [30]

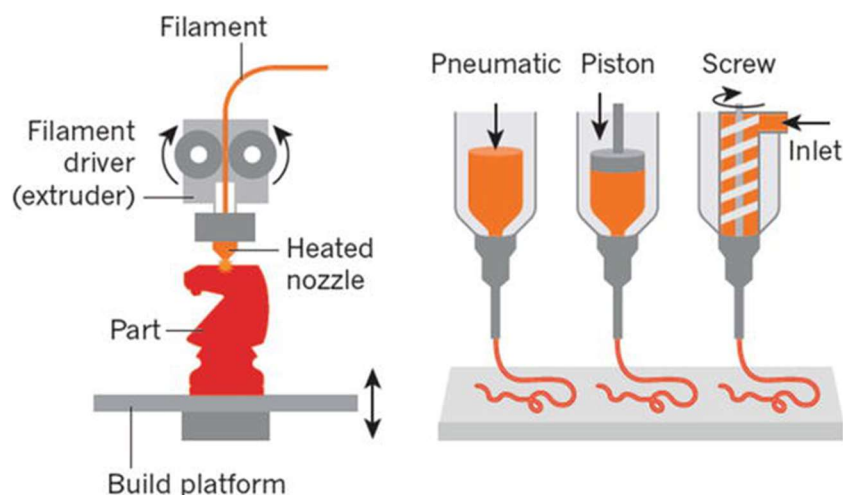
3.2 Technologie extruze materiálu (Material Extrusion)

Tato technologie je založená na vytlačování materiálu tryskou na sestavovací desku a může připomínat například vytlačování zubní pasty. Tryska následuje předem určenou trajektorii a vytváří vrstvu po vrstvě. [3]

3.2.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

Tuto technologii vynalezl a patentoval v roce 1989 Scott Crump, který krátce poté založil společnost Stratasys, která komercializovala první FDM 3D tiskárny. Jelikož Firma Stratasys vlastní ochranou známku na název FDM, tak se v praxi vyskytuje také ekvivalentní termín FFF (Fused Filament Fabrication). Metoda FDM zahrnuje 3D vytlačování termoplastických polymerů, které jsou mechanicky přiváděny v podobě tenkých vláken z cívky do vytlačovací hlavy. Poté dochází k zahřátí polymeru na správnou procesní teplotu, která odpovídá danému materiálu a k nanášení vrstev. [3] [31]

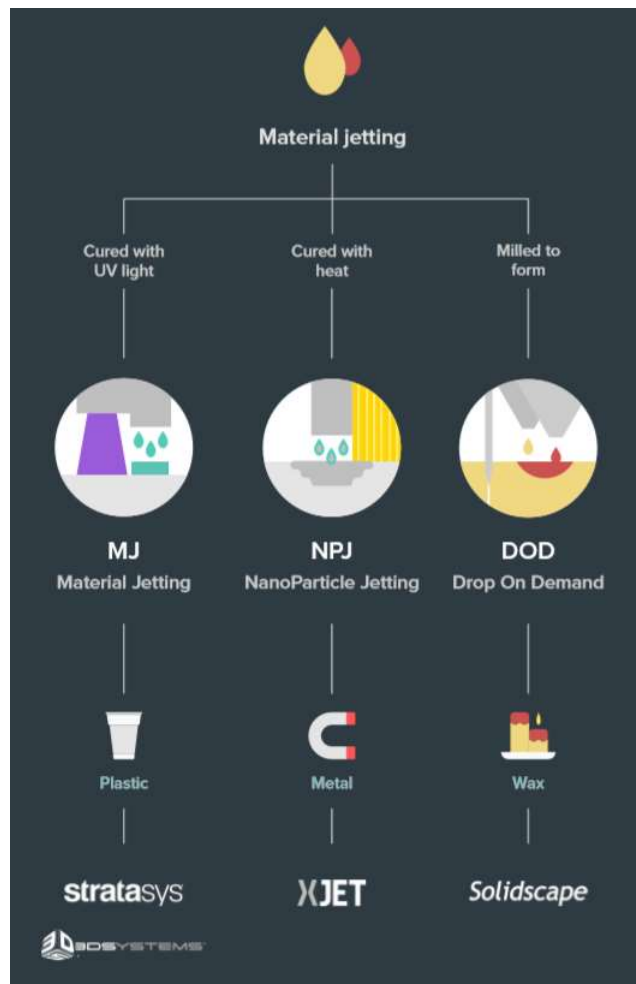
Na obrázku 11 můžeme vidět způsoby podávání materiálu. Zleva podávání vlákna, pneumatické vytlačování, vytlačování pomocí pístu a vpravo vytlačování pomocí šroubu či šneku. Díky snadnému nastavení a regulaci tlaku patří tento způsob mezi často používanou metodu přívodu materiálu. Šroubový systém dokáže poskytnout největší hnací sílu, díky které je možné použít materiály s vysokou viskozitou. Oproti jiným metodám má však složitější napájecí modul. [32] [33]



Obrázek 11 Mechanismy podávání materiálu [32]

3.3 Technologie tryskání materiálu (Material Jetting)

Technologie tryskání materiálu bývá často srovnávána s procesem 2D inkoustových tiskáren. Vytvrzují fotopolymery, kovy či vosk po jednotlivých vrstvách. V těchto procesech je umožněno tisknout více materiálů zároveň.



Obrázek 12 Přehled technologií Material Jetting [23]

3.3.1 Material Jetting (MJ)

Technologie Material Jetting vytváří objekty podobným způsobem jako 2D inkoustové tiskárny. Při nanášení materiálu tisková hlava vypouští kapičky materiálu, který začne tuhnut a vytvrzovat se pod ultrafialovým světlem a tím vytváří postupně jednotlivé vrstvy. Výsledkem jsou díly s vysokou rozměrovou přesností a hladkým povrchem. V tomto případě je omezujícím faktorem materiál. Je třeba, aby měl správnou viskózní povahu a dokázal tvořit kapky. Roztavené polymery je možné použít také s tiskovou hlavou se zvýšenou teplotou. Polymer poté tuhne při teplotě okolí. Výhodou této technologie je vysoké

rozlišení či možnost použít více materiálů najednou. Nevýhodami je, že některé části mohou mít nízkou pevnost a také nízká viskozita zpomaluje rychlost tisku. [34]

3.3.2 NanoParticle Jetting (NPJ)

Mladá technologie NanoParticle Jetting se objevila v roce 2016 a patří mezi technologie kovového 3D tisku. Od konvenčních technologií 3D tisku kovu je tato technologie rozdílná v tom, že používá místo částic kovového prášku tekutý inkoust, který kovový prášek obaluje. Pro dosažení tohoto stavu jsou kovové kousky rozdrceny na nanočástice a jsou vmíseny do tekutého inkoustu a vytváří kapalinu, která je vložena do tiskárny podobně jako cartridge. Poté dochází k nanášení extrémně tenkých vrstev ve formě kapiček. Vysoké teploty uvnitř obálky mají za následek odpařování kapaliny a zanechání kovových částí. [23] [35]

3.3.3 Drop On Demand (DOD)

Inkoustový tisk Drop On Demand (DOD) zahrnuje řízené nanášení kapiček s průměrem menším než 100 μm na konkrétní místo. Vlastnost tečení vzorku (smyková viskozita) je jedním z parametrů, který se upravuje při ladění celého procesu. Dynamika tryskání kapiček je však poměrně složitá a závisí na více parametrech než jen na vizkozních vlastnostech materiálů. Tiskárny pro DOD metodu mají dvě trysky, kdy jedna je pro stavební materiál (obvykle kapalina podobná vosku) a druhá tryska pro pomocný nosný roztavitelný materiál. Jako u tradičních technik aditivní výroby dochází k tisku bodovým způsobem po určené trajektorii. Technologie DOD se velmi často využívá pro slévárenské účely na výrobu forem. [23] [36] [37]

3.4 Technologie tryskání pojiva (Binder Jetting)

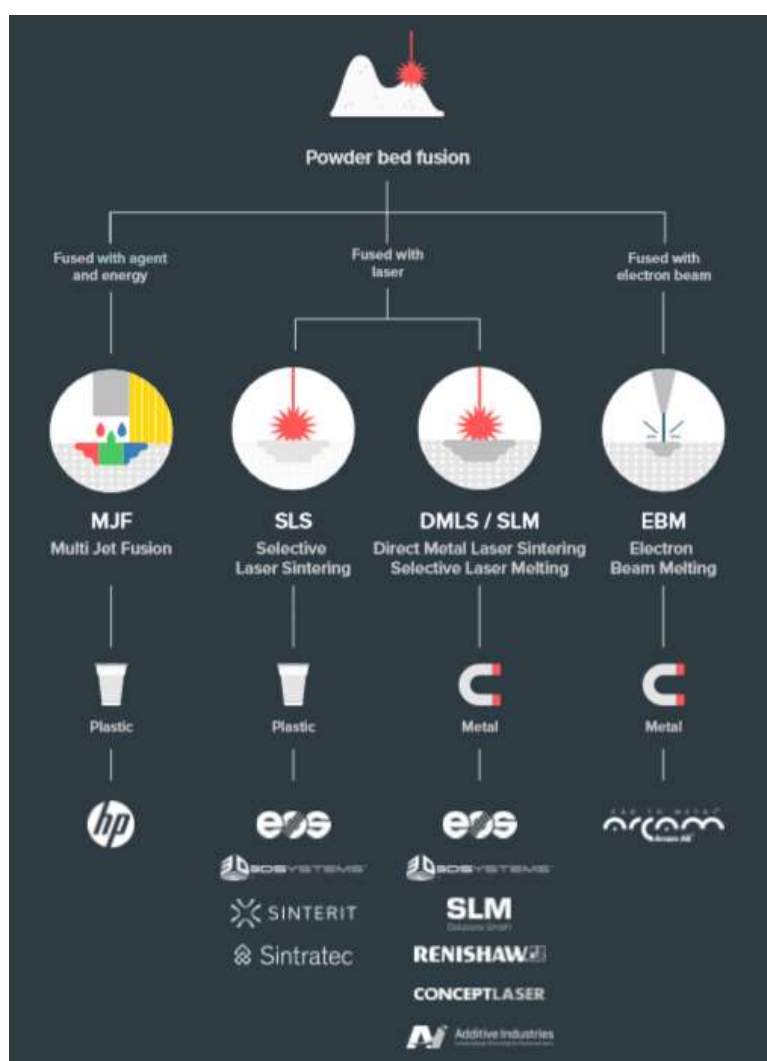
3.4.1 Binder Jetting (BJ)

Technologie Binder Jetting používá jednu či dvě inkoustové tiskové hlavy. Tisková hlava se pohybuje po sestavovací platformě a nanášením zkapalněného pojiva na prášek vytváří tenké vrstvy. Vytváření vrstev připomíná způsob tisknutí pomocí 2D inkoustové tiskárny. Po zhotovení jedné vrstvy dojde k posunutí lože a k nanesení nové vrstvy prášku. Proces se opakuje až do vytvoření poslední vrstvy. Poté se pojivo vytvrzuje při zvýšené teplotě, aby došlo k zlepšení pevnosti a hustoty. Práškové materiály jsou buď na bázi keramiky či kovu. Pro zlepšení mechanických vlastností se

se do procesu často přidává pro keramiku kyanoakrylátové lepidlo či v případě kovů bronz. [23] [38]

3.5 Technologie slinování prášků (Powder Bed Fusion)

Všechny tyto technologie zahrnují rozprostření práškového materiálu přes předchozí natavené vrstvy a jsou podobné jako tryskání pojivem, jen s rozdílem, že vrstvy jsou dohromady spojovány zdrojem tepla. Toto rozprostření obvykle provádí váleček či čepel. Ze zásobníku či nádrže na straně funkční palety je zajištěn přísun nového prášku. K roztavení prášku se nejčastěji používá elektronový paprsek či laser. Technologie byla určena pro zpracování kovových prášků, dnes je však možné se setkat se zpracováváním keramik či polymerů. [3] [9]



Obrázek 13 Přehled použití, technologií Powder bed fusion [23]

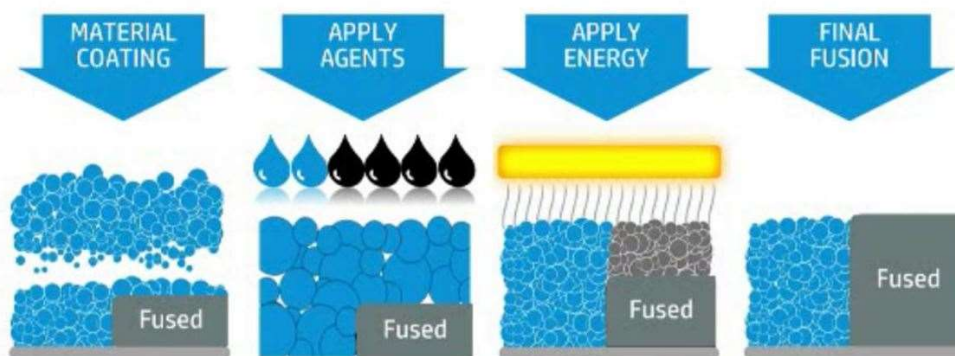
3.5.1 Selective Laser Sintering (SLS)

Metoda SLS je třetí nejčastější používanou technologií aditivní výroby. Byla překonána pouze metodou stereolitografie a metodou FDM. Postup vytváření vrstev se skládá z nanášení prášku, ztuhnutí prášku a poté se platforma pro stavbu sníží o tloušťku jedné vrstvy. Tyto tři kroky se opakují do doby, dokud se nevytvoří poslední vrstva a k vytvoření výrobku. Podobně jako u technologie SLA se proces ztuhnutí provádí za pomoci laserového zdroje. Laserová optika zachycuje obrysy modelu a vrstev. Principem je absorbování laserového záření na konkrétním místě a zahřívání částic, které postupně změknou, poté se roztaví a následně ztuhnou. V průběhu postupu je procesní komora udržována při teplotě o několik stupňů nižší, než je bod měknutí zpracovávaného materiálu. Toto udržování teploty se dělá z důvodu zkrácení doby zpracování, snížení vnitřních pnutí a deformací zvlnění při vytváření vrstev. Pro udržování konstantní teploty je však nutné v komoře udržovat atmosféru s inertním plynem, aby nedocházelo oxidaci materiálu. Při procesu zůstávají volné částice prášku na stavící platformě a slouží jako podpěrný materiál. Díky tomu lze vyrábět díly s jemnou a složitější strukturou bez nutnosti použít další podpěrné struktury. Výhodou této technologie je možnost snadno odstranit prášek z palety a použít ho znovu při další výrobě. [3]

3.5.2 Multi Jet Fusion (MJF)

V posledních několika letech se objevil soupeř SLS a tím je metoda Multi Jet Fusion (MJF). Proces začíná nanesením prášku polymerních částic na výrobní platformu. Poté se na vrstvu materiálu aplikuje infračervené absorbní činidlo, jehož úlohou je zabránit fúzi částic kolem obrysů a zlepšit rozlišení. Díky tomuto činidlu je možné vytvořit lepší detaily a hladký povrch. V tomto procesu dochází ke kombinaci využití energie a reakce mezi činidlem a materiálem. Tyto reakce způsobí, že se materiál selektivně roztaví. [39] [40]

MULTI JET FUSION PROCESS:



Obrázek 14 Zleva: Nanesení prášku, poté činidla, zahřátí energií a vpravo dokončená vrstva [39]

3.5.3 Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting (DMLS / SLM)

Technologie DMLS a SLM jsem zařadil do jedné kapitoly a to z důvodu, že často ani sami výrobci ne vždy jasně rozlišují tyto dvě technologie. Často k těmto dvěma technologiím bývá zařazena také technologie SLS a LaserCUSING. Všechny tyto technologie jsou si velmi podobné a řídí se stejnými základními postupy. U všech dochází k podobným návrhům ve stejné rovině, zaplnění zásobníkové komory práškem, vytvrzení prášku laserem a postupné stavení vrstev směrem zdola nahoru. Prášek je také u všech těchto technologií znovu použitelný a nedochází k žádnému odpadu. Největším rozdílem DMLS/SLM a SLS je, že SLM a DMLS se používají pro výrobu kovových součástí. Zatímco SLS se používá k označení procesu, který se zaměřuje na materiály jako jsou plasty či keramika. Rozdílem mezi DMLS a SLM je, že u technologie DMLS dochází k zahřátí prášku na teplotu blízkou teplotě tání a nedojde tedy k úplnému roztavení, ale pouze k zahřátí na teplotu potřebnou k chemickému rozpojení. Při technologii SLM se z prášku stává tavenina. Dalším rozdílem mezi DMLS a SLM je materiál, který se u těchto metod používá. DMLS pracuje pouze se slitinami jako jsou například slitiny niklu, titanu, hliníku,.. apod. Zatímco při technologii SLM je možné používat jednosložkové kovy jako je například hliník. DMLS/SLM vyžadují použití podpůrných struktur, kvůli kompenzaci zbytkových napětí, které vznikají během procesu vrstvení. DMLS patří mezi nejznámější kovovou technologii aditivní výroby a má v průmyslu velkou základnu. [22] [23] [41]

3.5.4 Electron Beam Melting (EBM)

Technologie Electron Beam Melting (EBM) používá k tavení prášku elektronový paprsek jako zdroj tepla. Po nanesení prášku dochází k rovnoměrnému přehřívání průchodem paprsků. Na rozdíl od ostatních Power Bed Fusion technologií se EBM dnes používá pro hromadnou výrobu. Vyrobené součásti pomocí EBM jdou lehce rozeznat dle horší drsnosti povrchu součásti. Nižší kvalita povrchu je hlavním omezením této technologie. Systémy s elektronovým paprskem vytvářejí menší zbytková napětí v součástech a díky tomu je menší potřeba vytváření podpůrných struktur. EBM spotřebovává méně energie a může vytvářet vrstvy rychleji než SLM a DMLS. Procesy EBM vyžadují výrobu ve vakuu a je možné pracovat pouze s vodivými materiály. Použití EBM má potenciál pro práci s mnoha třídami materiálů, jako jsou nerezová ocel, nástrojová ocel, superslitiny na bázi Ni, na bázi Co, tvrdé kovy aj. [23] [42]

3.6 Technologie přímé energetické depozice (Direct energy deposition)

Technologie Direct Energy Deposition vytvářejí součásti pomocí roztavení prášku nebo drátu při jeho pokládání. Někdy jsou tyto metody známé jako Metal Deposition (depozice kovu).

3.6.1 Laser Engineering Net Shape (LENS)

Technologie Laser Engineering Net Shape je dnes jednou z klíčových technologií v přímé výrobě či při opravách kovových součástí a má obrovský potenciál změnit dosavadní způsob výroby kovových součástí. Proces LENS vytváří vrstvu po vrstvě zdola nahoru pomocí zdroje tepla, kterým je vysoce výkonný laser. LENS užívá nanášecí hlavu, která se skládá z laserové hlavy, trysek pro vydávání prášku a inertní plynové potrubí. Na oblasti, kde chceme vytvářet vrstvy se zahřátím pomocí laseru vytvoří kovová lázeň, do které je sypán prášek, který se roztaví a následně ztuhne. Základní plochou pro stavbu bývá obvykle plochá kovová deska či při opravách to bývá existující opravovaná část. Touto technologií se nejčastěji zpracovává titan, hliník, nástrojová a nerezová ocel či měď. [23] [43] [44]

3.6.2 Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)

Výroba metodou Electron Beam Additive Manufacturing je určena pro kovové součásti a je obdobná jako technologie LENS. Proces ve stavební komoře probíhá ve vakuu pomocí vakuové pumpy. EBAM je schopný pokládat v krátkém čase relativně velký objem

materiálu. EBAM k vytvoření kovového celku používá kovový prášek nebo drát, který svařuje dohromady zdrojem tepla, kterým je elektronový paprsek. Technologie je vhodná na titan, hliník, nerezovou ocel a jiné. [23]

3.7 Technologie laminace

3.7.1 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Tato technologie je kombinací několika technik. Jednotlivé vrstvy jsou postaveny z papíru či jiného laminátu, které bývají proloženy lepidlem. List je položen na pohyblivý stůl a na něj je přitlačen zahřátý váleček s určitým tlakem. Tímto způsobem dochází k lepení jedné vrstvy k vrstvě další. Ze spojených vrstev se poté vyřeže kontura pomocí laseru. Zpočátku se pro tuto metodu používal pouze papír. Dnes už dochází k použití materiálů pro konstrukční účely jako jsou polymery či keramika. [45]

4 ODLEHČENÉ STRUKTURY

Jak už bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tak největší tlak na snižování hmotnosti je v oblasti letectví a kosmonautiky. Se snižující se hmotností letadla dochází ke zvyšování účinnosti motorů a tím nejen ke snížení spotřeby paliva, ale také ke snížení emisí. Proto je nízká hmotnost leteckých komponent důležitým tématem při vývoji letadel. [46]

Snížení hmotnosti vede k úsporám nákladů na palivo v průběhu celé životnosti letadla. Každý snížený kilogram hmotnosti u komerčního letadla může ušetřit palivo v hodnotě až 3000\$ ročně. [2]

Kovové pěny s buněčnou strukturou jsou tvořeny prázdnými prostory uvnitř materiálu, které jsou nazývány póry. Tyto póry zabírají relativně velký objem v porovnání s objemem celkové struktury.

Obecně existují dvě kategorie porézních kovových pěn, které by jsme mohli nazývat odlehčenými strukturami. První kategorií jsou struktury se stochastickou geometrií (náhodné), kde kovová pěna má v určitých variacích náhodný tvar a náhodnou velikost jednotlivých buněk. Druhou kategorií jsou naopak struktury s nestochastickou geometrií (periodické). Periodické buněčné struktury jsou opakující se mřížkové struktury a jejich typy lze rozřadit dle tvaru či velikosti. [47] [48]

Buněčné struktury se běžně vyskytují v našem každodenním životě. Nejběžněji se setkáváme se zástupci této struktury jako jsou houby, dřevo či korek. [49]

4.1 Stochastické struktury

Stochastické pěny jsou komerčně dostupné již delší dobu a používají se v široké škále aplikací. Tyto materiály mají geometricky nedefinovanou porézní strukturu. Buněčné materiály, jejichž buňky jsou vytvořeny stochasticky, můžeme dále rozdělit na struktury otevřené a uzavřené. Pěny s uzavřenými buňkami se obvykle vyrábějí přímým přidáváním plynu do taveniny. Používané plyny jsou například vzduch, dusík či argon. Metod výroby kovových pěn se stochastickým uspořádáním je vícero. Jelikož se tato práce zabývá pravidelnými buněčnými strukturami, tak zmíním pouze některé další způsoby vzniku stochastických struktur.

Dalším způsobem vzniku stochastických struktur je použití nadouvadel, které uvolňují plyn nebo způsobem srážení plynových bublin. Proces je řízen tak, aby bylo dosaženo

požadované velikosti póru, jejich tvaru a četnosti. Tento proces se provádí při tváření plastu. Je možné použít také spalovací syntézu, kde jsou reakční složky smíchány, lisovány za studena, poté umístěny do inertní atmosféry a zapáleny. Tím se spustí režim tepelného výbuchu a syntéza se samovolně rozšiřuje s vysokou teplotou. Prášková metalurgie je také běžnou technikou, při které se vytváří buněčná struktura a kde poréznost je přirozeným výsledkem tohoto procesu. Tyto stochastické struktury se dnes používají například k filtračním účelům.[50] [51]



Obrázek 15 Stochastická struktura [50]

4.2 Nestochastické struktury

Jak již bylo zmíněno výše, tak nestochastické struktury mají opakující se mřížkovou strukturu. Při výrobě těchto struktur nedochází k náhodné změně velikostí a tvaru buněk, tak jako se to může stávat u stochastických struktur. Tomu vděčíme především pokroku v oblasti aditivní výroby a je možné řídit proces vytváření mřížkové struktury. Díky metodám, které užívají přístup vrstvení materiálu, je možné vytvořit struktury s téměř jakýmkoliv tvarem a geometrií buňky. Proto je možné materiál, strukturu a celkové vlastnosti lépe přizpůsobit a optimalizovat ke konkrétní aplikaci. Jednou konkrétní aplikací může být například výroba filtrů, které se tradičně dělají z děrovaných desek či pletiva. Subtraktivními metodami tedy dochází k řezání, děrování, válcování či svařování a použití aditivních technologií může být v této oblasti výroby velkou výhodou. [48]

4.3 Sandwichové panely

Dalo by se říci, že sandwichové panely jsou předchůdci dnešních mřížkových struktur. Sandwichové panely se objevovaly už v minulém století. První použití sandwichových panelů, tak jak je známe, se nejčastěji uvádí u letadla Mosquito, které se hromadněji vyrábělo v době druhé světové války v Anglii. Koncepte či principy podobné sandwichovým panelům se však používaly mnohem dříve, jen byly méně efektivní. Kolem roku 1960 rostl počet alternativních použití v oblastech stavebnictví, skladování, automobilovém, lodním a především leteckém průmyslu. Dne 20. července 1969 došlo k prvnímu úspěšnému přistání na měsíci. Úspěšné přistání vesmírné lodi na měsíci se podařilo také díky použití Sandwichových panelů, které tvořily skořepinu vesmírné lodi. Použití těchto panelů splnilo podmínku, aby tato skořepina byla dostatečně silná a vydržela napětí při akceleraci a přistání, ale také aby měla nízkou hmotnost.



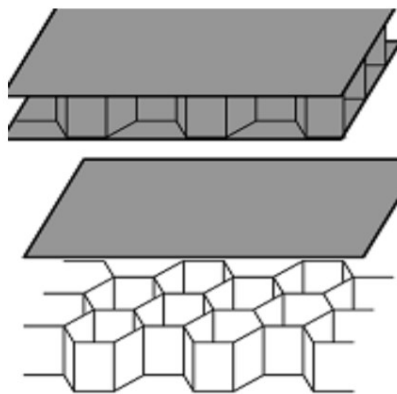
Obrázek 16 Příklad sandwichového panelu z oceli [52]

Struktura sandwichových panelů se vždy řídí základními vzory. Jsou dva relativně tenké obklady s vysokou pevností uzavírající jádro, které je relativně tlusté, lehké a má dostatečnou tuhost ve směru plochy obkladů. Díky různým kombinacím obkladových a jádrových materiálů je možné získat různé alternativní formy sandwichových konstrukcí.

Materiálů, se kterými se lze setkat u sandwichových panelů, ať už u obkladů či jádra, je nepřehledné množství. Uvedu tedy jen některé příklady materiálů jako jsou např. ocel, hliník, dřevo, plast, beton, guma, papír a jiné. [53]

4.3.1 Hexagonální struktura

Hexagonální struktura patří mezi jednu z nejrozšířenějších geometrií mřížek. Je vytvořena z šestiúhelníkových buněk a je velmi často označována jako tzv. honeycomb (včelí plástev). Často se tato struktura používá právě jako výplň mezi dvěma vrstvami. Z tohoto důvodu jsem tuto strukturu zařadil do podkapitoly sandwichových panelů. Účelně se používají tam, kde zatížení směřuje na plochý či mírně zakřivený povrch. Kompozitní materiály s touto strukturou se objevují v letadlech a raketách od padesátých let 20. století. Použití honeycomb struktury lze vidět v mnoha dalších oborech. Například obalové materiály nebo sportovní zboží, jako jsou lyže či snowboardy. [54] [55] [56]

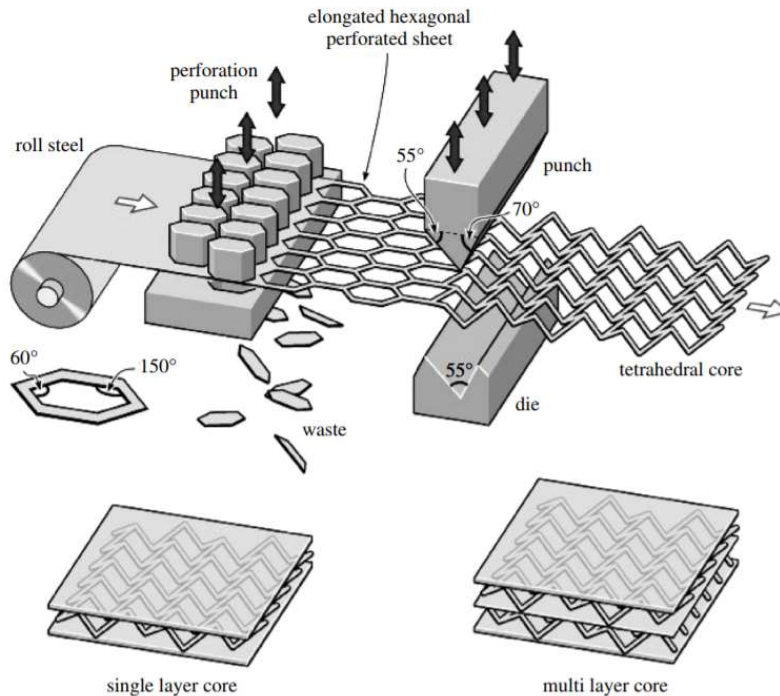


Obrázek 17 Sandwich s hexagonální strukturou [54]

5 PERIODICKÉ BUNĚČNÉ STRUKTURY

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, tak v posledních letech v některých průmyslových oblastech strojírenství dochází k nahrazování plných materiálů porézními. Zájem o porézní struktury stále více roste a to z důvodu vysoké pevnosti, tuhosti, dobré absorpci nárazů, akustické izolaci a především nižší hmotnosti oproti plnému tělesu. Vznik aditivní výroby umožnil také konstrukci a jednodušší výrobu lehkých dílů s mřížkovými strukturami – lattice structures. Některé tyto struktury je možné vyrobit i za pomoci konvenčních metod. Na obrázku 18 je možné vidět příklad výroby sandwichové konstrukce s jednou ze struktur za pomoci konvenční metody. Plech je děrován a poté ohýbán. Pro děrování plechu je možné použít například také technologii řezání laserem či vodním paprskem. Jednotlivé vrstvy lze poté spojit na sebe a vytvořit vícevrstvé struktury. [57]

Jsou však mřížkové struktury, které nelze takto jednoduše vyrobit konvenčními technologiemi, či jimi nejdou vyrobit vůbec. Právě v těchto případech aditivní technologie nabízejí svobodu designu a možnost tyto struktury poměrně jednoduše vyrábět.



Obrázek 18 Příklad výroby se strukturou tetrahedral truss konvenční technologií [57]

Slovo mřížka se používá v různých kontextech a má také různé významy. V krystalografii se slovo mřížka používá v souvislosti s uspořádáním čar a jejich průsečíků, kde se nacházejí jednotlivé atomy krystalu. Ve stavebnictví a architektuře se toto slovo používá pro řadu spojených vzpěr. V této práci je slovo mřížka používáno k identifikaci struktur buněčných materiálů, kde každá buňka má určité rozměry a vlastní geometrii. Struktury těchto pěnových materiálů lze rozdělit do dvou kategorií na základě způsobu, jakým je každá jejich buňka prostorově uspořádána. Dělíme je na stochastické a nestochastické. Pan N.G.Wadley a kolektiv v roce 2002 v jejich práci zaznamenal, že robustní sandwichové panely s periodickými otevřenými strukturami mají mnohem lepší výsledky při zatěžování než stochastické pěny. [52]

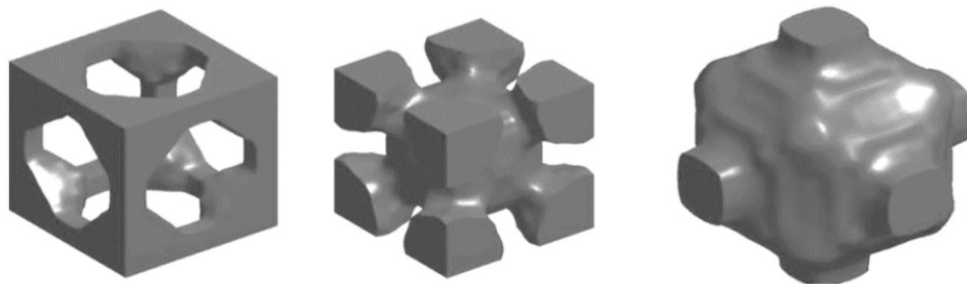
Lze se setkat s vícero možnostmi rozdělení mřížkových struktur. V této práci zmíním pouze některé z nich. Pokud bychom tyto struktury chtěli rozdělit dle designu, dělili bychom je do čtyř skupin. První skupina je založená na CAD datech (CAD-based), druhá na obrazových datech (image-based), třetí je design s implicitními povrchy a čtvrtá s topologickou optimalizací jednotlivých buněk. [58]



Obrázek 19 Ukázka jednotkové buňky založené na CAD [58]



Obrázek 20 Ukázka jednotkových buněk založených na implicitním povrchu [58]



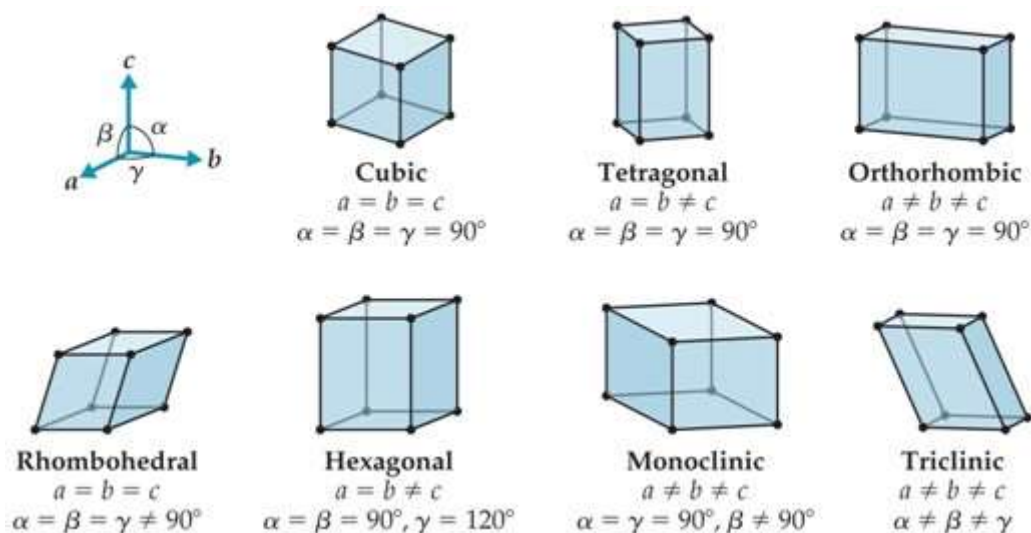
Obrázek 21 Ukázka jednotkových buněk založených na topologické optimalizaci [58]

Nejčastěji se však používá rozdělení dle toho, zda jejich konstrukce je založená na vzpěrách či matematicky definované architektuře. První skupina využívá propojení mezi vzpěrami a uzly. Druhá skupina se zakládá na povrchové reprezentaci. Často užívanou metodou pro vytvoření struktury z této skupiny je matematická metoda TPMS - Triply Periodic Minimal Surface. O těchto dvou skupinách se blíže zmíním v následujících kapitolách.

Vlastnosti jednotlivých krystalografických systémů se, díky různému uspořádání uzlů a vzpěr, od sebe mohou velmi lišit. Pan Auguste Bravais v roce 1845 odvodil 14 typů mřížek v 7 krystalografických soustavách, které jsou nazývány jako Bravaisovy mřížky (Bravais lattice). Právě z těchto známých typů krystalových mřížek se často vychází při vytváření struktur. V některých případech jsou struktury založené na jedné či více krystalových mřížek s použitím určité úpravy, jako například přidáním dalších vzpěr. [56] [59] [60]

Typy krystalových mřížek lze vidět na následujícím obrázku.

- krychlová (kubická – cubic)
- čtverečná (tetragonální – tetragonal)
- kosočtverečná (ortorombická – orthorhombic)
- trigonální (romboedrická – rhombohedral)
- šesterečná (hexagonální – hexagonal)
- jednoklonná (monoklinická – monoclinic)
- trojklonná (triklinická – triclinic)



Obrázek 22 Typy krystalových mřížek [61]

5.1 Struktury založené na vzpěrách

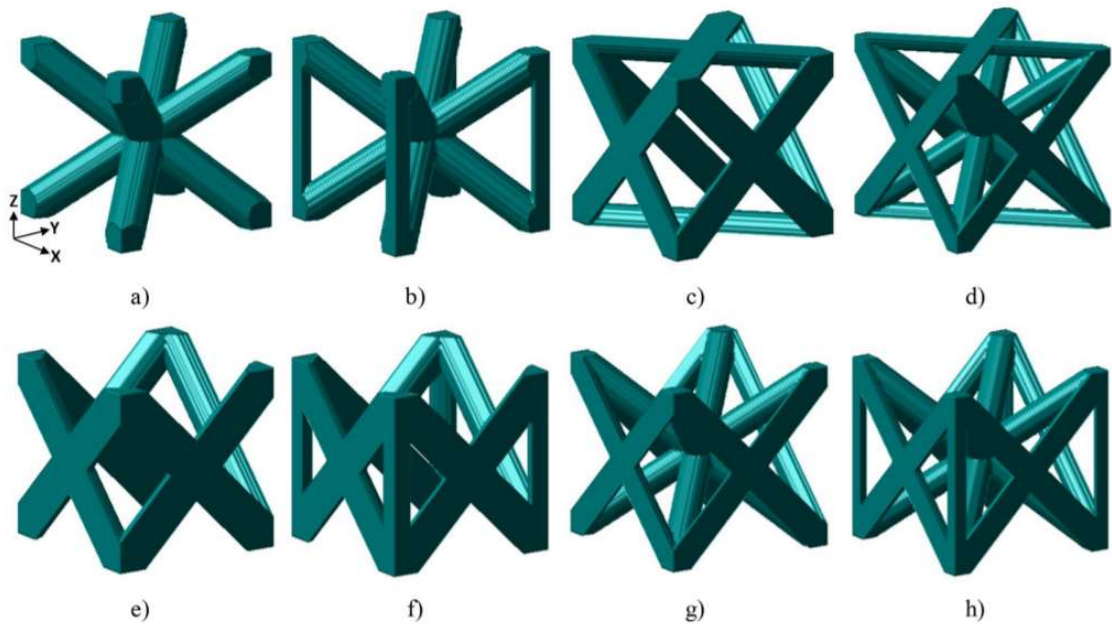
Existuje velké množství proveditelnosti buněčných mřížkových struktur. Tento typ mřížkových struktur bývá složen ze vzájemně propojených uzlů a vzpěr. Uzel je místo, ve kterém se setkávají dvě či více vzpěr. Vzpěra je spojovací člen, který spojuje dva uzly mezi sebou. S přibývajícím počtem uzlů a vzpěr přibývají také potenciální možnosti provedení. Důležité parametry, které mění výslednou konfiguraci mřížky jsou - pozice a počet uzlů, průměry vzpěr a uzlů. Počet propojení uzlů se vzpěrami se nazývá uzlová konektivita. Když je mřížková struktura pod tlakovým napětím, dochází nejprve k elastické deformaci, poté k absorpci energie a nakonec dochází ke zhuťování mřížky. [62] [63]

V této podkapitole se budu zabývat pouze některými typy struktur, jež jsou založeny na krystalografických soustavách. Především tedy o strukturách, které jsou použity v praktické části této práce.

5.1.1 BCC a FCC

Struktury založené na krychlových mřížkách jsou rozsáhle používány. Tak jako u ostatních mřížek, tak i u mřížek BCC (prostorově středěná mřížka) a FCC (plošně středěná mřížka) je možné měnit některé parametry mřížky. Na obrázku níže pod označením (a) lze vidět buňku struktury BCC a pod označením (c) buňku struktury FCC. Ostatní mřížky na obrázku z nich vycházejí a mají určité úpravy. U struktury s označením BCCz se jedná o mřížku BCC, kde písmeno „z“ značí další přidávané členy ve směru osy Z. Struktury obsahující

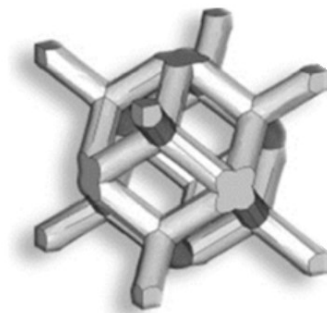
předponu S (např. S-FCC) jsou struktury, které nemají žádné členy ležící rovnoběžně s rovinou X-Y. [60]



Obrázek 23 Jednotkové buňky se vzpěrami: a) BCC, b) BCCz, c) FCC, d) FBCC, e) S-FCC, f) S-FCCz, g) S-FBCC, h) S-FBCCz [60]

5.1.2 Rhombic dodecahedron

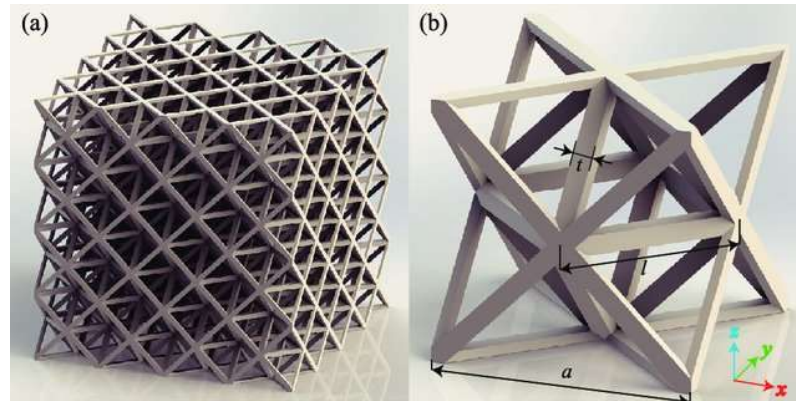
Rhombic dodecahedron neboli rombický dodekaedr je dvanáctistěn, který je tvořen dvanácti shodnými kosočtverečnými stěnami.



Obrázek 24 Jednotková buňka se strukturou rombického dodekaedru [64]

5.1.3 Octet-truss

Jednotková buňka této struktury je kubicky plošně středěného uspořádání. Centrální buňka je tvořena dvanácti vzpěrami, které jsou ohraničeny osmi hranami čtyřstěnnů. Každý uzel v této mřížce leží na průsečíku dvanácti vzpěr. Strukturu octet truss poprvé navrhl pan Fuller v roce 1961. [65]



Obrázek 25 a) mřížková konstrukce složená z buněk struktury octet-truss, b) jednotková buňka mřížkové struktury octet-truss a její parametry [66]

5.2 Struktury popsané matematickou definicí

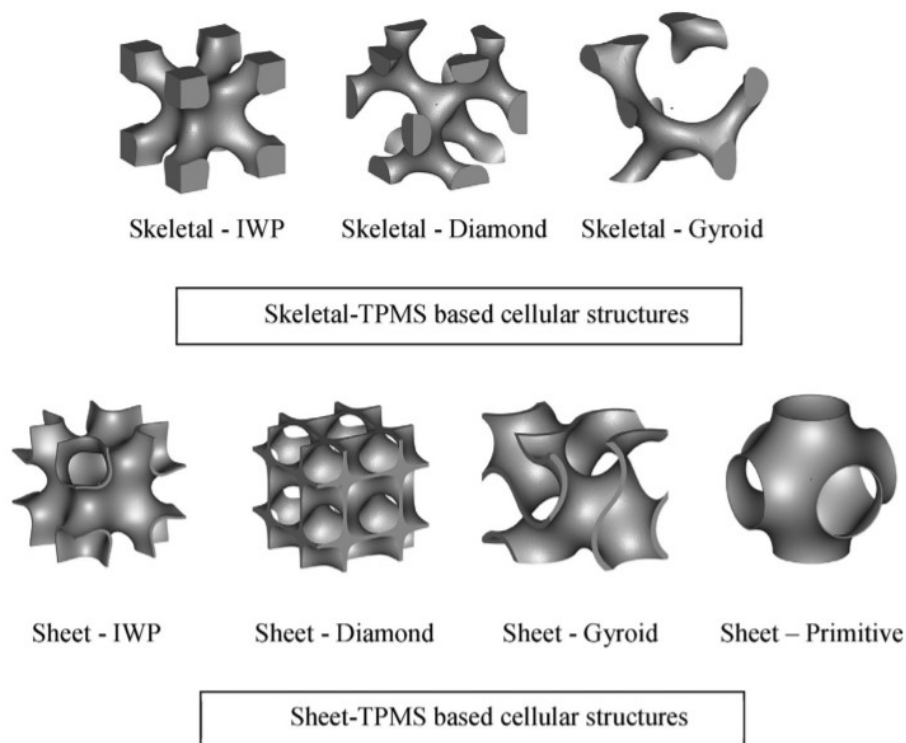
5.2.1 Metoda TPMS

Příkladem konstrukce, která je vytvořena matematickou definicí je metoda TPMS (Triply Periodic Minimal Surface – trojitě periodický minimální povrch). Metoda TPMS je založena na principu minimální plochy a je to komplexní 3D topologie, při které dochází k lokální minimalizaci povrchu. Tato topologie je generována pomocí matematických vzorců, které definují povrch a hranici mezi pevnou a prázdnou částí struktury v jednotlivých buňkách. TPMS lze aproximovat pomocí implicitně zadané plochy, která zastupuje trigonometrické kombinace sinusových funkcí. Minimální povrch v názvu znamená, že jde o povrch, který má střední hodnotu zakřivení rovnou nule v každém bodě. Když je minimální povrch nekonečný a periodicky ve třech nezávislých směrech, poté se nazývá TPMS. Jednotkové buňky těchto struktur lze periodicky opakovat, tak jako je tomu u vzpěrové konstrukce buněk.

Mnoho dnešních CAD/CAM systémů, které jsou vhodné pro přípravu CAD dat včetně simulace, však nemají nástroj pro generování těchto 3D povrchů. Proto se často používají pro generování CAD dat takovýchto struktur další softwary. Významné softwary

s nástroji pro tvoření implicitně zadaných povrchů jsou například Rhinoceros, Matlab a další.

Z morfologického hlediska lze použít dvě strategie návrhu založeném na TPMS. O první skupině se hovoří jako kosterní TPMS (skeletal-TPMS) a druhá se nazývá listová TPMS (sheet-TPMS). V první strategii může docházet k TPMS zahuštění pro fázi vyztužení. Zatímco u druhé strategie jsou zpevňovány objemy oddělené dle TPMS. Al-Ketan a další vědci zkoumali mechanické vlastnosti velkého množství struktur, včetně porézních struktur založené na vzpěrách, kosterních TPMS a listových TPMS. Poté došli k závěru, že struktury listové TPMS mají vynikající mechanické vlastnosti v souvislosti s napětím a deformací. Listové TPMS mají také relativně vysoký Youngův modul pružnosti a houževnatost ve srovnání se strukturami kosterními. Tento výzkum se prováděl na struktuře gyroid. [63] [67] [68] [69] [70]



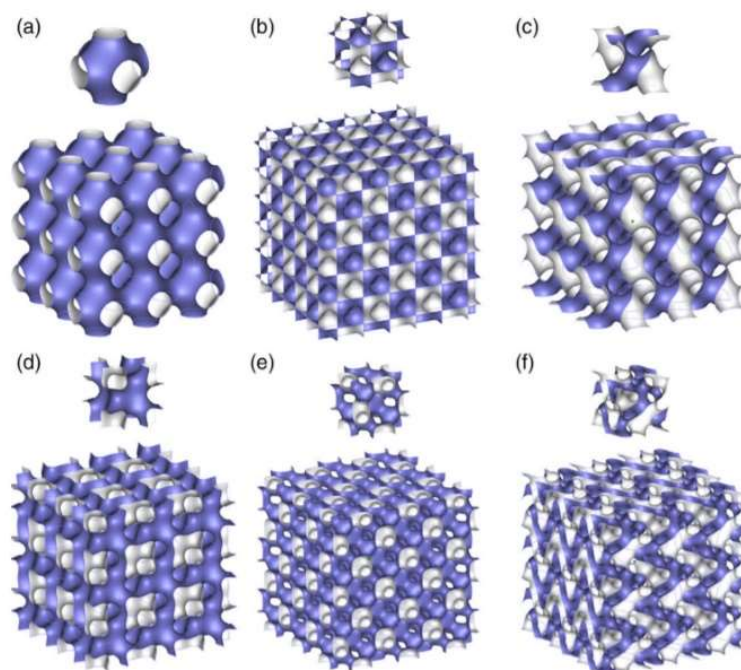
Obrázek 26 Náhled struktur skeletal-TPMS a sheet TPMS [68]

Pomocí metody TPMS lze tvořit velké množství implicitně popsaných konstrukcí. Díky 3D tisku zmizely bariéry, které limitovaly výrobu těchto struktur a vnesl také do této oblasti velkou svobodu při navrhování konstrukce.

Tabulka 1 Aproximační rovnice implicitních povrchů některých struktur TPMS

Schwarz-Primitive	$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = 0$
Schwarz-Diamond	$\sin(x) \sin(y) \sin(z) + \sin(x) \cos(y) \cos(z) + \cos(x) \sin(y) \cos(z) + \cos(x) \cos(y) \sin(z) = 0$
Schoen-Gyroid	$\cos(x) \sin(y) + \cos(y) \sin(z) + \cos(z) \sin(x) = 0$
Schoen-I-WP	$2(\cos(x) \cos(y) + \cos(y) \cos(z) + \cos(z) \cos(x)) - (\cos(2x) + \cos(2y) + \cos(2z)) = 0$
Schoen-F-Rhombic Dodecahedra	$4(\cos(x) \cos(y) \cos(z)) - (\cos(2x) \cos(2y) + \cos(2y) \cos(2z) + \cos(2z) \cos(2x)) = 0$
Fischer-Koch S	$\cos(2x) \sin(y) \cos(z) + \cos(x) \cos(2y) \sin(z) + \sin(x) \cos(y) \cos(2z) = 0$

Tabulka č.1 zobrazuje rovnice aproximace implicitních povrchů některých vybraných struktur TPMS. Na obrázku č. 27 je náhled jednotkových buněk a periodických buněk 3x3 těchto vybraných struktur. Jmenovitě a) Schwarz Primitive, b) Schwarz Diamond, c) Schoen Gyroid, d) Schoen I-WP, e) Schoen F-Rhombic Dodecahedra (F-RD), and f) Fischer-Koch S.



Obrázek 27 Příklady designu TPMS jednotkových buněk a periodických struktur 3x3 [71]

6 OPTIMALIZACE TOPOLOGIE

Většina přírodních struktur je ve skutečnosti složitou topologickou strukturou se složitými tvary či nepravidelnou morfologií povrchu. Z důvodu rychlého rozvoje 3D tisku lze tyto složité topologické struktury přesně a efektivně vyrobit za pomoci vrstvení materiálu. Nové výrobní technologie a jejich aplikace přinášejí nové požadavky na současnou metodiku topologické optimalizace struktur. Ačkoliv složité topologické struktury mají mnoho výhod ve vlastnostech, tak je velmi obtížné je vyrobit tradičními výrobními postupy. Aditivní výroba je nejmodernější technologií pro výrobu komplexních modelů po jednotlivých vrstvách bez ohledu na geometrii tvaru. Díky aditivní výrobě je možné vyrábět složité topologické struktury z různých materiálů.

Optimalizace topologie je technologický nástroj, kterým usilujeme o větší ušetření materiálu, než to dokážeme optimalizováním tvaru či rozměru průřezu. Jedná se o mladou a rychle se vyvíjející oblast mechaniky. Cílem optimalizace topologie je najít nejlepší možné rozvržení konstrukce s ohledem na zatížení a na splnění okrajových podmínek. Optimalizace topologie a tzv. latticing (mřížkování) byli objeveny jako dvě hlavní strategie, jak odlehčovat vyráběné součásti. Tyto strategie navíc mohou využívat svobodu designu, kterou nabízejí aditivní technologie. Topologická optimalizace je prováděna s ohledem na vlastnosti jako jsou hmotnost, odolnost proti zatížení, tuhost, frekvence a napětí.

V posledních třech desetiletích byl zaznamenán velký zájem o metody optimalizace topologie. Optimalizaci topologie je možné rozřadit do dvou skupin a těmi jsou optimalizace dispozice (LO – layout optimization) a tzv. zobecněná optimalizace tvaru (GSO - Generalized Shape Optimization) [72] [60]

6.1 Optimalizace dispozice

Optimalizace dispozice (LO – layout optimization) je určena pro konstrukci s malým objemovým zlomkem. Jedná se o konstrukce rámové a prutové. Tento typ optimalizace jako první ve své práci zmínil Australan Anthony Michell v roce 1904. Jeho postupy a závěry rozšířil o několik desítek let G.I.N. Rozvany na tzv. roštové konstrukce (grillage). Roštové konstrukce se skládají z nosníkových prvků (beam system). Díky jejich práci byly později obecně sestaveny základní principy pro optimalizaci dispozice. [72] [60]

6.2 Zobecněná optimalizace tvaru

Zobecněná optimalizace tvaru (GSO - Generalized Shape Optimization) se zabývá konstrukcemi s velkým objemovým zlomkem a dochází zde současně k návrhu topologie a tvaru. Problémy spojené s těmito konstrukcemi mohou být řešeny buď analyticky či numericky. Nejčastější metodou výpočtu je metoda konečných prvků MKP (FEM - Finite element method). S použitím metody konečných prvků se dále metody dají klasifikovat dle typů elementů, které jsou v metodách užívány.

- Izotropní pevný nebo prázdný element (ISE - Isotropic Solid or Empty element)
- Anizotropní pevný nebo prázdný element (ASE – Anisotropic Solid or Empty element)
- Izotropní pevný, prázdný nebo pórovitý element (ISEP - Isotropic Solid, Empty or Porous element)

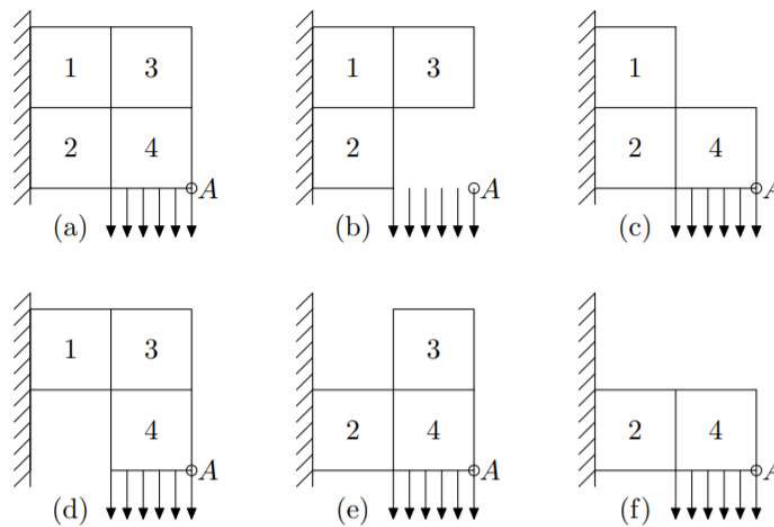
Pevným elementem se rozumí zcela vyplněný a to jedním materiálem. Prázdný element neobsahuje žádný materiál a pórovitý element je vytvořen jedním materiálem a prázdným prostorem. Dále je možné se setkat s topologií ISEC, která je podobná jako ISEP, ale místo pórovitých elementů obsahuje elementy kompozitní. Topologie ISECP připouští zároveň porézní i kompozitní materiály. [72] [73]

6.2.1 ISE-topologie

Tuto třídu topologie rozdělujeme na tři užívané strategie. Metoda pevné izotropní izotropní mikrostruktury s penalizací (SIMP - Solid Isotropic Microstructure with), metoda optimální mikrostruktury s penalizací (OMP - Optimal Microstructure with Penalization) a metoda neoptimálních mikrostruktur (NOM – NonOptimal Microstructures). Jelikož vytvořit topologickou optimalizaci není mým cílem v rámci této práce, nebudu se dále těmito strategiím podrobněji věnovat.

Při výpočtu je možné pracovat s pevně danou sítí elementů, či s volnou sítí, která se v průběhu optimalizování vytváří. Jestliže kromě prázdného prostoru, můžeme uvažovat čtyři různé materiály, tak tuto topologii značíme 4ISE-topologie. Obrázek 28 představuje příklad 1ISE-topologie. Návrhový prostor je složen ze čtyř elementů a je pokrytý sítí. Element 1 a element 2 jsou pevně vetknuty a element 4 je spojitě zatížen. Zde je problémem toto zatížení čtvrtého elementu. Naším požadavkem je co nejmenší svislá deformace bodu A za použití pevných nebo prázdných elementů. Obrázek 28 demonstruje: (a) návrhovou

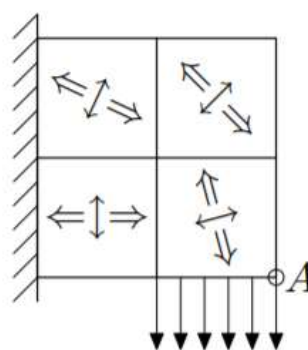
oblast s MKP sítí, (b) nepřipustné řešení, (c) optimální řešení, (d-f) přípustná řešení, která nejsou optimální. [72] [73]



Obrázek 28 Příklad IISE topologie [73]

6.2.2 ASE-topologie

Topologie s použitím anizotropních pevných nebo prázdných elementů. Každý element má mechanické vlastnosti, které jsou vyjádřeny tenzorem tuhosti a jsou v celém elementu konstantní. Mezi elementy se však liší.

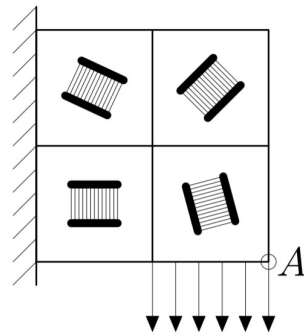


Obrázek 29 Příklad ASE topologie [73]

6.2.3 ISEP, ISEC, ISECP-topologie

U těchto způsobů topologie jsou použity elementy vytvořené z prázdného prostoru a jedním nebo více izotropními materiály. Každý element je optimalizovat samostatně a

uvažován jako obecně kompozitní či porézní struktura. Optimalizace se nejčastěji provádí matematickou homogenizací, kde zjednodušeně dochází ke zprůměrování vlastností v objemu elementu. Po homogenizaci se mění topologie ISEP na topologii ASE a může to být výhodnější z hlediska výpočtů. [73]



Obrázek 30 Příklad ISEP topologie [73]

7 ZKOUŠKA OHYBEM

Cílem této práce je porovnání periodických mřížkových struktur s topologicky optimalizovanou konstrukcí. Tato optimalizace uvažovala primárně ohybové namáhání. Z tohoto důvodu se v této práci zabývám pouze zkouškou tříbodovým ohybem, která byla provedena u všech vzorků, které byly navrženy a vytvořeny aditivní technologií.

Při psaní této práce jsem narazil na vědecké práce, které se zabývaly především zkoumáním odolnosti odlehčených struktur proti tlakovému zatížení. **V této kapitole budu citovat některé body české normy s označením ČSN EN ISO 7438.** Tato norma je také uvedena v příložených zdrojích.

Tato norma je českou verzí evropské normy EN ISO 7438:2016 a nese název „Kovové materiály – Zkouška ohybem“

7.1.1 Předmět normy

Tato mezinárodní norma specifikuje metodu stanovení schopnosti kovových materiálů se plasticky deformovat ohybem. Tato mezinárodní norma se používá pro zkušební tělesa odebraná z kovových výrobků podle příslušné normy na výrobek. Nelze ji použít pro stanovené materiály nebo výrobky, jako jsou trubky plného průřezu nebo svarové spoje, pro které existují jiné normy.

7.1.2 Princip normy

Zkouška ohybem spočívá v plastické deformaci zkušebního tělesa kruhového, čtvercového, obdélníkového nebo polygonálního průřezu ohybem do dosažení předepsaného úhlu, aniž by se změnil směr zatěžování.

Osy obou ramen zkušebního tělesa setrvávají v rovině kolmé k ose ohybu. Podle požadavků normy na výrobek se mohou oba boční povrchy v případě ohybu o 180° dotýkat nebo mohou být v definované vzdálenosti, která je kontrolována vložkou, rovnoběžné.

7.1.3 Zkušební zařízení

Zkouška ohybem se musí provádět na zkušebních strojích nebo na lisech vybavených následujícími přípravky

- a) ohýbací přípravek se dvěma podpěrami a trnem
- b) ohýbací přípravek s blokem ve tvaru V a trnem
- c) ohýbací přípravek s upínacími čelistmi

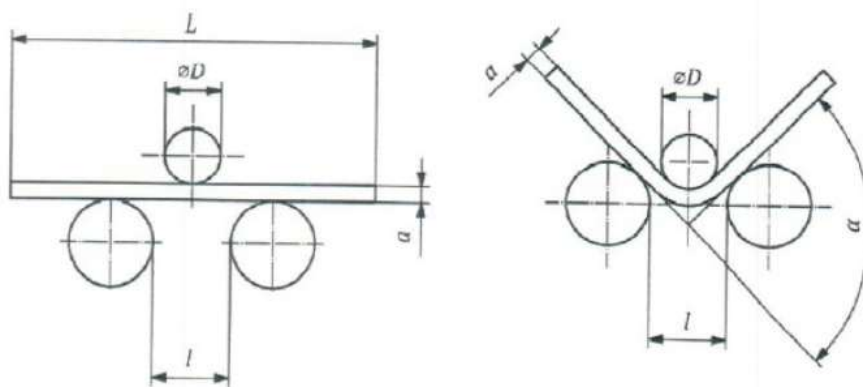
V této práci bude provedena zkouška dle bodu a), tedy s ohýbacím přípravkem a dvěma podpěrami a trnem.

7.1.4 Ohýbací přípravek s podpěrami a trnem

Délka podpěr a šířka trnu musí převyšovat šířku nebo průměr zkušební tělesa. Průměr trnu určuje norma na výrobek. Podpěry zkušební tělesa a trn musí mít dostatečnou tvrdost. Pokud není stanoveno jinak, musí být vzdálenost mezi podpěrami:

$$l = (D + 3a) \pm \frac{a}{2}$$

Tato vzdálenost se nesmí v průběhu zkoušky ohybem změnit.



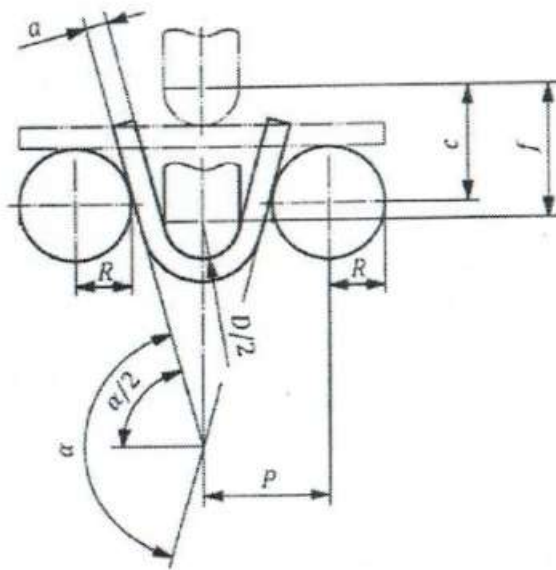
Obrázek 31 Ohýbací přípravek se dvěma podpěrami a trnem [74]

7.1.5 Zkušební těleso

Ke zkoušce musí být použito zkušební těleso kruhového, čtvercového, pravoúhlého nebo polygonálního průřezu. Jakékoliv oblasti materiálu ovlivněné stříhem, řezáním plamenem nebo jinými podobnými operacemi při odběru vzorků k výrobě zkušebních těles se musí odstranit. V případě vyhovujícího výsledku lze však připustit i zkoušení zkušební tělesa s neodstraněnými ovlivněnými oblastmi.

7.1.6 Stanovení úhlu ohybu z měření posunu trnu

Stanovení úhlu ohybu z měření posunu trnu je přílohou A v normě ČSN EN ISO 7438. Tato mezinárodní norma specifikuje stanovení úhlu ohybu, α , zkušebního tělesa pod zatížením. Přímé měření tohoto úhlu je obtížné. Z tohoto důvodu je navržena metoda výpočtu tohoto úhlu z měření posunu trnu, f . Úhel ohybu, α , zkušebního tělesa pod zatížením lze stanovit z posunu trnu a veličin uvedených na následujícím obrázku.



Obrázek 32 Hodnoty potřebné k výpočtu úhlu ohybu α [74]

Výpočet úhlu α lze stanovit následovně:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{p \cdot c - W \cdot (f - c)}{p^2 + (f - c)^2}$$

$$W = \sqrt{p^2 + (f - c)^2 - c^2}$$

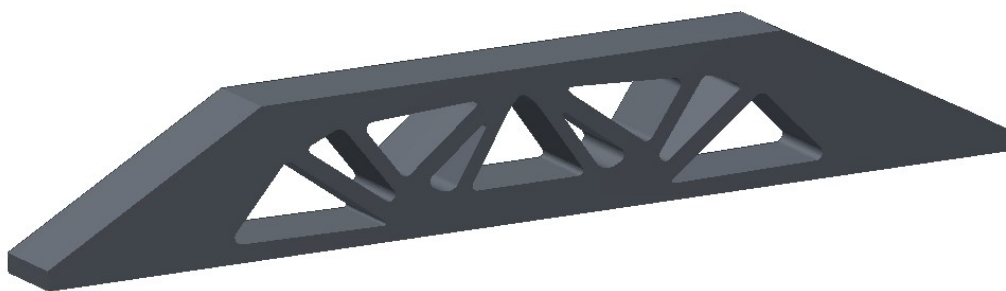
$$c = R + a + \frac{D}{2}$$

8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této práci se zabývám porovnáním vzorků s mřížkovými strukturami, plným tělesem a topologicky optimalizovanou konstrukcí při zkoušce tříbodovým ohybem. Hlavním záměrem je vytvořit odlehčená tělesa s mřížkovými strukturami. Vytvoření těles s mřížkovými strukturami, v porovnání s topologicky optimalizovaným tělesem, není tak časově náročné. Nahrazením těmito tělesy by bylo možné snížit hmotnost a také ušetřit čas, který je u topologických těles nutný k výpočtu a návrhu samotné optimalizace. Cílem této práce je tedy především snížení váhy tělesa, nikoliv vytvořit těleso vykazující lepší mechanické vlastnosti či zvýšení nosnosti struktury.

8.1 Návrh zkušebních vzorků

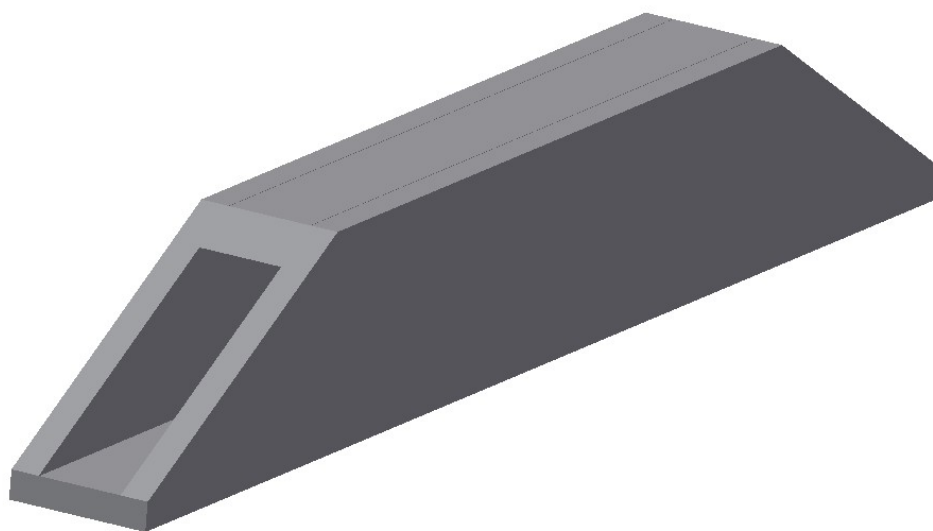
Návrh vzorků s mřížkovými strukturami vycházel z topologické optimalizace, která byla napočítaná na základě vzdálenosti podpor 70 mm. Při snaze vzorky co nejvíce odlehčit, bylo vytvořeno nespočet modelů, které byly zcela tvořeny mřížkovými strukturami. Mřížkové struktury byly nakonec vytvořeny do obálky, kvůli lepší nosnosti celé struktury. Další výhodou obálky je zajištění rovného povrchu na místech, na kterých budou umístěny podpory, či na které bude tlačit trn při ohybové zkoušce.



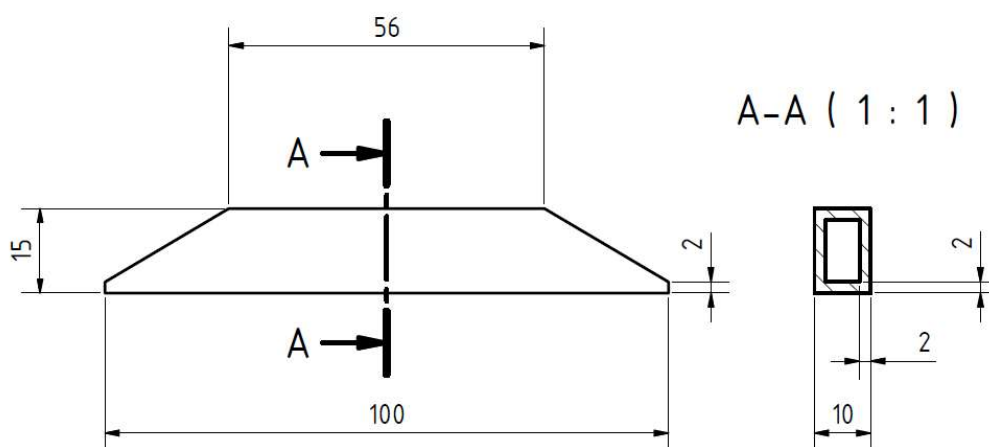
Obrázek 33 Topologicky optimalizovaná konstrukce

Topologicky optimalizovaný vzorek měl podle CAD modelu objem 8599 mm^3 . Tělesa byla navržena tak, aby měla srovnatelný objem s tělesem topologickým. Jelikož budou všechny vzorky tisknuty ze slitiny AlSi10Mg, tak vytvořením vzorků podobného

objemu, docílíme také podobné hmotnosti vzorků. Kombinací různých obálek a různých mřížkových struktur jsem se snažil docílit co nejpodobnějšího objemu, jako měl topologicky optimalizovaný vzorek. Vyzkoušel jsem řádově desítky kombinací obálek a struktur. Pro dosažení správného objemu jsem zkoušel měnit parametry jednotkových buněk jednotlivých struktur.

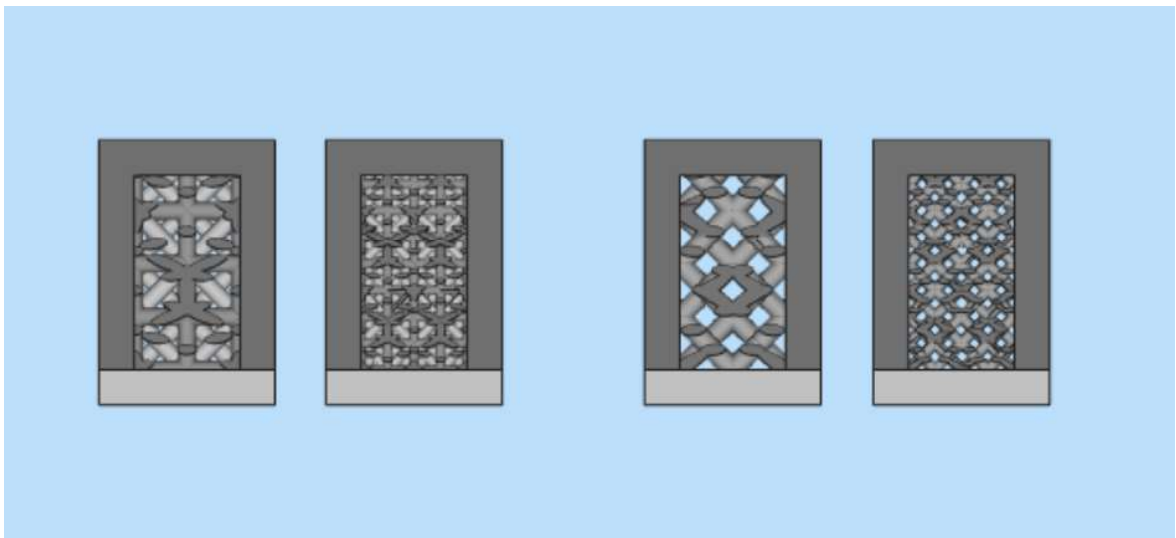


Obrázek 34 Zvolená obálka pro mřížkovou strukturu



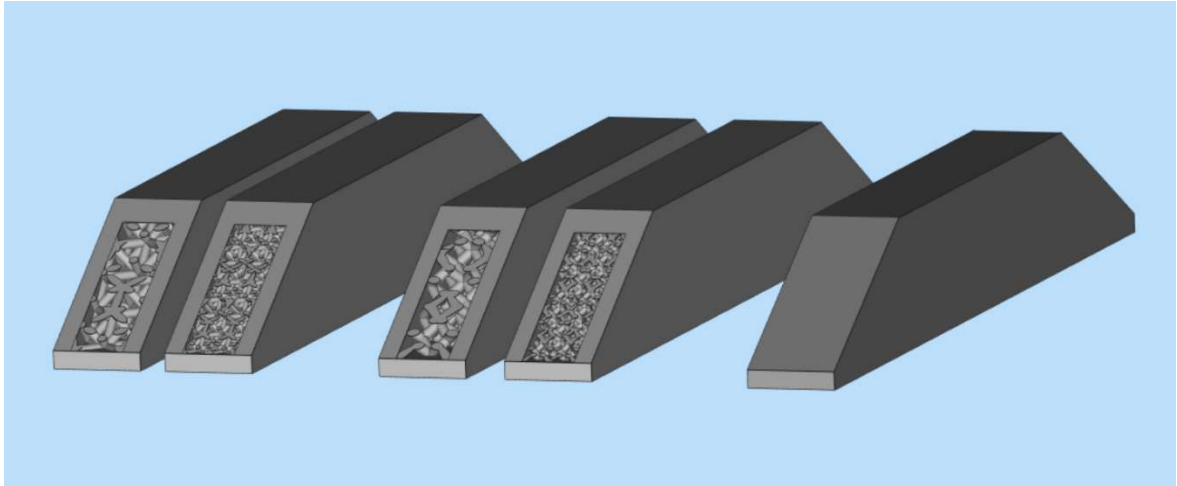
Obrázek 35 Rozměry obálky v milimetrech

Obálka a pevné jádro bylo vymodelováno v softwaru Autodesk Inventor. Mřížková struktura z těchto souborů byla vytvořena v softwaru Materialise Magics 23. Tento software nabízí dostatečný počet typů předdefinovaných mřížkových struktur a lze v přehledném rozhraní upravovat jejich parametry. Pokud je zvolena jednotková buňka příliš malá, pak vytváření mřížkové struktury je časově velmi náročné. Velikost buňky jsem volil nejen dle toho, aby součet objemů obálky a mřížkové struktury nabýval podobných hodnot jako topologická struktura. Dále však také dle toho, aby vzorky vizuálně vypadaly pěkně a mřížková struktura jádra byla osově souměrná.



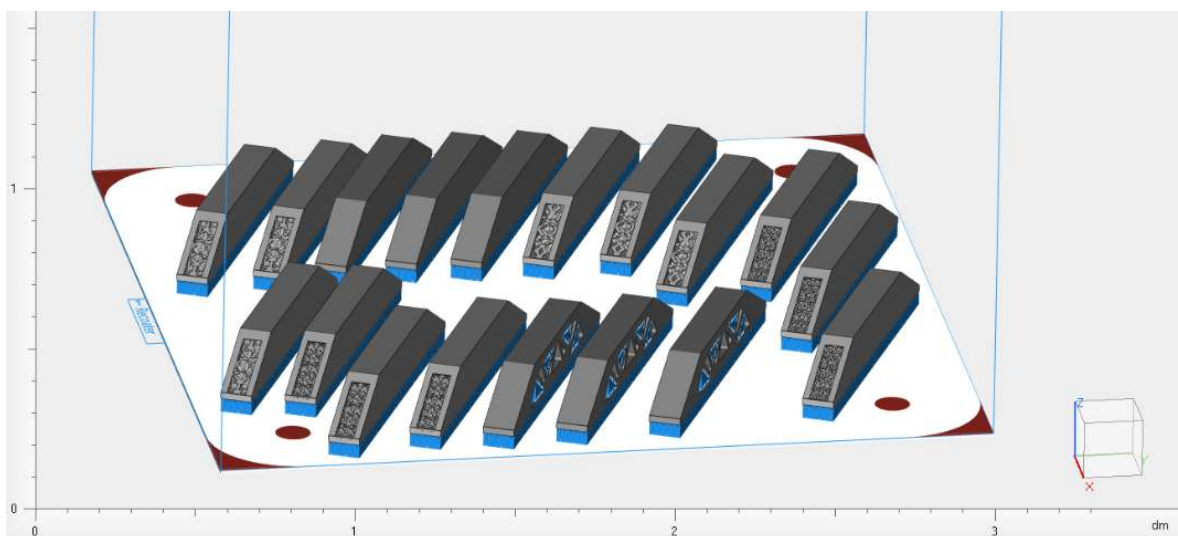
Obrázek 36 Navrhnuté vzorky mřížkových struktur v programu Materialise Magics 23. Zleva: octet truss (6mm), octet truss (3mm), rhombic dodecahedron (6mm) a rhombic dodecahedron (3mm)

Na obrázku 36 jsou na levé straně dva vzorky s mřížkovou strukturou octet truss. Na pravé straně jsou dva vzorky, které jsou tvořeny mřížkovou strukturou rhombic dodecahedron. Použil jsem pouze dva rozměry jednotkové buňky a to z toho důvodu, aby počet buněk vycházel přes šířku vzorku na celá čísla. Vzorky s drobnější strukturou na obrázku 34 mají velikost jednotkové buňky 3 mm ve všech směrech a jelikož tloušťka stěn obálky je na každé straně 2 mm, tak přes šířku jádra jsou tedy vedle sebe umístěny dvě periodizované jednotkové buňky. Vzorky s hrubší strukturou mají velikost jednotkové buňky 6 mm a přes celou šířku jádra je tedy vždy jen jedna jednotková buňka dané struktury.



Obrázek 37 Všechny 5 typů vzorků pro porovnání s topologicky optimalizovanou strukturou

Na obrázku 37 je vidět všech 5 typů vzorků u kterých dojde k porovnávání s topologicky optimalizovaným vzorkem. Jmenovitě jsou to tedy octet-truss s jednotkovou buňkou 6 mm a objemem 8337 mm^3 , octet-truss s jednotkovou buňkou 3 mm a objemem 8346 mm^3 , rhombic dodecahedron s buňkou 6 mm a objemem 8367 mm^3 a rhombic dodecahedron s buňkou 3 mm a objemem 8368 mm^3 . Kromě plného tělesa, u kterého pro nás není objem tak důležitý, mají všechny čtyři navrhnuté struktury požadující objem. Všechny tyto vzorky jsou tedy méně objemné, než topologicky optimalizovaný vzorek (8599 mm^3).



Obrázek 38 Rozmístění vzorků na stavební paletě o velikosti 250 mm x 250 mm

Na obrázku 38 je vidět rozmístění všech osmnácti vzorků. Pro zpřesnění výsledků byl každý z šesti typů vzorků vytvořen třikrát. Na tomto obrázku lze také vidět červeně vyznačená místa, kterým je se nutné při rozmisťování vzorků na paletě vyhnout. Modrou barvou jsou vyznačeny tzv. podpory, které je nutné po dokončení součásti odstranit.

8.2 Aditivní výroba zkušebních vzorků

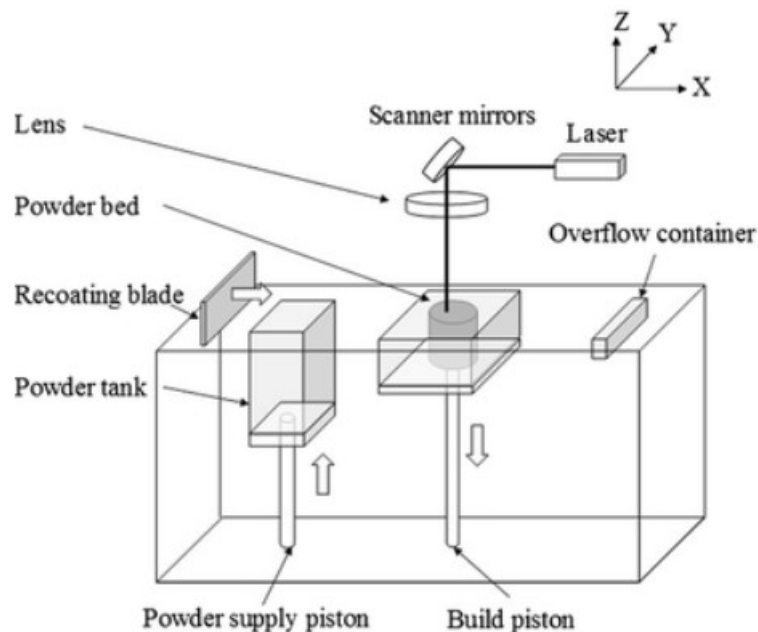
Při výrobě byla použita aditivní technologie DMLS (Direct Metal Laser Sintering) a byl použit materiál AlSi10Mg. Stroj, na kterém byla provedena výroba je Concept Laser M2 Cusing a nachází se na Fakultě strojní ČVUT v Praze. Samotný tisk trvá řádově desítky hodin.



Obrázek 39 Concept Laser M2 Cusing [75]

Concept Laser M2 Cusing má laser s výkonem 400 W a průměr ohniska svazku se pohybuje od 50 μm do 500 μm . Maximální rychlost pohybu laseru je 4,5 m/s. Parametry se však liší podle toho, zda vytváří podpory, konturu či jádro. Tento stroj umožňuje maximální objem stavby 250x250x350 mm^3 . Při stavbě při překročení úhlu 45° je nutné využít podpor, které je třeba definovat v softwaru již před samotným tiskem. Jelikož celý proces tisku probíhá v inertní atmosféře, je nutné před samotným tiskem zkontrolovat několik věcí. Je

třeba především zkontrolovat, zda nanašeč je vodorovně srovnán s paletou a zda je správně uchycena stavební paleta. Před samotným tiskem je také důležité doplnit do zásobníku sypký prášek materiálu, který bude nanášen na paletu. Technologie a stroj umožňuje využití starého prášku z předchozí výroby. Je však nutné tento prášek prosít a poté popřípadě doplnit práškem novým. Pokud je vše připravené, je možné vytvořit inertní atmosféru. V našem případě byl do atmosféry postupně přidáván dusík. Tento proces trvá několik desítek minut, proto je dobré se před tímto procesem přesvědčit, zda je tiskárna opravdu připravena pro proces výroby. Concept Laser M2 Cusing je vybaven třemi komorami. Stavební komorou, zásobníkovou komorou pro doplňování prášku a komorou, která slouží k přepadu zbylého materiálu.



Obrázek 40 Schéma procesu DMLS/SLM [80]

Na obrázku 40 lze vidět nanašeč (recoating blade), jež nabírá prášek, kterým zahrne stavební paletu. Prášek, který zbyde, je stěrkou zhrnut do přepadu a je možné ho dále používat. Vždy kdy dojde k natavení vrstvy, píست se stavební paletou se posune dolů o vzdálenost jedné vrstvy. Naopak píست se zásobníkem se posune nahoru a vytlačí ze zásobníku množství prášku, které je nutně potřebné opět nanést na stavební paletu pro vytvoření další vrstvy. Tento cyklus se opakuje do doby, než je nanesena a natavena poslední vrstva. Laser taví prášek pouze na místech dle CAD dat. Na místech, kde nedochází ke stavbě, sypký

prášek zůstává. Postupným posouváním po vrstvách dochází k tomu, že hotový výrobek je téměř celý zasypán v sypkém prášku.

Ve chvíli, kdy byl dokončen tisk vzorků bylo třeba zasypanou paletu vytáhnout z prášku a očistit ji. Prášek je velmi nebezpečný nejen při vdechnutí, ale také při kontaktu s pokožkou. Z tohoto důvodu bylo důležité dodržet bezpečnostní opatření a celý tento proces jsem absolvoval ve speciálním obleku s maskou na obličeji. Po očištění stavební palety bylo potřeba ve vodě propláchnout všechny vzorky od prášku, který zůstal uvnitř struktur.

Tabulka 2 Parametry pro vytváření podpor, kontury a jádra

	Power [W]	Speed [mm/s]	Spot size [mm]	Offset to original contour [mm]	Trace spacing
Support	200	1600	0,05	0,1	-
Skin	200	1250	0,1	0,175	-
Core	370	1400	0,19	-	0,112

8.3 Žihání na odstranění pnutí

Když už byly vzorky očištěny a propláchnuté ve vodě, byly vloženy do pece za účelem žihání na odstranění pnutí. Dle pokynů výrobce byly vzorky během 3 hodin zahřáty na 550 °C a na této teplotě zůstaly 6 hodin. Ochlazení proběhlo na vzduchu. Dle výrobce je možné ochlazení provést i v peci.



Obrázek 41 Aditivně vytvořené jednotlivé typy vzorků.

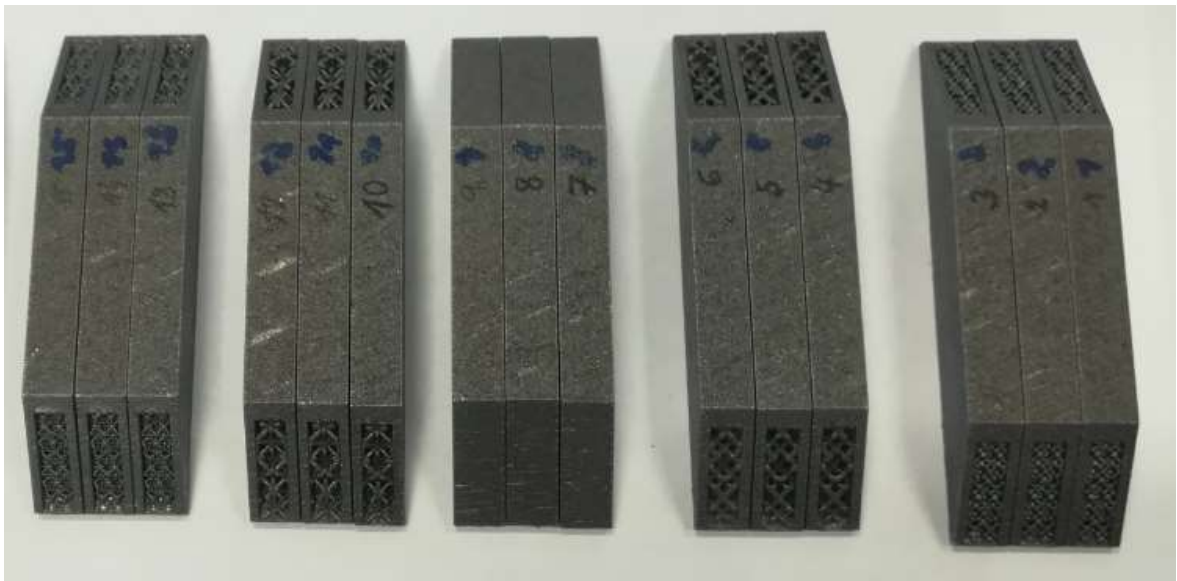
Na obrázku 41 zleva: topologicky optimalizovaný vzorek, struktury rhombic dodecahedron (buňka 3 mm^3 a 6 mm^3), plný vzorek, struktury octet truss (buňka 3 mm^3 a 6 mm^3)

8.4 Odstranění podpor

Po očištění palety a následném žihání, bylo nutné odřezat vzorky od stavební palety. Tento proces byl proveden strojní pilou a následně byly ručně odstraněny malé zbytky podpor. Poté byly vzorky připraveny na zkoušku tříbodovým ohybem ve stavu tzv. as build.

8.5 Značení vzorků

Jednotlivé vzorky jsou označeny od 1 do 18 dle toho, jak byly umístěny na stavební paletu. Stejně struktury na paletě byly vždy vedle sebe. Značení jednotlivých vzorků, pro lepší přehlednost v této práci, je zobrazeno v následující tabulce. U malých jednotkových buněk může docházet k potížím s vysypáním prášku ze vnitřní části struktury. To se může promítnout do hodnot hmotnosti vzorku. Vzhledem však k vlastnostem sypkého prášku, by nemělo docházet k velkému ovlivnění únosnosti.



Obrázek 42 Označení vzorků dle umístění na paletě

Tabulka 3 Parametry a značení jednotlivých vzorků

Číslo vzorku	Struktura	Velikost buňky [mm ³]	Hmotnost [g]	Označení vzorku
1	Rhombic dodecahedron	3	28,105	01_RD3
2	Rhombic dodecahedron	3	28,029	02_RD3
3	Rhombic dodecahedron	3	27,882	03_RD3
4	Rhombic dodecahedron	6	25,307	04_RD6
5	Rhombic dodecahedron	6	23,51	05_RD6
6	Rhombic dodecahedron	6	24,474	06_RD6
7	Plné těleso	-	31,818	07_PT
8	Plné těleso	-	31,847	08_PT
9	Plné těleso	-	31,88	09_PT
10	Octet truss	6	25,517	10_OT6
11	Octet truss	6	23,418	11_OT6
12	Octet truss	6	25,098	12_OT6
13	Octet truss	3	27,199	13_OT3
14	Octet truss	3	26,622	14_OT3
15	Octet truss	3	27,066	15_OT3
16	Topologické	-	23,242	16_TOP
17	Topologické	-	23,199	17_TOP
18	Topologické	-	23,217	18_TOP

8.6 Zkouška tříbodovým ohybem

Ohybová zkouška byla provedena na trhacím stroji LabTest Model 5.100SP1. Parametry stroje jsou uvedeny v tabulce č.3.

Tabulka 4 Parametry stroje Labtest Model 5.100SP1

Technická data	5.100SP1
Jmenovité zatížení [kN]	100
Max. zkušební rychlost [mm/min]	600
Přesnost řízení rychlosti [%]	±0,5
Rozlišení příčnicku [μm]	1
Tuhost rámu [mm/N]	1,6x 10 ⁻⁶
Rozpětí sil [kN]	500-600
Přesnost měření síly [%]	±0,3 z hodnoty v rozsahu
Přesnost dráhy [μm]	1 - ČSN EN ř513
Přesnost měření napětí [%]	±0,5 průtahoměru

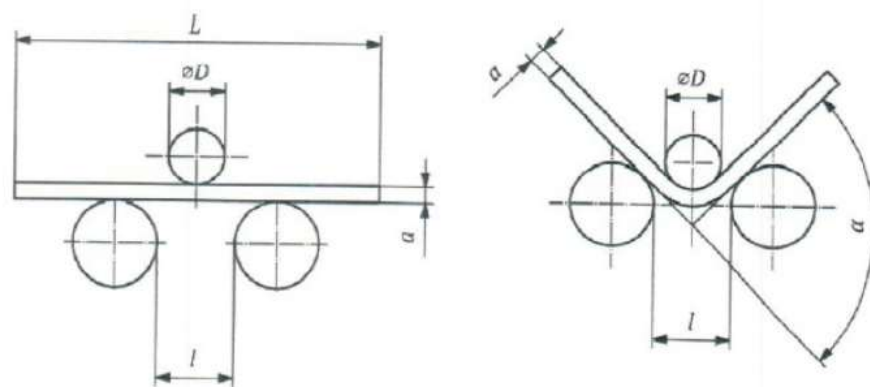


Obrázek 43 Výrobní štítek stroje



Obrázek 44 Trhací stroj LabTest 5.100SP1

Jelikož chci porovnat výsledky tříbodového ohybu mnou navržených vzorků se vzorky s topologickou optimalizací, je třeba uvažovat stejné podmínky, pro které tato topologie byla napočítána. Topologicky optimalizované vzorky byly napočítány pro podpory od sebe vzdálené 70 mm.



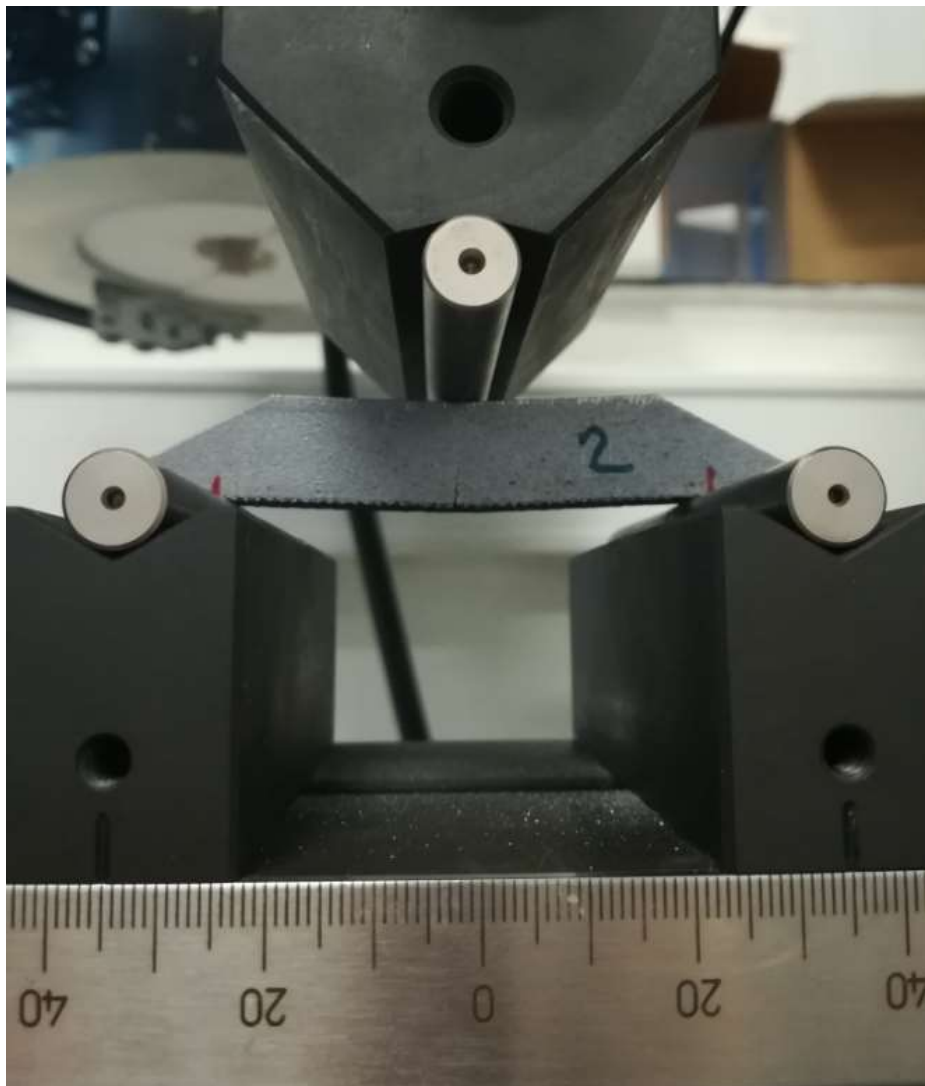
Obrázek 45 Schéma ohybové zkoušky

Výpočet vzdálenosti podpor:

$$l = (D + 3a) \pm \frac{a}{2}$$

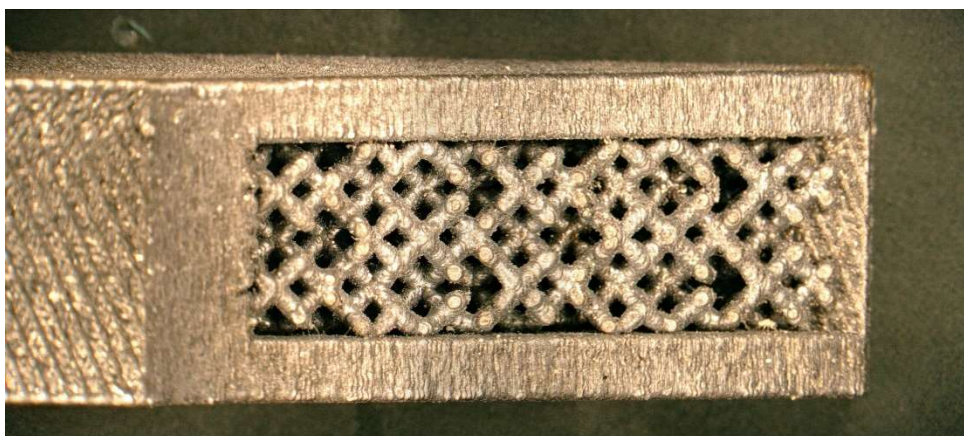
$$l = (10 + 3 \cdot 15) \pm \frac{15}{2} = 55 \pm 7,5 = \mathbf{47,5 \div 62,5 \text{ mm}}$$

Vzdálenost podpor u topologicky optimalizovaného tělesa je stanovena na 70 mm a rozmístění podpor vypočítané dle normy je v rozmezí od 47,5 mm do 62,5 mm. Aby bylo možné tato tělesa porovnávat s navrhnutými mřížkovými strukturami, bylo nutné ohybovou zkoušku provést se stejnými podmínkami. Zkouška třibodovým ohybem tedy nebyla provedena podle normy ČSN EN ISO 7438.



Obrázek 46 Zkouška třibodovým ohybem

8.6.1 Rhombic dodecahedron (3 mm³)



Obrázek 47 Struktura rhombic dodecahedron s velikostí jednotkové buňky 3 mm³

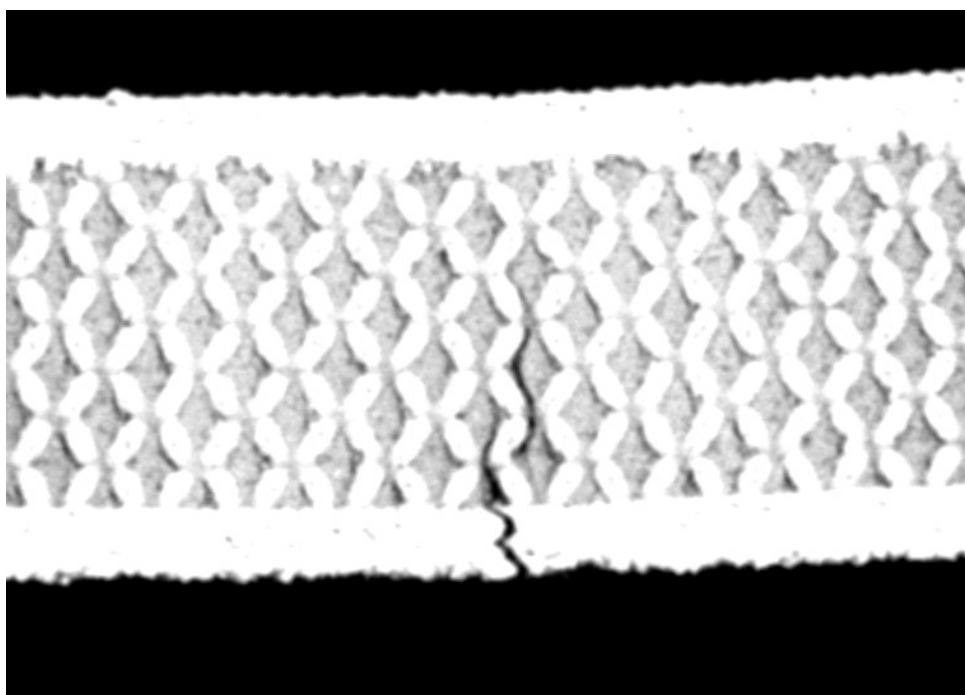
Tabulka 5 Naměřené a vypočtené hodnoty ze zkoušky ohybem pro vzorky RD3

Vzorek	Úhel ohybu α	Maximální ohybová síla [N]
01_RD3	5°1′	10 185,90
02_RD3	5°5′	10 099,40
03_RD3	5°1′	9 884,90
Aritmetický průměr ohybové síly		10 056,73
Směrodatná odchylka maximální ohybové síly		126,532

Vzorky se strukturou rhombic dodecahedron s velikostí jednotkové buňky 6 mm³ jsou označeny číslem 1,2 a 3. Maximální ohybová síla se nejvíce blížila hodnotě ohybové síly topologického vzorku. Na obrázku 49 lze vidět trhlinu, která se rozšiřovala dle kontury struktury.

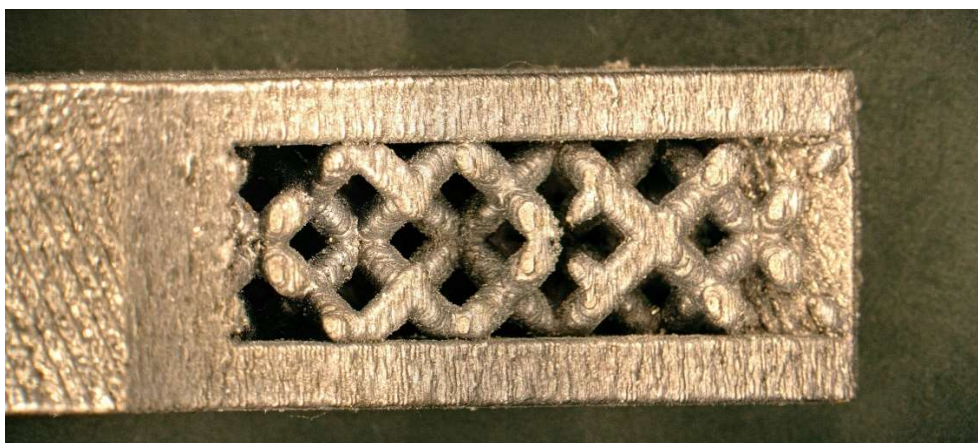


Obrázek 48 Trhlina u vzorku 01_RD3



Obrázek 49 Tomografický snímek trhliny u vzorku 03_RD3 v softwaru MyVGL 3.2.3

8.6.2 Rhombic dodecahedron (6 mm³)

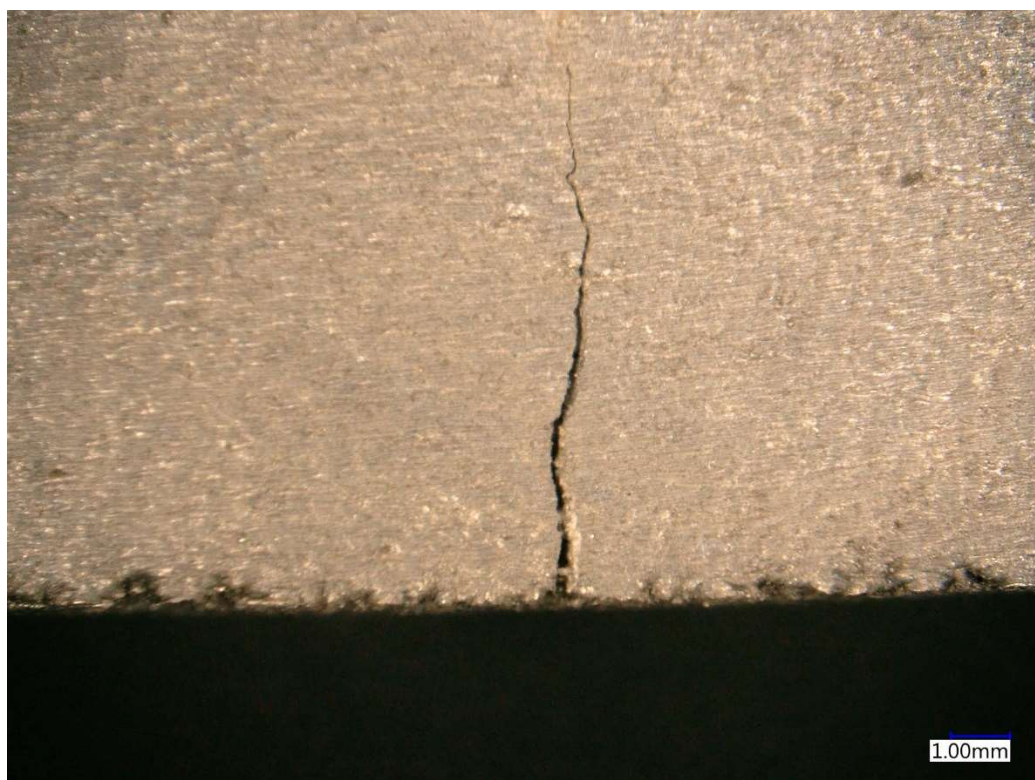


Obrázek 50 Struktura rhombic dodecahedron s velikostí jednotkové buňky 6 mm³

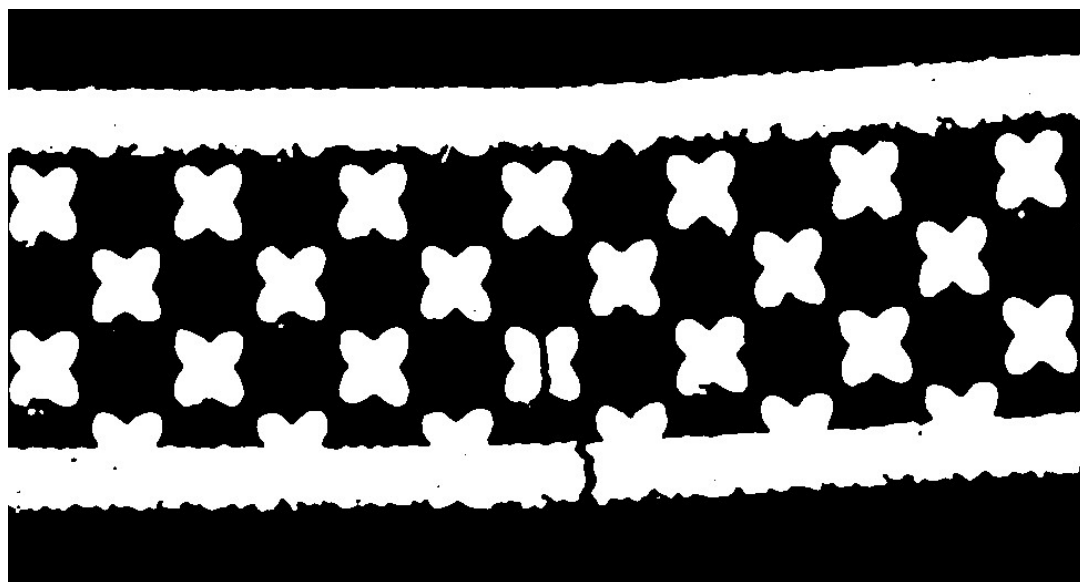
Tabulka 6 Naměřené a vypočtené hodnoty ze zkoušky ohybem pro vzorky RD6

Vzorek	Úhel ohybu α	Maximální ohybová síla [N]
04_RD6	5°19'	9 853,20
05_RD6	5°24'	9 615,70
06_RD6	5°18'	9 600,90
Aritmetický průměr ohybové síly		9 689,93
Směrodatná odchylka maximální ohybové síly		115,61

Vzorky se strukturou rhombic dodecahedron s velikostí jednotkové buňky 6 mm³ jsou označeny číslem 4,5 a 6. Hodnota maximální ohybové síly je ze všech vzorků druhá nejnižší. Tedy dvě nejnižší hodnoty ohybové síly vykazovaly struktury s větší jednotkovou buňkou.

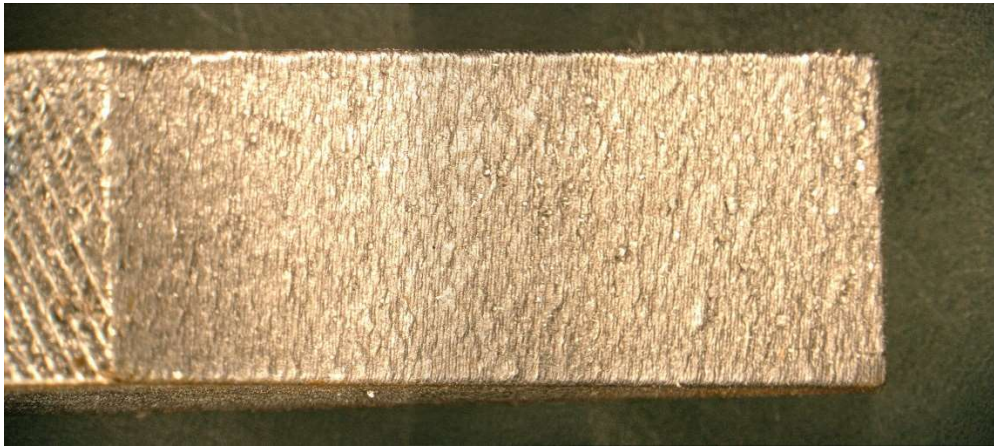


Obrázek 51 Trhlina u vzorku 04_RD6



Obrázek 52 Tomografický snímek trhliny u vzorku 05_RD6 v softwaru MyVGL 3.2.3

8.6.3 Plné těleso



Obrázek 53 Plné těleso

Tabulka 7 Naměřené a vypočtené hodnoty ze zkoušky ohybem pro vzorky PT

Vzorek	Úhel ohybu α	Maximální ohybová síla [N]
07_PT	5°25'	13 380,30
08_PT	5°46'	13 617,80
09_PT	5°22'	13 199,80
Aritmetický průměr ohybové síly		13 399,3
Směrodatná odchylka maximální ohybové síly		171,18

Zkušební vzorky plného tělesa jsou označeny číslem 7,8 a 9. Dle očekávání měly tyto vzorky nejlepší únosnost, ale také měly nejvyšší hmotnost.

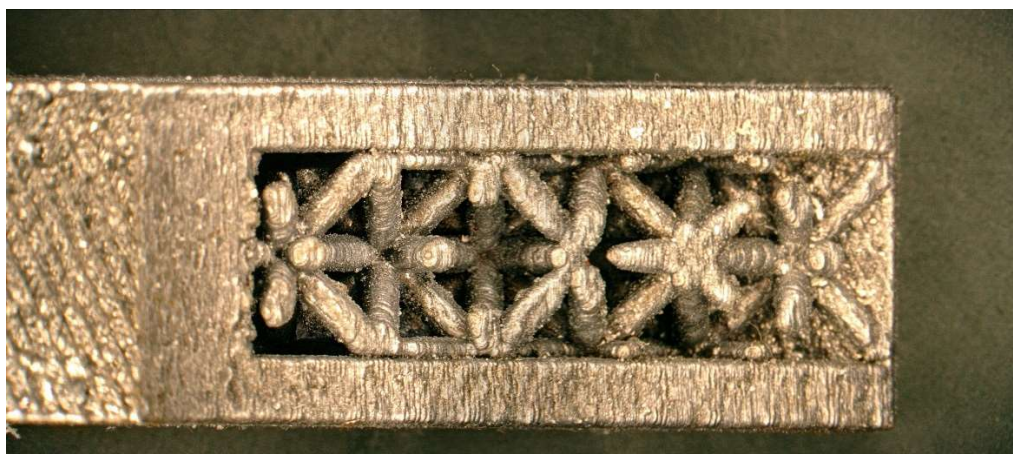


Obrázek 54 Trhlina u vzorku 07_PT



Obrázek 55 Tomografický snímek trhliny u vzorku 09_PT v softwaru MyVGL 3.2.3

8.6.4 Octet truss (6 mm³)



Obrázek 56 Struktura octet truss s velikostí jednotkové buňky 6 mm³

Tabulka 8 Naměřené a vypočtené hodnoty ze zkoušky ohybem pro vzorky OT6

Vzorek	Úhel ohybu α	Maximální ohybová síla [N]
10_OT6	4°59'	9 486,50
11_OT6	4°42'	9 169,20
12_OT6	5°39'	10 036,50
Aritmetický průměr ohybové síly		9 564,07
Směrodatná odchylka maximální ohybové síly		358,3

Vzorky se strukturou octet truss s velikostí jednotkové buňky 3 mm³ jsou označeny číslem 10,11 a 12. Tyto vzorky vykazovaly nejnižší průměrnou ohybovou sílu. Mají však velký rozptyl hodnot jak sil, tak i úhlu ohybu. Tyto rozdíly mohou být částečně ovlivněny porezitou materiálu či nepřesným umístěním vzorku při zkoušce tříbodovým ohybem.

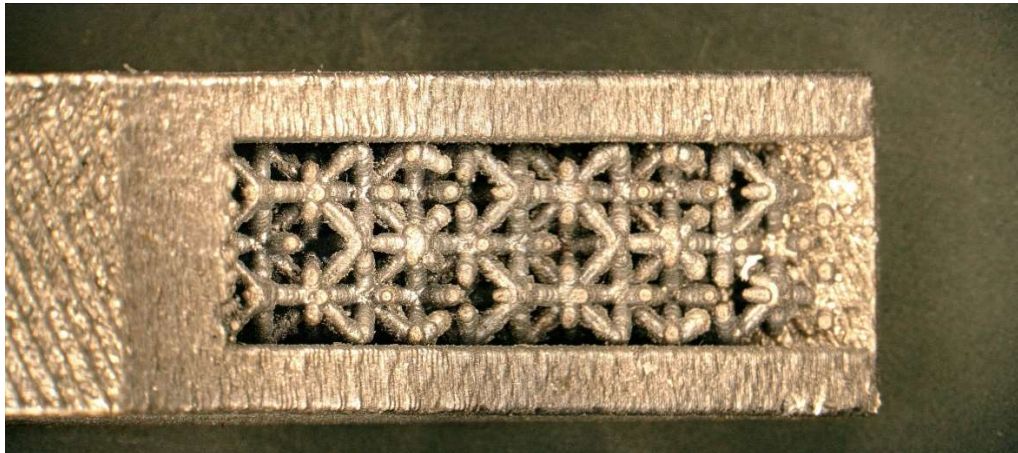


Obrázek 57 Trhlina vzorku 10_OT6



Obrázek 58 Tomografický snímek trhliny u vzorku 12_OT6 v softwaru MyVGL 3.2.3

8.6.5 Octet truss (3 mm³)



Obrázek 59 Struktura octet truss s velikostí jednotkové buňky 6 mm³

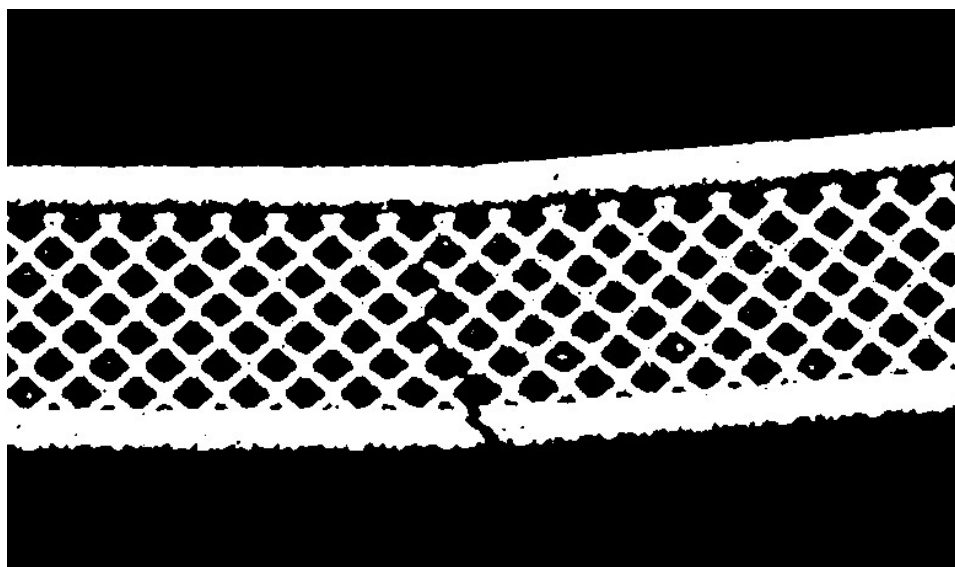
Tabulka 9 Naměřené a vypočtené hodnoty ze zkoušky ohybem pro vzorky OT3

Vzorek	Úhel ohybu α	Maximální ohybová síla [N]
13_OT3	5°7'	10 629,60
14_OT3	5°7'	9 788,60
15_OT3	5°11'	9 416,00
Aritmetický průměr ohybové síly		9 944,73
Směrodatná odchylka maximální ohybové síly		507,60

Vzorky octet truss s velikostí jednotkové buňky 3 mm³ jsou označeny číslem 13,14 a 15. Hodnoty maximální ohybové síly měly v tomto případě největší rozptyl. Oproti vzorkům se stejnou strukturou, ale s větší jednotkovou buňkou, je směrodatná odchylka ještě vyšší. Tak jako u předešlého případu mohou být tyto rozdíly způsobeny porezitou materiálu či nepřesným umístěním při ohybové zkoušce.

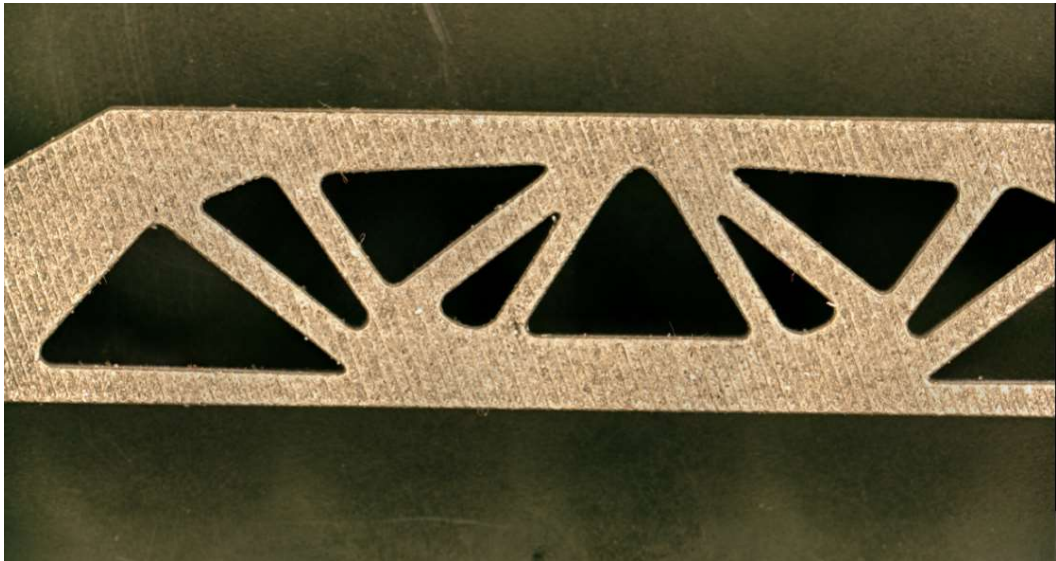


Obrázek 60 Trhlina vzorku 13_OT3



Obrázek 61 Tomografický snímek trhliny u vzorku 13_OT3 v softwaru MyVGL 3.2.3

8.6.6 Topologicky optimalizované těleso

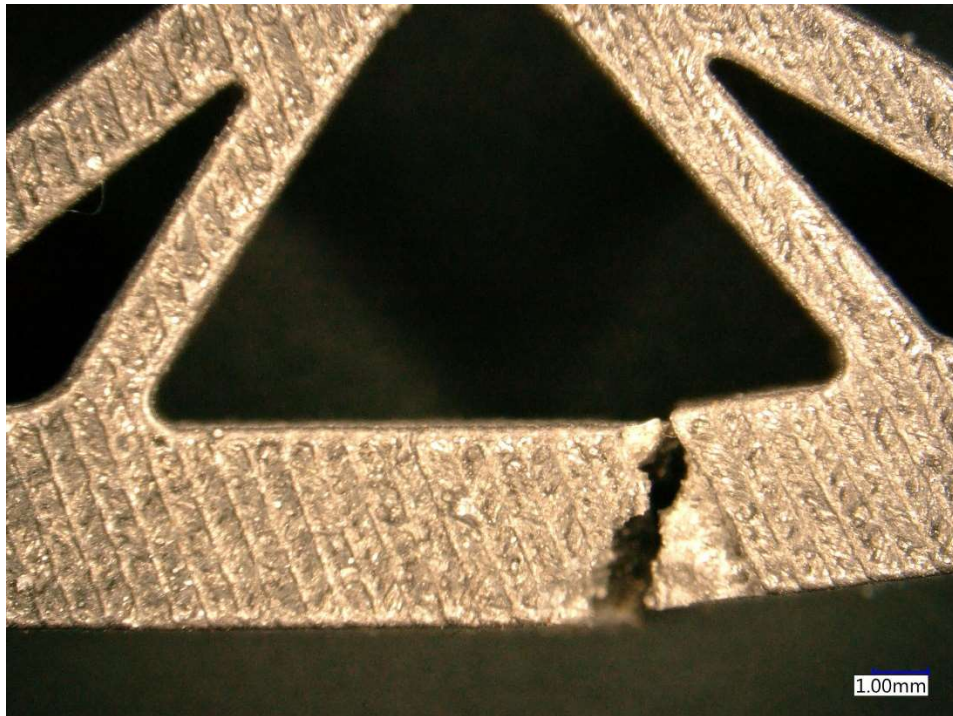


Obrázek 62 Topologicky optimalizovaný vzorek

Tabulka 10 Naměřené a vypočtené hodnoty ze zkoušky ohybem pro vzorky TOP

Vzorek	Úhel ohybu α	Maximální ohybová síla [N]
16_TOP	5°21'	10 575,50
17_TOP	5°39'	10 690,40
18_TOP	6°3'	10 922,90
Aritmetický průměr ohybové síly		10 729,6
Směrodatná odchylka maximální ohybové síly		144,51

Topologicky optimalizované vzorky jsou označeny číslem 16,17 a 18. Z odlehčených těles vykazovaly topologické vzorky nejvyšší hodnoty maximální ohybové síly a zároveň měly také nejnižší hmotnost.



Obrázek 63 Trhlina vzorku 18_TOP

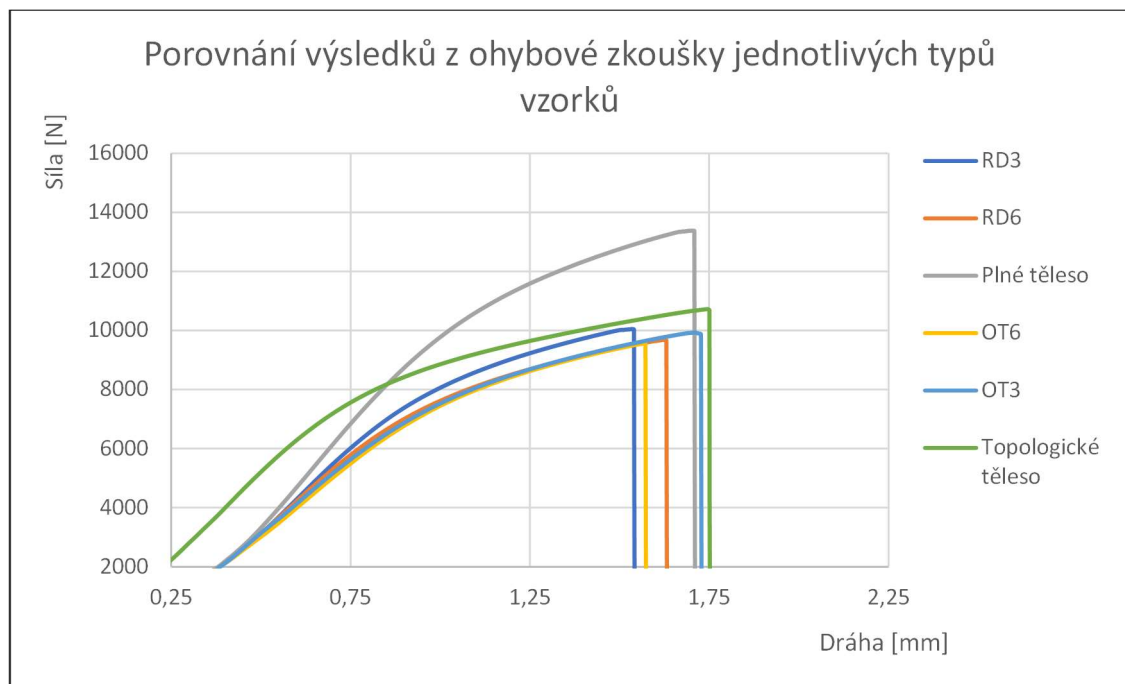


Obrázek 64 Tomografický snímek trhliny u vzorku 16_TOP v softwaru MyVGL 3.2.3

8.7 Vyhodnocení výsledků

Hlavním cílem této diplomové práce bylo porovnat vytvořené vzorky s topologicky optimalizovanými vzorky a dokázat, zda jsou tyto vzorky porovnatelné.

Dle očekávání byla maximální ohybová síla u plných vzorků nejvyšší. Tyto vzorky mají však také nejvyšší hmotnost a ve srovnání s topologicky optimalizovaným vzorkem je průměrný rozdíl 37,16 %. Maximální hodnota ohybové síly byla naměřena u plného tělesa 13 399,3 N a u tělesa s optimalizovanou topologií 10 729,6 N. V grafu a tabulce níže lze vidět, že z navržených mřížkových struktur vyšly v ohybové zkušce nejlépe vzorky se strukturou rombického dodekaedru s jednotkovou buňkou 3 mm³. Hodnota průměrné maximální ohybové síly byla naměřena 10 056,73 N.



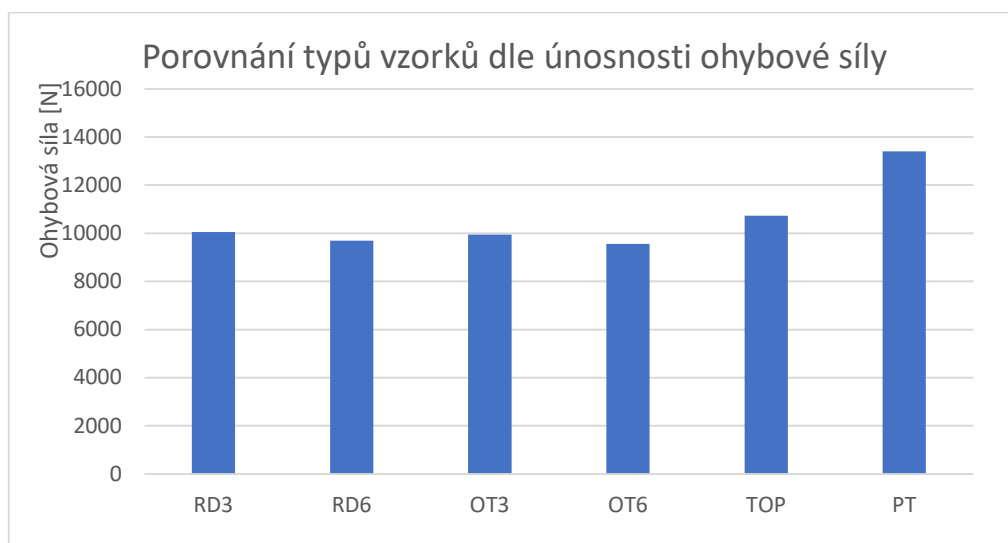
Graf 1 Výsledky ohybové zkoušky jednotlivých typů vzorků

Topologicky optimalizovaný vzorek měl únosnost ohybové síly téměř o čtvrtinu horší než plné těleso. Topologickou optimalizací však došlo ke zmenšení váhy vzorku, a to průměrně z 31,85 gramu na 23,22 gramu.

Tabulka 11 Naměřené a vypočítané hodnoty jednotlivých typů vzorků

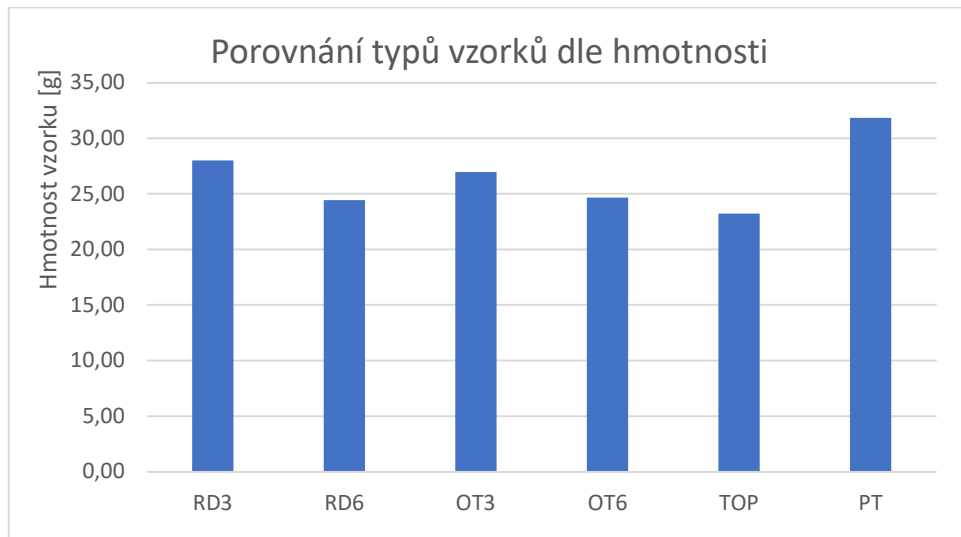
Struktura	RD3	RD6	OT3	OT6	TOP	PT
Průměrná hodnota ohybové síly [N]	10 056,73	9 689,93	9 944,73	9 564,06	10 729,6	13 399,3
Procentuální rozdíl maximálních ohybových sil vzorků a topologického tělesa [%]	-6,27	-9,69	-7,31	-10,86	0	24,88
Průměrná hodnota hmotnosti typového vzorku [g]	28,01	24,43	26,96	24,68	23,22	31,85
Procentuální rozdíl hmotnosti vzorků a topologického tělesa [%]	20,61	5,22	16,12	6,28	0	37,16

Rozdíl hmotností navržených vzorků s mřížkovými strukturami a topologickým tělesem se pohyboval v rozmezí od 5,22% do 20,61%. Jak již bylo zmíněno, tak z navržených mřížkových struktur vyšly v ohybové zkušce nejlépe vzorky se strukturou rombického dodekaedru s jednotkovou buňkou 3 mm³ a za nimi vzorky se strukturou octet truss s jednotkovou buňkou 3 mm³. Lepší výsledky ohybové zkoušky tedy měly vzorky s menšími buňkami. Tyto struktury však ale mají vyšší hmotnost.



Graf 2 Porovnání vzorků dle únosnosti ohybové síly

Při přihlédnutí k únosnosti vzorků, a především k hmotnosti vzorků, má nejlepší výsledky struktura rombického dodekaedru s jednotkovou buňkou 6 mm^3 . Od topologicky optimalizovaného vzorku se hmotnostně liší o 5,22% a rozdíl v únosnosti je necelých 10%. Pokud tedy uvažujeme situaci, kde bude působit jednoduchý typ namáhání, hmotnostní rozdíl je řádově pouze několik procent a vzorky jsou mezi sebou porovnatelné.



Graf 3 Porovnání vzorků dle hmotnosti

9 ZÁVĚR

Teoretická část práce se zpočátku zabývá aditivní výrobou a jejím historickým vývojem. Jsou zde zmíněny obecné výhody a nevýhody, které tento způsob výroby přináší a také možnosti využití v jednotlivých průmyslových oblastech. Dále jsem vytvořil přehled technologií aditivní výroby a jednotlivě jsem popsal jejich principy a provedení. Součástí experimentální části této práce bylo vytvoření zkušebních vzorků s odlehčenými strukturami. Odlehčené struktury lze rozdělit na stochastické neboli nahodilé a na struktury nestochastické. Navržené vzorky, které byly v rámci této práce vytvořeny, mají nestochastickou strukturu. Právě nestochastickým strukturám, a to konkrétně strukturám s periodickými buňkami, je věnovaná velká část této práce. Jsou zde zmíněny používané způsoby a principy, kterými se dosahuje požadovaných tvarů periodických buněčných struktur. Dále byly popsány geometrie některých komerčně používaných struktur a struktur, které byly vybrány pro aditivní výrobu mých vzorků. Tyto vzorky byly srovnávány se vzorky s topologicky optimalizovanou geometrií při zkoušce tříbodovým ohybem. Vlastní kapitola je věnována topologii, kde je popsána obecná topologie, její druhy a způsoby optimalizování. Poslední kapitola teoretické části se zabývá zkouškou tříbodovým ohybem dle české normy.

V rámci této diplomové práce byly navrženy čtyři typy zkušebních vzorků s mřížkovou strukturou, které byly hmotnostně porovnatelné s tělesem tělesu, u kterého byla napočítána topologická optimalizace. Pro aditivní výrobu bylo připraveno 6 typů vzorků, kde každý typ byl zastoupen třemi vzorky pro zpřesnění výsledků ohybové zkoušky. Jmenovitě jsou to topologicky optimalizované vzorky, plné vzorky, vzorky s mřížkovou strukturou rhombic dodecahedron a vzorky se strukturou octet truss. U vzorků s mřížkovou strukturou byly dále použity dvě velikosti jednotových buněk a to 3 mm^3 a 6 mm^3 . Celkový počet vzorků je tedy 18.

Aditivní výroba vzorků byla provedena na stroji Concept Laser M2 Cusing a byl použit materiál AlSi10Mg. Z důvodu nevhodně nastavených podpor při prvním tisku, došlo ke zdeformování vzorků a výsledky ohybové zkoušky by nebyly relevantní. Byl tedy proveden druhý tisk, který byl úspěšný. Po vytažení ze stavební komory byly vzorky žíhány na odstranění pnutí dle pokynů výrobce. Vzorky byly ochlazeny na vzduchu a strojní pilou byly odstraněny podpory. Poté byly jednotlivé vzorky zváženy a byly připraveny na

zkoušení ohybem tzv. as build. Což znamená, že vzorky jsou takové, jak byly navrženy a nedošlo po výrobě k dalším změnám geometrie.

Po provedení zkoušky tříbodovým ohybem byla provedena analýza vzorků. Trhliny byly nejdříve zkoumány pomocí mikroskopu. Následně byla provedena tři měření, vždy po šesti vzorcích, nedestruktivní metodou testování - počítačovou tomografií.

Hlavním cílem mojí diplomové práce bylo porovnání navržených mřížkových struktur s topologicky napočítaným tělesem při ohybovém zatížení. Největší maximální ohybovou sílu do porušení, dle očekávání, vykazovaly plné vzorky. Jsou to vzorky, které mají však nejvyšší hmotnost. Topologicky optimalizovaný vzorek měl téměř o čtvrtinu horší únosnost než plné těleso a to 10 729,6 N. Topologická optimalizace byla napočítána tak, aby byla snížena hmotnost cca o 40%. Rozdíl průměrných hmotností navržených vzorků s mřížkovými strukturami a topologickým tělesem se pohyboval v rozmezí od 5,22% do 20,61%. V rámci jednotlivých typů struktur, měly mřížky s jednotkovou buňkou 6 mm³ mnohem menší hmotnost než mřížky s jednotkovou buňkou 3 mm³. Konkrétně u struktury rombického dodekaedru přes 15% z hmotnosti topologického tělesa a u struktury octet truss téměř 10% z hmotnosti topologického tělesa. Naopak únosnost byla u struktur s menší jednotkovou buňkou lepší než u struktur s větší jednotkovou buňkou. V rámci jednotlivých mřížkových struktur se síly s rozdílnými velikostmi buněk od sebe lišily v obou případech pouze o cca 3,5 %. Ze vzorků s mřížkovými strukturami měly nejvyšší hodnoty sil vzorky se strukturou rombického dodekaedru s jednotkovou buňkou 3 mm³ a to 10 056,73 N. Naopak nejnižší hodnoty vykazovaly vzorky se strukturou octet truss s jednotkovou buňkou 6 mm³ a s průměrnou hodnotou 9 564,06 N. Při přihlédnutí k únosnosti, ale především k hmotnosti vzorků, měly nejlepší výsledky vzorky se strukturou rombického dodekaedru s jednotkovou buňkou 6 mm³. Od topologicky optimalizovaného vzorku se hmotnostně liší o 5,22% a rozdíl v únosnosti ohybové síly je necelých 10%.

Napočítání a navržení topologicky optimalizovaných těles je časově i finančně náročnější, než bylo navržení vzorků s mřížkovými strukturami. Jedním z nákladů při topologické optimalizaci je software. Pokud budou tyto vzorky s mřížkovými strukturami použity v aplikaci pro jednoduchý typ namáhání a bez zvýšených nároků na únosnost, dojde k výraznému odlehčení těles oproti tělesu plnému. K odlehčení tedy dojde bez nutnosti počítat a navrhovat topologii těles. Hmotnost navržených vzorků se od topologického tělesa liší řádově pouze o několik procent a jsou tedy spolu porovnatelné.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. In: . [cit. 2019-10-20]
- [2] SINGAMNENI, Sarat, Yifan LV, Andrew HEWITT, Rodger CHALK, Wayne THOMAS a David JORDISON. *Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review* [online]. In: . DOI: 10.4172/2329-6542.1000214. In: . [cit. 2019-10-20]
- [3] LIGON, SC, R LISKA, J STAMPFL, M GURR a R MÜLHAUPT. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. [online]. In: . 2017. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074. In: . [cit. 2019-10-20]
- [4] KOLLATAJ, Julian. *Additive Manufacturing (3D Printing) - A Potential Future for Tennis Racket Production* [online]. In: . [cit. 2019-10-20]
- [5] BENSOUSSAN, Hannah. *The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today* [online]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/> In: . [cit. 2019-10-20]
- [6] GAO, Wei, Yunbo ZHANG, Devarajan RAMANUJAN, et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design Volume 69* [online]. Volume 69. 2015, s. 65-89. DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001. In: . [cit. 2019-10-20]
- [7] CHEN, Lian, Young HE, Yingxin YANG, Shiwei NIU a Haitao REN. *The research status and development trend of additive manufacturing technology*. 2016. DOI: 10.1007/s00170-016-9335-4. In: . [cit. 2019-10-20]
- [8] JOSHI, Sunil C. a Abdullah A. SHEIKH. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping*. 2015, s. 175-185. In: . [cit. 2019-10-20]
- [9] SHAHRUBUDIN, N., T.C. LEE a R. RAMLAN. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*. 2019, , 1286-1296. In: . [cit. 2019-10-20]

- [10] NIAKI, Mojtaba Khorram a Fabio NONINO. *The impacts of Additive Manufacturing on firms' competitiveness: An empirical investigation*. 2015. In: . [cit. 2019-10-20]
- [11] Optimising Engine Design With Metal Additive Manufacturing. In: *Industry Europe* [online]. 2019. Dostupné z: <https://industryeurope.com/optimising-engine-design-with-metal-additive-manufacturing/> In: . [cit. 2019-10-20]
- [12] LIPTON, Jeffrey I., Meredith CUTLER, Franz NIGL, Dan COHEN a Hod LIPSON. Additive manufacturing for the food industry. *Trends in Food Science & Technology* 2015, s. 114-123. In: . [cit. 2019-10-20]
- [13] VENTOLA, C. Lee. *Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses*. 2014. In: . [cit. 2019-11-05]
- [14] REED, Warren a Kamarul A. ABDULLAH. 3D printing in medical imaging and healthcare services. *Journal of Medical Radiation Sciences*. 2018. In: . [cit. 2019-11-05]
- [15] YAN, Qian, Hanhua DONG, Jin SU, Jianhua HAN, Bo SONG, Qingsong WEI a Yusheng SHI. A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications. *Engineering* [online]. Volume 4, Issue 5. 2018, s. 729-742. In: . [cit. 2019-11-05]
- [16] HAGER, Izabela, Anna GOLONKA a Roman PUTANOWICZ. *3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?*. Cracow University of Technology. In: . [cit. 2019-11-05]
- [17] BUCHANAN, C. a L. GARDNER. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures* [online]. 2019, (Volume 180), 332-348. In: . [cit. 2019-11-05]
- [18] *MX3D*. Dostupné z: <https://mx3d.com/projects/mx3d-bridge/> In: . [cit. 2019-11-05]
- [19] RICHARDOT, Amandine. *3D printed fashion: Why is additive manufacturing interesting for fashion?* [online]. In: . 2018. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2018/01/24/3d-printed-fashion-why-is-additive-manufacturing-interesting-for-fashion/> In: . [cit. 2019-11-05]

- [20] FOO, Chuan Yi, Hn LIM, Mohd Adzir MAHDI, M. Haniff WAHID a Huang Nay MING. *Three-Dimensional Printed Electrode and Its Novel Applications in Electronic Devices*. 2019. In: . [cit. 2019-11-05]
- [21] LEE, Jeongwoo, Ho-Chan KIM, Jae-Won CHOI a In Hwan LEE. *A review on 3D printed smart devices for 4D printing*. 2017. ISSN 2288-6206. In: . [cit. 2019-11-05]
- [22] NOE, Rain. *Production Methods: What's the Difference Between Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Laser Melting and LaserCusing?* [online]. In: . 2014. [cit. 2019-11-05] Dostupné z: <http://www.core77.com/posts/26457/Production-Methods-Whats-the-DifferenceBetween-Selective-Laser-Sintering-Direct-Metal-Laser-Sintering-Laser-Melting-andLaserCusing>
- [23] REDWOOD, Ben. Additive Manufacturing Technologies: An Overview. In: <https://www.3dhubs.com> [online]. In: . [cit. 2019-11-05] Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/>
- [24] HÄLLGREN, Sebastian, Jens EKENGREN a Lars PEJRYD. *(Re)Design for Additive Manufacturing*. In: . s. 246-251. ISSN 2212-8271. [cit. 2019-11-05]
- [25] *Additive Manufacturing Overview* [online]. West Conshohocken [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.astm.org/industry/additive-manufacturing-overview.html>
- [26] DEHGHANGHADIKOLAEI, Amir, Navid NAMDARI, Behrouz MOHAMMADIAN a Behzad FOTOVVATI. Additive Manufacturing Methods: A Brief Overview. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 123-131. ISSN 2394-2630. In: . [cit. 2019-11-11]
- [27] JANOVEC, Martin. *Užitné vlastnosti výrobků připravených pomocí technologie 3D tisku*. Zlín, 2019. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. In: . [cit. 2019-11-11]
- [28] KADRY, Hossam, Soham WADNAP, Changxue XU a Fakhrul AHSAN. Digital light processing (DLP) 3D-printing technology and photoreactive polymers in fabrication of modified-release tablets. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2019, (Volume 135), 60-67. DOI: 10.1016/j.ejps.2019.05.008. In: . [cit. 2019-11-11]

- [29] WARE, Henry Oliver T., Adam C. FARSEED, Cheng SUN , Guillermo AMEER a Evan U. BAKER. Fabrication Speed Optimization for High-resolution 3D-printing of Bioresorbable Vascular Scaffolds. *Procedia CIRP*. 2017, (Volume 65), 131-138. In: . [cit. 2019-11-11]
- [30] TUMBLESTON, John R., David SHIRVANYANTS, Nikita ERMOSHKIN, et al. *Continuous liquid interface production of 3D objects*. 2015, (Vol 347), 1349-1352. DOI: 10.1126/science.aaa2397. In: . [cit. 2019-11-15]
- [31] SUN, Q., Gulzar RIZVI, C.T. BELLEHUMEUR a Peihua GU. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. In: *Rapid Prototyping Journal*. DOI: 10.1108/13552540810862028. In: . [cit. 2019-11-15]
- [32] TRUBY, RL a JA LEWIS. *Printing soft matter in three dimensions*. In: DOI: 10.1038/nature21003. In: . [cit. 2019-11-15]
- [33] SYCKS, Dalton, Sungmin HONG, Hon Fai CHAN, et al. *3D Printing of Highly Stretchable and Tough Hydrogels into Complex, Cellularized Structures*. In: . DOI: 10.1002/adma.201501099. In: . [cit. 2019-11-15]
- [34] PETRIE, Edward M. *3D Printing / Additive Manufacturing Using Polymers - Complete Guide* [online]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/3d-printing-and-additive-manufacturing-polymers-and-processes#content>
- [35] NI, J., H. LING, S. ZHANG, et al. Three-dimensional printing of metals for biomedical applications. In: *Materials Today Bio* [online]. Volume 3. 2019. DOI: 0.1016/j.mtbio.2019.100024. In: . [cit. 2019-11-15]
- [36] ZHANG, Lei. Characteristics of drop-on-demand droplet jetting with effect of altered geometry of printhead nozzle. In: *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. Volume 298. 2019. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111591. In: . [cit. 2019-11-17]
- [37] WANG, Xi, Wallace W. CARR, David G. BUCKNALL a Jeffrey F. MORRIS. *Drop-on-demand drop formation of colloidal suspensions* [online]. In: . s. 17-26. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.09.001. [cit. 2019-11-17]
- [38] TRAN, Thang Q., Amutha CHINNAPPAN, Jeremy Kong Yoong LEE, et al. *3D Printing of Highly Pure Copper* [online]. In: . 2019. [cit. 2019-11-17]

- [39] *Multi Jet Fusion 3D Printers* [online]. In: . [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://www.3dprintingstudios.com/mjf-multi-jet-fusion/>
- [40] O'CONNOR, Heather, Andrew Nigel DICKSON a Denis P DOWLING. *Evaluation of the mechanical performance of polymer parts fabricated using a production scale multi jet fusion printing process* [online]. In: . 2018. DOI: 10.1016/j.addma.2018.05.035. [cit. 2019-11-17].
- [41] RAHMATI, S. Direct Rapid Tooling. In: *Comprehensive Materials Processing*. Volume 10. 2014, s. 303-344. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01013-X. In: . [cit. 2019-11-17].
- [42] GALATI, Manuela, Paolo MINETOLA a Giovanni RIZZA. *Surface Roughness Characterisation and Analysis of the Electron Beam Melting (EBM) Process* [online]. In: . 2019. DOI: 10.3390/ma12132211. In: . [cit. 2019-11-17].
- [43] LIU, Z. C., F. D NING, W. L. CONG a H. C. ZHANG. *Laser Engineered Net Shaping of metal powders: A study on energy consumption: Energy modeling in Laser additive manufacturing* [online]. 2016. In: . [cit. 2019-11-17].
- [44] SURESH, Ganzi, K L NARAYANA a M. Kedar MALLIK. Laser Engineered Net Shaping process in Development of Bio-Compatible Implants: An Overview. In: *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems* [online]. Vol. 9. 2017. In: . [cit. 2019-11-17].
- [45] SRIDHARAN, Aravind K. a Sanjay JOSHI. An octree-based algorithm for the optimization of extraneous material removal in laminated object manufacturing (LOM). In: *Journal of Manufacturing Systems* [online]. Volume 19, Issue 6. s. 355-364. DOI: 10.1016/S0278-6125(01)80007-8. In: . [cit. 2019-11-17].
- [46] GONZÁLEZ, Roberto Kobeh., Raymond BENJAMIN, Boubacar DJIBO a Jane HUPE. ICAO environmental report – Aviation and climate change. Destination green [online]. 2013. In: . [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <http://cfapp.icao.int/Environmental-Report-2013/>
- [47] LEHMHUS, Dirk, Matej VESENJAK, Sven SCHAMPHELEIRE a Thomas FIEDLER. *From Stochastic Foam to Designed Structure: Balancing Cost and Performance of Cellular Metals*. In: . 2017. DOI: 10.3390/ma10080922. [cit. 2019-11-17].

- [48] HASIB, Hazman, Allan RENNIE, Neil BURNS a Louise GEEKIE. *Non-stochastic lattice structures for novel filter applications fabricated via additive manufacturing*. In: . 2014. [cit. 2019-11-17].
- [49] AZMAN, Abdul Hadi. *Method for integration of lattice structures in design for additive manufacturing* [online]. In: . 2017. [cit. 2019-11-17].
- [50] CANSIZOGLU, O., D. CORMIER, O. HARRYSSON, H. WEST a T. MAHALE. *An Evaluation of Non-Stochastic Lattice Structures Fabricated Via Electron Beam Melting*. [online]. In: . 2006. [cit. 2019-11-17].
- [51] LUKY, Adam. *Spalovací syntéza nanostrukturovaného oxidu ceričitého*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Ústav chemie. In: . [cit. 2019-11-20].
- [52] WADLEY, Haydn N.G., Norman FLECK a Anthony G. EVANS. *Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structures: Norman Fleck* [online]. In: . 2003. DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00266-5. [cit. 2019-11-20].
- [53] DAVIES, J.M. *Lighweight sandwich construction*. The University of Manchester, UK. In: . [cit. 2019-11-20].
- [54] NAIDU, B.Vishnu Vardhana a G. Dileep KUMAR. Additive Manufacturing of Honeycomb Structure and Analysis of Infill and Material Characteristics. In: *International Journal of Scientific Research and Review* [online]. ISSN 2279-543X. In: . [cit. 2019-11-20].
- [55] TIWARI, G., T. THOMAS a R.P. KHANDELWAL. *Influence of reinforcement in the honeycomb structures under axial compressive load* [online]. In: . 2017. DOI: 10.1016/j.tws.2017.06.010. [cit. 2019-12-10].
- [56] ALKETAN, Oraib, Reza ROWSHAN, Rashid K. ABU a Al-Rub AL-RUB. *Topology-Mechanical Property Relationship of 3D Printed Strut, Skeletal, and Sheet Based Periodic Metallic Cellular Materials* [online]. In: . 2018. DOI: 10.1016/j.addma.2017.12.006. [cit. 2019-12-10].

- [57] WADLEY, HAYDN N. G. *Multifunctional periodic cellular metals* [online]. In: . University of Virginia, Charlottesville, USA, 2005. DOI: 10.1098/rsta.2005.1697. [cit. 2019-12-10].
- [58] MAHMOUD, Dalia a Mohamed A. ELBESTAWI. Lattice Structures and Functionally Graded Materials Applications in Additive Manufacturing of Orthopedic Implants: A Review. In: *Manufacturing and Materials Processing* [online]. 2017. In: . [cit. 2019-12-10].
- [59] LUNEAU, Dominique, Erwann JEANNEAU, Jean-François JAL a Isabelle DANIEL. *Auguste Bravais: a major human contribution* [online]. In: . 2014. DOI: 10.1107/S2053273314086926. [cit. 2019-12-10].
- [60] PANESAR, Ajit, Meisam ABDI, Duncan HICKMAN a Ian ASHCROFT. *Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing* [online]. In: . 2017. DOI: 10.1016/j.addma.2017.11.008. [cit. 2019-12-10].
- [61] KIRBY, James F. *The Central Science: Solids and Modern Materials*. Hamden, Connecticut, 2015. Quinnipiac University. In: . [cit. 2019-12-10].
- [62] SYAM, Wahyudin P., Wu JIANWEI, Bo ZHAO, Ian MASKERY, Waiel ELMADIH a Richard LEACH. *Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation* [online]. In: . Volume 52. s. 494-506. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.09.010. [cit. 2019-12-10].
- [63] FENG, Jiawei, Jianzhong FU, Zhiwei LIN, Bin LI a Bin LI. *A review of the design methods of complex topology structures for 3D printing* [online]. In: . 2018. [cit. 2019-12-20].
- [64] EPASTO, G., G. PALOMBA, D. D'ANDREA, S. DI BELLA, R. MINEO, E. GUGLIELMINO a F. TRAINA. Experimental investigation of rhombic dodecahedron micro-lattice structures manufactured by Electron Beam Melting. In: *Materials Today* [online]. Proceedings 7. 2019, s. 578–585. [cit. 2019-12-20].
- [65] DONG, Liang, Vikram DESHPANDE a Haydn WADLEY. *Mechanical response of Ti–6Al–4V octet-truss lattice structures* [online]. In: . Volumes 60–61. 2015, s. 107-124. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2015.02.020. [cit. 2019-12-20].

- [66] HE, Zezhou, FengChao WANG, YinBo ZHU a Harold S PARK. *Mechanical Properties of Copper Octet-Truss Nanolattices* [online]. In: . 2017. DOI: 10.1016/j.jmps.2017.01.019. [cit. 2019-12-20].
- [67] AL-KETAN, O., R. ROWSHAN a R.K. ABU AL-RUB. *Topology-mechanical property relation- ship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials*. [online]. In: . 2018, s. 167–183. DOI: 10.1016/j.addma.2017.12.006. [cit. 2019-12-20].
- [68] AL-KETAN, Oraib, Mhd Adel ASSAD a Rashid K. ABU AL-RUB. *Mechanical properties of periodic interpenetrating phase composites with novel architected microstructures* [online]. In: . Volume 176. 2017, s. 9-19. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.05.026. [cit. 2019-12-20].
- [69] YUAN, Li, Songlin DING a Cuie WEN. *Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review* [online]. In: . 2018. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2018.12.003. [cit. 2019-12-20].
- [70] MONKOVA, Katarina, Peter MONKA, Ivana ZETKOVÁ, Pavel HANZL a Dusan MANDULAK. *Three Approaches to the Gyroid Structure Modelling as a Base of Lightweight Component Produced by Additive Technology* [online]. In: . 2017. DOI: 10.12783/dtscse/cmsam2017/16361. [cit. 2019-12-20].
- [71] AL-KETAN, Oraib a Rashid K. Abu AL-RUB. *Multifunctional Mechanical Metamaterials Based on Triply Periodic Minimal Surface Lattices* [online]. In: . 2019. DOI: 10.1002/adem.201900524. [cit. 2019-12-20].
- [72] MAREŠ, Tomáš. *Metody a přístupy k optimalizaci topologie*. Praha 6, 2005. České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav mechaniky. In: . [cit. 2019-12-20].
- [73] MAREŠ, Tomáš. *Základy Konstrukční Optimalizace*. In: *Knižnice Konstrukční Optimalizace — Svazek II*. [online]. Praha, 2006. In: . [cit. 2019-12-20].
- [74] ČSN EN ISO 7438 (420401). *Kovové materiály - Zkouška ohybem*. 2016. In: . [cit. 2019-12-20].

- [75] *GE Additive Upgrades Concept Laser M2 cusing, Multilaser Machines* [online]. In: . [cit. 2019-12-20]. Dostupné také z: <http://www.dailycadcam.com/ge-additive-upgrades-concept-laser-m2-cusing-multilaser-machines/>
- [76] CLOUGH, Eric C., Jie ENSBERG, Zak C. ECKEL, Christopher J. RO a Tobias A. SCHAEDLER. Mechanical performance of hollow tetrahedral truss cores. In: *International Journal of Solids and Structures* [online]. Volume 91. 2016, s. 115-126. [cit. 2019-12-26].
- [77] Yi Zhang, Linmin Wu, Xingye Guo, Stephen Kane, Yifan Deng, Yeon-Gil Jung, Je-Hyun Lee a Jing Zhang. *Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review* [online]. In: . s. 1-13. [cit. 2019-12-26].
- [78] CHOUGRANI, Laurent, Jean-Philippe PERNOT, Philippe VÉRON a Stéphane ABED. Lattice structure lightweight triangulation for additive manufacturing. In: *Computer-Aided Design* [online]. Volume 90. s. 95-104. In: . [cit. 2019-12-26].

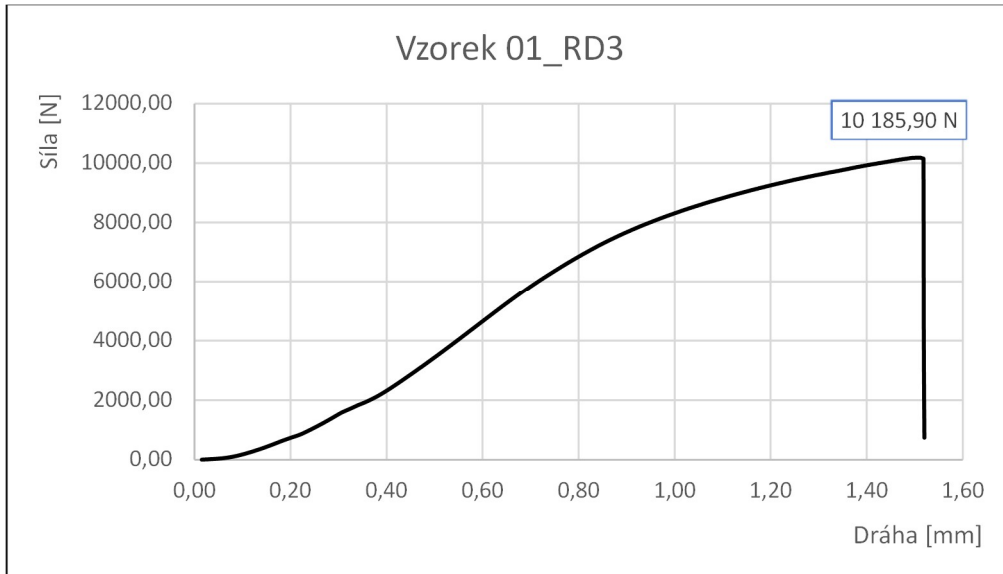
11 SEZNAM ZKRATEK

AM	.....	Additive Manufacturing – aditivní výroba
RP	.....	Rapid Prototyping – soubor technologií výroby prototypů využívající 3D tisk
SLA	.....	Stereolithography - stereolitografie
DLP	.....	Digital Light Processing – aditivní technologie využívající světelného paprsku a projekčního plátna
CDLP	.....	Continuous Digital Light Processing - aditivní technologie využívající světelného paprsku a projekčního plátna s regulací propustnosti kyslíku
FDM	.....	Fused Deposition Modeling – aditivní technologie vytlačování termoplastických polymerů
MJ	.....	Material Jetting – aditivní technologie založená nařízeném nanášení kapiček materiálu
NPJ	.....	NanoParticle Jetting - aditivní technologie založená na obalování nanočástic kovu inkoustem
DOD	.....	Drop On Demand – aditivní technologie založená na nanášení kapiček a pomocného roztavitelného materiálu
BJ	.....	Binder Jetting – aditivní technologie založená na nanášení zkapalněného pojiva na vrstvy prášku
SLS	.....	Selective Laser Sintering – selektivní laserové spékání
MJF	.....	Multi Jet Fusion – aditivní technologie využívající kombinaci využití energie a reakce absorpčního činidla s materiálem
DMLS	.....	Direct Metal Laser Sintering – přímé kovové laserové spékání
SLM	.....	Selective Laser Melting – selektivní laserové tavení
EBM	.....	Electron Beam Melting – tavení elektronovým paprskem
LENS	.....	Laser Engineering Net Shape – aditivní technologie založená na sypání prášku do kovové lázně, vytvořené laserovým paprskem

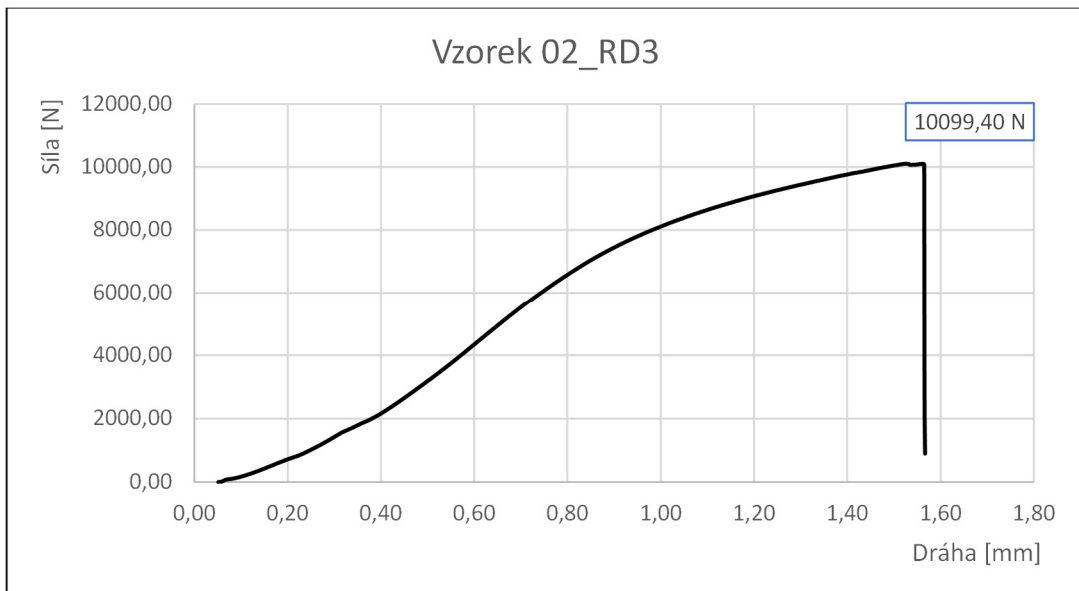
EBAM	.....	Electron Beam Additive Manufacturing – aditivní technologie založená na svařování kovového prášku či drátu elektronovým paprskem
LOM	.....	Laminated Object Manufacturing – Aditivní technologie laminace
CAD	.....	Computer Aided Design – počítačem podporované projektování
CAD	.....	Computer Aided Manufacturing – počítačová podpora výroby
TPMS	.....	Triply Periodic Minimal Surface – matematická metoda založena na principu minimální plochy povrchu
BCC	.....	Body Centered Cubic – prostorově středěná mřížka
FCC	.....	Face Centered Cubic – plošně středěná mřížka
LO	.....	Layout Optimization - optimalizace dispozice
GSO	.....	Generalized Shape Optimization – zobecněná optimalizace tvaru
MKP	.....	Metoda Konečných Prvků
FEM	.....	Finite Element Method – metoda konečných prvků
ISE	.....	Isotropic Solid or Empty element – izotropní pevný nebo prázdný element
ASE	.....	Anizotropic Solid or Empty element – anizotropní pevný nebo prázdný element
ISEP	.....	Isotropic Solid, Empty or Porous element – izotropní pevný, prázdný nebo pórovitý element
ISEC	.....	Isotropic Solid, Empty or Composite element – izotropní pevný, prázdný nebo kompozitní element
ISECP	.....	Isotropic Solid, Empty, Composite or Porous element – izotropní pevný, prázdný, kompozitní nebo pórovitý element
SIMP	.....	Solid Isotropic Microstructure with Penalization – metoda pevné izotropní mikrostruktury s penalizací
OMP	.....	Optimal Microstructure with Penalization – metoda optimální mikrostruktury s penalizací
NOM	.....	NonOptimal Microstructures – metoda neoptimální mikrostruktury

12 PŘÍLOHY

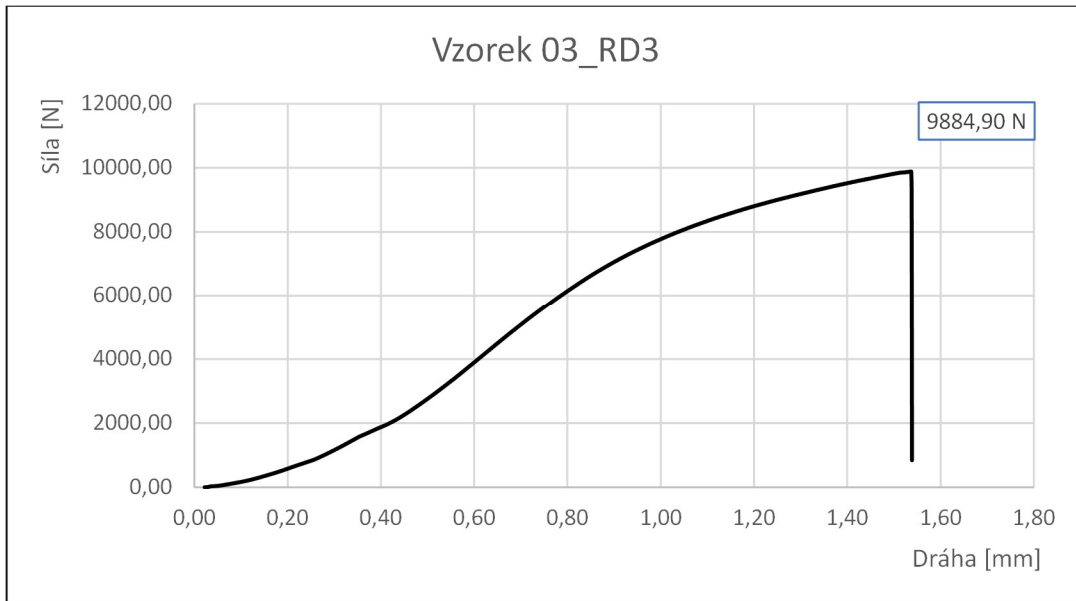
Příloha 1 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 01_RD3



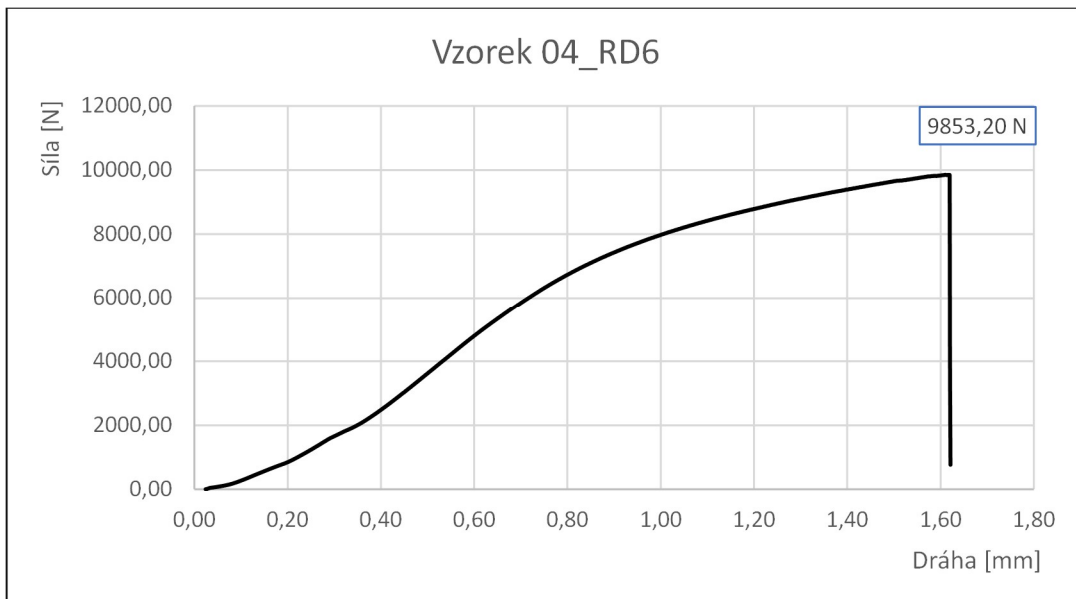
Příloha 2 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 02_RD3



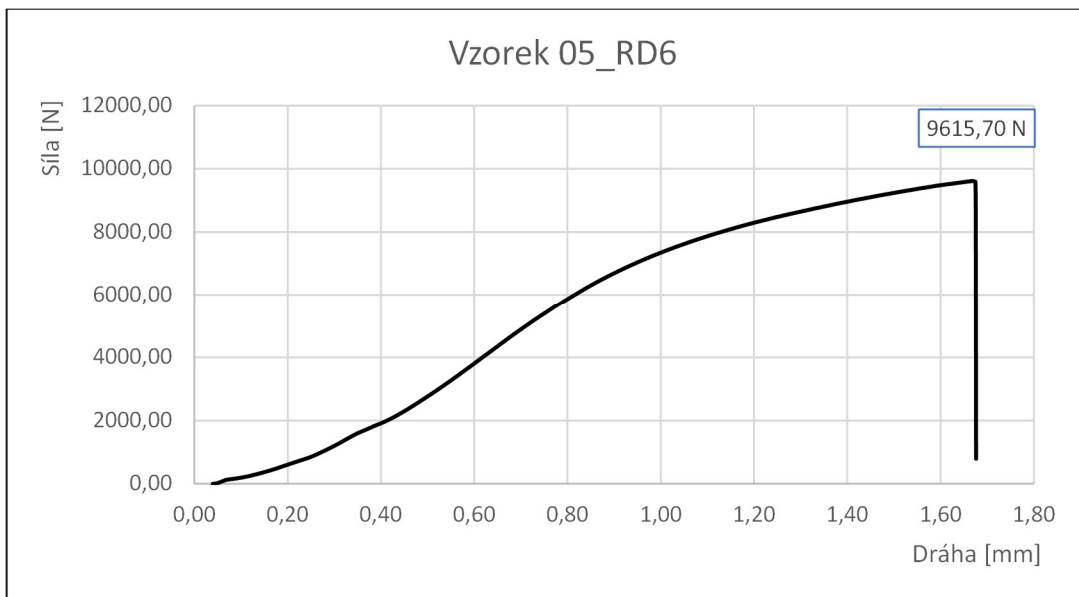
Příloha 3 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 03_RD3



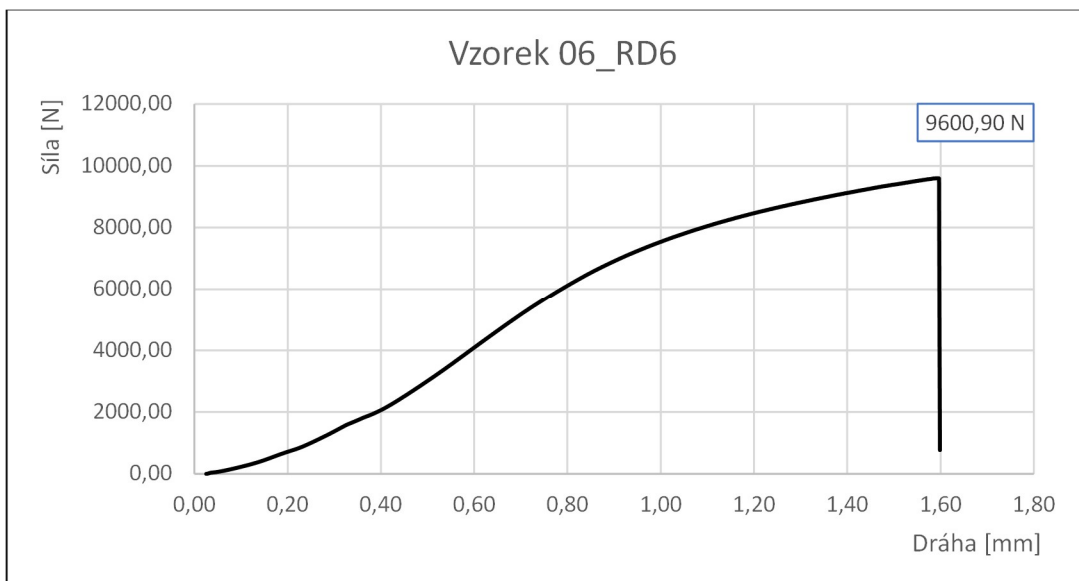
Příloha 4 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 04_RD6



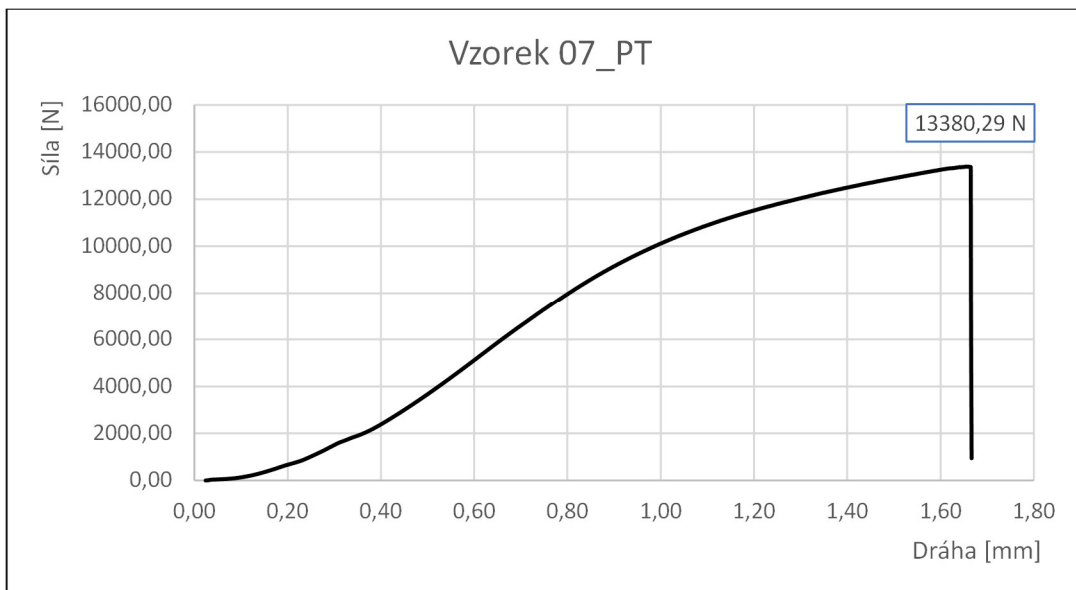
Příloha 5 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 05_RD6



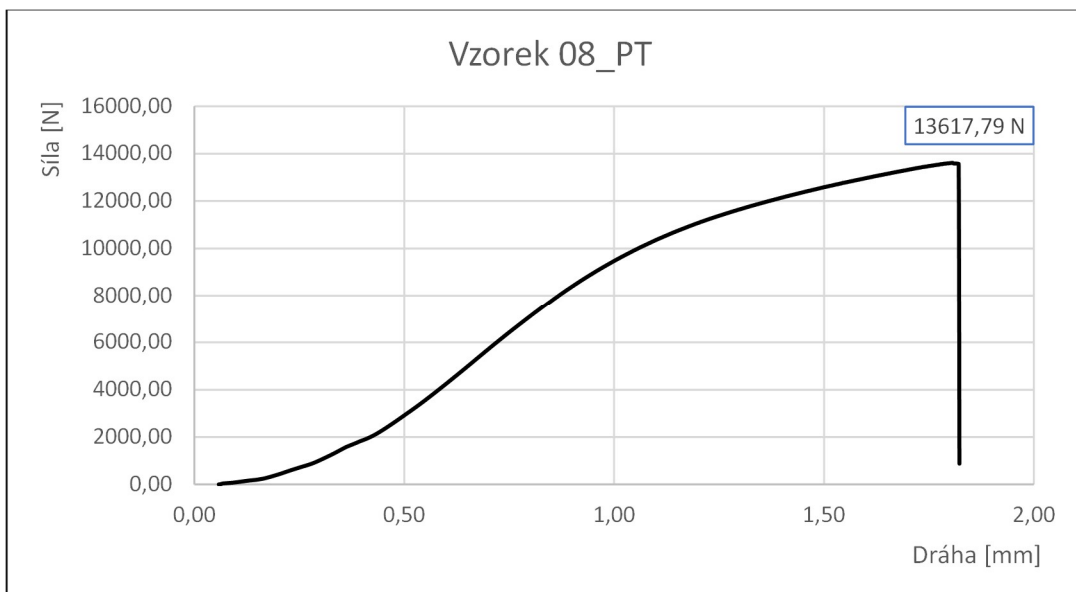
Příloha 6 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 06_RD6



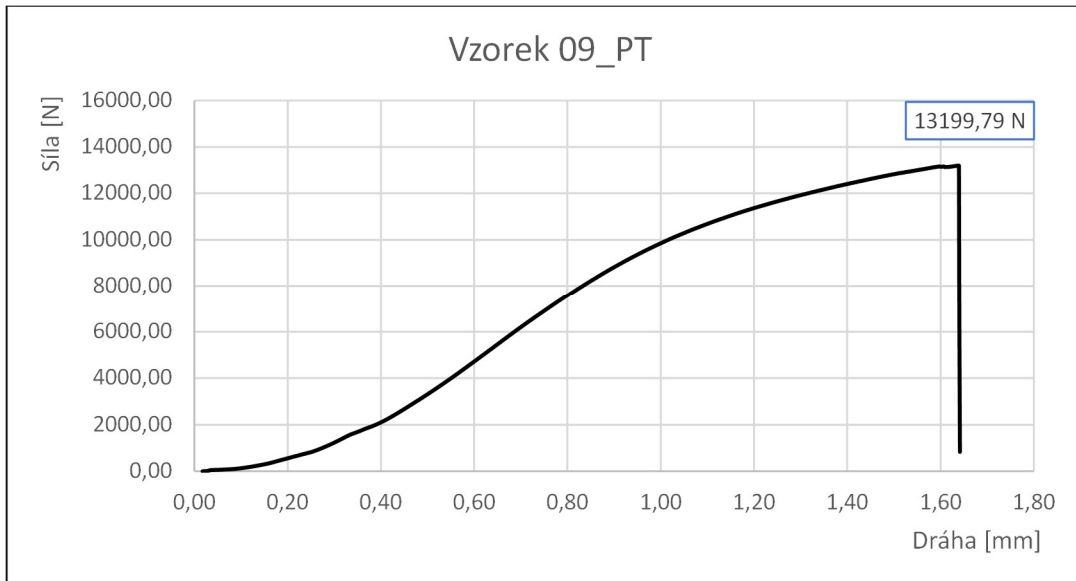
Příloha 7 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 07_PT



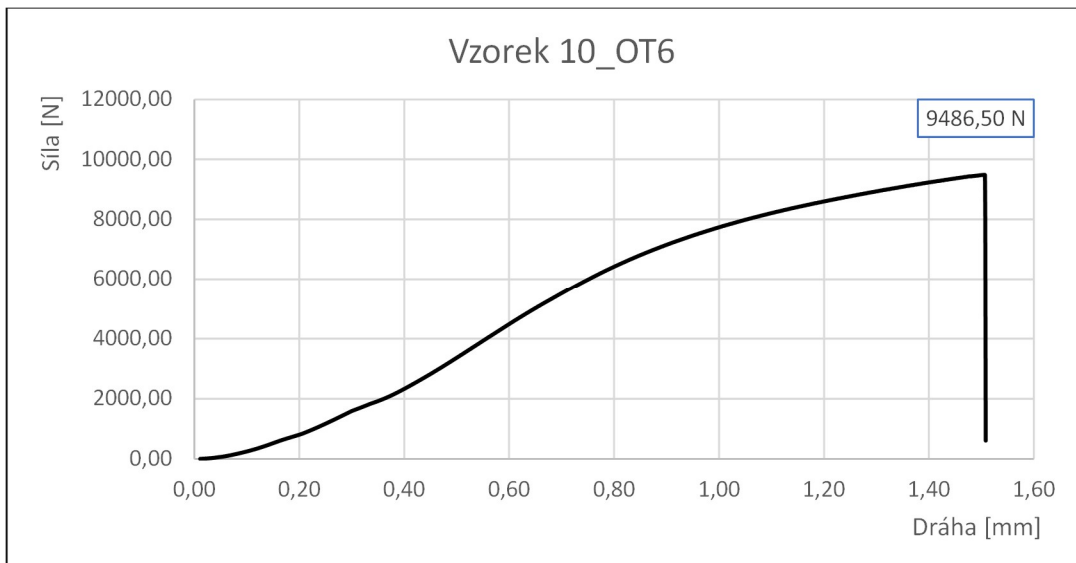
Příloha 8 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 08_PT



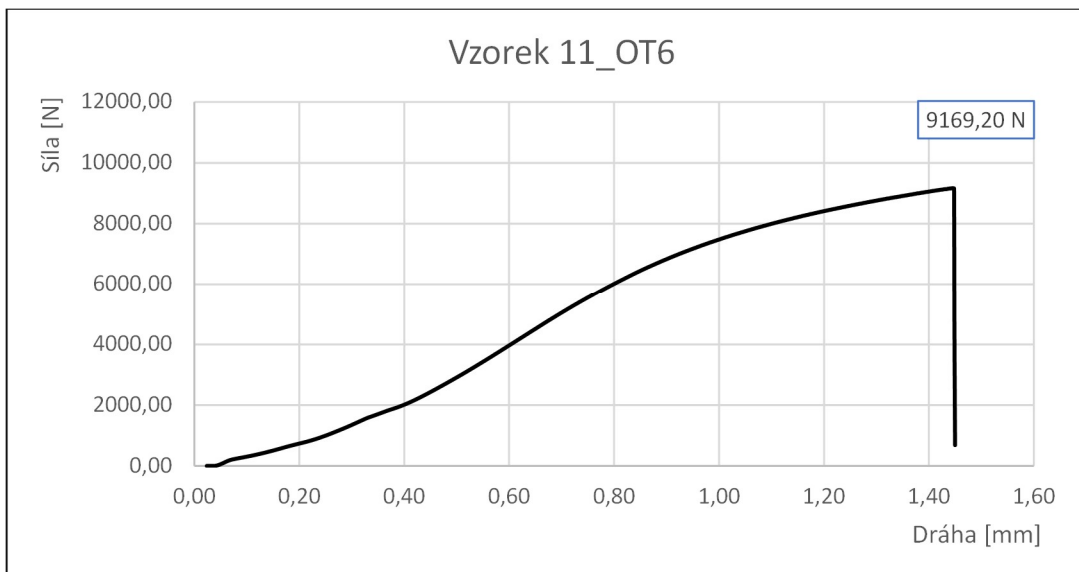
Příloha 9 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 09_PT



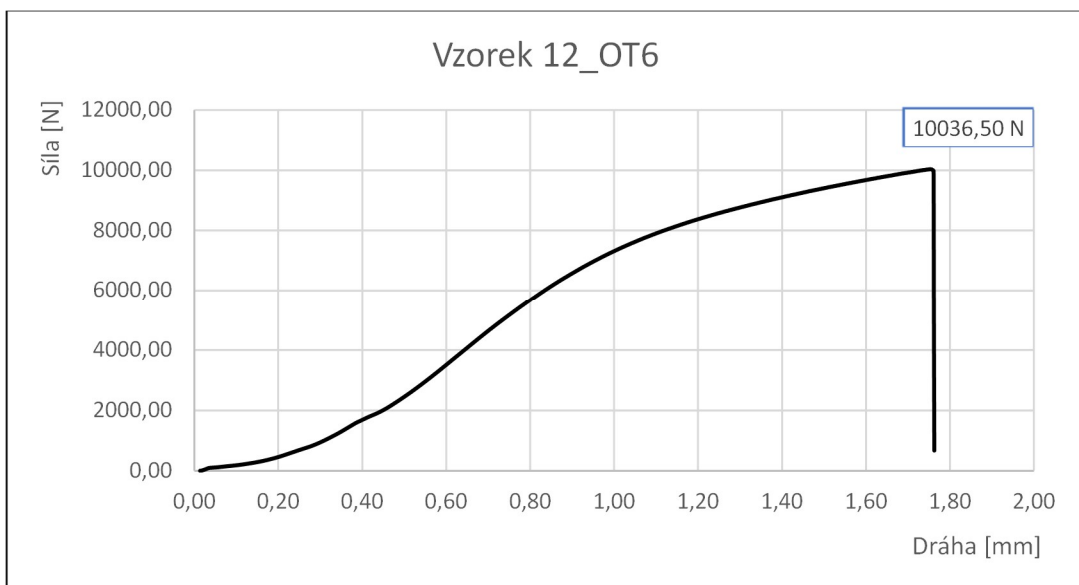
Příloha 10 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 10_OT6



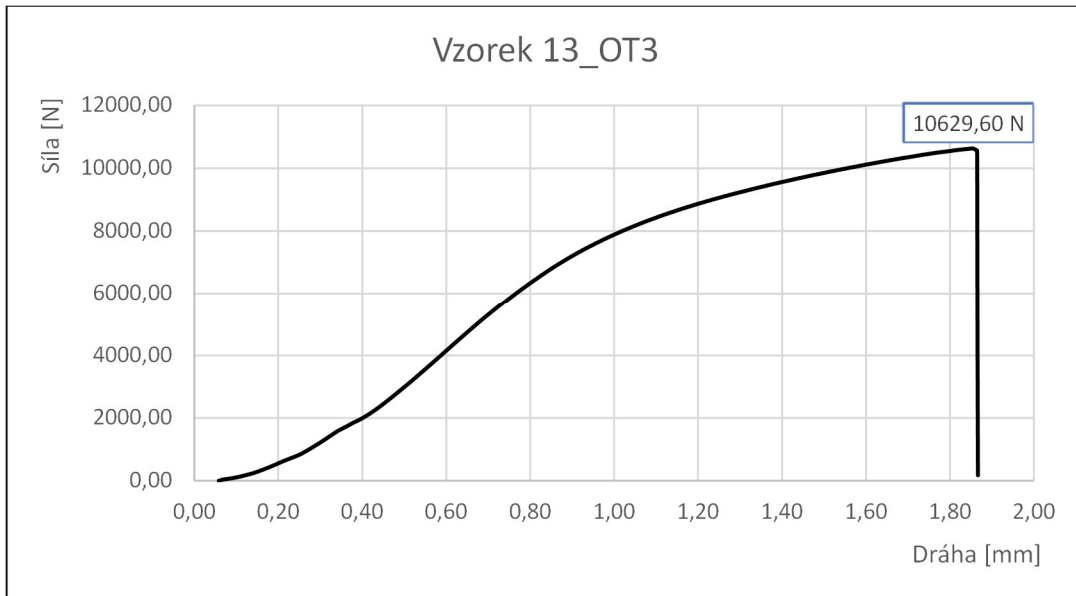
Příloha 11 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 11_OT6



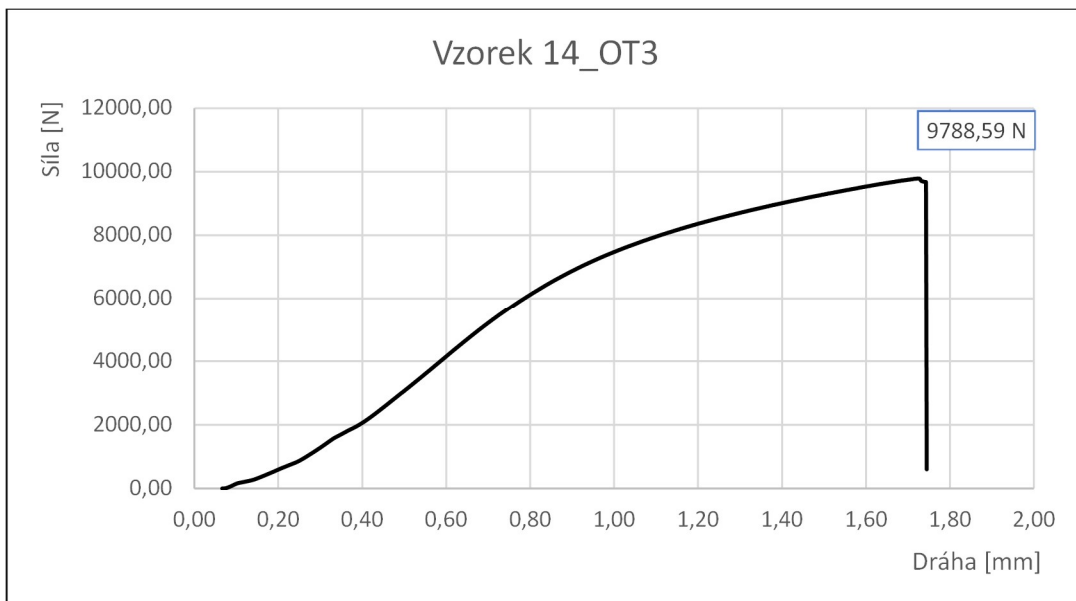
Příloha 12 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 12_OT6



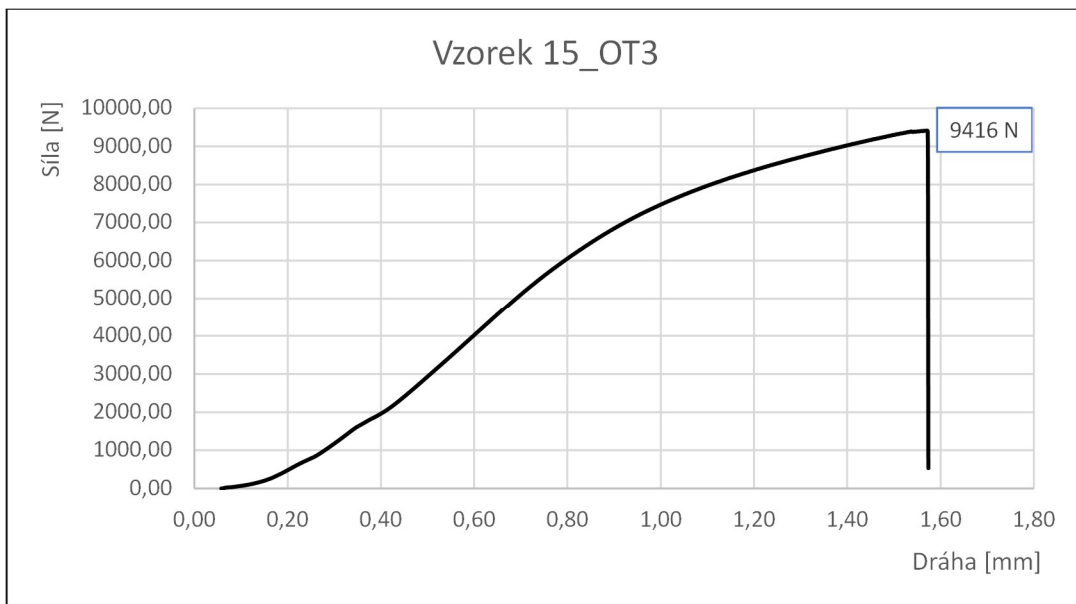
Příloha 13 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 13_OT3



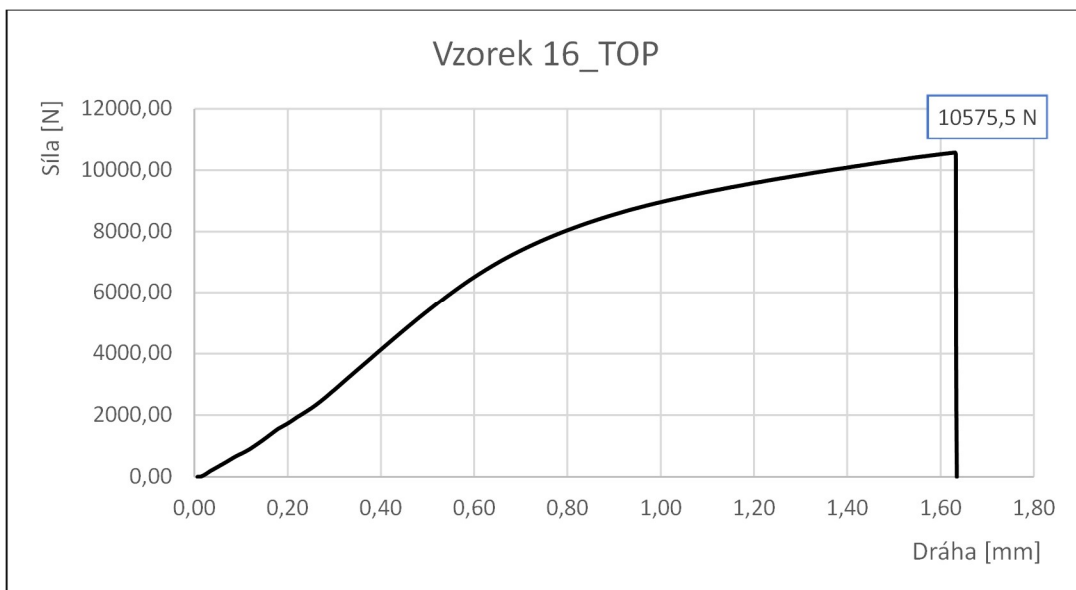
Příloha 14 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 14_OT3



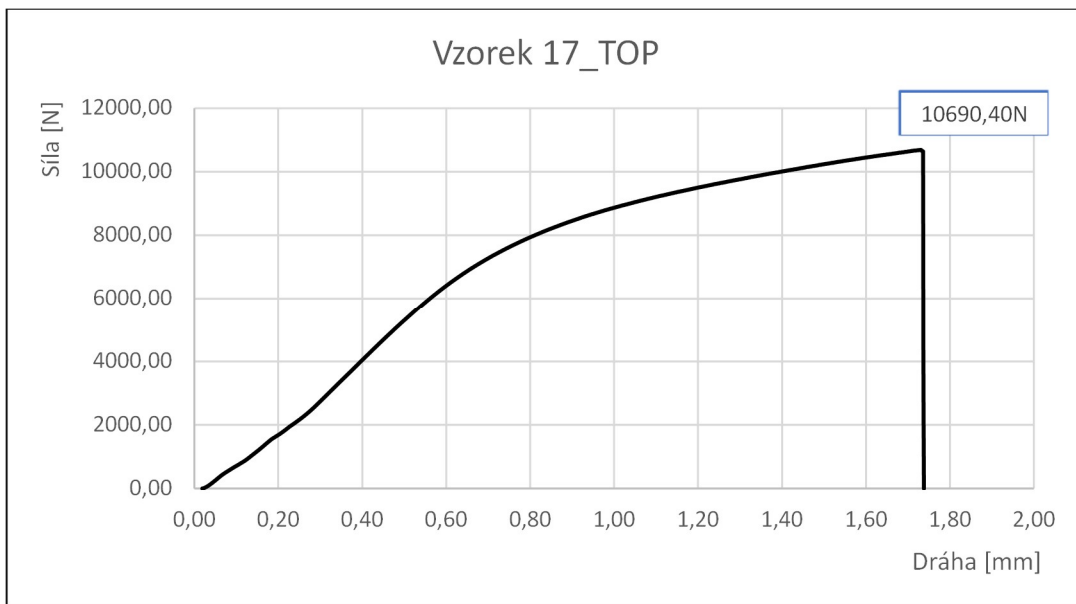
Příloha 15 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 15_OT3



Příloha 16 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 16_TOP



Příloha 17 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 17_TOP



Příloha 18 Závislost ohybové síly na dráze trnu pro vzorek 18_TOP

