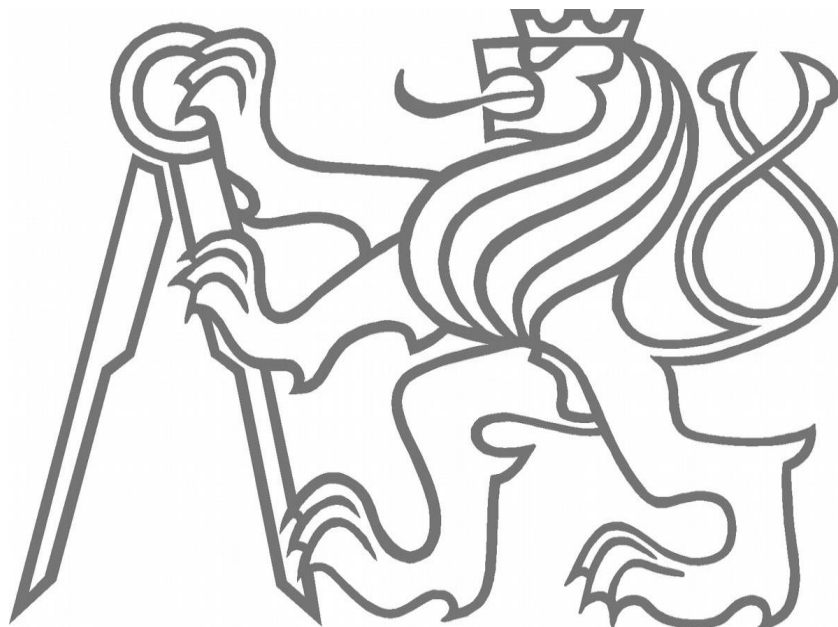


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analýza vlastností materiálu tisknutého pomocí technologie DMLS

Analysis of the material manufactured by DMLS technology

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

Praha, 2017

Matěj Jarolímek

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Analýza vlastností materiálu tisknutého pomocí technologie DMLS“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Šimoty s použitím zdrojů uvedených na konci této práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne __.__._____

.....

Matěj Jarolímek

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali. Především děkuji svému vedoucímu práce, Ing. Janu Šimotovi za věnovaný čas, trpělivost a věcné připomínky.

Abstrakt

Tato práce pojednává zprvu obecně o aditivní technologii 3D tisku, jako novém a moderním směru výroby komponent a její historii. Dále se zabývá jednotlivými metodami aditivní výroby pomocí různých materiálů, jejich principy a použití. Součástí práce je návrh tištěné palety, vyrobené pomocí DMLS (Direct Metal Laser Sintering – laserové spékání kovového prášku) metody, kde byly vytištěny zkušební vzorky pro zkoumání mechanických vlastností nerezové oceli 17-4 PH. Závěr práce obsahuje zhodnocení mechanické zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy dle ČSN ISO 148-1.

Klíčová slova: 3D tisk, DMLS, 17-4 PH, mechanické vlastnosti

Abstract

This thesis deals firstly with an additive technology of 3D printing, as a new and modern direction of component production and its history. It also covers individual methods of additive manufacturing technology using different materials, their principles and uses. The thesis focuses on the design of the printed palette using DMLS (Direct Metal Laser Sintering) method, where the test specimens for the mechanical properties of stainless steel 17-4 PH were printed. The conclusion of the thesis contains an evaluation of the mechanical bending test using Charpy pendulum impact test according to ČSN ISO 148-1.

Keywords: 3D print, DMLS, 17-4 PH, mechanical properties

Obsah

1	Zkratky.....	1
2	Úvod do problematiky 3D tisku.....	2
3	Historie 3D tisku.....	2
3.1	80. léta.....	3
3.1.1	Zrození 3D tisku (1984).....	3
3.1.2	Jak 3D tisk funguje.....	3
3.2	90. léta.....	4
3.2.1	Tvoření dílů metodou "vrstvu po vrstvě" (1992).....	4
3.2.2	Navrhované orgány přinášejí nové pokroky v medicíně (1999).....	4
3.3	21. století.....	4
3.3.1	Funkční 3D ledvina (2002).....	4
3.3.2	Open-source spolupráce 3D tisku (2005).....	4
3.3.3	SLS vede k masovému přizpůsobení ve výrobě (2006).....	5
3.3.4	První samoreplikující se tiskárna (2008).....	5
3.3.5	Spuštění služby DIY (2008).....	5
3.3.6	První protetická noha (2008).....	5
3.3.7	Na trh vstupuje DIY souprava pro 3D tiskárny (2009).....	6
3.3.8	Od buněk k cévám (2009).....	6
3.3.9	První vytištěné robotické letadlo na světě (2011).....	6
3.3.10	První vytištěné auto na světě (2011).....	7
3.3.11	3D tisk ve zlatě a stříbře (2011).....	7
3.3.12	3D tisknutá implementovaná protetická čelist (2012).....	7
4	Metody.....	8
4.1	FDM technologie (Fused Deposition Modeling).....	8
4.2	STA technologie (Stereolitografie).....	10
4.3	Technologie PolyJet.....	12
4.4	Laser Cladding (LC).....	14

4.5	DMLS Technologie (Direct Metal Laser Sintering – laserové spékání kovového prášku)	16
5	Určení mechanických vlastností materiálu tisknutého pomocí DMLS technologie	19
5.1	Popis práce	19
5.1.1	Návrh těles pro mechanické zkoušky	19
5.1.2	Rozmístění těles na paletě.....	20
5.2	Materiál SS 17-4 PH (CL 92PH)	22
5.2.1	Vlastnosti materiálu	22
5.2.2	Použití oceli 17-4 PH.....	24
5.3	Zkouška tahem	24
5.3.1	Zkušební tělesa a princip zkoušky	24
5.3.2	Mechanické vlastnosti a jejich stanovení ze zkoušky.....	25
5.3.3	Vyhodnocení zkoušky tahem pro materiál 17-4 PH.....	26
5.4	Zkouška rázem v ohybu	27
5.4.1	Podstata metody	27
5.4.2	Zkušební tělesa	28
5.4.3	Úprava těles před zkouškou.....	28
5.4.4	Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu pro materiál 17-4 PH.....	32
6	Závěr	34
7	Seznam použité literatury	36

1 Zkratky

3D	Three Dimensional
ASTM	American Society for Testing and Materials
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer-Aided Design
CMM	Coordinating Measuring Machine
ČSN	Česká Státní Norma
DIY	Do It Yourself
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modelling
FST	Fire, Smoke and Toxicity
LC	Laser Cladding
PC	PolyCarbonate nebo Personal Computer
PLA	Polylactic Acid
PP	Polypropylene
PPF	polypropylen fumarát
RepRap	Replication Rapid-Prototyper Project
RN	Rovina Normálová
RT	Rovina Tisku
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
TED	Technology, Entertainment, Design
TZ	Tepelné Zpracování
UV	Ultra Violet

2 Úvod do problematiky 3D tisku

3D tisk je moderní, nová a ne zcela probádaná výrobní metoda. Na rozdíl od konvenčních způsobů výroby, jako jsou například lité, kované nebo normované polotovary, se odebírá obráběním materiál pro tvorbu výsledného produktu. U aditivní technologie, jako je 3D tisk, může být výrobek po dokončení tisku plně funkční. Díky této vlastnosti nemáme odpadový materiál, což zmírňuje provozní náklady. Především se užívá k výrobě prototypů v malé a kusové výrobě, kde výrazně snižuje náklady na výrobu forem, a to i díky schopnosti vytvářet složité tvary. 3D tisk je obecně nákladná technologie a obzvláště jeho metody, které zpracovávají kovové materiály.

Tím se dostáváme k tomu, že 3D tisk není jen výroba plastových komponent, kde nejznámější metodou je FDM, která pomocí nataveného plastového drátu vytváří objekty, ale také komponent kovových. FDM je nejlevnější metodou 3D tisku díky projektu RepRap, což je open-source na vytvoření vlastní tiskárny. Další metody zpracující plasty jsou např. stereolitografie nebo PolyJet, které fungují na principu ztužování pryskyřic. Metody, které používají kovy, jsou např. Laser Cladding nebo DMLS. U metody DMLS se pomocí laseru spéká kovový prášek vrstvu po vrstvě. Používají se kvalitní a drahé kovové materiály, jako jsou TiAl6V4, Inconel 718, 17-4 PH korozivzdorná a vytvrditelná ocel, hliníková slitina AlSi10Mg, nerezová slitina 316L a další. Tyto materiály často vidíme v leteckém průmyslu, kde si i tato technologie našla své místo. Konkrétně ocel 17-4 PH se používá na výrobu lopatek kompresorů v leteckých motorech. Tato ocel byla použita při tisku palety se zkušebními vzorky metodou DMLS.

Jelikož v ČR ještě ocel 17-4 PH nikdy nebyla tištěna, zaměřili jsme se na její mechanické vlastnosti po precipitačním vytvrzení označené H900 dle ASTM A564. Zejména nás zajímala její pevnost v závislosti na anizotropii zkušebních těles na tištěné paletě.

3 Historie 3D tisku

Počátek 3D tisku lze vysledovat do roku 1976, kdy byla vynalezena inkoustová tiskárna. V roce 1984 se adaptace a pokrok na inkoustovém konceptu změnil v technologii od tisku s inkoustem až po tisk s materiály. V posledních desetiletích byla rozmanitá aplikace 3D tisku rozvíjena v několika průmyslových odvětvích. Následuje stručná historie hlavních milníků na cestě rozvoje 3D tisku. [1]

3.1 80. léta

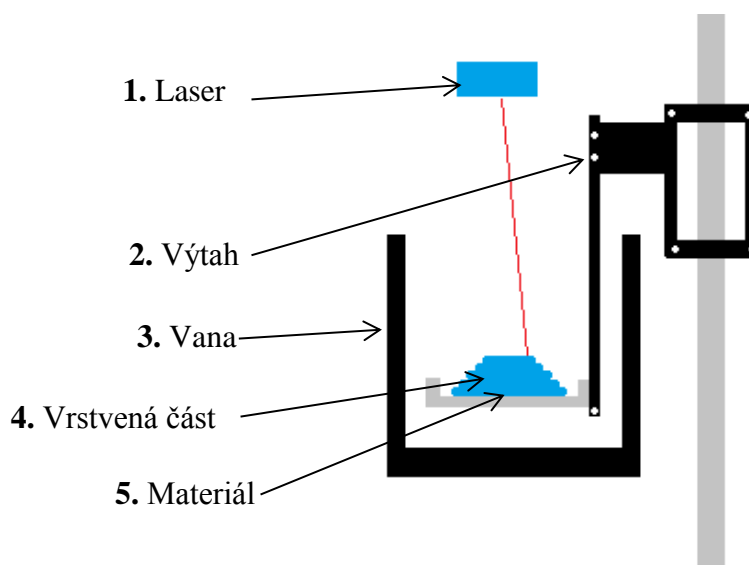
3.1.1 Zrození 3D tisku (1984)

Charles Hull, později spoluzakladatel 3D System, vyvinul stereolitografii, proces tisku, který umožňuje vytvářet hmatatelný 3D objekt z digitálních dat. Tato technologie vytvoří 3D model, který umožňuje uživatelům otestovat design před investováním do větších výrobních programů. [1]

3.1.2 Jak 3D tisk funguje

3D tiskárny fungují jako inkoustové tiskárny. Namísto inkoustu vkládají 3D tiskárny požadovaný materiál do několika vrstev, aby vytvořily fyzický objekt z digitálního souboru. [1]

1. Laser pošle laserový paprsek do pevného materiálu.
2. Výtah zvyšuje a snižuje plošinu, aby pomohl vytvořit vrstvy.
3. Vana obsahuje materiál použitý k vytvoření 3D objektu.
4. 3D objekt je vytvořen navařováním jednotlivých vrstev na sebe.
5. Pokročilé 3D tiskárny používají jeden nebo více materiálů, včetně plastů, pryskyřice, titanu, polymerů a dokonce i zlata nebo stříbra.



Obrázek 1 - Schéma 3D tiskárny

3.2 90. léta

3.2.1 Tvoření dílů metodou "vrstvu po vrstvě" (1992)

První stroj SLA (stereolithographic) vyráběl 3D System. Výrobní proces zahrnuje UV laser ztužující fotopolymer, který se změní z kapaliny s viskozitou a barvou podobnou medu na trojrozměrné součásti tvořené vrstvou po vrstvě. Ačkoli to nebyl dokonalý stroj, přes to dokázal vytvořit vysoce složité součásti přes noc. [2]

3.2.2 Navrhované orgány přinášejí nové pokroky v medicíně (1999)

První laboratorně vytvořený orgán byl implantován u mladých pacientů, kteří podstoupili augmentaci močového měchýře pomocí 3D syntetické konstrukce potaženého vlastními buňkami. Technologie vyvinutá vědci z institutu Wake Forest Institute for Regenerative Medicine otevřela dveře k objevení další strategie vývoje orgánů včetně jejich tisku. Vzhledem k tomu, že jsou vyrobeny s vlastními buňkami pacienta, existuje jen malé až žádné riziko odmítnutí jejich organismem. [3]

3.3 21. století

3.3.1 Funkční 3D ledvina (2002)

Vědci vyvinuli miniaturní funkční ledviny, které byly schopny filtrovat krev a produkovat zředěnou moč u zvířete. Výzkum byl veden na institutu Wake Forest Institute for Regenerative Medicine, jehož cílem byl tisk orgánů a tkání pomocí technologie 3D tisku. [3]

3.3.2 Open-source spolupráce 3D tisku (2005)

Dr. Adrian Bowyer z University Bath vytvořil RepRap, což je open-source (software nebo hardware, který je poskytnut - většinou zdarma - dalším vývojářům, kteří jej mohou studovat a většinou i upravovat a dále vylepšovat) na vybudování 3D tiskárny, která dokáže tisknout většinu svých vlastních komponent. Vizí tohoto projektu je dostupnost všem pro sestavení si vlastní tiskárny tím, že levně poskytuje RepRap jednotlivcům všude, což jim umožňuje si samy vytvářet každodenní produkty. [4]

3.3.3 SLS vede k masovému přizpůsobení ve výrobě (2006)

SLS (select laser sintering) je první 3D tiskárna, která se stala rentabilní. Tento typ stroje používá laser pro spojení materiálů na tvorbu 3D produktů. To přineslo průlom v možnosti přizpůsobení se požadavkům zákazníka při výrobě průmyslových dílů a posléze například i zdravotnických protéz. [5]

Tentýž rok společnost Object, poskytovatel materiálů a systémů pro 3D tisk, vytvořila stroj schopný tisknout z několika materiálů současně včetně elastomerů a polymerů. Stroj umožňuje výrobu jednoho dílu s různými hustotami a vlastnostmi materiálů. [5]

3.3.4 První samoreplikující se tiskárna (2008)

Po svém uvedení v roce 2005 projekt RepRap vydal Darwin, první samoreprodukční tiskárnu, která dokáže tisknout většinu svých vlastních komponent a umožňuje uživatelům, kteří už ji mají, aby vytvořili další pro své přátele. [4]

3.3.5 Spuštění služby DIY (2008)

Společnost Shapeways spustila novou soukromou beta verzi pro spolupráci a komunikaci umělců, architektů a návrhářů. Díky ní mohou vytvářet své 3D návrhy levně. [6]

3.3.6 První protetická noha (2008)

První osoba, která se prošla na 3D vytištěné protetické noze se všemi potřebnými částmi nohy (koleno, chodidlo, kloubní jamky apod.), měla vytištěné díly ve stejné složité struktuře, jako jsou reálné části nohy bez jakékoli montáže. Na vývoj se zaměřil výrobce Bespoke Innovations, který tiskne krytí na protetické nohy na míru. [2]



Obrázek 2 - Kryt protetické nohy od Bespoke Innovations [o1]

3.3.7 Na trh vstupuje DIY souprava pro 3D tiskárny (2009)

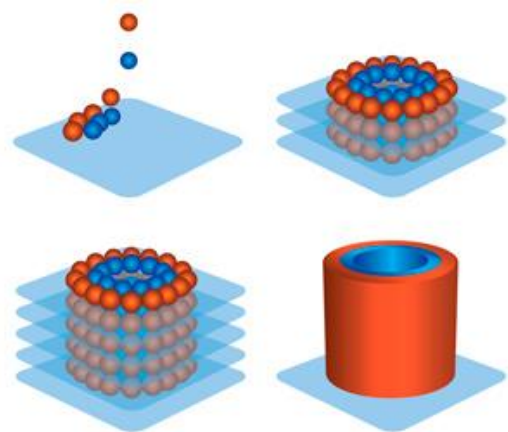
MakerBot je společnost poskytující open-source hardware pro 3D tiskárny. Tato firma odstartovala prodej DIY (Do It Yourself) souprav, které umožňují kupujícím vytvářet vlastní 3D tiskárny a produkty. [7]

3.3.8 Od buněk k cévám (2009)

Další inovace v oblasti biotisku má na svědomí společnost Organovo, spoléhající se na technologii Dr. Gabora Forgacse. Jako první použili 3D biotiskárnu pro tisk cév. [8]

3.3.9 První vytištěné robotické letadlo na světě (2011)

Inženýři z University of Southampton navrhli a letěli jako první s 3D tištěným letadlem na světě. Toto bezpilotní letadlo je postaveno za sedm dní s rozpočtem 5 000 liber. 3D tisk dovolí letadlo postavit s eliptickými křídly, což je obvykle drahý tvar. Tento tvar pomáhá zlepšit aerodynamiku a minimalizuje indukovaný odpor křídel. [9]



Obrázek 3 – Od buněk k cévám [o2]

3.3.10 První vytištěné auto na světě (2011)

Kor Ecologic odhalil Urbee, elegantní, ekologicky šetrný prototyp vozidla, který byl kompletně vytištěný na konferenci TEDxWinnipeg v Kanadě. Bylo navrženo tak, aby bylo úsporné a levné. Urbee spotřebuje 200 mpg (=1,18 l na 100 km) na dálnici a 100 mpg (2,35 l na 100 km) ve městě. Odhaduje se, že v maloobchodě bude stát od 10 000 do 50 000 dolarů, pokud bude komerčně životaschopný. [10]



Obrázek 4 – Urbee [o3]

3.3.11 3D tisk ve zlatě a stříbře (2011)

i.materialise se stala první celosvětovou firmou, která na celém světě nabízí tisk z 14 karátového zlata a stříbra jako materiálu, který lze potencionálně využít k novému a levnějšímu výrobnímu postupu pro návrháře šperků. [11]

3.3.12 3D tisknutá implementovaná protetická čelist (2012)

Lékaři a inženýři v Nizozemsku mají 3D tiskárnu od společnosti LayerWise, kterou použili k tisku třírozměrné protetické dolní čelisti na míru. Ta byla následně implantována do 83leté ženy, která trpěla chronickou kostní infekcí. Tato technologie je v současné době zkoumána, aby podpořila výzkum pro růst nových kostních tkání. [2]

4 Metody

4.1 FDM technologie (Fused Deposition Modeling)

FMD je běžná technologie ve zpracovatelském průmyslu, která je schopná vyrábět fyzické prototypy přímo z virtuálního modelu bez složitých geometrických omezení. Zpočátku sloužila k vytvoření koncepčních modelů, které pomáhají při vývoji produktu. Pro FDM byly vyvinuty materiály s ohledem na přesnost a celkové zlepšení výstupní kvality, které se staly vhodnými pro konečnou výrobu. V současné době je kladen důraz na výrazné zkrácení doby výroby produktů a nákladů, a to v malých a středních výrobních sériích. Kritická nevýhoda, která brání šíření této technologie je výsledná přesnost. Existuje jen málo možností, jak zjistit výsledné rozměrové odchylky, a ty se často navzájem vylučují. Další nevýhodou je, že tato metoda nezvládne plnobarevný tisk, což je způsobeno jednobarevným plastovým vláknem, navinutým na cívce, které slouží jako materiál pro tisk. Více barevný tisk můžeme zajistit vyšším počtem extruzních hlav, ale tato možnost je omezená nebo dodatečným přemalováním. [12]

Princip metody FDM spočívá nanášení tenkého nataveného vlákna z plastu z extruzní hlavy na nepřilnavou podložku (často z karbonových vláken). Hlava se pohybuje ve dvou osách a vytváří v horizontální rovině tenkou vrstvičku nataveného materiálu. Po nanesení celé vrstvy podložka klesne o tloušťku vrstvy a hlava opět nanese požadovaný tvar vrstvy. Tento proces se celý opakuje do vytvoření výsledného produktu. [13]



Obrázek 5 - Výrobek tištěný pomocí FDM [04]

Pro vlákna se obvykle používají termoplasty ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) a PLA (Polylactid acid). V profesionálních aplikacích jsou využívány další materiály jako polykarbonáty nebo speciální termoplasty typu ULTEM. [13] [14]

Tabulka 1 - Některé materiály pro FDM technologii

MATERIÁL	Unikátní vlastnosti
ABS-M30	25-70% silnější než ABS plast
PC	Přesnost, odolnost a stabilita; Vytváří pevné díly pro funkční testování
PC-ABS	Pevnost a tepelná odolnost z PC a flexibilita z ABS
ULTEM 9085	Nepodporuje hoření, neuvolňuje škodlivý kouř ani toxické výpary (FST rating); Vysoký poměr pevnosti k hmotnosti; Vhodný pro letecký a automobilový průmysl
NYLON 12	Nepřekonatelná houževnatost, vysoká odolnost proti únavě, silná chemická odolnost

Tato metoda má široké možnosti uplatnění, jak pro svojí nízkou pořizovací cenu, tak pro nízké náklady na výrobu dílů v malosériové výrobě. Byla například použita na výroby prvního tištěného automobilu UrBee. [13]

FDM slouží pro výrobu prototypů a funkčních součástí. Tyto díly jsou ideální pro testování tvarů, forem a funkcí, protože jsou schopné odolat přísnému testování a nesmršťují se, nedeformují ani neabsorbují vlhkost. Díly z ABS termoplastu se dají dobře vrtat a to i pro tvorbu závitů nebo například malovat. [14]

Využití:

- Kosmonautika a letectví
- Automobilový průmysl
- Komerční
- Spotřebitelský průmysl
- Strojní průmysl
- Zdravotnictví



Obrázek 6 - FDM tiskárna [o5]

4.2 STA technologie (Stereolitografie)

SLA je aditivní výrobní proces, který má schopnost vytvářet jemné detailní trojrozměrné prototypy a koncepční modely z 3D CAD dat. Modely SLA jsou ideální pro koncepční modely, které se vytvoří a následně aplikují pro studie jako vzorové modely z řad formovacích technik, jako je vstřikování, pro tvorbu dutinových vložek, tepelné tvarování a vyfukování. Výhodami této technologie je její vysoká přesnost a hladký povrch, díky tomu můžeme dosáhnout jemných detailů. Hotovené produkty lze upravovat různými dokončovacími metodami např. broušením, pískováním, lakováním a barvením nebo je po odstranění podpěr rovnou použít jako funkční díly. Díky těmto vlastnostem lze dostat produkty rychleji na trh. Nevýhodou pro stereolitografii je vyšší cena vlastního zařízení, což se týká také používaných materiálů. [13]

Proces SLA začíná vytvořením 3D modelu v CAD systému. Model je následně vodorovně "rozřezán", čímž se vytvoří vrstvy s tloušťkami 0,05 mm až 0,15 mm a formátovány do dat pro tiskárnu. Systém použije data pro vytvoření dílčí vrstvy pomocí ultrafialového laseru. Plošina je ponořena do fotopolymeru. Horní strana plošiny je v hloubce tloušťky jedné vrstvy a následně laser začne působit na pryskyřici fotopolymeru. Ta se následně začne ztužovat. Po vyhotovení vrstvy se plošina posune dolů o výšku jedné vrstvy. Vrstvy se k sobě pojí, dokud není celý model vyhotoven. [13]

Materiály použité pro SLA metodu vynikají často svojí optickou číroostí a vysokou tepelnou odolností. [2]

Tabulka 2 - Materiál pro SLA technologii

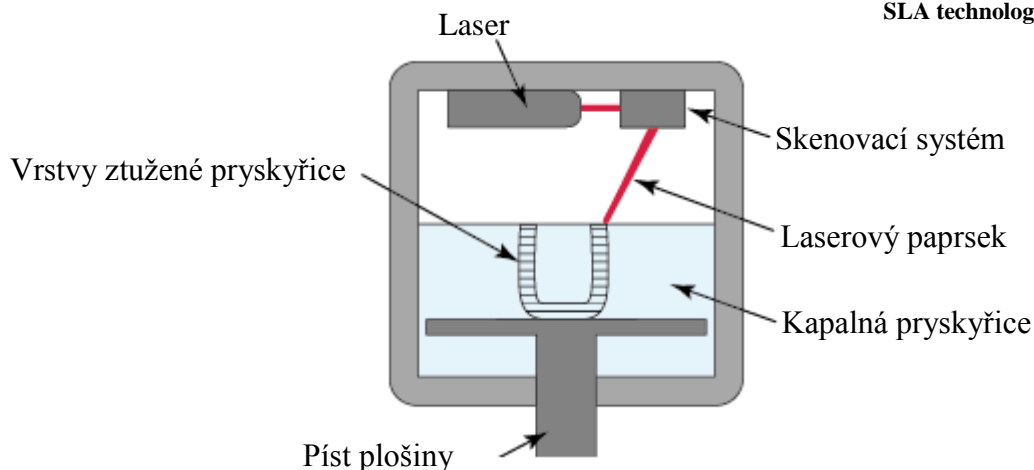
MATERIÁLY	Vlastnosti
Somos WaterShed 11122XC	Téměř bezbarvý vzhled; hustota 1 120kg/m ³ při 25°C; viskozita 0,26 Pa/s
ACCURA 25	Pevnost v tahu 55-58 MPa; Pevnost v ohybu 55-58 MPa; Tepelná odolnost 58-63°C

Technologie SLA byla pro příklad užita v experimentální medicíně k výrobě biologicky rozložitelných polymerových podpěr pro tkáňové inženýrství. Zde se využila její přesnost rozlišení tisku 0,1mm. V experimentech byly využity směsi biologicky odbouratelné pryskyřice diethylfumarátu, polypropylen fumarátu (PPF), fotoiniciátoru a bisacylfosfinoxidu. PPF bylo ztužováno použitím UV laseru (vlnová délka 325 nm). V jiné práci se výzkum zaměřil na vhodnost stereolitografie při výrobě lékových tablet s různými charakteristikami a s modifikovaným uvolňováním. Při této práci se jako monomer použil polyethylenglykol diakrylát a jako fotoiniciátor se použil difenyl (2,4,6-trimethylbenzoyl) fosfinoxid. Kyselina 4-aminosalicylová a paracetamol (acetaminofen) byli vybrány jako modelové léky. Tablety byly úspěšně vytištěny a připraveny s různými vlastnostmi, pomocí přidáním polyethylenglykolu 300 (PEG 300) do tiskového roztoku. Při realistické simulaci dynamického rozpouštění v trávicím traktu bylo uvolňování léku z tablet závislé na složení přípravků, ale nezáviselo na pH rozpouštění. Technologie SLA umožňuje výrobu tablet se specifickými profily doby uvolňováním. V budoucnu by se tato technologie mohla stát výrobní technologií pro přípravu orálně podávaných léků v průmyslové výrobě léčiv nebo dokonce pro jejich individuální výrobu. [15][16]

Díky schopnostem vytvářet rychlé a složité tvary lze technologii SLA používat v mnoha dalších odvětvích jako například v: [13]

- Tvorbě komponentů
- Elektronice
- Letectví a kosmonautice
- Obraně
- Energetice
- Tvorbě forem
- Tvorbě základních modelů nástrojů

Obrázek 7 - Schéma výroby pomocí SLA technologie [06]





Obrázek 8 – Produkt vytištěný na SLA 3D tiskárně [o7]

4.3 Technologie PolyJet

PolyJet je výkonná technologie 3D tisku, která vytváří hladké a přesné součásti, prototypy a nástroje. Díky mikroskopické vrstvě s rozlišením a přesností až 16 μm může produkovat tenké stěny, převisy a složité geometrie s použitím široké škály materiálů dostupných pro tuto technologii. Kromě modelových materiálů se používá gelový materiál, který je vhodný pro tvorbu jakýchkoliv převisů, které by měla mít součást, stejně jako komplikované geometrie. PolyJet je skvělá alternativa k SLA technologii, protože používá podobné materiály, ale s větší přesností. PolyJet umožňuje konstrukci dílů s různými materiály a mechanickými a fyzikálními vlastnostmi v jednom procesu výstavby. Také může rychle a ekonomicky vyrábět prototypy, které napodobují vzhled a funkci požadovaného produktu, což je ideální pro různé typy aplikací. [13][14]

Výroba začíná vytvořením 3D modelu v PC. Jeho data se následně v tiskárně automaticky přepočítají pro zjištění potřebného množství fotopolymeru, a kde bude výrobek umístěn na plošinu. Pak začne tiskárna nanášet drobné kapičky fotopolymeru na plošinu, které se spojí a vytvoří tenkou vrstvu. Tato vrstva je ihned vytvrzena UV lampou v dalším kroku plošina sjede o tloušťku vrstvy níže a nanese se další vrstva. Takto se proces opakuje, dokud produkt není vyhotoven. Modely a součásti jsou připraveny k manipulaci a použití přímo z 3D tiskárny, aniž by bylo nutné dodatečné vytvrzení. [13][14]



Obrázek 9 - Kartáč tištěný na PolyJet tiskárně [08]

Tabulka 3 - Materiály pro PolyJet technologii

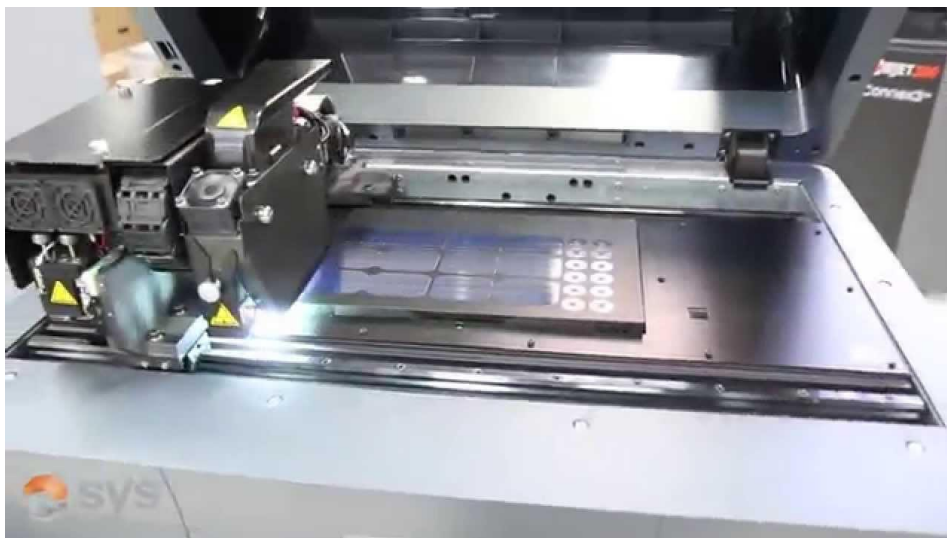
MATERIÁLY	Unikátní vlastnosti
Transparent PolyJet (FC720)	Průhledný
Clear (EC810)	Pevný, čistý a průhledný
Durus White	Polypropylenový vzhled
VERO White (FC830)	Jemné detaily
VERO Black (FC840)	Větší odolnost vůči deformaci v ohybu a teplotnímu namáhání než VERO White
VERO Blue (FC840)	Nejodolnější ze všech materiálů VERO
TANGO Gray (FC950)	Řízeně pružný a elastický
TANGO Black (FC970)	Pružný
TANGO Plus (FC930)	Maximální pružnost, poloprůhledný

Tato technologie se například použila při výzkumu kužele tvořící elektromagnetického pole. To je koncept transformační optiky, který se používá pro řízení toku elektromagnetických polí mezi dvěma úseky různých rozměrů prostřednictvím zužujícího se zařízení. Ověřila se numericky a experimentálně širokopásmová výkonnost kuželového

pole. Kuželové zařízení představuje stupňovitý profil permitivity, které bylo vyrobeno právě pomocí PolyJet technologie tisku, díky němuž se dosáhly nízké náklady na všechny dielektrické materiály. Byly spočítány a naměřeny hodnoty při mapování v blízkosti pole, které byly prezentovány za účelem ověření navrhovaného kužele. Naměřené výsledky měly kvalitní shodu se spočtenými simulacemi. Takovýto dielektrický kužel může sloužit k vývoji nových typů mikrovlnných zařízení, které lze snadno vyrobit pomocí aditivních výrobních procesů s nízkými náklady. [17]

Ideální aplikace PolyJet technologie je výroba produktů se složitými vnitřními prvky, elektronickými součástkami a konektory, díly s elektronickým obalem, výroba prezentačních modelů, zdravotnických prostředků a odlitků z uretanu. PolyJet technologii můžeme použít pro výrobu: [13][14]

- Dílů s různými materiály
- Prototypů na testování tvarů a přesností
- Náradí
- Prezentačních modelů



Obrázek 10 – PolyJet technologie [o9]

4.4 Laser Cladding (LC)

Laser cladding je proces, při kterém se materiál ve formě prášku nebo drátu roztaví ve výšce jedné vrstvy. Laser působí v tomto procesu jako zdroj tepla pro vytvoření tavicího lázně, která je chráněna před oxidací inertním plynem. Aplikovaná vrstva je metalurgicky spojena s podkladovým materiálem (5-10% směs) a vykazuje malou nebo žádnou poréznost.

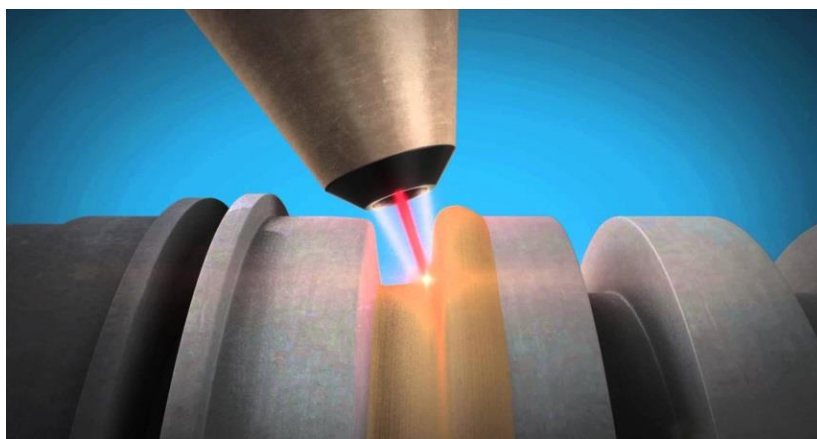
Při 3D tisku je první vrstva nanosená na podkladovou desku, ze které je vyhotovený produkt odstraněn. Laser cladding je speciální druh sváření. LC technologie zaznamenává silný růst v průmyslu a je známá především z oblasti povlakování a oprav. Později se použil laser cladding pro 3D tisk. Tento vývoj je vhodný do nové éry výroby, založené na udržitelném využívání zdrojů a materiálů. Samotný proces opracování laserem je materiálně a energeticky účinný. Jelikož se jedná o aditivní techniku, nedochází ke ztrátě materiálu. LC má recyklační technologii pro regeneraci prášku. Koncoví uživatelé spoléhají na LC pro opravu kritických komponent. Takže LC dává druhou šanci dílcům, které by jinak byly ztraceny. Na úrovni produktu LC chrání součásti proti opotřebení s výrazným prodloužením životnosti. Proces LC minimálně tepelně ovlivňuje substrát. Díky tomu má LC široké uplatnění. [18][19]

Všechny použité materiály jsou neporézní. Díky tomu jsou odolné proti korozi a výsledkem jsou vynikající mechanické vlastnosti. LC má schopnost vytvářet vícevrstvé směsi pro vyladění vlastností materiálu k optimálnímu výkonu. Materiály lze třídit jak s konstantním, tak s proměnlivým poměrem. Směšování prvků v různých poměrech umožňuje například vyladit tvrdost povlaku změnou množství karbidu wolframu. S proměnnými poměry lze vlastnosti přesahovat přes profil. Tímto způsobem je například možné vytvořit tvrdou vnější skořápku na vnitřním jádru. [18][19]



Obrázek 11 - Navařování pomocí LC technologie [o10]

LC má rozsáhlé možnosti s různými materiály pro povlakování, opravy a 3D tisk a to materiály na bázi kovu jako je Fe, Ni, Co, kovových matricových kompozitů a lehkých kovů (Ti, AlSi12 atd.). Zvláštní pozornost je věnována odolnosti vůči otěru a nárazovým vlivům materiálů. Aplikované materiály vykazují lepší odolnost proti opotřebení ve srovnání s konvenčními technikami vytvrzování nebo tepelným postřikem, jako je například plazmový sprej. [18][19]



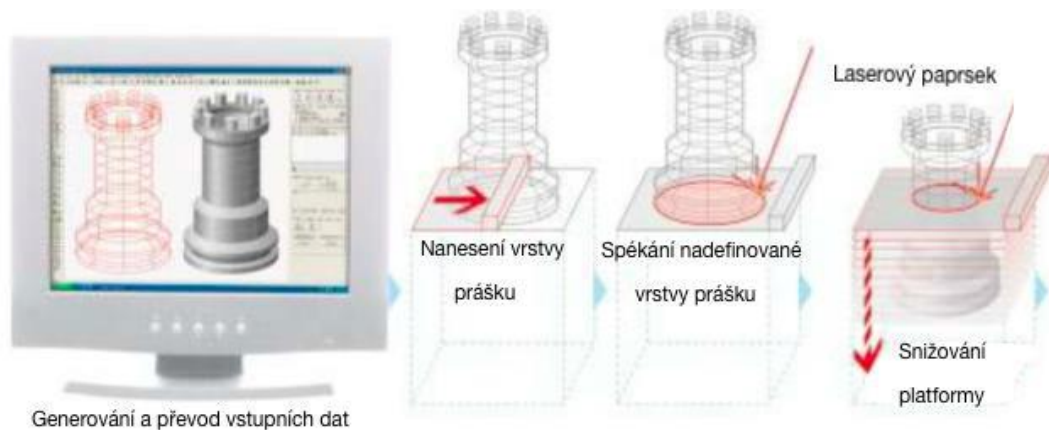
Obrázek 12- Laser Cladding [o11]

4.5 DMLS Technologie (Direct Metal Laser Sintering – laserové spékání kovového prášku)

DMLS je také jednou z technologií tzv. aditivní výroby (AM), při níž produkt nevzniká úbytkem materiálu jako u konvenčních metod, např. frézování, ale naopak vrstvení materiálu do konečného tvaru. I v tomto případě se pro výrobu využívají data z CAD softwaru, která nesou informaci o geometrii potřebné k zhotovení produktu dle přesného zadání. Touto technologií lze vyrábět i tvarově velmi komplikované díly, které by jinými technologiemi byly vyloučené. [20][21]

Předností technologie DMLS oproti jiným způsobům 3D tisku je, že dokáže tisknout z kovových materiálů, a navíc skoro nezanechává žádný odpad. Díky vysoké rychlosti, přijatelné přesnosti a možnosti tvořit plně funkční prototypy, nebo dokonce produkovat výrobky v menších sériích pro rozličné aplikace, je DMLS technologie čím dál více oblíbená u zákazníků, a tím získává vyšší pozici na trhu. [20][21]

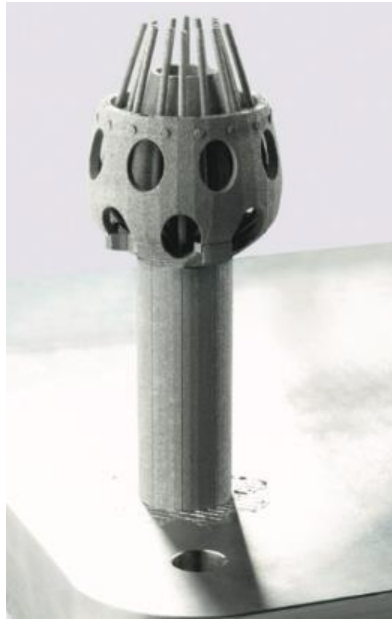
Komponenty se vytvářejí vrstvením materiálu. Systém začíná aplikací tenké vrstvy práškovitého materiálu na stavební platformu. Po vytvoření vrstvy laserový paprsek spojí prášek přesně v bodech definované daty generovanými počítačem pomocí laserové skenovací optiky. Plošina potom klesne o výšku další vrstvy (obvykle bývá v rozmezí 20 – 40 μ m) a je aplikována další vrstva prášku. Opět je materiál taven tak, aby se spojil s vrstvou níže na předem stanovených místech, dokud není celý dílec vyhotoven. Tímto procesem vznikne nejen součást, ale také zbyde nepoužitý kovový prášek, který lze opět použít pro další výrobu, díky tomuto má technologie DMLS jedinečné vlastnosti. [21]



Obrázek 13 - Schéma výroby pomocí DMLS technologie [21]

Technologie DMLS disponuje řadou využitelných materiálů, jakou jsou korozivzdorné, nástrojové oceli, slitiny titanu, hliníku, Inconel nebo drahé kovy jako zlato a stříbro. V konkrétním případě se využívají materiály např. TiAl6V4, Inconel 718, 17-4 PH korozivzdorná ocel, hliníková slitina AlSi10Mg, nerezová slitina 316L a další. Tyto materiály jsou aplikované pro výrobu technických součástí, lékařských implantátů, vstřikovacích forem, šperků nebo leteckých a automobilových součástek. Při zpracování se u těchto materiálů snažíme dosáhnout stálé parametry pro vysokou kvalitu. Dodavatelé systémů pro technologie DMLS poskytují volně k dispozici materiálové listy, ve kterých si zákazník získá povědomí o vlastnostech materiálů, jejich použití, nebo následné zpracování materiálu, které je nutné pro dosažení předepsaných parametrů. [22]

Tato metoda je stejně jako předešlé aditivní technologie využívána při výrobě složitých dílců a prototypů ve vývojových fázích přípravy nových výrobků. Oproti konkurenci má výhodu vyšší rychlosti výroby, což dokáže přinést nemalé finanční úspory. Díky těmto vlastnostem je využívána např. v automobilovém průmyslu, kde slouží k vývoji plechových součástí. Výhody součástí vyrobené touto technologií je, že odpadá potřeba razicích a tvarovacích nástrojů, a tím se výrazně sníží celkové náklady a uspoří se výrobní čas. Dále je využívána v leteckém průmyslu, a to konkrétně při vývoji bitevníku Eurofighter Typhoon, kde DMLS technologie posloužila při výrobě součásti pro rozvod kyslíku. Ta byla před tím vyráběna z více kusů a docházelo k úniku kyslíku. Na tiskárně se podařilo tuto součást vyrobit z jednoho kusu, a tím byl problém vyřešen. V neposlední řadě se laserové spékání využívá při výrobě forem, kostních náhrad a zubních protetik, nebo výrobě šperků. [22]



Obrázek 14 - Součásti stavěné technologií DMLS [o12] [o13]

Jedna z firem, která u nás na trhu poskytuje systémy pro aditivní výrobu s využitím technologie DMLS, je společnost Misan s.r.o. V katalogu s řadou produktů Concept Laser nalezneme 4 stroje. [22]

- Mlab/R cusing je nejjednodušším strojem, který je vhodný pro výrobu složitě a jemně strukturovaných součástí, kdy záleží na vysoké kvalitě povrchu. Slouží při výrobě dílů z reaktivních materiálů (Titan).
 - Stavební prostor: 90 x 90 x 80 mm (x,y,z)
 - Vlákno laseru: 100W
 - Tloušťka vrstvy: 15 – 50 μm
- M1 cusing je vhodný pro začátek s technologií DMLS.
 - Stavební prostor: 250 x 250 x 250 mm (x,y,z)
 - Vlákno laseru: 200W nebo 400W
 - Tloušťka vrstvy: 20 - 80 μm
- M2 cusing/Multilaser je stroj pro stavbu těles z titanových, hliníkových, ocelových a dalších kovových slitin, případně čistých kovů.
 - Stavební prostor: 250 x 250 x 280 mm (x,y,z)
 - Vlákno laseru: kombinace 1 nebo 2 laserů s 200 nebo 400 W
 - Tloušťka vrstvy: 20 - 80 μm
- X line 2000R je s vysokou produktovou pro bezpečné zpracování reaktivních materiálů. Dvoupaletové uspořádání s automatickou výměnou pro eliminaci vedlejších časů.

- Stavební prostor: 800 x 400 x 500 mm (x,y,z)
- Vlákno laseru: 2 x 1 kW
- Tloušťka vrstvy: 30 - 150 μm

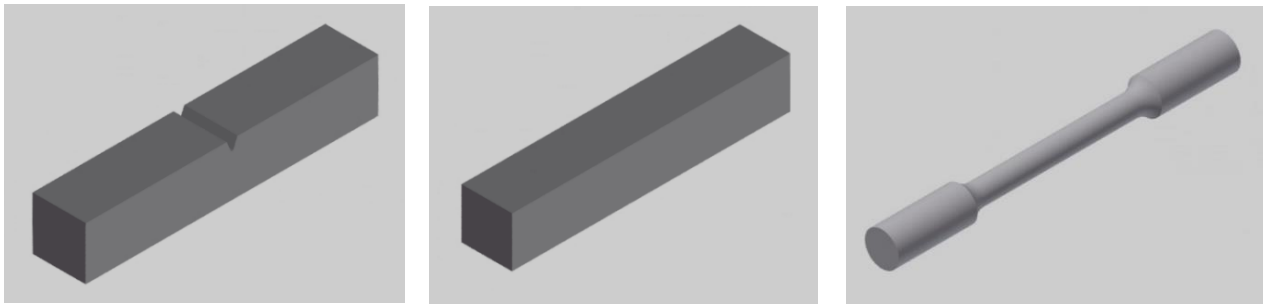
5 Určení mechanických vlastností materiálu tisknutého pomocí DMLS technologie

5.1 Popis práce

Součástí bakalářské práce je zjištění mechanických vlastností perspektivního materiálu 17-4 PH (CL92 PH – martenzitická precipitačně vytvrditelná nerezová ocel), a to zkouškou rázem v ohybu a zpracování dat ze zkoušky tahem. Toto měření bylo uskutečněno v rámci interního projektu na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie na fakultě strojní ČVUT. Zkoumaná ocel byla zpracována aditivní technologií DMLS, pomocí které byla vytištěna paleta se zkušebními tělesy. Paleta byla vytištěna společností Misan, která je výhradním dodavatelem 3D tiskáren Concept Laser. Tato ocel byla v ČR tisknuta vůbec poprvé. [23]

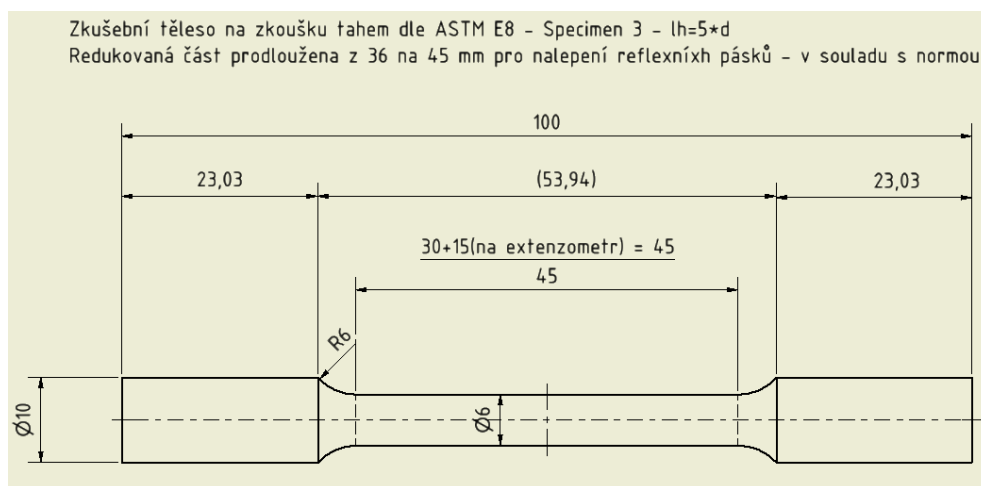
5.1.1 Návrh těles pro mechanické zkoušky

Zkušební tělesa byla navrhována podle normalizovaných vzorků. Tím se minimalizuje vliv metodiky testování na výsledky měření a dopomáhá k průkaznosti měření. Pro zkoušku rázem v ohybu byly tisknuty klasické vzorky. Podle normy ČSN ISO 148-1 (zkouška rázem v ohybu dle Charpyho) byla provedena zkouška. Tisknutá tělesa byla vyrobena horizontálně i vertikálně za účelem zjišťování anizotropie mechanických vlastností. U některých těles nemohl být V-vrub vytištěn, proto byl dodatečně vybroušením. (výkres viz příloha) [23]



Obrázek 15 - Zkušební tělesa 1) pro zkoušku rázem v ohybu s vrubem (10ks), 2) pro zkoušku rázem v ohybu bez vrubu (5ks), 3) pro zkoušku tahem (12ks – 6 svisle + 6 pod 45°) [23]

Podle normy ASTM E8 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) byly zvoleny správné tvary a rozměry zkušebních těles. Vybrané rozměry z normy ČSN ISO byly podřízeny ceně tisku. Z důvodů měření prodloužení za pomoci extenzometru byla prodloužena válcová část vzorku oproti běžné ASTM E8. [23]



Obrázek 16 - Rozměry zkušebního tělesa dle ASTM E8 [23]

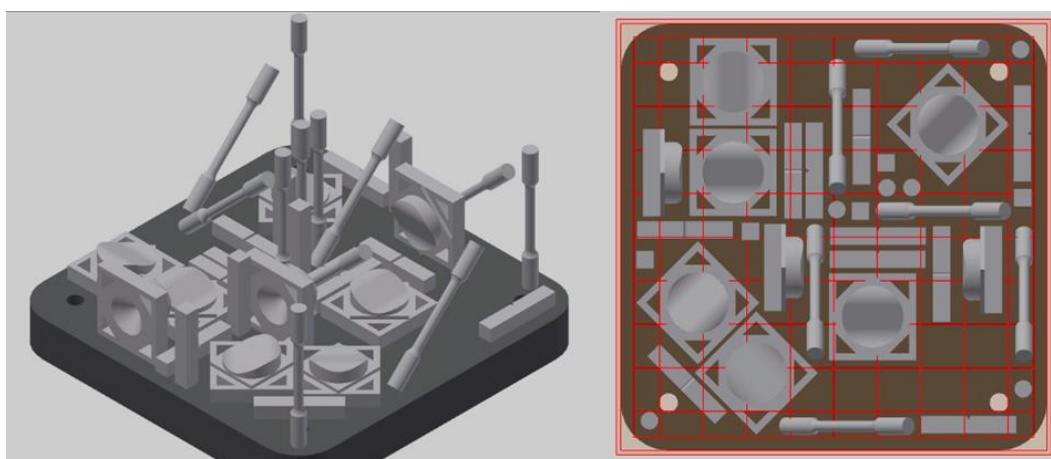
5.1.2 Rozmístění těles na paletě

Tištěné objekty byly postupně vrstveny na tiskové platformě, ze které se po vyjmutí odřízly drátořezem, pokryly ochranným lakem a tepelně se zpracovaly. Rozmístění vzorků stručně popisuje následující tabulka: [23]

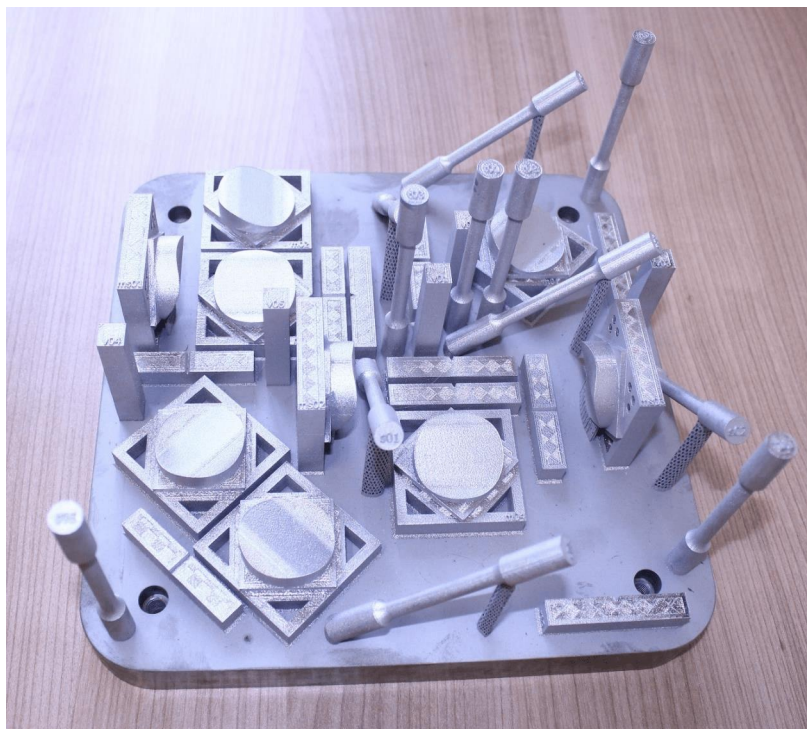
Tabulka 4 - Seznam tištěných těles a jejich poloha na tiskové platformě

ozn.	typ	orientace	kraj/střed	vrub předtištěn?
R01	zkouška rázem	horizontálně	střed	YZ
R02	zkouška rázem	horizontálně	střed	YZ
R03	zkouška rázem	horizontálně	střed	YZ
R04	zkouška rázem	horizontálně	kraj	XZ
R05	zkouška rázem	horizontálně	kraj	šikmo
R06	zkouška rázem	horizontálně	kraj	XY

R07	zkouška rázem	horizontálně	střed	XY
R08	zkouška rázem	horizontálně	střed	XY
R09	zkouška rázem	horizontálně	střed	XY
R10	zkouška rázem	horizontálně	kraj	XY
V01	zkouška rázem	vertikálně	střed	bez vrubu
V02	zkouška rázem	vertikálně	střed	bez vrubu
V03	zkouška rázem	vertikálně	kraj	bez vrubu
V04	zkouška rázem	vertikálně	kraj	bez vrubu
V05	zkouška rázem	vertikálně	kraj	bez vrubu
S01	zkouška tahem	pod 45°	střed	
S02	zkouška tahem	pod 45°	kraj	
S03	zkouška tahem	pod 45°	střed	
S04	zkouška tahem	pod 45°	kraj	
S05	zkouška tahem	pod 45°	kraj	
S06	zkouška tahem	pod 45°	střed	
T01	zkouška tahem	vertikálně	střed	
T02	zkouška tahem	vertikálně	střed	
T03	zkouška tahem	vertikálně	střed	
T04	zkouška tahem	vertikálně	kraj	
T05	zkouška tahem	vertikálně	kraj	
T06	zkouška tahem	vertikálně	kraj	



Obrázek 17 - 3D model platformy – rozvrstvení, příprava tisku [23]



Obrázek 18 - Vytištěná paleta [23]

5.2 Materiál SS 17-4 PH (CL 92PH)

5.2.1 Vlastnosti materiálu

17-4 PH je označení materiálu, který se řadí do skupiny korozivzdorných ocelí. Mezi legující prvky patří chrom, nikl a měď. V žíhaném stavu je struktura této oceli martenzitická, austenitická a feritická. Po precipitačním vytvrzení se struktura změní na martenzitickou, se zbytkovým austenitem a intermetalickými fázemi. Toho docílíme zahřátím oceli na teplotu v rozmezí 1025 – 1055 °C a následným zchlazením ve vodě, oleji nebo na vzduchu. Pro zbavení pnutí v materiálu ho opět zahřejeme na teplotu 480 °C po dobu 1h, poté necháme vychladnout na vzduchu při pokojové teplotě. Toto zpracování je označeno H900 dle ASTM A564, což je nízkoteplotní vytvrzování s nejnižší plasticitou a nejvyššími pevnostními vlastnostmi. Precipitační zpevnění se provádí v sedmi stavech dle normy DIN EN 10088-3. V tabulkách 5, 6 a 7 je uvedeno chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti. [24][25]

Tabulka 5 - Chemické složení 17-4 PH oceli v procentech

Chemické složení [%]						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Nb
0,04	0,25	0,40	15,30	4,50	3,25	0,30

Tabulka 6 - Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti při 20°C					
Hustota [kg/m ³]	Tepelná vodivost [W/(m.K)]	Měrná tepelná kapacita [J/(kg.K)]	Elektrický odpor [Ω.mm ² /m]	Modul pružnosti [N/mm ²]	Magnetické vlastnosti
7 800	16,0	500	0,71	200.10 ³	magnetický

Tabulka 7 - Mechanické vlastnosti po tepelném zpracování

Mechanické vlastnosti			
Tvrdość ¹⁾ [HB]	Mez kluzu ²⁾ [N/mm ²]	Pevnosť v tahu ²⁾ [N/mm ²]	Prodloužení ²⁾³⁾ [%]
388	1 170	1 310	10

¹⁾Tvrdość měřena podle DIN EN ISO 6508

²⁾Pevnosť měřena při 20°C podle DIN EN 50125

³⁾Použitím tepelného zpracování lze dosáhnout vyššího prodloužení

Tato ocel je obtížně tvářitelná kvůli své vysoké tvrdosti. Pokud však potřebujeme ocel tvářet, musíme využít tvářením za tepla nebo tepelným zpracováním před tvářením za studena. Má vysokou korozivzdornost oproti ostatním ocelím s vysokou pevností. Materiál je možné svařovat pomocí metody TIG. Svářet však můžeme až po rozpouštěcím žháním. Doporučené je také zachování nízkého příkonu a předehřev na 100 až 200 °C při tloušťce nad 25 mm. Po svařování se provádí precipitační vytvrzení. [24]

Jestliže chceme tento materiál povrchově upravit, používá se nitridace, plazmová nitridace, odvápnění a pasivace. Nitridace se provádí jen v případě zvýšených nároků na tření ke zvýšení odolnosti proti opotřebení. V kombinaci s precipitačním vytvrzováním se používá plazmová nitridace a to do hloubky 0,1 až 0,15 mm s tvrdostí této povrchové vrstvy 67 HRC. V případě odvápnění se provádí mořením po rozpouštěcím žháním, nebo po tvářením za tepla. Pasivace se provádí v roztoku 10% kyselině dusičné a 2% kyseliny fluorovodíkové při teplotě 40 až 60°C po dobu několika minut. Touto metodu se mimo jiné odstraní povrchové odbarvení způsobené rozpouštěcím žháním, což může mít za následek nežádoucí snížení korozní odolnosti. [24][25]

5.2.2 Použití oceli 17-4 PH

Použití korozivzdorných ocelí nachází uplatnění v mnoha odvětvích. Ocel 17-4 PH není výjimkou. Hlavní předností jsou vysoká korozivzdornost, dobrá odolnost při vyšších teplotách, vysoká houževnatost při zachování přijatelné tažnosti. Její využití nalezneme na výrobky i jednotlivé součásti v leteckém i raketovém průmyslu, ve strojním průmyslu, potravinářském a chemickém průmyslu, petrochemickém průmyslu na výrobu generátorů elektřiny, měřicí a kontrolní techniku. Maximální provozní teplota je až do 350°C. Po krátkou dobu mohou být díly z této oceli použity až do teplot dosahujících těsně pod teploty precipitačního vytvrzení (až pod 620°C, v závislosti na stavu). Nízké provozní teploty se pohybují ve velkém intervalu od 0°C do -196°C, ale záleží na teplotním zpracování. [24][25]

5.3 Zkouška tahem

Nejčastěji používanou statickou zkouškou je zkouška tahem, pomocí níž se vyhodnocuje pevnost a plasticita materiálu. Norma ČSN EN ISO 6892-1 je nejčastěji používaná pro určení těchto vlastností. [26]

5.3.1 Zkušební tělesa a princip zkoušky

Pro zkoušku se používají tělesa obrobená i neobrobená, tím pádem je možné použít vzorek zhotovený různými technologiemi. Může mít různé průřezy, a to kruhový, čtvercový, obdélníkový nebo šestihranný. Hlavně se musí dodržet norma. Kruhový průřez je nejčastěji používaný tvar, pro který pro počáteční měřenou délku L_0 platí vztah:

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad [\text{mm}]$$

Počáteční délka je tedy definovaná jako součin součinitele proporcionality k (nejčastěji je $k = 5,65$) a odmocniny počáteční plochy příčného průřezu S_0 . [26]

Při zkoušce se těleso deformuje tahovým zatížením předepsanou rychlostí, dokud nedojde k přetržení potažmo vzniku lomu při určité teplotě (10 až 35 °C). [26]

Zaznamenané veličiny během zkoušky jsou zatěžující síla F a absolutní prosloužení ΔL zkušební tyče. Zaznamenané hodnoty se vykreslují do grafu $F=f(\Delta L)$. Fáze vyvolává napětí v tyči, které způsobuje deformace. Z diagramu lze vyčíst nejdříve lineární část, která

představuje elastickou deformaci. Po ukončení lineární závislosti, materiál se začne deformovat plasticky. [26]

Různé oceli mají odlišné pracovní diagramy. Pro tvrdou ocel se určuje smluvní mez kluzu, pro měkkou ocel naopak je charakteristická výrazná mez kluzu. Pomocí síly se určuje smluvní mez kluzu, která odpovídá předem stanovené velikosti deformace (0,2% L₀). [26]

5.3.2 Mechanické vlastnosti a jejich stanovení ze zkoušky

Mechanické vlastnosti se vyhodnocují z naměřených hodnot ze snímačů zkušebního stroje, pracovních diagramů a tvarů zkušební vzorku. Smluvní vlastnosti se vztahují k rozměrům zkušební tělesa. [26]

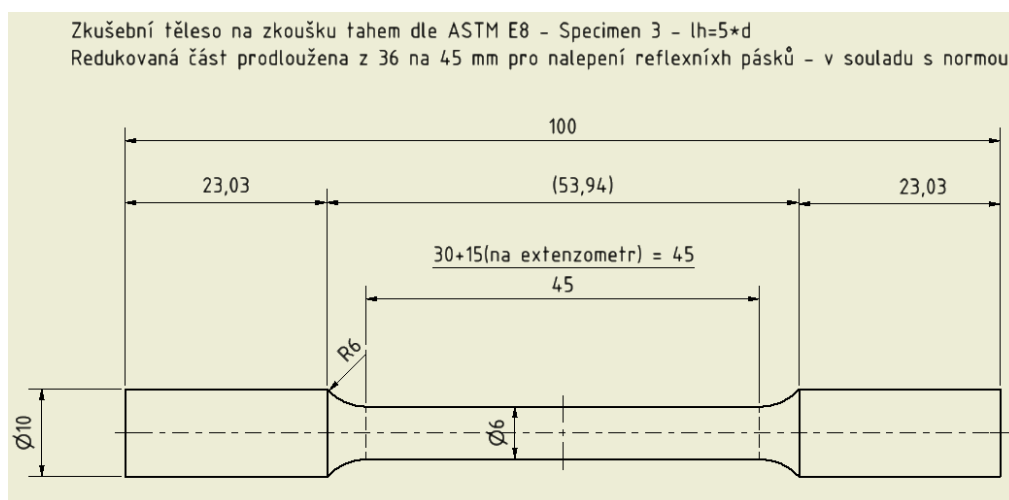
U zkoušky tahem jsou smluvní vlastnosti tyto: mez kluzu (napětí způsobuje nárůst plastické deformace bez nárůstu napětí), smluvní mez kluzu (hodnota napětí, při kterém dosáhne předepsané prodloužení 0,2% plastické deformace), mez pevnosti v tahu (při této hodnotě napětí dochází k lomu zkušební tyče), tažnost (napětí odpovídající největšímu zatížení před přetržením zkušební tyče) a kontrakce (udává procentuální poměr mezi původním průřezem a zmenšeným průřezem po přetržení zkušební tyče). [26]

Mez kluzu	$R_e = \frac{F_e}{S_0}$	[MPa]
Smluvní mez kluzu	$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$	[MPa]
Mez pevnosti v tahu	$R_m = \frac{F_m}{S_0}$	[MPa]
Tažnost	$A = \frac{(L_u - L_0)}{L_0} \cdot 100$	[%]
Kontrakce	$Z = \frac{(S_0 - S_u)}{S_0} \cdot 100$	[%]

5.3.3 Vyhodnocení zkoušky tahem pro materiál 17-4 PH

Pomocí technologie DMLS byly vytištěna tělesa z materiálu 17-4 PH a podrobena zkoušce tahem. Zkoušení probíhalo na trhacím stroji LabTest 5.100SP1. Podle normy ASTM E8 byly zvoleny tvary a rozměry zkušebních těles a jsou uvedeny na obrázku 19. Vzorky byly zatíženy maximální možnou zatěžující silou, kterou trhací stroj vyvine, a to 98 000N při rychlosti deformování 10 mm/min. [23]

Vzorky byly vytištěny na paletu v různých směrech, a to ve směru svislém (6x – T01,



Obrázek 19 - Rozměry zkušebního tělesa dle ASTM E8 [23]

T02, T03, T04, T05, T06) a pod úhlem 45 ° (6x – S01, S02, S03, S04, S05, S06). Všechna zkušební tělesa byla tepelně zpracována (precipitační vytvrzování) kromě vzorků T06 a S06. Cílem této tahové zkoušky je zjištění, jak se mění mechanické vlastnosti a jaký vliv má u tištěných těles jejich odlišný směrem tisku a tepelné zpracování. Toto měření je zaměřeno na mechanické vlastnosti, a to hlavně na mez pevnosti v tahu, mez kluzu a tažnost. Na konci se naměřené hodnoty porovnají s katalogovými hodnotami. [23]

Tabulka 8 - Mechanické vlastnosti zkušebních těles

Název vzorku	Tepelné zpracování	Mez pevnosti v tahu [N/mm ²]	Mez kluzu [N/mm ²]	Tažnost [%]	Mez pevnosti z katalogu [N/mm ²]	Mez kluzu z katalogu [N/mm ²]
S01 (45°)	Ano	1371	1238	-	1310	1170
S02 (45°)	Ano	1356	1226	-	1310	1170
S03 (45°)	Ano	1290	1151	-	1310	1170
S04 (45°)	Ano	1361	1232	-	1310	1170
S05 (45°)	Ano	1298	1153	-	1310	1170
S06 (45°)	Ne	953	886	-	1310	1170
T01	Ano	-	-	-	1310	1170

T02	Ano	1269	1150	-	1310	1170
T03	Ano	1234	1100	-	1310	1170
T04	Ano	1200	1065	-	1310	1170
T05	Ano	1230	1099	-	1310	1170
T06	Ne	821	719	2,36	1310	1170

Z měření je patrné, že nejlepší hodnoty meze pevnosti mají vzorky tištěné pod úhlem 45° s tepelným zpracováním. Důvodem pravděpodobně bude, že tištěné vrstvy nejsou kolmé na směr tažné síly oproti vzorkům tištěným svisle. Vzorky tištěné pod úhlem 45° mají mnohdy lepší meze pevnosti, než jsou uvedené v katalogu. Naopak svisle tištěné vzorky ani jednou této hodnoty nedosáhly a to v průměru o 70 N/mm². Poloha zkušebních těles na paletě nemá zřejmě vliv na mechanické vlastnosti. Tažnost bylo možné změřit pouze u vzorku T06, kde hodnota byla 2,36%, u ostatních vzorků to nebylo možné kvůli jejich křehkosti. Meze pevnosti u tepelně nezpracovaných vzorků vyšla téměř o 400 N/mm² hůře, než u vzorků tepelně zpracovaných. Pro získání nejlepších hodnot meze pevnosti musíme součásti tisknout pod úhlem 45° a tepelně zpracovat.

5.4 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybuje zjišťuje vrubovou houževnatost vzorku. Patří mezi nejrozšířenější materiálové zkoušky. Provádí se při podmínkách stanovených normou, a to nejčastěji zkouškou rázem v ohybu metodou Charpy dle ČSN ISO 148-1. [26]

5.4.1 Podstata metody

Za předem stanovených podmínek proběhne jedním rázem k přeražení vzorku s vrubem za pomoci kyvadlového kladiva, většinou o kapacitě 300 J, rychlostí 4 až 7 m/s. Vzorek musí splňovat předepsanou geometrii, kde vrub je uprostřed tělesa na protilehlé straně k místu úderu při zkoušce. Vrubová houževnatost se určí jako podíl spotřebované nárazové práce (K) k počátečnímu průřezu zkušebního tělesa v místě vrubu (S₀).

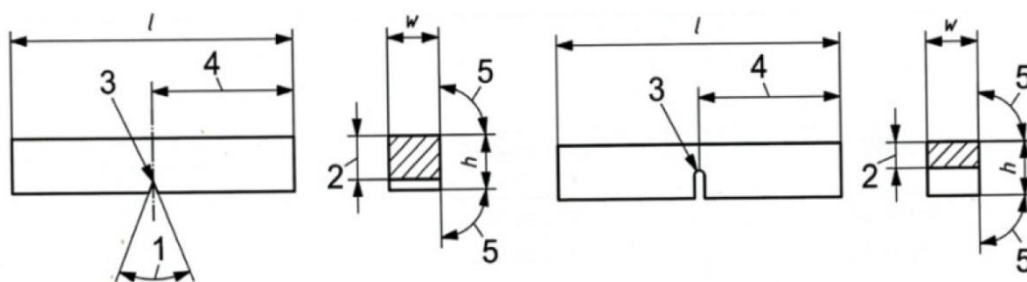
$$KCV = \frac{KV}{S_0} \quad [J/cm^2]$$

Z důvodu rozdílných naměřených hodnot při odlišných teplotách vzorků se musí zaznamenávat i teplota při měření. Především pokud je těleso řízeně zahřáté nebo ochlazené. [26][27]

Dále se u této zkoušky vyhodnocuje plocha lomu. Na ní je snadno rozlišitelný podíl lomu plastického (tvárný, matná plocha) a křehkého (rovinný, krystalicky třpytivý). [26][27]

5.4.2 Zkušební tělesa

Norma říká, že „standardní zkušební těleso musí mít délku 55 mm a čtvercový průřez o stranách 10 mm. Ve středu délky musí být buď vrub ve tvaru V, nebo U, jak je patrné z obrázku 20. V-vrub tvaru V musí mít úhel 45°, hloubku 2 mm a poloměr kořene 0,25 mm. U-vrub tvaru U musí mít hloubku 5 mm a poloměr kořene 1 mm.“ Dále musí vzorek splňovat požadovanou drsnost povrchu. Je-li vzorek tepelně zpracován, musí všechny mechanické procesy jako broušení povrchu a obrobení vrubu být provedeny až po konečném tepelném zpracování. Výjimku mají materiály, u kterých je prokázáno, že se jejich mechanické vlastnosti nemění po opracování před tepelným zpracováním. [27]



Obrázek 21 - Geometrie zkušebního tělesa s V-vrubem (vlevo) a s U-vrubem (vpravo) [27]

5.4.3 Úprava těles před zkouškou

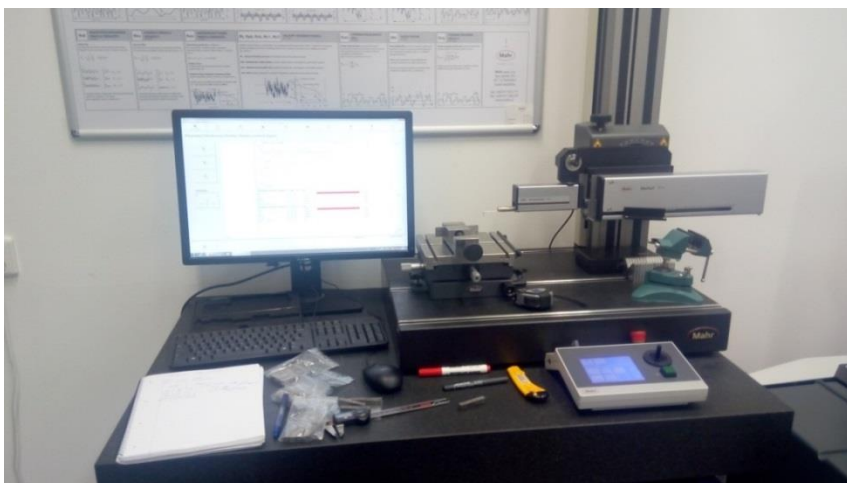
Nejdříve jsme museli zjistit, zda vytištěné vzorky splňují rozměry a tvar dle normy. Z měření na CMM (Coordinating Measuring Machine) bylo zjištěno, že délka vzorků je menší cca o 1 %, což je pro vyhodnocení zkoušky zanedbatelné. Dále byla pro potřeby přípravy vzorků změřena drsnost na laboratorním drsnoměru MarSurf XCR 20 od firmy Mahr, která by dle specifikace neměla přesáhnout hodnotu Ra 2, resp. Ra 4 μm (viz výkres).

Tabulka 9 - Naměřené hodnoty drsností v horizontálním směru tisku

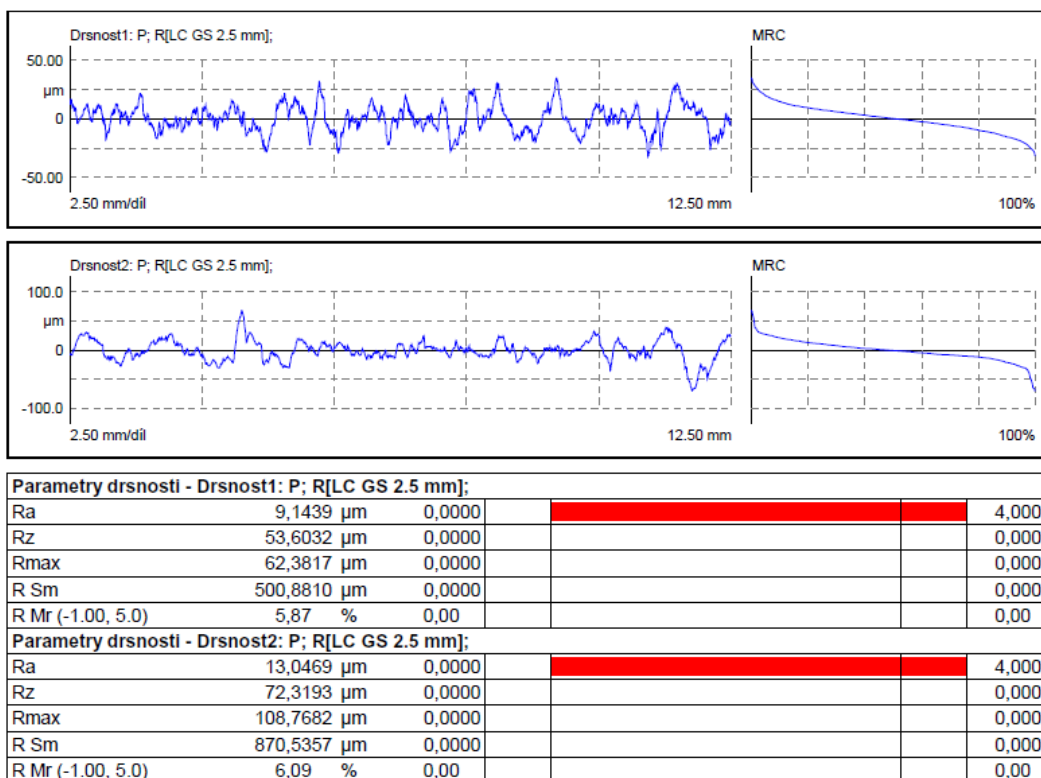
Horizontální směr tisku										Bez TZ		
Název	R01		R02		R03		R04		R05			
Rovina	tisku	norm.	tisku	norm.	tisku	norm.	tisku	norm.	tisku	norm.		
Na paletě	střed		střed		střed		kraj		kraj			
Ra [μm]	14,7	5,696	13,84	3,931	15,78	4,06	18,03	4,994	15,92	6,077		
Rz [μm]	81,54	44,08	77,12	26	82,48	30,26	97,54	33,76	88,72	39,38		
Nejvyšší Rz [μm]	RT	97,54		Požadovaná hodnota Ra v rovině tisku je (RT) Ra 2 a v rovině normálové (RN) Ra 4 .								
	RN	44,08										
Horizontální směr tisku										Bez TZ		
Název	R06		R07		R08		R09		R10			
Rovina	tisku	norm.	tisku	norm.	tisku	norm.	tisku	norm.	tisku	norm.		
Na paletě	kraj		střed		střed		střed		kraj			
Ra [μm]	11,1	4,055	13,66	3,994	2,318	4,107	13,02	4,069	15,06	13,81		
Rz [μm]	62,96	26,58	73,73	29,44	16,42	28,56	73,02	27,19	91	91,11		
Nejvyšší Rz [μm]	RT	73,73		Požadovaná hodnota Ra v rovině tisku (RT) Ra 4 a v rovině normálové (RN) Ra 2 .								
	RN	29,44										

Tabulka 10 - Naměřené hodnoty drsností ve vertikálním směru tisku

Vertikální směr tisku					Bez TZ
Název	V01	V02	V03	V04	V05
Na paletě	střed	střed	střed	kraj	kraj
Ra [μm]	4,172	4,42	3,734	8,159	7,5092
Rz [μm]	28,78	32,72	24,75	53,39	47,8195
Požadovaná hodnota drsnosti je Ra 2 .					
Nejvyšší Rz [μm]			53,39		
Předpokládáme, že 4 shodné plochy (rovinu tisku (RT) a na ni kolmá) mají podobné drsnosti.					



Obrázek 22 - Měření drsností



Obrázek 23 - Část z protokolu z měření drsnosti vzorku R04 na ploše v RT

Zaznamenané hodnoty drsností v tabulce 11 jsou průměrné hodnoty ze dvou měření na jedné ploše. Z těchto hodnot je patrné, že kvalita je skoro ve všech případech nedostačující. Nejhorší hodnoty dosahují plochy v rovině tisku (RT, rovina rovnoběžná s rovinou stolu stroje), které jsou v průměru Ra 13,11 µm a Rz 72,811 µm. O něco lépe na tom jsou plochy v rovině normálové (RN, rovina kolmá na RT), kde jejich kvalita povrchu byla v průměru Ra 5,4793 µm a Rz 37,636 µm, což nedosahuje požadovaných hodnot Ra 4 µm pro plochy bez vrubu (kromě vzorku R02) a Ra 2 µm pro plochy s vytištěným vrubem. V RT je vždy jedna ze dvou ploch odříznutá od výrobní palety drátořezem a ta je vždy kvalitnější než její protilehlá plocha. U vzorku R08 v RT je jedna z ploch kvalitnější a to v důsledku broušení před měřením drsností v rámci zkoušky tvrdosti a její protilehlá plocha je plocha odříznutá, a proto při měření jako jeden z mála vzorků splňuje požadovanou drsnost. Drsnosti konce tyčí nejsou podstatné.

Aby zkouška rázem v ohybu byla relevantní, museli jsme vzorky zbrousit na přibližně stejný rozměr v průřezu a na požadovanou drsnost Ra 2 resp. Ra 4. Broušení bylo provedeno na rovinné brusce BRH 20 CNC v provedení s řídicím systémem MIKRONEX SN 600.4. V poslední fázi před samotným přeražením byl vybroušen V-vrub do požadované hloubky 2 mm.

Tabulka 12 - Rozměry průřezu zkoumaných těles

Název vzorku	Šířka [mm]	Výška [mm]
R01	9,07	9,09
R02	9,03	9,06
R03	9,07	9,10
R04	9,05	9,07
R05	9,09	9,08
R06	9,06	9,08
R07	9,09	9,09
R08	9,02	9,10
R09	9,04	9,02
R10	9,09	9,10
V01	9,08	9,10
V02	9,09	9,07
V03	9,07	9,06
V04	9,10	9,06
V05	9,08	9,10
Průměr	9,07	9,08



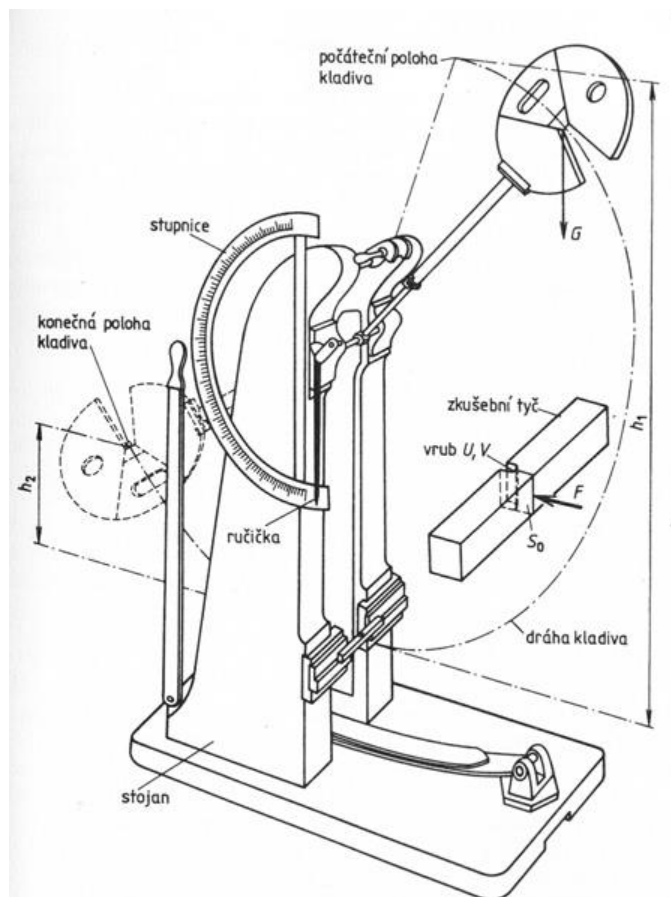
Obrázek 25 - Rovinná bruska BRH 20 CNC



Obrázek 24 - Upevnění vzorků na magnetické lóže brusky

5.4.4 Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu pro materiál 17-4 PH

Zkouška rázem v ohybu byla provedena na zkušebních tělesech s V-vrubem zhotovených pomocí technologie 3D tisku z materiálu 17-4 PH. Pro přeražení zkušebních těles bylo použito Charpyho kladivo o kapacitě 300 J. Teplota při měření byla přibližně 20 °C.



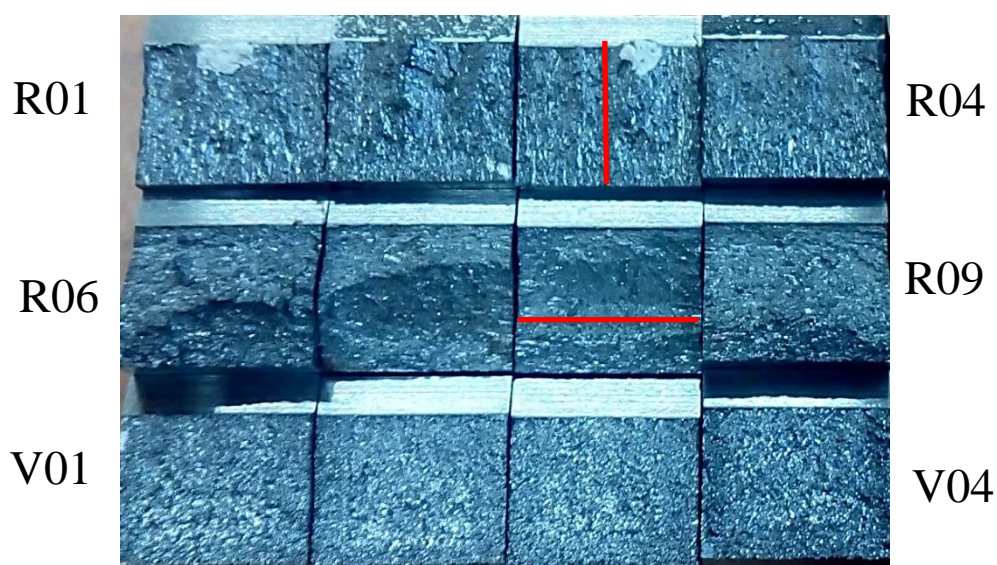
Obrázek 26 - Charpyho kladivo [o14]

Tabulka 13 - Naměřené a dopočítané hodnoty ze zkoušky rázem v ohybu

Vzorky tištěné horizontálně						
Název	Průřez pod vrubem S_0 [cm ²]	Absorbovaná energie KV [J]	Vrubová houževnatost KCV [J/cm ²]	ϕ [°]	Poloha na paletě	Vrub tištěný kolmě/rovnoběžně na/s RT
R01	0,644	8	12	152,5	střed	rovnoběžně
R02	0,64	6	9	154	střed	rovnoběžně
R03	0,646	4	6	156	střed	rovnoběžně
R04	0,641	6,5	10	153,5	kraj	rovnoběžně
Průměr		6,125	9,25			

R06	0,643	5	8	155	kraj	kolmě
R07	0,644	4,8	7	155,2	střed	kolmě
R08	0,646	5	8	155	střed	kolmě
R09	0,633	5	8	155	střed	kolmě
Průměr		4,95	7,75			
Vzorky tištěné vertikálně						
V01	0,646	3,5	5	156,5	střed	bez vrubu
V02	0,641	3,8	6	156	střed	bez vrubu
V03	0,64	3,5	5	156,5	kraj	bez vrubu
V04	0,64	3,5	5	156,5	kraj	bez vrubu
Průměr		3,575	5,25			

Z naměřených hodnot můžeme vyčíst, že ocel 17-4 PH po tepelném zpracování je obecně velmi křehká. Nejlepší hodnoty vrubové houževnatosti vykazují vzorky tištěné horizontálně s vrubem tištěným v rovině tisku, a to s průměrnou hodnotou $KCV = 9,25 \text{ J/cm}^2$. To je téměř dvojnásobek oproti průměrné hodnotě u vzorků tištěných vertikálně bez vytištěného vrubu, kde tato hodnota byla $KCV = 5,25 \text{ J/cm}^2$. Nejspíše je to způsobeno tím, že u vertikálně tištěných těles síla vyvinutá kladivem působí v rovnoběžném směru k rovině tisku, což může mít za následek snazší přelomení vzorku. Vrbová houževnatost u vzorků tištěných horizontálně s vrubem tištěným kolmo na rovinu tisku je v průměru $KCV = 7,75 \text{ J/cm}^2$, což je někde mezi předešlými dvěma skupinami zkušebních těles. Katalogová hodnota absorbované energie je $KV = 21,7 \text{ J}$, což z daleka ani jeden vzorek z měření nesplnil. Nejlépe na tom opět jsou vzorky tištěné horizontálně s vrubem v rovině tisku, ale jejich hodnota je v průměru více jak trojnásobně nižší – $KV = 6,125 \text{ J}$. U vzorků tištěných vertikálně je průměrná hodnota skoro 6,5 krát nižší než udává katalog – $KV = 3,8 \text{ J}$. Z naměřených vzorků nelze jasně prokázat, že poloha vzorků na paletě měla nějaký vliv na výslednou křehkost.



Obrázek 27 - Plochy v místech lomů

Na obrázku 28 jsou zřejmé rozdílnosti povrchů v místě lomu. U vzorků R01 – R04 je vidět, že na lomu jsou kolmé rýhy na vrub, tudíž kolmé i na vrstvy tisku. Vzorky R06 – R09 mají naopak rýhy rovnoběžné s vrubem, ale opět kolmé na vytištěné vrstvy. Důvodem by mohlo být nedokonalé spečení materiálu v každém bodě jedné vrstvy. Při spékání další vrstvy se vrstvy mezi sebou nespojí dokonale a vznikají vady kolmé na rovinu tisku. Lom u vertikálně tištěných vzorků (V01 – V04) je rovný a rovnoběžný s rovinou tisku. U těchto vzorků se neobjevují na jeho povrchu výrazné hrbolky oproti horizontálně tištěným tělesům. Pravděpodobně toto nastává v důsledku přelomení vzorku, kdy kladivo oddělilo dvě vrstvy.

Dále byla zjištěna porezita zkoumaného materiálu, a to přibližně 1% jak ve směru tisku vertikálním, tak horizontálním. Obecně porezita negativně zvyšuje křehkost materiálů. Lze tedy usuzovat, že i zde bude mít nepatrný vliv na křehkost, ale nebude mít vliv na rozdílné výsledky měření.

V porovnání se vzorky tepelně nezpracovanými, vychází tepelně zpracované vzorky mnohonásobně hůře. Vrubová houževnatost u tepelně nezpracovaných vzorků vycházela v průměru $KCV = 32 \text{ J/cm}^2$.

Za nedostatečné výsledné hodnoty z měření v porovnání s katalogovými bude stát mnoho faktorů a my se jen můžeme domnívat, který z nich bude mít největší vliv. Jeden z faktorů bude jistě vlastnost metody DMLS, a to vrstvení materiálu na sebe, což je patrné i z lomové charakteristiky, kde jsou vidět směry vrstev vytvořené při výrobě. Dalším faktorem může být nedostatečné natavení kovového prášku a následné vytvoření vady v homogenitě materiálu. Minimální vliv bude mít 1% porezita.

6 Závěr

Úvodem této práce jsou vyzdvižené nejdůležitější milníky 3D tisku, jako byl vznik prvních tiskáren nebo využití aditivní technologie na poli lékařství, letectví nebo automobilového průmyslu.

Dále byly zpracovány některé z metod 3D tisku se zaměřením na jejich principy výroby, použité materiály a jejich praktické využití v průmyslu. Výhodu lze u 3D tisku shledat v možné customizaci produktu a ohromné flexibilitě. To je u konvenčních výrobních linek jen těžce představitelné. Naopak nevýhoda této technologie je pořizovací cena strojů, stejně tak

jejich provoz. Proto se využívá v průmyslových odvětvích, kde je malá nebo sériová výroba, jako je letecký a kosmický průmysl nebo v lékařství.

Stěžejní část práce bylo určení mechanických vlastností korozivzdorné oceli 17-4 HP, která byla precipitačně vytvrzena (na hodnotu H900 dle ASTM A564) a vytištěna metodou DMLS v závislosti na anizotropii. Bylo zjištěno, že tato ocel vykazuje nejlepší meze pevnosti v tahu, pokud jsou zkušební tyče tisknuty pod úhlem 45° . Výsledné hodnoty dokonce převyšovaly ty katalogové udávané výrobcem. Výsledkem zkoušky rázem v ohybu bylo zjištění, že tištěné vzorky jsou příliš křehké. Naměřené hodnoty byly několikanásobně horší než katalogové. I přesto bylo prokázáno, že nejlepší výsledky měly vzorky tištěné v horizontálním směru s vrubem v rovině tisku. Za rozdílnost výsledků a jejich nízkou houževnatost může nejspíš nedokonalá soudržnost jednotlivých vrstev, vady ve struktuře materiálu a částečně i porozita materiálu. Z výsledných hodnot není jasně zřejmý důvod, proč hodnoty absorbované energie jsou tak nízké, a proto by bylo nasnadě udělat těchto měření více a zkoumat strukturu tištěného materiálu.

7 Seznam použité literatury

- [1] The History of 3D Printing [#Infographic] | StateTech Magazine. State and Local Government Technology [online]. Copyright © 2017 [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <https://statetechmagazine.com/article/2013/08/history-3d-printing-infographic>
- [2] 3D Systems. 3D Printers, 3D Scanning, Software, Manufacturing and Healthcare Services, 3D Systems [online]. Copyright © 2017 3D Systems, [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/our-story>
- [3] Wake Forest Baptist Medical [online]. Copyright © Wake Forest Baptist Medical Center, Medical Center Boulevard, Winston [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <http://www.wakehealth.edu/WFIRM/>
- [4] RepRap - RepRapWiki. RepRap - RepRapWiki [online]. Dostupné z: <http://reprap.org/>
- [5] The 3D Printing Solutions Company, Stratasys. Stratasys 3D Printing & Additive Manufacturing [online]. Copyright © 2015. [cit.15.07.2017]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/corporate/about-us>
- [6] Shapeways - 3D Printing Service and Marketplace. Shapeways - 3D Printing Service and Marketplace [online]. Copyright © 2008 [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <https://www.shapeways.com/>
- [7] MakerBot. Connected 3D Printing Solutions, MakerBot [online]. Copyright © 2009 [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/about-us/>
- [8] Organovo - Bioprinting functional human tissue. Organovo - Bioprinting functional human tissue [online]. Copyright © 2017 Organovo Holdings, Inc. 6275 Nancy Ridge Drive, Suite 110. San Diego, CA 92121 [cit. 15.07.2017] Dostupné z: <http://organovo.com/>
- [9] 2011: Revolutionising aircraft design with the world's first printed aircraft, Engineering and the Environment, University of Southampton [online]. Copyright © 2017 University of Southampton [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <http://www.southampton.ac.uk/engineering/about/making-history/3d-printed-unmanned-aircraft.page>

- [10] Urbee 1. [online]. Dostupné z: <https://korecologic.com/about/urbee/>
- [11] About Us, 3D Printing Service, i.materialise .Online 3D Printing Service, i.materialise [online]. Copyright © Copyright 2017 Materialise [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <https://i.materialise.com/about>
- [12] BOSCHETTO, A. a L. BOTTINI. Accuracy prediction in fused deposition modeling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2014, 73(5-8), 913-928 [cit. 2017-07-15]. DOI: 10.1007/s00170-014-5886-4. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-5886-4>
- [13] Additive Manufacturing for Industry, Incodema3D. Additive Manufacturing for Industry, Incodema3D [online]. Dostupné z: <http://www.incodema3d.com/>
- [14] 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies, Stratasys. Stratasys, 3D Printing & Additive Manufacturing [online]. Copyright © 2015. All rights reserved. See [stratasys.com](http://www.stratasys.com) [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies>
- [15] COOKE, Malcolm N., John P. FISHER, David DEAN, Clare RIMNAC a Antonios G. MIKOS. Use of stereolithography to manufacture critical-sized 3D biodegradable scaffolds for bone ingrowth. Journal of Biomedical Materials Research [online]. 2003, 64B(2), 65-69 [cit. 2017-07-15]. DOI: 10.1002/jbm.b.10485. ISSN 0021-9304. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/jbm.b.10485>
- [16] WANG, Jie, Alvaro GOYANES, Simon GAISFORD a Abdul W. BASIT. Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms. International Journal of Pharmaceutics [online]. 2016, 503(1-2), 207-212 [cit. 2017-07-15]. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2016.03.016. ISSN 03785173. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378517316302150>
- [17] YI, Jianjia, Gérard-Pascal PIAU, André DE LUSTRAC a Shah Nawaz BUROKUR. Electromagnetic field tapering using all-dielectric gradient index materials. Scientific Reports [online]. 2016, 6(1), - [cit. 2017-07-15]. DOI: 10.1038/srep30661. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/srep30661>
- [18] LCV - Laser Cladding Venture. LCV - Laser Cladding Venture [online]. Dostupné z: <https://www.lcv.be/en>

- [19] Laser Cladding Process | Laser Cladding Technology [online]. Copyright © Laser Cladding Technology [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <http://www.lasercladding.co.uk/Laser-Cladding-Process.aspx>
- [20] Technologie DMLS při opravách forem prostřednictvím 3D tisku kovovým materiálem. 3D tisk [online]. Copyright © 2014, Vydavatelství Nová média, s. r. o. [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/technologie-dmls-pri-opravach-forem-prostrednictvim-3d-tisku-kovovym-materialem/>
- [21] GRÜNBERGER, Thomas a Robert DOMRÖSE. Direct Metal Laser Sintering. Laser Technik Journal [online]. 2015, 12(1), 45-48 [cit. 2016-10-18]. DOI: 10.1002/latj.201500007. ISSN 16137728. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/latj.201500007>
- [22] Misan s.r.o.: ConceptLaser - katalog [online]. 2016 [cit. 2016-10-18]. Dostupné z: <http://misan.cz/concept-laser/katalog-detail/m2-cusing-concept-laser-m2-cusing-single-multilaser/>
- [23] PITRMUC, In. Zdeněk, Ing. Jan ŠIMOTA a Ing. Jan URBAN. Výzkumná zpráva projektu SGS16/218/OHK2/3T/12 „Vývoj technologie výroby obecných tvarových ploch za použití kombinace aditivních a CNC technologií využitelných v průmyslu“. Praha, 2016.
- [24] Bohler.: Bohler N700 – katalog [online]. 2016 [cit. 2016-10-20]. Dostupné z: <http://www.bohler-edelstahl.com/media/N700DE.pdf>
- [25] AKSteel.: 17-4PH Stainless steel – katalog [online]. 2016 [cit. 2016-10-20]. Dostupné z: http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/precipitation/17-4_ph_data_sheet.pdf
- [26] Čižmárová E., Horník J., Jeníková Z., Sobotová J. Nauka o materiálu I. a II. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2014, 104 s. ISBN 978-80-01-05550-2
- [27] CSN ISO 148-1: Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda
- [o1] Spinocchia Freund London [online]. Copyright ©i [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <http://spinocchiafreund.com/wp-content/uploads/2014/11/SF-World-Fairings-by-Scott-Summit02.jpg>

- [o2] [online]. Copyright ©p [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <https://images.fastcompany.com/upload/inline-organovo-Printing-Human-Organs-how-it-works.jpg>
- [o3] [online]. Copyright © [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: https://korecologic.files.wordpress.com/2013/02/img_9161.jpg
- [o4] Additive Manufacturing | 3D Printing [online]. Copyright © [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: http://additivemanufacturingllc.com/wp-content/uploads/2015/04/FDM_main.jpg
- [o5] [online]. Copyright © [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: http://img.dxcdn.com/productimages/sku_397157_1.jpg
- [o6] [online]. Copyright © [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <https://leedsunicareers.files.wordpress.com/2015/07/sla-3d-printing-method.png>
- [o7] Konstrukter.cz [online]. Copyright © [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/wp-content/uploads/2015/02/stereolitografie-model-vznika-z-pryskyrice.jpg>
- [o8] [online]. Dostupné z: http://www.javelin-tech.com/3d-printer/wp-content/uploads/2013/06/objet_model.jpg
- [o9] [online]. Copyright © [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: https://i.ytimg.com/vi/jLTQz_T-L54/maxresdefault.jpg
- [o10] [online]. Copyright © [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: http://www.dmgmori.com/webspecial/journal_2015_1/images/content/tn/llaserte-65-3d/lasertec-65-3d-slider-01.jpg
- [o11] [online]. Copyright ©K [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <https://i.ytimg.com/vi/X3dom58qD9Y/maxresdefault.jpg>
- [o12] MISAN, s.r.o. Concept Laser - souhrnný katalog: Systémy pro laserové spékání kovů. 2015.
- [o13] 3ders.org - 3D printer and 3D printing news [online]. Copyright © [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/images2015/precious-3dprinted-gold-jewelry.jpg>

[o14] [online]. Copyright ©b [cit. 15.07.2017]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/docs-images/17/84444/images/9-0.png>

8 Přílohy

