

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti aditivní výroby kovových dílů z materiálu

17-4 PH

Additive manufacturing production possibilities of material 17-4 PH

Autor:

Bc. Marek Hencel

Vedoucí práce:

Ing. Jan Šimota

Rok:

2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hencel** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **466101**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Možnosti aditivní výroby kovových dílů z materiálu 17-4 PH

Název diplomové práce anglicky:

Additive manufacturing production possibilities of material 17-4 PH

Pokyny pro vypracování:

1. Aditivní technologie - přehled a nové vývojové směry
2. Aditivní výroba kovových dílů - porovnání technologií, alternativy
3. Příprava dat a výroba zkušebních vzorků
4. Provedení a vyhodnocení zkoušek

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: **04.10.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **16.02.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací na téma *Možnosti aditivní výroby kovových dílů z materiálu 17-4 PH* vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:

Podpis autora:

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Janu Šimotovi za cenné připomínky, odborné rady a věnovaný čas při vypracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D a Ing. Vladimíru Márovi, Ph.D za pomoc a konzultaci při realizaci jednotlivých zkoušek.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na mechanické vlastnosti vzorků nerezové oceli 17-4 PH zhotovených aditivní technologií Direct Metal Laser Sintering (DMLS) a Bound Metal Deposition (BMD). Teoretická část je věnována aditivní výrobě, jejím procesům, technologiím a výrobnímu postupu dílu. Také jsou uvedené současné vývojové směry v tomto odvětví. Praktická část se věnuje přípravě zkušebních těles jednotlivými technologiemi a jejich analýzou. Mechanické vlastnosti vzorků jsou v této práci vyhodnoceny na základě zkoušky tahem, rázem v ohybu a tvrdosti. U vzorků je rovněž analyzována jejich porozita a anizotropie mechanických vlastností. Cílem práce je ověřit, zda zhotovené vzorky dosahují mechanických vlastností deklarovaných výrobcem, jaký vliv na tyto vlastnosti má orientace tisku a zda je možné odlišnými technologiemi aditivní výroby dosáhnout srovnatelných výsledků.

Klíčová slova

Aditivní výroba, 3D tisk, BMD, DMLS, 17-4 PH, mechanické vlastnosti

Abstract

The thesis is focused on the mechanical properties of 17-4 PH stainless steel samples made by additive technology Direct Metal Laser Sintering (DMLS) and Bound Metal Deposition (BMD). The theoretical part is devoted to additive manufacturing, its processes, technologies and the manufacturing process of the part. Current development directions in this industry are also indicated. The practical part is devoted to the preparation of test specimens using individual technologies and their analysis. The mechanical properties of the samples are evaluated in this work on the basis of tensile, impact and hardness tests. The samples are also analyzed for their porosity and anisotropy of mechanical properties. The aim of the work is to verify whether the manufactured samples achieve the mechanical properties declared by the manufacturer, what effect the print orientation has on these properties and whether it is possible to achieve comparable results with different additive manufacturing technologies.

Key words

Additive manufacturing, 3D print, BMD, DMLS, 17-4 PH, mechanical properties

Obsah

1	Úvod	8
2	Aditivní výroba.....	9
2.1	Historie a vývoj aditivních technologií	10
2.1.1	Současnost	13
2.2	Postup výroby dílu.....	15
3	Technologie aditivní výroby	17
3.1	Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	21
3.2	Electron Beam Melting (EBM).....	22
3.3	NanoParticle Jetting (NPJ).....	23
3.4	Bound Metal Deposition (BMD).....	24
3.5	Nové vývojové směry	26
3.6	Nerezová ocel 17-4 PH	27
4	Experimentální část	28
4.1	Příprava zkušebních těles DMLS	29
4.2	Příprava zkušebních těles BMD.....	31
4.2.1	Debinding.....	36
4.2.2	Sintrování	36
4.3	Tepelné zpracování	39
5	Počítačová tomografie.....	40
6	Zkouška tahem	46
6.1	Zkušební tělesa.....	47
6.2	Vyhodnocení zkoušky tahem	48
7	Zkouška rázem v ohybu	52
7.1	Zkušební tělesa.....	53
7.2	Měření drsnosti	54
7.2.1	Vyhodnocení drsnosti	54
7.3	Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu	56
7.3.1	Analýza lomových ploch	58
8	Světelná mikroskopie	61
9	Měření tvrdosti.....	66
9.1	Vyhodnocení tvrdosti	67
10	Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC)	68

11	Závěr	69
12	Seznam použité literatury a zdrojů	70
13	Seznam obrázků.....	74
14	Seznam tabulek	76
15	Seznam grafů	77

1 Úvod

Aditivní výroba kovových dílů se v posledních letech setkává s výrazným nárůstem zájmu ze strany průmyslových společností. Je to dáno tím, že se již od prototypové výroby, která má stále své využití, přechází k zařazení aditivních technologií do výrobních procesů, výrobě plně funkčních dílů a sériové výrobě. S čímž jsou spojené rovněž vysoké investice, které umožňují vývoj nových i zavedených technologií.

Z hlediska aplikačního potenciálu je tedy vhodné se zaměřit na nové technologie, jejich možnosti a vlastnosti vyrobených dílů. Rovněž se nabízí porovnání se zavedenými technologiemi aditivní výroby.

Jednou z již zavedených a v průmyslu široce používaných technologií je Direct Metal Laser Sintering (DMLS), která je založena na spékání kovového prášku pomocí laserového paprsku.

Poměrně novou technologií na trhu je technologie Bound Metal Deposition (BMD) od společnosti Desktop Metal. Tato technologie funguje na principu vytlačování ohřátého materiálu stejně jako technologie Fused Filament Fabrication (FFF), která je používána standardně ke zpracování termoplastů. Oproti technologii FFF je zde ovšem vstupním materiálem kovový prášek vázaný v polymerním pojivu, což následným zpracováním tisku umožňuje výrobu plně kovových dílů.

Diplomová práce je tedy zaměřena na mechanické vlastnosti vzorků zhotovených těmito technologiemi z materiálu 17-4 PH, který je vzhledem k vysoké pevnosti a korozní odolnosti používán pro náročné aplikace v automobilovém a leteckém průmyslu.

Cílem práce je ověřit, zda vzorky dosahují hodnot mechanických vlastností udávaných výrobcem, a zda je možné, vzhledem k odlišnému principu technologií, dosáhnout srovnatelných mechanických vlastností. Rovněž je cílem analyzovat vliv směru tisku na mechanické vlastnosti.

2 Aditivní výroba

Aditivní výroba je proces, během kterého dochází k tvorbě trojrozměrných objektů na základě digitálních dat. Při aditivním procesu se materiál postupně přidává, což je největší rozdíl oproti například konvenčním obráběcím technologiím, u kterých je materiál postupně odebírán. V případě aditivních technologií se finální objekt tvoří kladením jednotlivých vrstev materiálu na sebe a jejich spojováním. Mezi běžně používané materiály při aditivní výrobě řadíme ve strojírenském průmyslu především kovy, polymery a keramiku. Ve stavebním průmyslu je zástupcem například beton. Nespornou výhodou aditivních technologií je možnost výroby složitých geometrií, které nelze vyrobit pomocí konvenčních technologií. [1], [2]

Tvarová složitost dílů není jediným důvodem pro využití aditivních technologií v praxi. Dalším důvodem je možnost vyrábět díly v relativně krátkém čase bez nutnosti použití specializovaných výrobních nástrojů. Z tohoto pohledu je aditivní výroba spojována s pojmem Rapid Prototyping, kdy se jedná o rychlou výrobu prototypových dílů nebo modelů. Od vzniku prvních aditivních technologií ovšem došlo ke značnému vývoji a tyto technologie jsou využívány rovněž k výrobě finálních dílů a produktů procesem označovaném jako Rapid Manufacturing. Přechodnou oblastí využití aditivní výroby mezi Rapid Prototyping a Rapid Manufacturing je Rapid Tooling. Jedná se o proces, při kterém jsou vyráběny díly, jako jsou například vložky forem, které následně slouží jako nástroj při výrobě finálních produktů. [3], [4]

Další výhodou aditivní výroby je značné snížení odpadního materiálu a možnost tvorby vnitřních struktur, které se využívají ke snížení hmotnosti dílu a úspoře materiálu. Mezi nevýhody oproti konvenčním technologiím patří zejména vysoké náklady výrobních zařízení, výrobní náklady při větších sériích, čas výroby dílů, horší kvalita povrchu a horší mechanické vlastnosti. [4]

Aditivní výroba je rovněž označována souhrnným názvem 3D tisk, který byl použitý při vzniku prvních technologií. Ve skutečnosti však existuje celá řada technologií, které se odlišují především způsobem tvorby jednotlivých vrstev, zdrojem energie a vstupním materiálem. Z tohoto důvodu v roce 2009 Americká společnost pro

testování a materiály (ASTM) vydala soubor norem, které definují procesy aditivní výroby a rozdělují je do 7 základních kategorií. Tyto kategorie budou dále v práci představené. [4], [5]

2.1 Historie a vývoj aditivních technologií

První představu o 3D tisku popsal v roce 1945 spisovatel Murray Leinster v jedné z jeho povídek. V této povídce popisuje stroj, který by replikoval jeho kresby v 3D objekty za použití robotického ramena a roztaveného plastu. [5]

Teprve až po téměř třiceti letech přišel Johannes F. Gottwald s představou stroje, který by byl podobný kancelářské tiskárně s tím rozdílem, že by tiskl 3D objekty z kovu. V roce 1971 si nechal patentovat koncept zařízení pod názvem Liquid metal recorder. Jednalo se o zařízení, kde byl tekutý kovový inkoust vytlačován pomocí tlaku na nosič a následně se jednotlivé inkoustové kapky natavovaly na sebe elektrickým výbojem. [5], [6]

První zdokumentované experimenty 3D tisku se však objevují až v roce 1981, kdy Dr. Hideo Kodama publikoval podrobnosti o technologii rychlého prototypování. Jeho výzkum zahrnoval tisk fotopolymerní pryskyřice vytvrzované UV světlem, který stal základem pro technologii SLA (Stereolitografie). Tento výzkum byl rovněž prvním literárním záznamem o vrstveném přístupu. [7], [8]

První patent na technologii stereolitografie získal v roce 1986 Charles Hull, který byl zakladatelem společnosti 3D Systems. Tato společnost v roce 1988 uvedla na trh první komerčně dostupnou SLA tiskárnu s označením SLA-1. V této době byla vyvíjena též technologie SLS (Selective Laser Sintering) na Texaské univerzitě, kde byl oproti technologii SLA laserový paprsek použitý ke spékání práškového polymeru. Později byla licence SLS udělena společnosti DTM, která byla v pozdějších letech získána společností 3D Systems. [7], [8]



Obr. 1 Tiskárna SLA-1 [9]

Rovněž v roce 1988 Scott Crump, zakladatel společnosti Stratasys, představil technologii FDM (Fused Deposition Modelling), u které je polymerní materiál vytlačován skrze vyhřívanou trysku. [7], [8]

Tyto tři výše zmíněné technologie vytvořily základy 3D tisku a následný vývoj se značně urychlil. Na přelomu 90. let byly založeny další velké společnosti zabývající se 3D tiskem. Například v Německu byla založena společnost EOS (Electro Optical Systems), která se zaměřuje na vývoj systémů pro průmyslové prototypy, aplikace 3D tisku ve výrobě a technologie spékání práškových materiálů. Její průmyslová kvalita je dnes uznávána po celém světě v oblasti technologií DMLS (Direct Metal Laser Sintering) a SLS. [6], [7], [8]

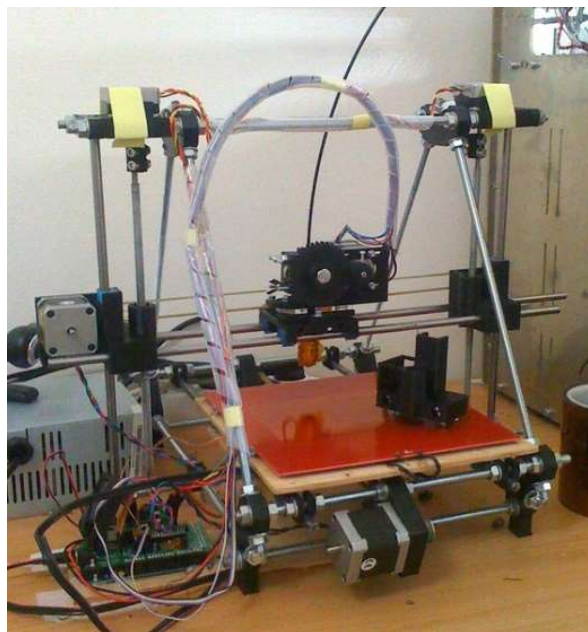
V roce 1991 Společnost Stratasys představila svou první 3D tiskárnu s technologií FDM, která byla první skutečnou konkurencí pro 3D Systems, jelikož každá ze společností měla patentová práva na dvě odlišné technologie 3D tisku. Díly vyrobené technologií FDM byly pevnější a chemicky odolnější, zatímco technologie SLA dosahovala rychlejšího a přesnějšího tisku. Obě technologie se během několika let rozšířily a staly se oblíbenou volbou pro různé aplikace v řadě odvětví. [7], [8]

V průběhu 90. let byly také vyvíjeny technologie jako Binder Jetting, která byla vyvinuta společností ZCorp a spočívala v aplikaci malých kapek materiálu na stavební

platformu vrstvu po vrstvě. Souběžně docházelo k rozvoji CAD systémů, kterému značným dílem napomohla společnost Sanders Prototype, známé dnes pod názvem Solidscape, zabývající se 3D tiskem voskových modelů pro technologii přesného lití. Ve druhé polovině 90. je založena společnost Arcam, která přišla s technologií EBM (Electron Beam Melting), a společnost Object Geometries s technologií Poly Jet. [6], [7], [8]

Počátkem 21. století se 3D tisk dále vyvíjel a stal se více dostupným, jelikož společnost Stratasys v roce 1999 uvedla na trh svou první 3D tiskárnu založenou na technologii FDM pro širokou veřejnost. Zároveň se objevují první zmínky o využití 3D tisku ve zdravotnictví a v roce 2004 byl spuštěn projekt RepRap, jehož cílem bylo vytvořit 3D tiskárnu, která by byla schopna vyrobit velkou část svých vlastních komponent k sestavení další takové tiskárny, čímž by se stal 3D tisk dostupnější veřejnosti. [8]

K RepRap projektu se připojil i český vynálezce Josef Průša, zakladatel společnosti Prusa Research, která se zabývá vývojem a výrobou 3D tiskáren. Josef Průša se k projektu RepRap připojil v roce 2011, kdy začal pracovat na vývoji 3D tiskárny s názvem Prusa Mendel Iteration 2. Tento model byl významným pokrokem oproti původnímu Prusa Mendel a stal se jedním z nejoblíbenějších 3D tiskáren v komunitě RepRap. [10]



Obr. 2 Prusa Mendel Iteration 2 [10]

Velkou mediální pozornost si 3D tisk získal v roce 2008 díky první vytisknuté protéze. Vzhledem k dnešním možnostem 3D tisku spojených s 3D skenováním jsou lékařské pomůcky a protézy stále levnější, rychleji dostupné a více přizpůsobovány konkrétním potřebám pacienta. [8]

Následně 3D tisk pronikl do celé řady dalších oblastí a zaznamenal například následující milníky [7], [8] :

- V roce 2010 byl představen první prototyp automobilu s názvem Urbee, jehož karoserie je kompletně tvořená z 3D tisknutých dílů.
- V roce 2011 začala Cornellova univerzita vyvíjet 3D tiskárnu na potraviny.
- V roce 2012 byla poprvé implantována 3D tisknutá náhrada čelisti.
- V roce 2013 tehdejší prezident USA Barack Obama ve svém projevu k národu prohlásil, že 3D tisk je zásadním tématem do budoucna, čímž se 3D tisk dostal do ještě většího povědomí veřejnosti než doposud.
- V roce 2014 společnost NASA oznámila první tisk ve vesmíru.
- V roce 2016 laboratoř Daniela Kellyho oznámila tisk kostní tkáně.
- V roce 2018 se první rodina se přestěhovala do vytisknutého domu.

2.1.1 Současnost

Nové společnosti a velké investice

V posledních několika letech se objevují stále nové společnosti zabývající se 3D tiskem a mnoho z nich je spojeno s velkými investicemi. Jedním z příkladů je společnost Carbon 3D, která byla založena v roce 2014 v Kalifornii Josephem a Philepem DeSimone. Po uvedení jejich hlavní technologie s názvem CLIP (Continuous Liquid Interface Production) získala společnost do konce roku 2017 více než 360 milionů dolarů a měla hodnotu 1,7 miliardy dolarů, což v té době bylo více než měla společnost Stratasys nebo 3D Systems. [7]

Společnost Carbon 3D nebyla jedinou společností v oblasti 3D tisku, která dosáhla vysoké hodnoty a získala stovky milionů dolarů investic. Dalším příkladem je společnost Desktop Metal, která představila své 3D tiskárny Studio System a Production System. Od svého založení v říjnu 2015 získala společnost Desktop Metal více než 200 milionů dolarů investic a její hodnota přesáhla miliardu dolarů. Technologie této společnosti má název Bound Metal Deposition a je podobná technologii FDM, pouze pracuje s kovovým materiálem, což je i důvod vysokých investic, jelikož náklady na tisk jsou oproti jiným technologiím značně nižší. [7]

3D tisk v kosmickém průmyslu

Společnost NASA, jak již bylo zmíněno, v roce 2014 oznámila použití 3D tiskárny ve vesmíru, což otevřelo astronautům možnosti výroby nástrojů a dílů dle potřeby. Rovněž jsou prováděné experimenty, které by umožnily stavbu budov na Měsíci nebo Marsu. V neposlední řadě je 3D tisk používáný pro výrobu raketových komponent, kde je snahou odlehčit díly a zrychlit proces výroby. [7]

3D biotisk

Biotisk je velkým tématem v lékařském odvětví a aditivní výrobě celkově. V současné době je využití 3D biotisku poměrně široké. Například je možné tisknout kožní tkáň pro oběti popálenin nebo tkáň orgánů určených pro transplantaci. Technologie 3D biotisku dále umožňuje vytvářet různé struktury tkání, jako je tkáň ledvin, chrupavek nebo kostí. [7]

3D tisk ve stavebnictví a architektuře

Ve stavebnictví a architektuře se 3D tisk též stává čím dál více populární a nachází zde své využití. Například architektům umožňuje rychleji a efektivněji vytvářet návrhy budov a staveb v podobě fyzických modelů téměř bez omezení fantazie. Rovněž se v posledních letech v tomto odvětví používá 3D tisk při samotné realizaci budov. [8]

Jeden z prvních 3D tisku budovy v Česku vznikl na základě spolupráce mezi Ústavem konstruování a částí strojů Fakulty strojní ČVUT v Praze, Experimentálním centrem Fakulty stavební ČVUT a společností Strojírny Podzimek a Podzimek a synové. [11]



Obr. 3 Jedna z prvních 3D tisknutých budov v Česku [11]

2.2 Postup výroby dílu

Proces aditivní výroby dílu se skládá z několika na sebe navazujících kroků, během kterých je nutné zvážit řadu aspektů, aby bylo ve výsledku dosaženo požadované kvality dílu.

Postup aditivní výroby dílu se skládá z následujících kroků [12], [13]:

- **Vytvoření 3D modelu**

Prvním krokem aditivní výroby je vytvoření digitální reprezentace fyzického dílu neboli modelu. Nejběžnějším způsobem je využití CAD softwarů k vytvoření 3D CAD modelu, který musí zahrnovat veškeré geometrické prvky požadovaného dílu. Druhou možností je vytvoření modelu pomocí 3D skeneru.

- **Vytvoření souboru STL**

CAD model je následně převeden do formátu STL (Standard Triangle Language), který zahrnuje veškeré plochy modelu rozdělených trojúhelníkovou sítí. Model je následně nahrán do specializovaného softwaru (sliceru), kde je možné nastavit orientaci dílu, podpurné struktury, výšku vrstvy a další parametry. Výstupem je G-kód obsahující instrukce pro konkrétní výrobní zařízení.

- **Tisk**

Fáze tisku je zpravidla nejvíce časově náročná část výroby. Tiskárna postupně vytváří díl vrstvu po vrstvě a dokončení tohoto procesu může trvat řádově hodiny i dny v závislosti zejména na velikosti dílu, technologii výroby a výšce vrstvy. Na druhou stranu většinou není během této fáze potřeba zásahu ze strany obsluhy.

- **Vyjmutí dílu z tiskárny**

Jakmile je dokončený tisk, tak se díl vyjme z prostoru tiskárny. Některé technologie vyžadují následné odříznutí dílu od stavební platformy nebo odstranění pojiva a sintrování.

- **Post-Processing**

Post-Processing tištěných dílů je odlišný a odvíjí se od technologie tisku. Základní postup zahrnuje odstranění podpor a tepelné zpracování, ale dle potřeby může být zahrnuto například obrábění, pískování, leštění nebo barvení.

3 Technologie aditivní výroby

Jak již bylo v úvodní části zmíněno, technologie aditivní výroby se člení do 7 základních procesních kategorií v závislosti na zdroji energie, tiskovém materiálu a způsobu tvorby jednotlivých vrstev. Těmito kategoriemi jsou Vat Photopolymerisation, Material Extrusion, Material Jetting, Binder Jetting, Powder Bed Fusion, Directed Energy Deposition, a Sheet Lamination. V následujícím textu budou představeny jednotlivé procesy. Dále budou uvedeny nové nebo již zavedené technologie aditivní výroby. Pozornost bude věnována především procesům a technologiím aditivní výroby kovových dílů. [16]

Vat Photopolymerisation (VPP)

Proces, jak již název napovídá, funguje na principu fotopolymerizace. Konkrétně jde o vytvrzování tekuté fotopolymerní pryskyřice pomocí viditelného nebo ultrafialového světla. Molekuly fotopolymeru jsou selektivně vystaveny vytvrzovacímu světlu, čímž dojde k jejich spojení a vytvrzení. Tímto procesem se postupně vytvoří jednotlivé vrstvy. Vat Photopolymerisation zahrnuje tři základní technologie: Stereolitografie (SLA), Digital Light Processing (DLP) a Continuous Digital Light Processing (CDLP). [14], [15], [16]

Výhody: rychlý proces výroby, vysoké rozlišení detailních prvků, hladký povrch dílů, možnost použití biologicky kompatibilních materiálů, znovupoužití tiskového materiálu

Nevýhody: poměrně vysoká cena materiálu, zdlouhavý post-processing, vlastnosti dílu jsou po výrobě stále náchylné na UV záření

Material Extrusion (ME)

Je nejrozšířenější proces aditivní výroby z důvodu dostupnosti tiskáren pro širokou veřejnost. Princip spočívá ve vytlačování materiálu skrze ohřátou trysku na stavební platformu vrstvu po vrstvě. Vstupním materiálem je termoplast nebo kompozit v podobě struny navinuté na cívce. Pod tento proces spadají technologie Fused Deposition Modelling (FDM) a Fused Filament Fabrication (FFF). Jedná se však o stejné technologie pod jiným názvem. Rovněž je možné do této kategorie zařadit nové technologie jako Bound Metal Deposition (BMD) a Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM).[13],[14] [15], [16]

Výhody: široký výběr materiálů, uživatelsky přívětivý proces výroby, nižší provozní a počáteční náklady oproti jiným technologiím aditivní výroby, nízká teplota během procesu

Nevýhody: nižší přesnost, viditelnost jednotlivých vrstev tisku, anizotropie dílů, náchylnost k deformaci vlivem smršťování, vyšší porozita

Material Jetting (MJT)

Material Jetting je proces, při kterém je ohřátý materiál ve formě malých kapek selektivně nanášen na stavební platformu. Materiálem v tomto případě je primárně fotopolymer, který je následně vytvrzován UV světlem. Rovněž je ale možné použití voskového materiálu nebo kovových nanočástic v tekutém pojivu v závislosti na technologii tisku. Pod kategorií Material Jetting spadají technologie Poly Jet, NanoParticle Jetting (NPJ) a Drop on Demand (DOD). [14], [15], [16]

Výhody: vysoká přesnost a rozlišení, plnobarevný tisk plastových dílů, možnost tisku z vícero materiálů zároveň

Nevýhody: vysoké pořizovací náklady, větší množství odpadního materiálu v podobě podpor, horší mechanické vlastnosti oproti jiným technologiím aditivní výroby

Binder Jetting (BJT)

Proces Binder Jetting zahrnuje i stejnojmennou technologii, při které jsou díly vyráběné selektivním nanášením pojiva na práškové lože. Proces BJT používá stejnou metodu nanášení prášku jako proces Powder Bed Fusion (PBF). Na rozdíl od PBF se však ke spojování dílů místo laserového nebo elektronového paprsku používá tekuté pojivo. Prvně je pomocí nanašeče rozprostřena vrstva prášku na stavební platformu a tisková hlava následně rozprašuje pojivo na selektivní oblasti vrstvy, čímž dojde ke spojení práškových částic. Proces se následně opakuje, dokud nedojde k vytvoření dílu. V závislosti na materiálu pojiva a prášku jsou díly po dokončení zpravidla dále zpracovávány, aby se dosáhlo požadovaných vlastností. Od většiny ostatních technologií se proces liší tím, že k vytvoření vrstev není použitý tepelný zdroj, čímž jsou minimalizována zbytková napětí v dílu. [14], [15], [16]

Výhody: vysoká přesnost a rozlišení, široký výběr materiálů, recyklovatelnost prášku, malá zbytková napětí, rychlost výroby

Nevýhody: nutnost následného zpracování a horší mechanické vlastnosti dílů oproti jiným technologiím aditivní výroby

Powder Bed Fusion (PBF)

Powder Bed Fusion je jedním z nejběžnějších procesů aditivní výroby kovových dílů používaných v řadě průmyslových odvětví. Vstupním materiálem je prášek, který je nanašečem rozprostřen v tenké vrstvě na stavební platformu a následně je selektivně nataven elektronovým nebo laserovým paprskem. U většiny technologií probíhá proces ve vakuové komoře s inertním plynem, který zabraňuje oxidaci materiálů. Do této kategorie jsou řazeny technologie Multi Jet Fusion (MJF), Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective laser melting (SLM) a Electron Beam Melting (EBM). [14], [15], [16]

Výhody: srovnatelné mechanické vlastnosti s konvenčními technologiemi výroby, široký výběr materiálů, recyklovatelnost prášků

Nevýhody: vysoké výrobní náklady, větší zbytková napětí, bezpečnostní rizika spojená především s kovovým práškem

Directed Energy Deposition (DED)

U tohoto procesu je materiál v podobě prášku nebo drátu přiváděn tryskou do místa nanášení, kde je zároveň taven intenzivně zaostřeným zdrojem energie, kterým je zde laserový paprsek, elektronový paprsek nebo plazmový oblouk. Pomocí DED je možné zpracovávat keramické i polymerní materiály, ale používá se především pro kovové díly a hybridní technologie, kde se tryska může pohybovat ve více osách a vytvářet tak složité tvary. Na základě principu nanášení materiálu se tento proces používá hlavně k opravám nebo úpravám stávajících dílů. Technologiemi spadajícími pod tento proces jsou: Laser Engineered Net Shaping (LENS), Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) a Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) [14], [15], [16]

Výhody: velké stavební prostory, vysoká rychlost stavby, úspora odpadního materiálu

Nevýhody: horší rozlišení a kvalita povrchu, tisk pouze méně komplexních tvarů bez výrazných převisů, vysoké pořizovací náklady

Sheet Lamination (SHL)

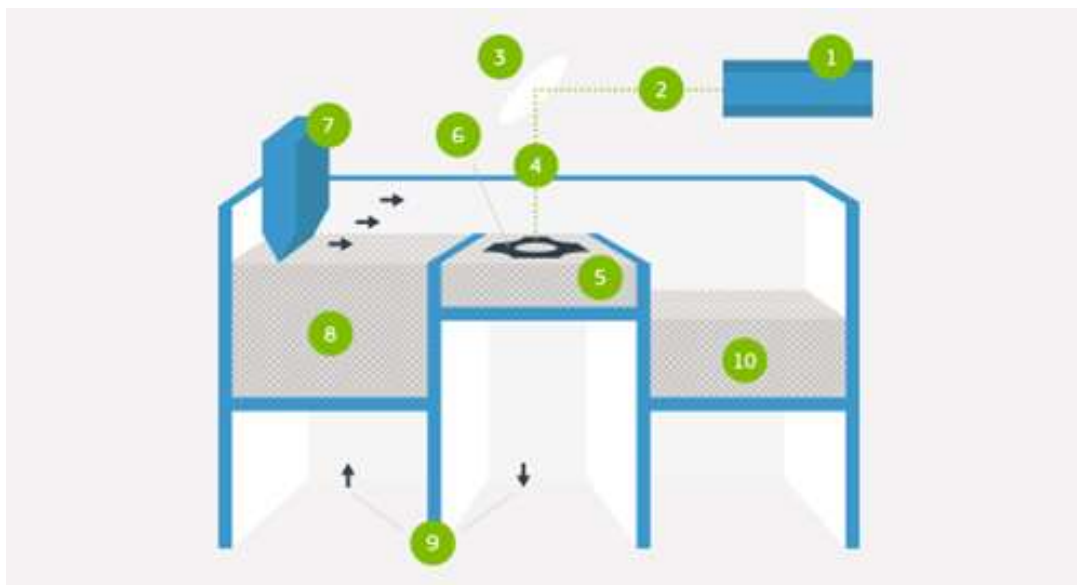
V případě procesu Sheet Lamination jsou díly tvořeny skládáním tenkých vrstev materiálu na sebe a jejich spojením pomocí lepidla, ultrazvukového svařování nebo pájení. Jednotlivé vrstvy jsou vyříznuty z kovového, papírového nebo plastového svitku do požadovaného tvaru pomocí laseru nebo nože, následně jsou vrstveny na sebe a spojovány. Po spojení všech vrstev je možné díl obrábět pro dosažení finálního tvaru. Samotným procesem SHL tedy není možné vyrábět tvarově složité díly s detailními prvky, ale v porovnání s ostatními procesy aditivní výroby se jedná o rychlý proces výroby používající levné a snadno dostupné materiály. [14], [15], [16]

Výhody: nízké výrobní náklady, využití v hybridních systémech, snadná a bezpečná manipulace s materiálem

Nevýhody: výroba pouze jednoduchých geometrií, velké množství odpadního materiálu

3.1 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Technologie Direct Metal Laser Sintering byla vyvinuta společnostmi Rapid Product Innovations a EOS v roce 1994. V té době se jednalo o první komerčně dostupnou technologii rychlé výroby prototypů kovových v rámci jediného procesu. V odborných textech je možné se setkat též s označením SLS nebo SLM. V zásadě je princip všech technologií stejný s tím rozdílem, že u technologie SLM a DMLS je vstupním materiálem kovový prášek, kdežto označení SLS se používá pro případ plastových a kompozitních materiálů. Rozdíl mezi DMLS a SLM již není tak zřejmý a záleží spíše na výrobcu a konkrétním použitém kovovém materiálu. Označení DMLS se spíše používá pro prášky kovových slitin, kdy dochází k částečnému roztavení materiálu vlivem rozdílných teplot tání obsažených prvků, a SLM pro prášky jednosložkových kovů, kdy se dosahuje úplného natavení. [17], [18]



Obr. 4 Princip tisku technologií DMLS 1) laserová jednotka 2) laserový paprsek 3) systém zrcadel, 4) zaostřený a usměrněný paprsek, 5) stavební komora 6) vyráběný díl 7), nanášecí břit, 8) zásobník prášku, 9) písty, 10) přepadová komora [19]

Proces 3D tisku technologií DMLS (obr. 4) začíná vysunutím pístu zásobníku s práškem o vzdálenost potřebnou k nanesení vrstvy o požadované výšce. Nanašeč poté rovnoměrně rozprostře vrstvu prášku na stavební platformu a přebytečný prášek je shrnutý do přepadové komory. Následně dojde pomocí laseru ke spečení vrstvy

prášku v daných místech na základě CAD dat. Píst stavební platformy se poté zasune o vzdálenost tloušťky vrstvy, píst zásobníku se opět posune nahoru a proces se opakuje. Tímto postupným spékáním vrstev se vytváří díl na stavební platformě, který je obklopen nespečeným práškem. Po dokončení stavby je potřeba prášek ze stavebního prostoru shrnout do přepadové komory a očistit platformu s výslednou součástí. Na závěr se stavební platforma tepelně zpracuje za účelem snížení vnitřního pnutí celé stavby a díl se poté oddělí od platformy. [18], [19]

Technologie DMLS je dnes známa především jako přední technologie ve výrobě odolných a přesných dílů v leteckém, automobilovém nebo lékařském průmyslu. Vyráběnými součástmi jsou například vzduchové kanálky letadel, odlehčené struktury, rotory, oběžná kola, implantáty, zubní protetika, ale třeba i šperky. Rovněž své využití našla tato technologie při výrobě nástrojů jako jsou formy pro vstřikování plastů a tlakového lití. [18], [20]

Výhodou technologie je zejména nízká porozita tisknutých dílů, která dosahuje při vhodně zvolených parametrech tisku hodnot do 1%, a dobré mechanické vlastnosti dílů, které jsou často srovnatelné s konvenčně vyráběnými díly. [19]

3.2 Electron Beam Melting (EBM)

Technologie EBM je jednou z kategorie Powder Bed Fusion, při které dochází k vytvoření a tavení tenké vrstvy prášku stejným způsobem jako u laserových technologií, ale tavení prášku v tomto případě probíhá pomocí výkonného elektronového paprsku. Paprsek je tvořen koncentrovaným svazkem elektronů, emitovaných rozžhavenou wolframovou elektrodou, a je řízený elektromagnetickými cívkami, které umožňují soustředit paprsek do potřebného místa na pracovní ploše.

Proces tisku probíhá při teplotě až 2000 °C ve vakuu, které zabraňuje oxidaci použitého materiálu, a umožňuje tak použití vysoce reaktivních materiálů, jako je například titan. Vysoká teplota během procesu zase zajišťuje ohřev práškového materiálu, což vede k výraznému snížení zbytkových napětí vyráběného dílu. Oproti laserovým technologiím se zde dosahuje větší rychlosti výroby, menší spotřeby energie a lepších mechanických vlastností zhotovených dílů, čímž nachází tato

technologie využití například v leteckém průmyslu při výrobě turbínových lopatek. Na druhou stranu tato technologie nedosahuje takové přesnosti, pořizovací cena zařízení je mnohem vyšší a vzhledem k použití elektronového paprsku je možné zpracovávat pouze kovové materiály. [21], [22]

3.3 NanoParticle Jetting (NPJ)

Technologie NanoParticle Jetting byla vyvinuta společností XJet a na rozdíl od ostatních technologií kovového 3D jsou zde vstupním materiálem kovové nanočástice v tekutém roztoku.

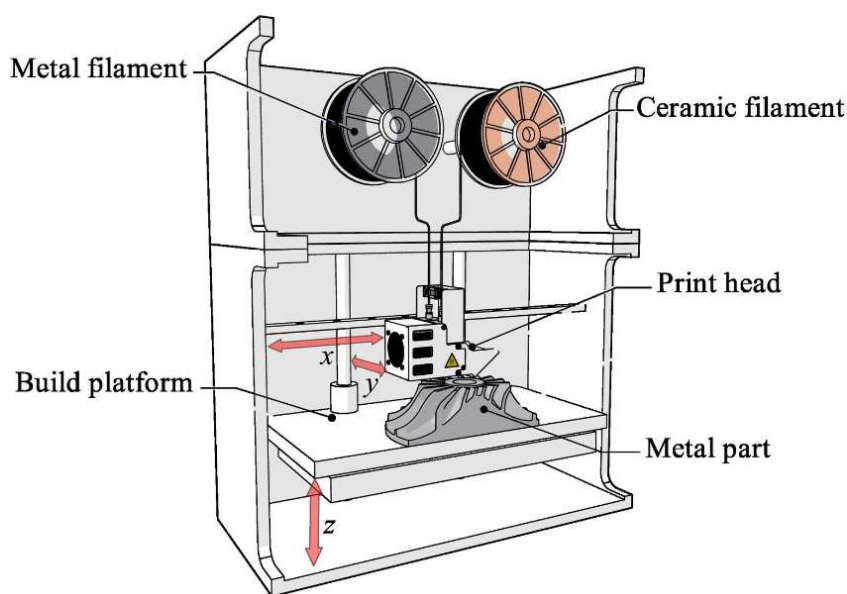
Proces výroby probíhá tryskáním roztoku současně s podpurným materiálem v podobě malých kapek na vyhřívanou stavební platformu, kde se vytváří velmi tenká vrstva. Během nanášení vrstev dochází vlivem vyhřívané podložky k odpařování tekutého pojiva, čímž vzniká díl s malým obsahem pojivového materiálu. Rovněž je touto technologií možné zpracovávat keramické materiály, ale v obou případech je nutné díly dále zpracovat. Podpurný materiál je možné rozpustit ve vodě a následně se díly sintrují v peci, kdy dojde k jejich smrštění a spojení částic.

Vzhledem k malým velikostem částic a tenkým vrstvám tisku je touto technologií možné vyrábět složité díly s detailními prvky a kvalitním povrchem. Oproti práškovým technologiím je manipulace s materiálem bezpečnější, který je zde dodáván již v podobě kazet s roztokem. Nevýhodou je především velmi úzký výběr materiálů.[23]

3.4 Bound Metal Deposition (BMD)

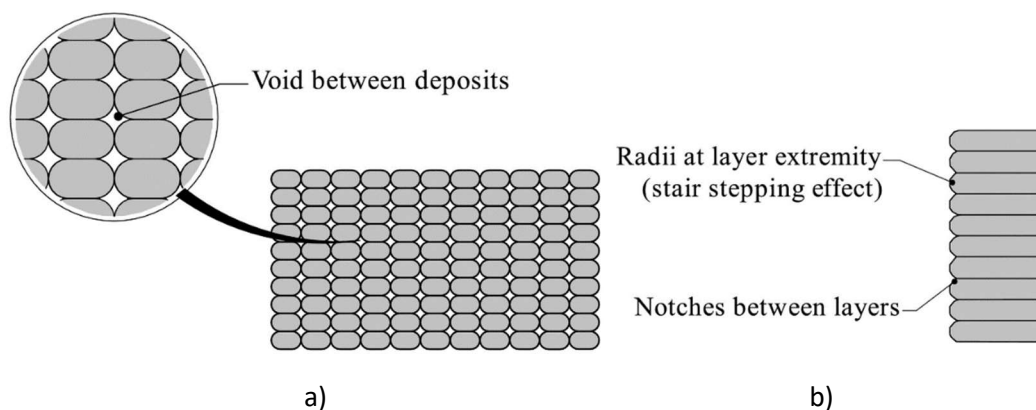
Technologie Bound Metal Deposition je jednou z novějších na trhu. Byla vyvinuta společností Desktop Metal, která nabízí kancelářské řešení s touto technologií kovového tisku pod názvem Studio System nebo průmyslové řešení pod názvem Shop System. Proces výroby se skládá ze tří kroků a je založený na kombinaci technologií FFF a MIM (Metal Injection Molding). [24], [25]

Prvním krokem je tisk dílu, který probíhá vytlačováním ohřátého materiálu po vrstvách na stavební platformu jako u technologie FFF s tím rozdílem, že vstupním materiálem je v tomto případě kovový prášek vázaný ve voskovém a polymerním pojivu. Samotná tiskárna je rovněž vybavena druhou tiskovou hlavou, která je určena pro keramický materiál vrstev oddělujících díl od podpor. Materiál je v obou případech ohřátý tiskovou hlavou nad teplotu tání pojiva a vytlačován tryskou. Princip tisku je možné vidět na obrázku 5 s tím rozdílem, že společnost Desktop Metal místo filamentu používá materiál ve formě tyčinek, které se vkládají do zásobníku tiskárny. [24], [25]



Obr. 5 Princip tisku technologií BMD [13]

Po vytištění následuje proces odstraňování přibližně 70 % primárního pojiva v debinderu za vzniku porézní struktury a zbývající část pojiva slouží k udržení tvaru dílu. Posledním krokem je sintrování dílu v peci při teplotě blízké teplotě tavení materiálu. Během sintrování je odstraněno zbylé pojivo a dochází ke zhutnění dílu vlivem smrštění o zhruba 20 % objemu v závislosti na materiálu. Porozita u takto zhotovených dílů se pohybuje okolo 4 %, z nichž značný podíl tvoří vzduchové mezery mezi vrstvami (obr. 6a). Nevýhodou je rovněž i horší kvalita povrchu z důvodu vzniku vrubů a tzv. schodového efektu. (obr.6b). Tyto tři defekty jsou dané kruhovým profilem trysky, ale lze je značně ovlivnit výškou vrstvy tisku. [24], [25]



Obr. 6 Schematický obrázek vzniku a) pórů mezi vrstvami tisku b) vrubů a schodového efektu [13]

V porovnání s aditivními technologiemi pracujícími s kovovým práškem nebo drátem, kde k tavení materiálu dochází pomocí laseru nebo elektronový paprsek, je u této technologie výhodou menší energetická náročnost a větší bezpečnost práce s materiálem. Rovněž zde nedochází k lokálnímu tavení a rychlému tuhnutí materiálu, čímž se u práškových technologií tvoří složitá napěťová pole uvnitř dílů, vyžadující tuhé podpurné konstrukce, které napomáhají odvodu tepla a zabraňují deformaci. V důsledku čehož je k odstranění podpor potřeba dalších nástrojů nebo obráběcích procesů. U technologie BMD je odstranění podpor poměrně jednoduchý proces. Vlivem rozpadu již zmíněné keramické vrstvy při sintrování, je možné díl oddělit od podpor pouhou rukou. Velmi podobnou technologii tisku kovového prášku v pojivu nabízí rovněž společnost Markforged pod názvem Atomic Diffusion Additive

Manufacturing (ADAM) nebo Pollen AM pod názvem Pellet additive manufacturing (PAM). Největší rozdíl je v podobě vstupního materiálu, technologie ADAM používá materiál v podobě filamentu. [13], [24], [25]

3.5 Nové vývojové směry

Dle článků, které referují o předním světovém veletrhu zaměřeným na technologie aditivní výroby Formnext konaném v roce 2022, bylo možné pozorovat různé trendy v této oblasti z nichž jsem učinil následující závěry [26], [27]:

- **Větší stavební prostory tiskáren a rychlost výroby**

Řada výrobců tiskáren s již zavedenými technologiemi se snaží zvětšovat výrobní prostory a dosahovat větších rychlostí tisku, což umožňuje výrobu jak větších dílů, tak i větší produktivitu.

- **Znamé společnosti vstupují na trh s aditivní výrobou**

Společnosti, které jsou proslulé v jiných odvětvích přicházejí se svými zařízeními pro aditivní výrobu. Například společnost Nikon začala investovat do hybridních technologií a též získala společnost SLM Solutions, která nabízí technologie laserového spékání prášku. Rovněž některé společnosti vyrábějící řezné nástroje nebo vstřikovací lisys představily svá řešení aditivní výroby.

- **Automatizace výroby**

Snahou mnohých společností je plně automatizovat proces aditivní výroby. Z tohoto pohledu se vývoj konstrukce tiskáren zaměřuje na stavební platformy a přístup do pracovního prostoru stroje s ohledem na využití robotických ramen. V rámci automatizace jsou též vyvíjena zařízení, která by umožnila komplexní post-processing vytištěných dílů.

- **Vývoj softwarů**

Snahou vývojářů softwarů pro aditivní výrobu je, jako doposud, docílit spolehlivé simulace výrobního procesu, optimalizace vyráběných dílů a tisku bez podpůrných struktur nebo alespoň jejich minimalizace. V ideálním případě by tedy bylo možné tisknout díly s požadovanými funkčními vlastnostmi s minimem odpadního i vstupního materiálu a bez nutnosti tisku testovacích vzorků.

- **Vývoj materiálů**

Vývoj jde kupředu u kovových, keramických, i plastových materiálů. Výrobci se zabývají materiály jak z pohledu jejich vlastností, možností aplikace a bezpečnosti, tak i ekologie. Vývoj keramických materiálů pro 3D tisk je dán především jejich vlastnostmi, obtížným zpracováním běžnými způsoby a širokým využitím v lékařském průmyslu nebo při výrobě nástrojů. Z hlediska ekologie je snahou používat recyklované materiály z plastu nebo i dřeva.

3.6 Nerezová ocel 17-4 PH

Materiál 17-4 PH spadá do skupiny korozivzdorných ocelí, kde hlavními legujícími prvky jsou chrom, nikl a měď. Označení PH udává, že se jedná o precipitačně vytvrditelný materiál, kdy tepelným zpracováním lze docílit vyšší pevnosti a tvrdosti. V žíhaném stavu se tato ocel vyznačuje martenzitickou, feritickou a austenitickou strukturou s dobrým poměrem pevnosti, houževnatosti a tvrdosti. Ve vytvrzeném stavu je struktura martenzitická s intermetalickými fázemi. [29]

Tvárnost této oceli je z důvodu vysoké tvrdosti obecně nízká. Lepší tvárnosti lze dosáhnout tvářením za tepla nebo provedením tepelného zpracování před tvářením za studena. Ze skupiny ocelí s vysokou pevností dosahuje nejlepších korozivzdorných vlastností. Svařování je možné stejným způsobem jako u jiných korozivzdorných ocelí. Jedinou podmínkou je provedení svaru po rozpouštěcím žíhání. Po svařování se provádí precipitační vytvrzení. [28]

Mezi prováděné povrchové úpravy u této oceli patří nitridace, plazmová nitridace, odvápnění a pasivace. [29]

4 Experimentální část

V rámci experimentu byly zhotovené vzorky pro zkoušku tahem a zkoušku rázem v ohybu z materiálu 17-4 PH technologií DMLS a BMD. Vzorky byly tepelně zpracovány za účelem dosažení vysoké pevnosti materiálu. Snahou bylo zjistit, zda vzorky dosahují mechanických vlastností udávaných výrobcem a zda je možné dosáhnout srovnatelných výsledků odlišnými technologiemi tisku. Vzorky byly rovněž tisknuté v různých směrech, aby bylo možné zhodnotit anizotropii mechanických vlastností takto zpracovaného materiálu.

Návrh těles pro uvedené zkoušky byl proveden dle normalizovaných rozměrů, aby bylo možné výsledky následně vzájemně porovnat. Pro zkoušku rázem v ohybu bylo navrženo těleso dle normy ČSN ISO 148-1. Těleso pro tahovou zkoušku bylo navrženo v případě technologie DMLS dle normy ASTM E8. Pro technologii BMD bylo zvoleno s ohledem na doporučení kratší těleso, aby se minimalizovala pravděpodobnost selhání vzorku při tisku nebo sintrování. Těleso tedy bylo navrženo dle normy DIN 50125. Specifikace jednotlivých zkušebních těles jsou dále uvedeny v příslušných kapitolách.

Orientace tisku byla navržena u těles pro zkoušku tahem ve směru vertikálním a pod úhlem 45°. U těles pro zkoušku rázem v ohybu byl navržen směr vertikální a směr horizontální s vrubem kolmo na rovinu tisku a rovnoběžně s rovinou tisku. Navržený počet byl 5 těles od každého vzorku a směru tisku pro statistické vyhodnocení.

4.1 Příprava zkušebních těles DMLS

Vzorky tištěné technologií DMLS byly zhotovené z práškové oceli 17-4 PH na výrobním zařízení Concept Laser M2 Cusing v laboratořích Fakulty strojní ČVUT.



Obr. 7 Výrobní zařízení Concept Laser M2 Cusing [20]

Tab. 1 Technické parametry Concept Laser M2 Cusing [20]

Concept Laser M2 Cusing	
Stavební prostor [mm]	250 x 250 x 280
Rychlost stavby [cm ³ /h]	2 - 35
Výška vrstvy [μm]	20 – 80
Laserový zdroj [W]	400
Průměr ohniska [μm]	50-500
Koncentrace O ₂ [%]	0,3
Vykreslovací rychlost [m/s]	7
Ochranná atmosféra	Dusík, Argon
Rozměry stroje [mm]	2542 x 1818 x 1985
Váha stroje [kg]	2400
Materiály tisku	nerezová ocel nástrojová ocel vytvrditelná korozivzdorná ocel slitiny niklu slitiny kobaltu a chromu slitiny hliníku slitiny titanu

Pro tisk byl vytvořen model palety s odsazením vzorků pro následné odříznutí a podporami 45-stupňových vzorků v místech jejich upínacích konců. Po dokončení tisku bylo provedeno tepelné zpracování ke snížení zbytkových napětí, která vznikla vneseným teplem během výroby. Na závěr se vzorky odřízly z palety pomocí drátořezu.

Celkem bylo vytištěno pět vzorků pro zkoušku tahem pod úhlem 45°, pět vzorků pro zkoušku tahem kolmo na rovinu tisku, deset horizontálních vzorků pro zkoušku rázem v ohybu a pět vertikálních. Z deseti horizontálních vzorků bylo tištěno pět s vrubem kolmo na rovinu tisku a pět s vrubem rovnoběžně. Vertikální vzorky byly tištěné bez vrubu, který byl následně vybroušen.

Tab. 2 Parametry tisku

	Vnitřní plochy	Kontura	Podpory
Výkon laseru [W]	300	140	200
Rychlost skenování [mm/s]	800	467	3000
Velikost ohniska [μm]	130	75	50
Výška vrstvy [μm]	0,25		
Rychlost nanašeče [mm/s]	50		
Ochranný plyn	Argon		

Tab. 3 Seznam tištěných vzorků technologií DMLS

Zkouška tahem		Zkouška rázem v ohybu		
Vzorek	Orientce tisku	Vzorek	Orientce tisku	Orientace vrubu
S1	45°	V1	vertikálně	bez vrubu
S2	45°	V2	vertikálně	bez vrubu
S3	45°	V3	vertikálně	bez vrubu
S4	45°	V4	vertikálně	bez vrubu
S5	45°	V5	vertikálně	bez vrubu
T1	kolmo	H1	horizontálně	rovnoběžně
T2	kolmo	H2	horizontálně	rovnoběžně
T3	kolmo	H3	horizontálně	rovnoběžně
T4	kolmo	H4	horizontálně	rovnoběžně
T5	kolmo	H5	horizontálně	rovnoběžně
		H6	horizontálně	kolmo
		H7	horizontálně	kolmo
		H8	horizontálně	kolmo
		H9	horizontálně	kolmo
		H10	horizontálně	kolmo

4.2 Příprava zkušebních těles BMD

Vzorky tištěné technologií BMD byly zhotovené z oceli 17-4 PH na zařízeních se souhrnným označením Studio System od společnosti Desktop Metal v laboratoři Českého institutu informatiky, robotiky a kybernetiky. Systém se skládá ze tří zařízení- tiskárna, debinder a pec.



Obr. 8 Zařízení Studio System od společnosti Desktop Metal [29]

Tab. 4 Studio System- technické parametry zařízení [29]

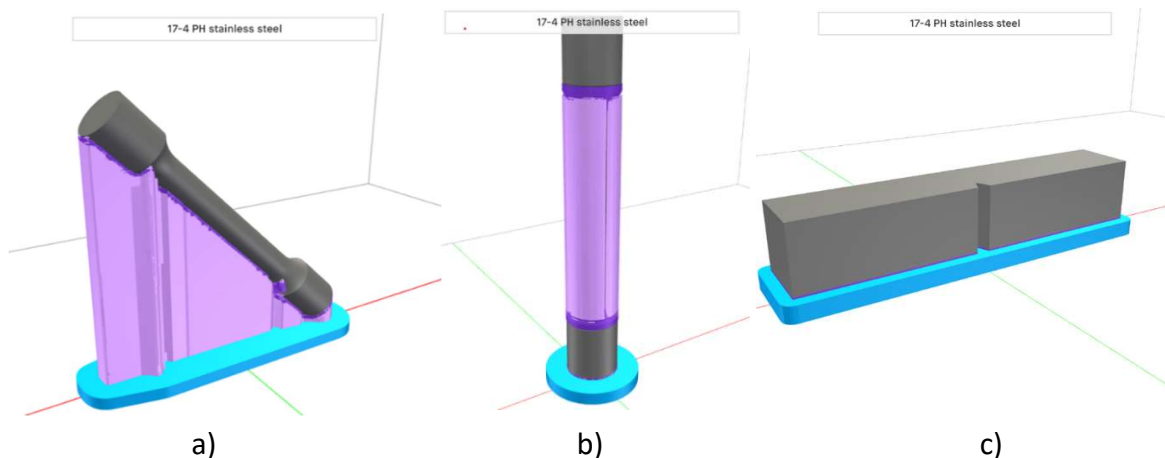
Tiskárna	
Stavební prostor [cm]	30 x 20 x 20
Rychlost stavby [cm ³ /h]	16
Výška vrstvy [μm]	50-220
Hmotnost [kg]	97
Rozměry [cm]	94,8 x 82,3 x 52,9
Debinder	
Doba cyklu [h]	9-72
Pracovní prostor [cm]	30 x 20 x 20
Hmotnost [kg]	150
Rozměry [cm]	102 x 74x 57
Pec	
Doba cyklu [h]	40-48
Maximální teplota [°C]	1400
Teplotní odchylka[°C]	± 5
Spotřeba plynu za cyklus [l]	750
Hmotnost [kg]	798
Rozměry [cm]	161,8 x 138,0 x 75,4

Vzhledem k finančním nákladům a ke skutečnosti, že se jedná o novou technologii, kdy u předchozích tisků docházelo k selhání dílu, byla pro tisk zvolena tělesa pouze pro zkoušku tahem v navržených směrech a pro zkoušku rázem v ohybu s vrubem kolmým na rovinu tisku. Vybraná tělesa byla tištěna v počtu o jeden kus více než bylo navrženo, aby v případě selhání některých vzorků bylo stále možné učinit směřodáté závěry. Celkem tedy bylo vytištěno šest vzorků pro zkoušku tahem pod úhlem 45°, šest vzorků pro zkoušku tahem kolmo na rovinu tisku a sedm vzorků pro zkoušku rázem v ohybu s vrubem kolmo na rovinu tisku. Sedmý vzorek byl dotištěn z níže uvedeného důvodu. Vzorky byly tištěné v sériích po 3-4 kusech, aby se předešlo delaminaci a deformaci vlivem vznikajících teplotních rozdílů.

Tab. 5 Seznam tištěných vzorků technologií BMD

Zkouška tahem		Zkouška rázem v ohybu		
Vzorek	Orientce tisku	Vzorek	Orientce tisku	Orientace vrubu
S1	45°	H1	horizontálně	kolmo
S2	45°	H2	horizontálně	kolmo
S3	45°	H3	horizontálně	kolmo
S4	45°	H4	horizontálně	kolmo
S5	45°	H5	horizontálně	kolmo
S6	45°	H6	horizontálně	kolmo
T1	vertikálně	H7	horizontálně	kolmo
T2	vertikálně			
T3	vertikálně			
T4	vertikálně			
T5	vertikálně			
T6	vertikálně			

První krok před tiskem začíná v softwaru Fabricate. Jedná se o cloudový software od společnosti Desktop Metal, který umožňuje plynulý postup výroby od CAD modelu přes tisk, debinding až po sintrování dílu. Nejprve tedy bylo potřeba vygenerovat podpory a raft pro jednotlivé vzorky v tomto softwaru. Raft slouží ke stabilizaci dílu na stavební platformě a brání deformaci zejména během procesu sintrování.



Obr. 9 a) 45-stupňový vzorek pro zkoušku tahem s raftem a podporami, b) vertikální vzorek pro zkoušku tahem s raftem a podporami, c) vzorek pro zkoušku rázem v ohybu s raftem

Na obrázku (obr. 9) je znázorněn vzorek pro zkoušku tahem tištěný pod úhlem 45° (obr. 9a), vzorek pro zkoušku tahem tištěný kolmo k rovině tisku (obr. 9b), vzorek pro zkoušku rázem v ohybu s vrubem kolmo k rovině tisku (obr. 9c) s vygenerovaným raftem a podporami. Raft je zobrazen světle modrou a podpory světle fialovou barvou. Raft a podpory jsou od vzorků odděleny keramickým pojivem, které je znázorněno tmavě fialovou barvou.

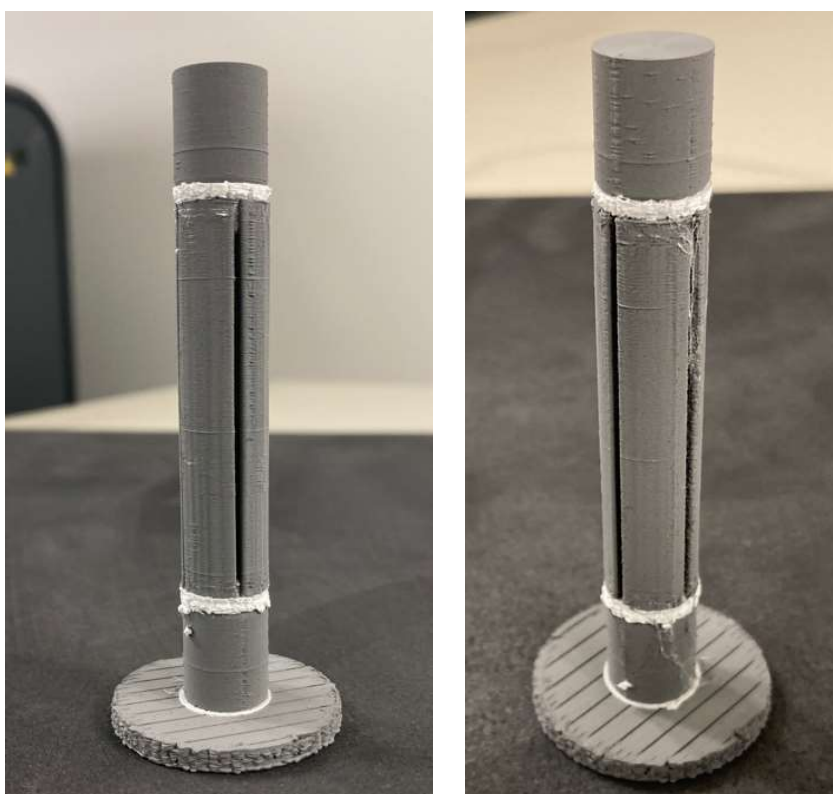
Podpory zajišťují požadovanou geometrii dílu během tisku, odstraňování primárního voskového pojiva (debindingu) a sintrování. [30]

Keramická vrstva je softwarem navržena tak, aby zajistila rovnoměrné smršťování dílu během celého procesu. Zároveň umožňuje snadné uvolnění podpor a raftu od dílu po procesu sintrování. [30]

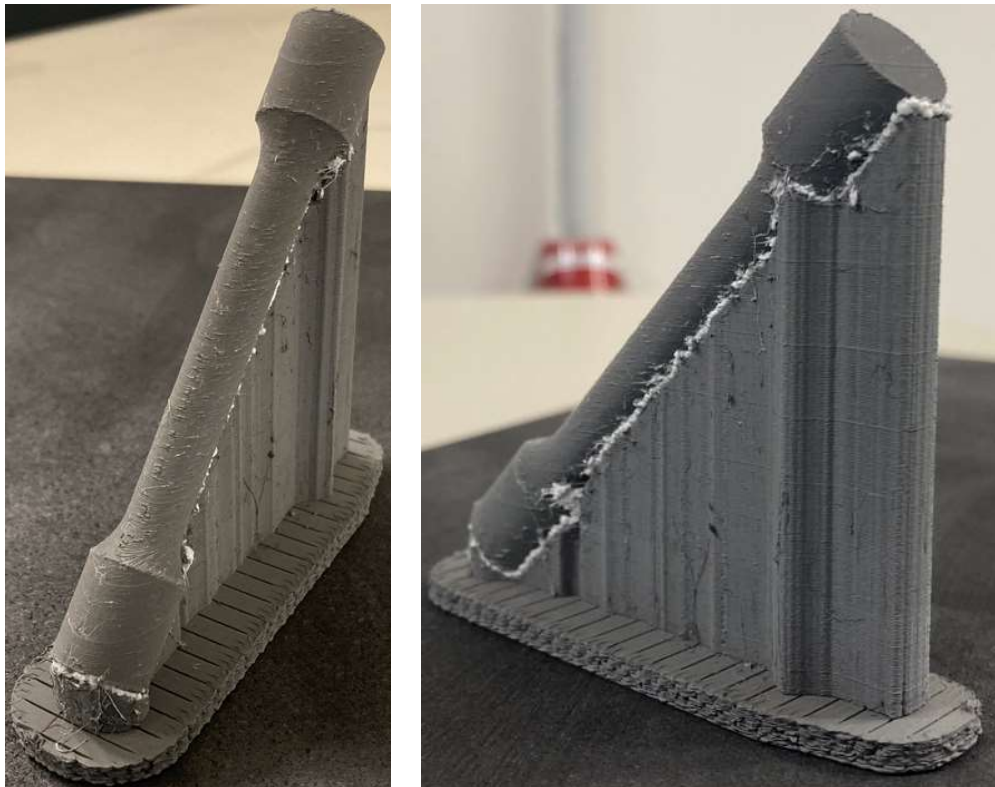
Parametry tisku

- Teplota tisku stavebního materiálu – 180 °C
- Teplota tisku keramického pojiva – 180 °C
- Teplota komory pracovního prostoru – 50 °C
- Teplota tiskové podložky – 65 °C
- Výška vrstvy – 0,1mm
- Rychlost tisku – 20mm/s

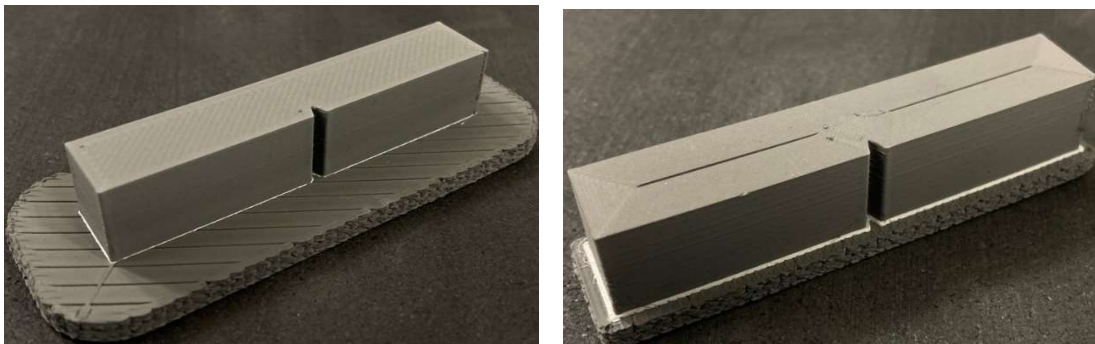
V případě jednotlivých teplot se nejedná o optimalizační parametr. Teploty jsou softwarem přednastavené pro danou stavbu tisku a nelze je měnit. Rychlost tisku byla snížena z běžně používaných 30 mm/s na 20 mm/s, jelikož při vyšší rychlosti docházelo v minulosti opakovaně k nepřesnosti tisku a nedostatečné přilnavosti vrstev, což vedlo k následné delaminaci dílu během procesu sinterování.



Obr. 10 Ukázka vytisknutých vertikálních vzorků - nesintrované



Obr. 11 Ukázka vytisknutých 45-stupňových vzorků - nesintrované



Obr. 12 Ukázka vytisknutých vzorků pro zkoušku rázem v ohybu – nesintrované

Jak je patrné na obrázku vytištěných vzorků pro zkoušku rázem v ohybu (obr. 5 vpravo), tak u těchto vzorků vznikly dvě mezery v prostřední části. Došlo k tomu vlivem chyby softwaru Fabricate, jelikož tato technologie není primárně určena k tisku plných těl. Při přípravě vzorků v softwaru tento defekt nebyl patrný a projevil se až při samotném tisku. V místě vrubu mezera nebyla přítomna, tudíž by vzniklé mezery neměly mít zásadní vliv na výsledek zkoušky. Pro ověření a porovnání byl dotisknut jeden vzorek (obr. 5 vlevo), kde byla tato chyba eliminována (vzorek H1).

4.2.1 Debinding

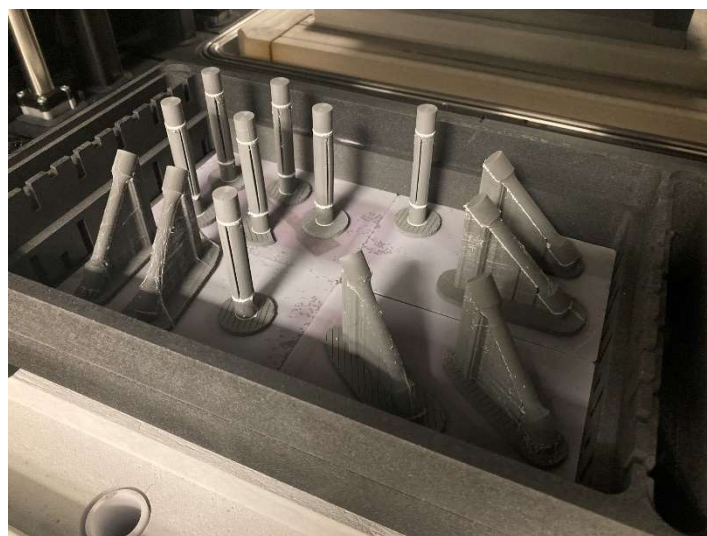
Dalším krokem po vytisknutí je odstranění primárního voskového pojiva. Tento proces probíhá v zařízení zvaném debinder. Vzorky se v košíku vložily do debinderu a zařízení se uzavřelo. Následně došlo k zaplnění komory roztokem a jeho ohřevu. Poté probíhalo po dobu několika hodin rozpouštění a vyplavování voskového pojiva ze vzorků. V závěru cyklu byl roztok odpuštěn z komory a vzorky byly vysušeny.

Parametry debindingu

- Teplota roztoku – 40 °C
- Teplota sušení – 70 °C
- Celkový čas cyklu – 49 hodin

4.2.2 Sintrování

Poslední fází je sintrování vzorků v sintrovací peci. Nejprve byly vzorky umístěny na grafitové podnosy. Díly nesmějí během sintrování přijít do přímého styku s grafitovým podnosem. Z tohoto důvodu jsou pod díly vkládány keramické destičky, které výrobce označuje názvem setter plate. Na každý grafitový podnos se vejdou čtyři keramické destičky. Rovněž by díly neměly být umístěné na hranicích těchto destiček z důvodu potenciálních výškových rozdílů a deformací.



Obr. 13 Umístění vzorků pro zkoušku tahem na keramických destičkách v grafitových podnosech



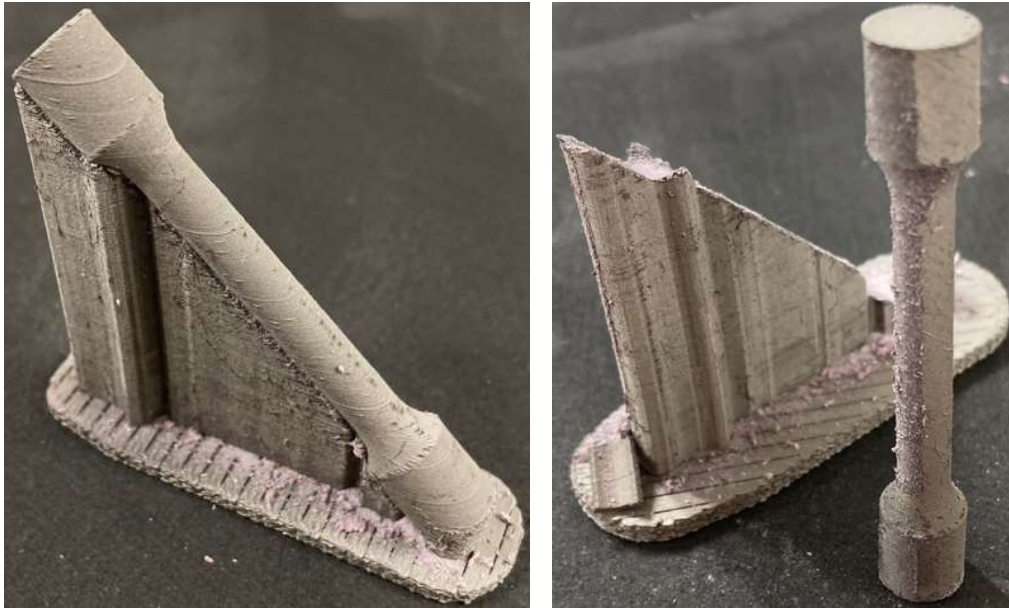
Obr. 14 Umístění vzorků pro zkoušku rázem v ohybu na keramických destičkách v grafitových podnosech

Díly je nutné sintrovat v bezkyslíkatém prostředí. Po spuštění pece tedy dojde k odsání vzduchu a vytvoření vakua. Ohřev komory je zajištěn prostřednictvím řady topných těles a inertní plyn přiváděný do komory cirkuluje skrze průduchy v grafitových podnosech, čímž je zajištěna stálá teplota sintrování. Veškeré parametry jsou optimalizovány softwarem Fabricate s ohledem na geometrii a materiál dílů. [29]

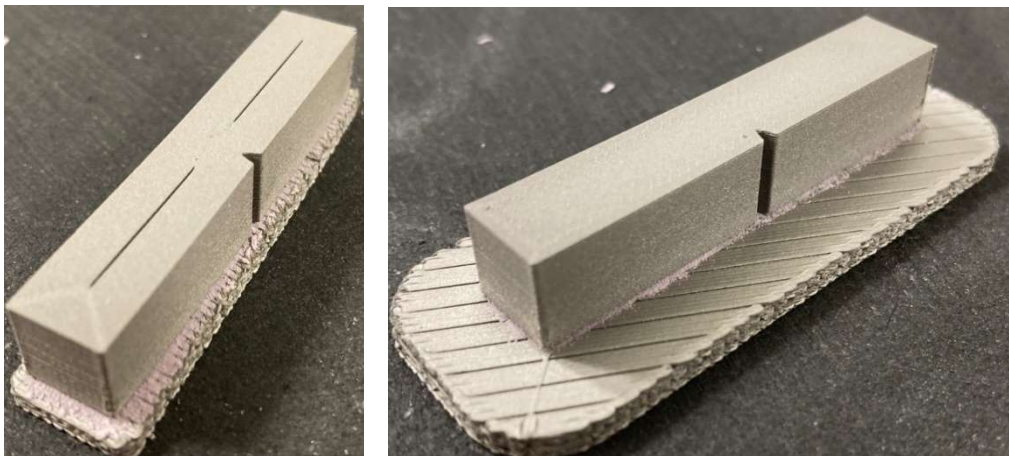
Teplota během sintrování vzorků byla dle informací okolo 1200 °C.



Obr. 15 Výsledek sintrování vertikálních vzorků pro zkoušku tahem



Obr. 16 Ukázka sintrovaných 45-stupňových vzorků pro zkoušku tahem



Obr. 17 Ukázka sintrovaných vzorků pro zkoušku rázem v ohybu

Na obrázku 8 je možné vidět , že v případě vertikálních vzorků pro zkoušku tahem došlo ke zhroucení a v některých případech i k delaminaci. Zhroucení vzorků bylo způsobeno oddělením podpor během sintrování. Zřejmě vlivem smršťování vzorků a rozpadu keramické vrstvy se jednotlivé části neudržely pohromadě a došlo k oddělení podpůrných částí.

Příčinou delaminace mohlo být nedostatečné spojení vrstev pravděpodobně vlivem špatného proudění plynu a vzniku teplotního rozdílu během sintrování. Druhou možnou příčinou je nedostatečně velká vzdálenost vzorků již při samotném tisku, což mohlo vést k vzájemnému tepelnému ovlivnění vzorků.

K výraznému průhybu došlo rovněž u 45-stupňového vzorku S6 pravděpodobně uvolněním od podpor, vlivem nerovnoměrného ohřevu nebo chladnutí během sinterování.

Z výsledků lze usoudit, že i přes provedená preventivní opatření není technologie BMD zcela vhodná pro tisk dílů, u kterých se v převažující míře vyskytují vysoké a tenké profily.

4.3 Tepelné zpracování

Pro dosažení požadovaných vlastností materiálu bylo nutné provést tepelné zpracování vzorků dle specifikace výrobce. Cílem tepelného zpracování je dosažení největší pevnosti materiálu.

V případě vzorků tištěných technologií DMLS se jednalo o rozpouštěcí žíhání při teplotě 1050 °C s následným ochlazením na vzduchu a precipitačního vytvrzování. Vzorky byly před tepelným zpracováním ošetřeny ochranným nátěrem.

U vzorků tištěných technologií BMD nebylo nutné provést rozpouštěcí žíhání a byly jen precipitačně vytvrzeny.

Precipitační vytvrzování spočívalo v ohřevu vzorků na teplotu 480 °C a výdrži na této teplotě po dobu jedné hodiny. Následně vzorky volně chladly na vzduchu. Stav takto zpracovaných vzorků odpovídá stavu s označením H900.



Obr. 18 Pec pro tepelné zpracování

Mechanické vlastnosti materiálu 17-4 PH ve stavu H900 udávané výrobcí jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 6).

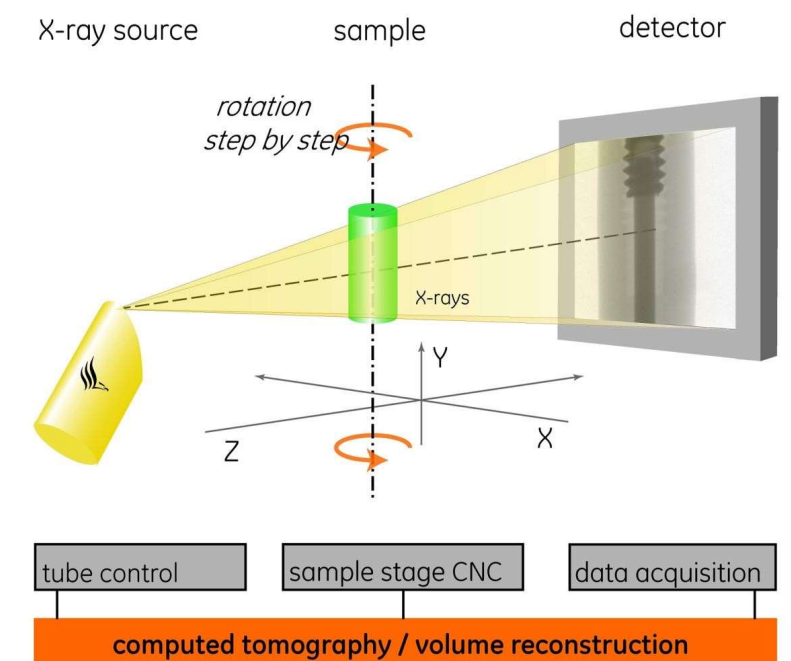
Tab. 6 Mechanické vlastnosti materiálu 17-4 PH H900 udávané výrobcí [20], [31]

	DMLS	BMD
Tvrdość [HRC]	43	42
Mez kluzu [Mpa]	1200	1020
Mez pevnosti [Mpa]	1300	1253
Prodloužení [%]	3	16,4

5 Počítačová tomografie

Výpočetní tomografie je nedestruktivní zobrazovací metoda sloužící ke zkoumání a měření defektů dílů v trojrozměrném prostoru. Touto metodou lze odhalovat i vady jako jsou trhliny a póry, které se vyznačují nízkým kontrastem a nelze jejich přítomnost zjistit běžnými nedestruktivními metodami. [32]

Principem metody je nasnímání zkoumaného předmětu rentgenovým zářením z několika úhlů. V průmyslovém odvětví je běžnou praxí snímání v kuželovém svazku, při kterém se snímáný objekt otáčí kolem své osy. [32]



Obr. 19 Princip snímání objektu v kuželovém svazku [32]

Během rotace dílu je pořizováno velké množství 2D snímků, které jsou tvořeny jednotlivými body. Z těchto snímků je následně matematickými operacemi sestaven 3D model snímaného dílu, který se skládá z prostorových bodů (voxelů). Voxely jsou nosiči informace o stupni šedi v daném místě v prostoru, dle které je následně vyhodnocována přítomnost defektů. [32]

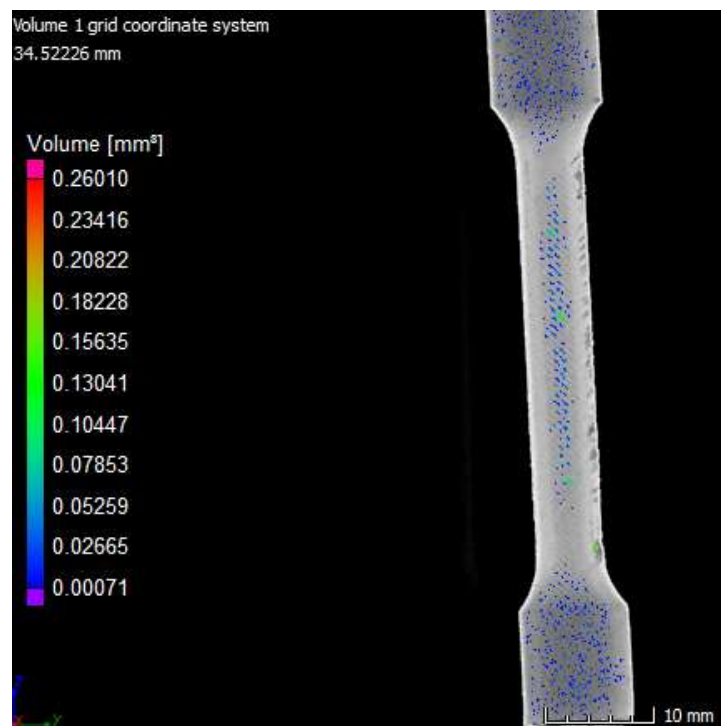
Vzhledem k delaminaci horizontálních BMD vzorků při sintrování, byly počítačovou tomografií analyzovány na výskyt vad 45-stupňové i rázové vzorky. Rovněž je u této technologie očekávána větší porozita, která by mohla mít zásadní vliv na mechanické zkoušky. Výrobce udává, že porozita dílu se může pohybovat okolo 6% v případě nižší teploty sintrování. [29]



Obr. 20 Umístění vzorků v tomografu

U vzorků bylo nalezeno velké množství defektů, které měly objem menší než 0.004 mm^3 . Zároveň se nedalo určit, zda se v těchto případech jednalo o defekt, jelikož rozdíl ve stupni šedi byl nepatrný. Tyto nálezy tedy nebyly zahrnuty do výsledků analýzy. V ostatních případech byl rozdíl již více patrný.

Stále však ve vzorcích bylo nalezeno velké množství defektů o objemu menším než 0.02 mm^3 , které vznikly pravděpodobně jako pozůstatek po pojivu. Příčinou větších defektů je vliv technologie tisku, při které mohlo dojít k lokálnímu nanesení menšího objemu materiálu. Dále byly detekovány vady v podobě mezer mezi jednotlivými vrstvami, které jsou značně ovlivněny výškou vrstvy a jsou pro tuto technologii charakteristické. Rovněž je možnou příčinou nižší teplota sintrování, kdy nedochází ke správnému spojení jednotlivých vrstev a uzavření mezer mezi nimi.

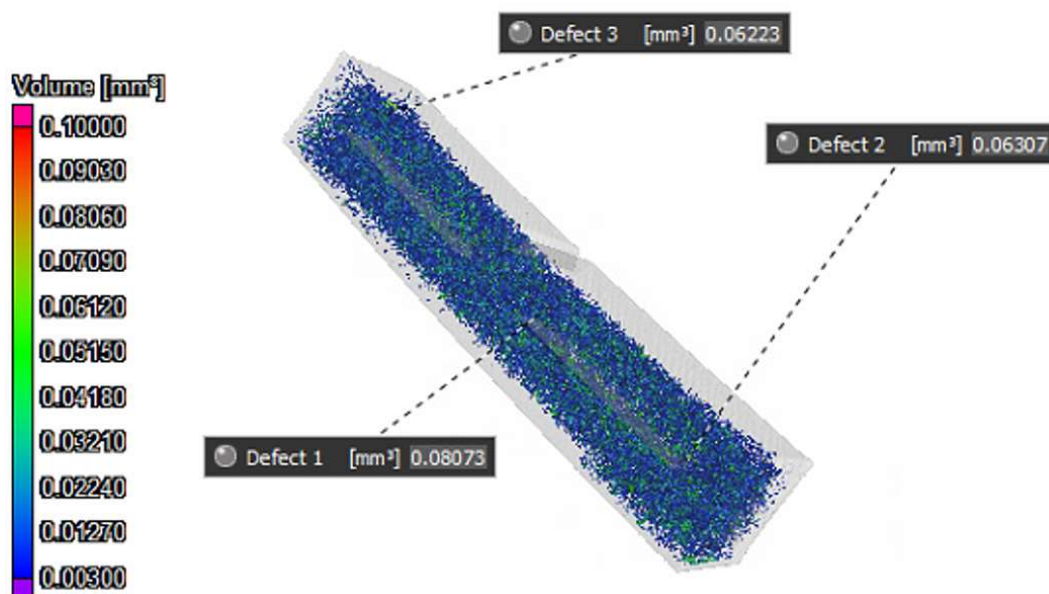


Obr. 21 Vzorek pro zkoušku tahem S1 s největší porozitou (v řezu)

Na obrázku 22 ve středové části vzorku S1 je možné pozorovat neúplné spojení jednotlivých vrstev tisku a výskyt defektů v těchto místech. Zároveň je možné vidět množství vrubů vzniklých v místě podpor, které pravděpodobně budou mít vliv na zkoušku tahem. Obdobné vady bylo možné vidět i u ostatních vzorků.

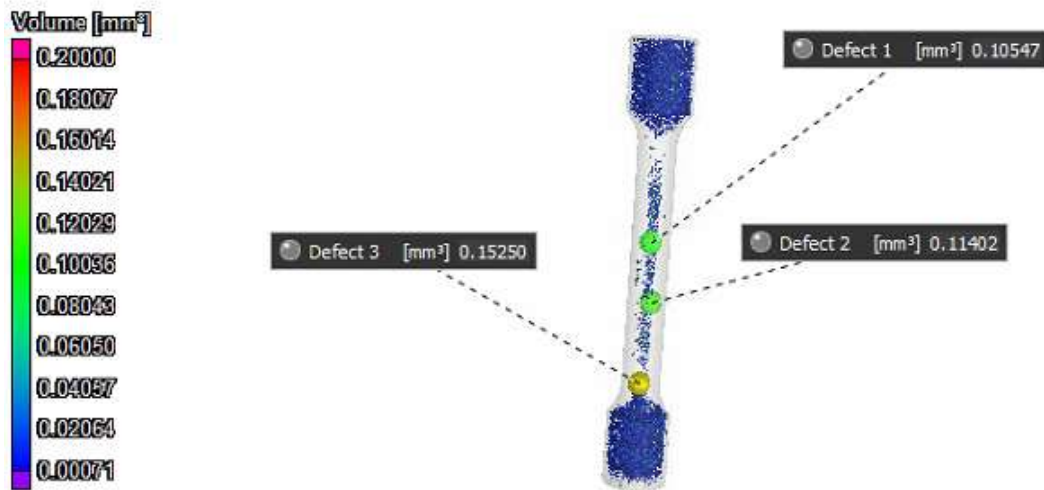
Menší porozitu přibližně o 1,5% vykazovaly 45-stupňové vzorky pro zkoušku tahem oproti vzorkům pro zkoušku rázem v ohybu. Největší porozita u vzorků pro zkoušku tahem vyšla 4,5% u vzorku S1. Nejmenší hodnota byla 3,8% u vzorku S4.

Porozita vzorků pro zkoušku rázem v ohybu byla v průměru 6%. Nejmenší porozita byla 5,5% u vzorku H1, který byl tištěný jinou strategií než ostatní vzorky. Nelze však jednoznačně říci, zda má strategie tisku výrazný vliv na porozitu, jelikož podobné výsledky měly i některé z dalších vzorků. Největší porozita byla 6,5% u vzorku H7. Oproti vzorkům pro zkoušku tahem, kde byly defekty koncentrovány více v koncových částech, tak u vzorků pro zkoušku tahem jsou rozložené v celém objemu. Lze tedy říci, že porozita je větší u objemnějších těles s větší plochou průřezu.

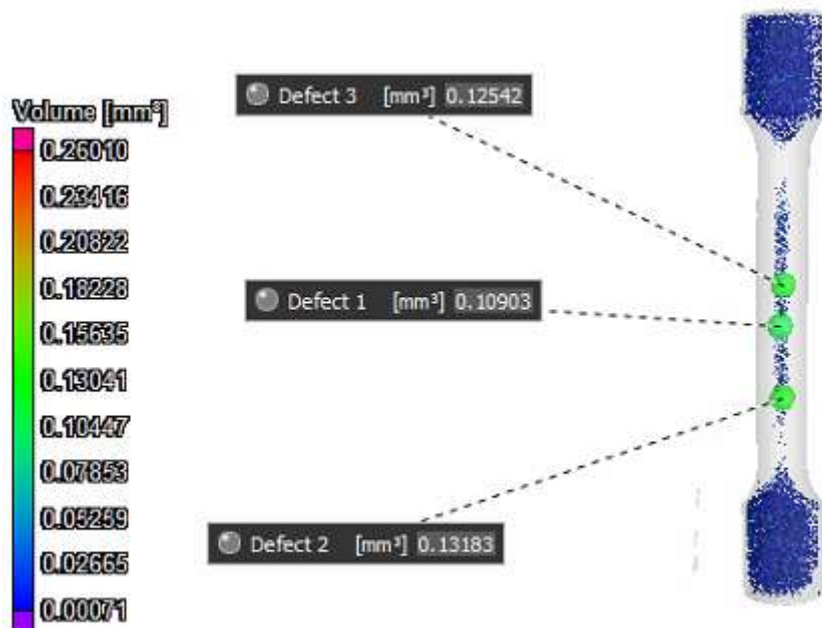


Obr. 22 Vzorek pro zkoušku rázem v ohybu H7 s největší porozitou

Další podstatnou informací je velikost a poloha velkých defektů. S výjimkou vzorků S1 a S5, u kterých se největší defekty nacházely ve středové části, se největší defekty nenacházely v místech, v kterých by mohly výrazně ovlivnit průběh mechanických zkoušek.



Obr. 23 Vzorek S1 - poloha tří největších defektů



Obr. 24 Vzorek S5 – poloha tří největších defektů

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty porozity a velikost tří největších defektů pro jednotlivé vzorky.

Tab. 7 Hodnoty porozity a velikosti největších defektů jednotlivých vzorků

Vzorek	Porezita [%]	Objem defektu [mm ³]		
		1	2	3
S1	4,6	0,15	0,11	0,11
S2	4,5	0,06	0,05	0,05
S3	4	0,15	0,13	0,05
S4	3,8	0,17	0,12	0,11
S5	4,2	0,13	0,13	0,11
H1	5,5	0,11	0,09	0,08
H2	5,7	0,08	0,07	0,07
H3	6,1	0,10	0,06	0,06
H4	5,9	0,08	0,07	0,07
H5	6,2	0,13	0,08	0,06
H6	6,1	0,08	0,08	0,07
H7	6,5	0,08	0,06	0,06

6 Zkouška tahem

Jedná se o statickou zkoušku, při které se postupně zatěžuje zkušební těleso rostoucí tahovou silou v jednom směru. Zkouška obvykle probíhá až do úplného porušení soudržnosti materiálu. Z průběhu zkoušky lze následně stanovit mechanické vlastnosti materiálu. [33], [34]

Zařízení pro zkoušku tahem je tvořené tuhým rámem, ve kterém je uložený pohyblivý příčný nosník. Jedna z čelistí se nachází na příčném nosníku a druhá na rámu. Pohybem příčného nosníku dochází následně k namáhání vzorku upnutého v čelistech. [33], [34]

Průběh zkoušky je graficky zaznamenáván pomocí tahového diagramu, který rozlišujeme na tři typy:

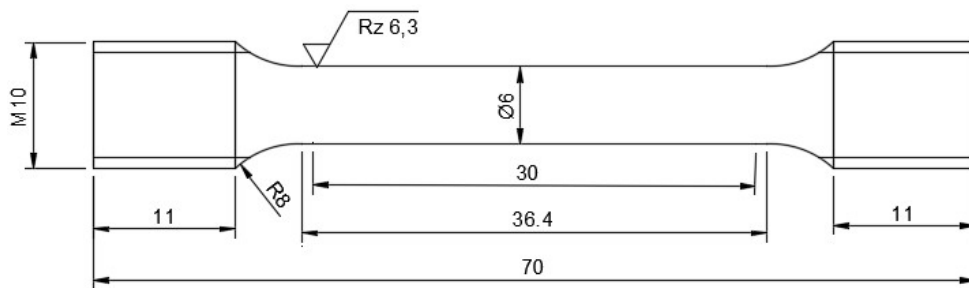
- Pracovní – závislost zatěžující síly na prodloužení vzorku
- Smluvní – závislost smluvního napětí na poměrném prodloužení
- Skutečný – závislost skutečného napětí na okamžitém prodloužení

Prodloužení vzorku během zkoušky je měřeno extenzometrem nebo pohybem nosníku. [33], [34]

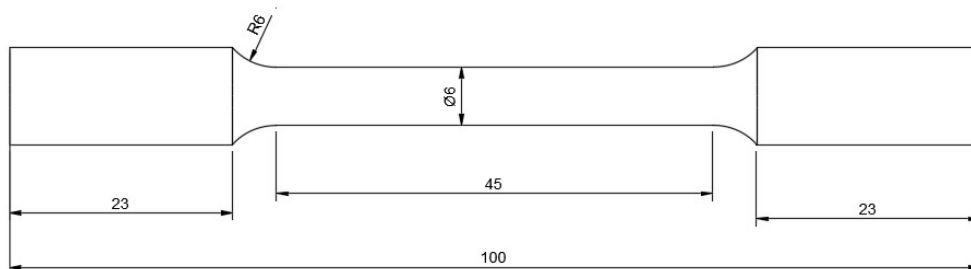
Průběh pracovního diagramu závisí na materiálu vzorku. Obecně lze tahový diagram rozdělit na čtyři oblasti. V první oblasti dochází k elastické deformaci a závislost mezi napětím a prodloužením je lineární až do meze úměrnosti. Od meze úměrnosti do meze kluzu je deformace stále elastická, ale závislost je již nelineární. Měkké oceli se vyznačují výraznou mezí kluzu, u tvrdých ocelí je potřeba stanovit smluvní mez kluzu. Smluvní mez kluzu je dána jako napětí, při kterém dojde k deformaci o 0,2%. Od meze kluzu nastává rovnoměrná plastická deformace až do meze pevnosti. Po dosažení meze pevnosti nastává nerovnoměrná deformace, která pokračuje do vyčerpání plasticity a následně nastává lom. [33], [34]

6.1 Zkušební tělesa

Zkouška se provádí na zkušebních tělesech normalizovaných rozměrů s kruhovým nebo obdélníkovým průřezem, která jsou upnuta do zkušebního stroje pomocí čelistí. Tvar a rozměry těles jsou stanovené normou. Pro zkoušku byla v případě technologie BMD zhotovená tělesa dle normy DIN 50125 typ B. Technologií DMLS byla zhotovená tělesa dle normy ASTM E8. Výkresy těles jsou uvedeny na obrázku 18 a 19.



Obr. 25 Výkres použitých zkušebních těles pro zkoušku tahem dle DIN 50125 [33]



Obr. 26 Výkres použitých zkušebních těles pro zkoušku tahem dle ASTM E8 [34]

Pro zkoušku tahem bylo použito celkem patnáct vzorků. Deset vzorků zhotovených technologií DMLS, z nichž pět bylo tisknuto pod úhlem 45° a pět vertikálně. Ze vzorků zhotovených technologií BMD byly použity pouze 45-stupňové vzorky, jelikož vertikální vzorky nebyly po sintrování použitelné. Všechna tělesa byla tepelně zpracována do stavu H900 za účelem docílení největší pevnosti.

Cílem tahové zkoušky bylo zjistit, jakých mechanických vlastností lze dosáhnout u těles z materiálu 17-4 PH ve stavu H900 tisknutých technologií DMLS a BMD v závislosti na orientaci tisku. Dále bylo cílem výsledné vlastnosti vzájemně porovnat a ověřit, zda odpovídají hodnotám výrobce.

6.2 Vyhodnocení zkoušky tahem

Tahová zkouška byla provedena na zkušebním zařízení LabTest 5.100 SP1 dle normy ČSN EN ISO 6892-1, která udává podmínky zkoušky za pokojové teploty. [37]



Obr. 27 Zkušební zařízení LabTest 5.100 SP1

Parametry zkoušky

- Typ stroje: LabTest 5.100 SP1
- Snímač síly: 100kN
- Průtahoměr: optický extenzometr
- Upínací přípravek: ne
- Zkušební prostor: spodní zkušební prostor
- Zkušební rychlosti: 1 mm/min
- Kritérium ukončení zkoušky: Síla = 80000 N

Tab. 8 Výsledky zkoušky tahem - DMLS

DMLS			
45-stupňové vzorky	R_m [N/mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	A [%]
S1	1325	1193	-
S2	1346	1216	-
S3	1383	1254	-
S4	1287	1142	-
S5	1311	1172	-
Vertikální vzorky			
T1	1215	1096	-
T2	1228	1094	-
T3	1253	1118	-
T4	1236	1105	-
T5	1248	1121	-

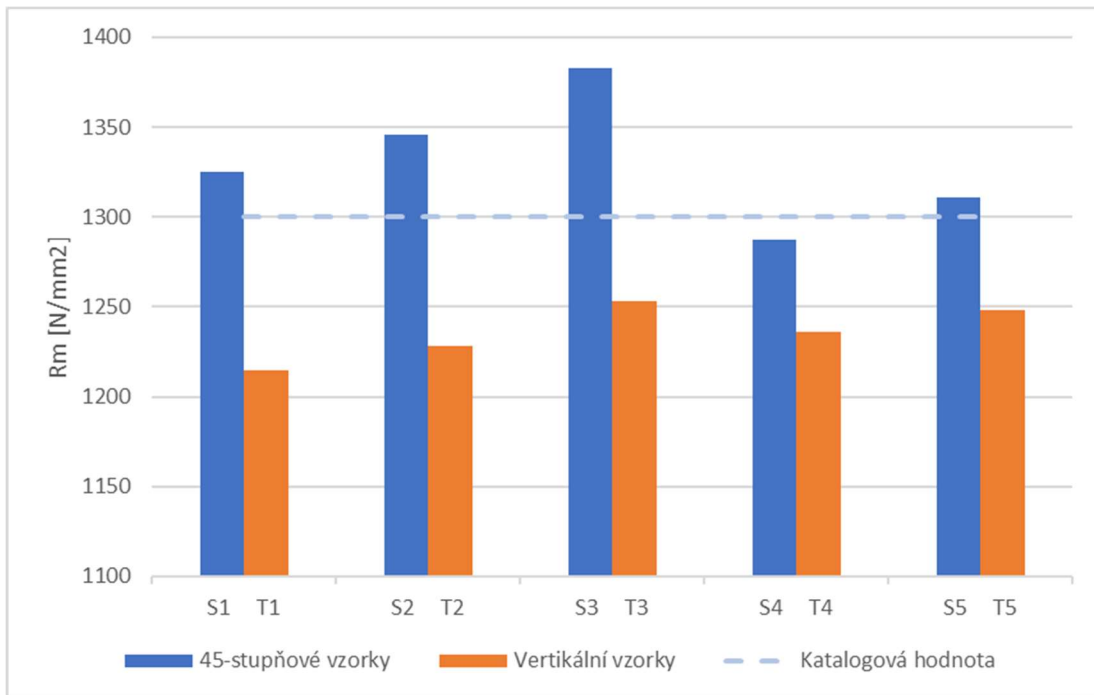
Tab. 9 Výsledky zkoušky tahem - BMD

BMD			
45-stupňové vzorky	R_m [N/mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	A [%]
S1	674	594	-
S2	879	671	-
S3	910	768	-
S4	734	658	-
S5	858	619	-

Z tab.5 je patrné, že v případě vzorků zhotovených technologií DMLS dosahují vertikální vzorky v průměru o 90 N/mm² menší meze kluzu a meze pevnosti než 45-stupňové vzorky. Vliv orientace tisku na pevnost materiálu byl předpokládán, jelikož u vertikálních těles byly jednotlivé vrstvy nanášeny kolmo na směr zatěžování, což bylo zřejmě příčinou rozdílných výsledků.

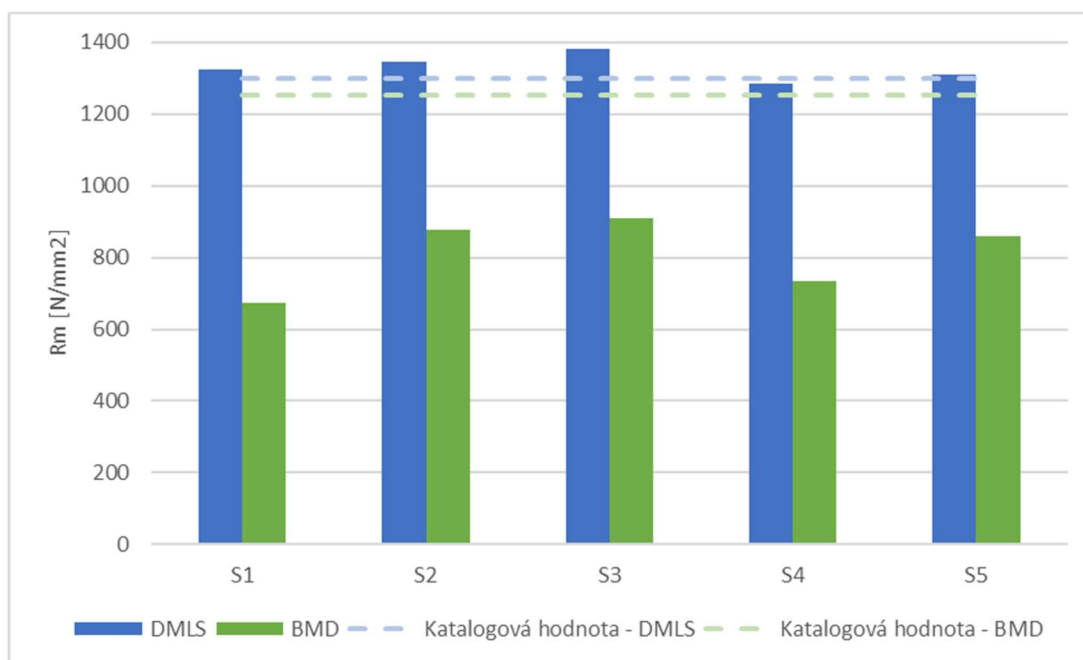
Výrobce udává spodní hodnota meze pevnosti je 1300N/mm². V průměru bylo u 45-stupňových vzorků dosaženo těchto hodnot, pouze u vzorku S4 byla hodnota nižší o 13 N/mm². U vertikální vzorků se v průměru hodnota meze pevnosti lišila o 64 N/mm², kdy ani jeden ze vzorků nedosáhl hodnoty udávané výrobcem.

Graf 1 Porovnání meze pevnosti 45-stupňových a vertikálních vzorků - DMLS



Hodnoty meze pevnosti 45-stupňových vzorků tisknutých technologií BMD (tab. 6) značně kolísaly a zdaleka nedosahovaly výsledků jako vzorky tištěné technologií DMLS. Největší hodnoty meze pevnosti bylo dosaženo u vzorku S3, a to 910 N/mm², což je stále přibližně o 300 N/mm² méně oproti DMLS vzorkům. V porovnání s hodnotou udávanou výrobcem je tato hodnota menší o 250 N/mm². Příčinou nízkých a kolísavých hodnot je pravděpodobně relativně vysoká porozita a především výskyt vrubů posaných v kapitole 5.

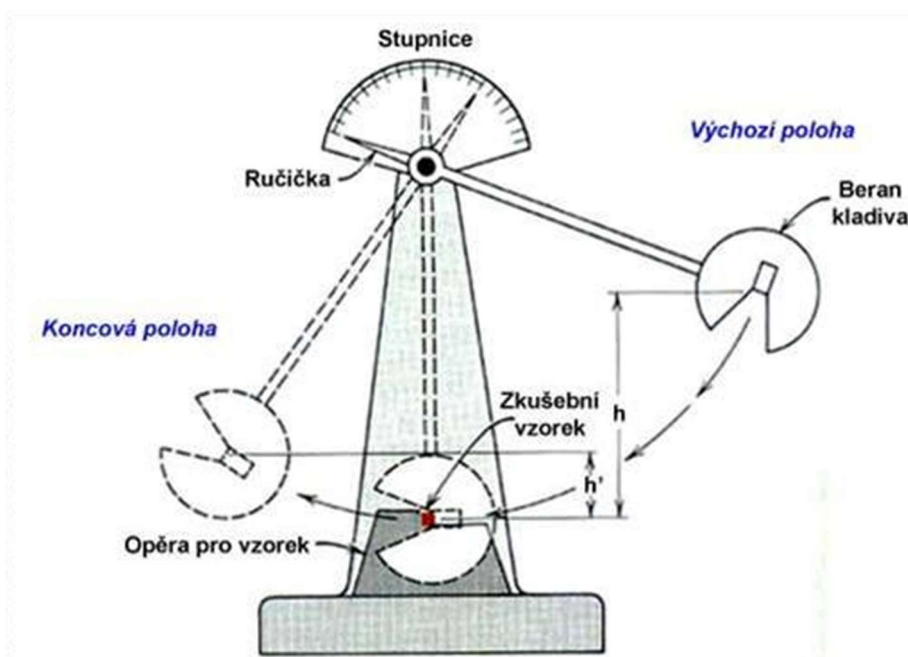
Graf 2 Porovnání meze pevnosti 45-stupňových vzorků – DMLS/BMD



Tažnost nebylo možné ani u jedněch vzorků stanovit, jelikož vzorky vykazovaly po přetržení křehký lom. Orientačně se tažnost pohybovala v desetinách procenta. U vzorků obou technologií tisku tedy nebylo dosaženo hodnot tažnosti udávané výrobcí, které začínaly na 3%. Vlivem velmi nízké tažnosti, způsobem měření prodloužení a nevýrazné meze kluzu materiálu bylo i obtížné vyhodnocení smluvní meze kluzu. V případě hodnot meze kluzu se tedy jedná spíše o přibližné hodnoty.

7 Zkouška rázem v ohybu

Vrubová houževnatost udává odolnost materiálu vůči křehkému lomu a stanovuje se zkouškou rázem v ohybu, která je jednou z nejpoužívanějších materiálových zkoušek. Princip metody spočívá v přeražení zkušebního tělesa s vrubem jedním úderem Charpyho kyvadlového kladiva s maximální nárazovou energií 300 J a rychlostí 5 až 5,5 m/s. Podmínky zkoušky jsou dané normou ČSN ISO 148-1. [33], [38], [39]



Obr. 28 Schématický obrázek zkoušky rázem v ohybu

Zkušební vzorky jsou opatřeny vrubem ve tvaru V nebo U, kde při nárazu kladiva dojde ke koncentraci napětí a následnému přeražení tělesa. Geometrie břitu kladiva je též dána normou, která předepisuje poloměr břitu 2 mm nebo 8 mm.[33], [38], [39]

Z výsledků zkoušky rázem v ohybu získáváme energii, která byla potřeba k přeražení tělesa. Tato energie je značena KU nebo KV, v závislosti na tom, o jaký typ vrubu se u tělesa jedná. Vrubová houževnatost je následně značena KCU nebo KCV a stanovuje se ze vztahu:

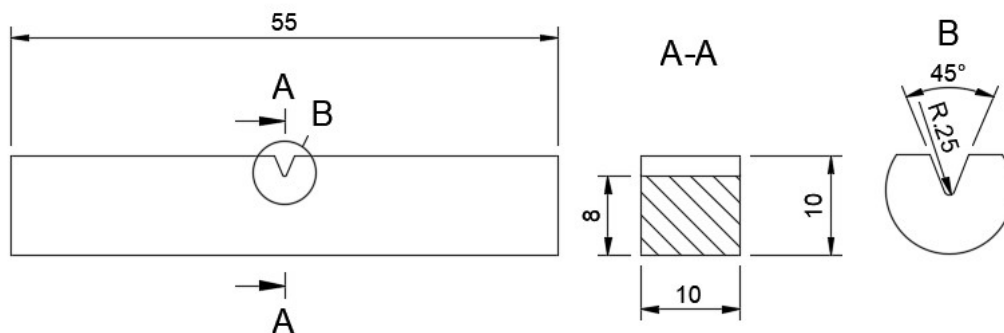
$$KC = \frac{K}{S_0} [J/cm^2]$$

kde K je hodnota absorbované energie a S_0 je plocha průřezu tělesa pod vrubem. Dle normy se zkouška provádí při teplotě 23 ± 5 °C, pokud nejsou stanoveny jiné podmínky. [33], [38], [39]

7.1 Zkušební tělesa

Standardní zkušební těleso má normou ČSN ISO 148-1 předepsanou délku 55 mm, šířku 10 mm a tloušťku 10 mm. Zkušební vzorek se uprostřed své délky opatří vrubem tvaru V nebo U. V případě vrubu tvaru V je jeho úhel rozevření 45° , hloubka 2 mm a poloměr zaoblení 0,25 mm. Vrub tvaru U má definovanou hloubku 5 mm a poloměr zaoblení 1 mm. Dále je potřeba u zkušebních těles dodržet normou předepsanou drsnost povrchu $Ra 5 \mu\text{m}$ a v případě tepelně zpracovávaných těles je nutné veškeré dokončovací operace provést až po tepelném zpracování. [39]

Výkres použitých zkušebních těles pro zkoušku rázem v ohybu je uveden na obrázku 28.



Obr. 29 Výkres použitých těles pro zkoušku rázem v ohybu dle ČSN ISO 148-1 [37]

Pro zkoušku rázem v ohybu bylo použito celkem dvacet dva vzorků. Patnáct vzorků zhotovených technologií DMLS, z nichž pět bylo tištěno s vrubem kolmo na rovinu tisku, pět s vrubem rovnoběžně s rovinou tisku a pět vertikálně. Sedm vzorků bylo zhotovených technologií BMD s vrubem kolmým na rovinu tisku. Všechna tělesa byla tepelně zpracována do stavu H900 za účelem docílení největší pevnosti. Cílem této zkoušky bylo zjistit náchylnost materiálu v tomto stavu vůči křehkému l

7.2 Měření drsnosti

V rámci přípravy vzorků před zkouškou rázem v ohybu byla změřena jejich drsnost povrchů, jelikož norma pro zkoušku rázem v ohybu ČSN EN ISO 148-1 stanovuje drsnost povrchu Ra 5 μm .

Měření vzorků bylo provedeno na laboratorním drsnoměru MarSurf XCR 20 s posuvnou jednotkou LD 120 a snímačem LD A 14-10-2 1197. Rychlost měření byla 0,5mm/s. Měřeny byly podélné plochy vzorků, tedy plochy rovnoběžné s rovinou tisku a plochy kolmé na rovinu tisku u vzorků horizontálních. U vertikálně tištěných vzorků byly měřeny podélné plochy kolmé na rovinu tisku. Pro měření byly vybrány vždy tři vzorky z každé sady.

7.2.1 Vyhodnocení drsnosti

Měřenými parametry byly:

- Ra – střední aritmetická hodnota drsnosti
- Rz – střední hloubka drsnosti

Tab. 10 Hodnoty drsností vzorků pro zkoušku rázem v ohybu - DMLS

DMLS			
Horizontální vzorky	Měřená plocha	Ra [μm]	Rz [μm]
H1		17,9	97,2
	⊥	4,8	33,5
H2		15,9	82,2
	⊥	4,2	30,1
H3		14,5	81,3
	⊥	5,4	43,8
H6		13,2	73,3
	⊥	4,2	28,7
H7		13,8	73,9
	⊥	4,2	29,6
H8		12,2	63,7
	⊥	3,9	26,8
Vertikální vzorky			
V1	⊥	4,5	32,8
V2	⊥	4,3	29,9
V3	⊥	3,9	26,6

Tab. 11 Hodnoty drsností vzorků pro zkoušku rázem v ohybu - BMD

BMD			
Horizontální vzorky	Měřená plocha	Ra [μm]	Rz [μm]
H1		3,2	24,5
	⊥	8,4	62,2
H2		4,3	29,5
	⊥	10,3	71,2
H3		4,5	31,1
	⊥	9,9	75,1

Tab. 12 Průměrné hodnoty drsností

Průměrné hodnoty			
	Měřené plochy	Ra [μm]	Rz [μm]
DMLS		14,6	78,6
	⊥	4,4	31,3
BMD		4,0	28,4
	⊥	9,5	69,5

V tabulkách 10 a 11 jsou uvedeny průměrné hodnoty ze tří měření. Z naměřených hodnot je patrné, že drsnost povrchu je vždy na některých plochách nevyhovující. V případě vzorků zhotovených technologií DMLS jsou to strany rovnoběžné s rovinou tisku, u vzorků zhotovených technologií BMD jsou to strany kolmé na rovinu tisku.

V tabulce 12 jsou uvedeny průměrné hodnoty drsnosti stran kolmých na rovinu tisku a rovnoběžných s rovinou tisku. Z tabulky je patrné, že u technologie DMLS je drsnost povrchu horší v rovinách rovnoběžných s rovinou tisku oproti rovinám kolmým na rovinu tisku, což je dáno strategií tisku. V průměru byla u DMLS vzorků drsnost povrchu rovnoběžných stran Ra 14,6 a Rz 78,6. Kvalita kolmých ploch byla v průměru Ra 4,4 a Rz 31,3. U BMD vzorků tomu bylo naopak, větší drsnosti vykazovaly plochy kolmé k rovině tisku oproti rovnoběžným plochám. V průměru byla drsnost kolmých ploch Ra 9,5 a Rz 69,5. Průměrná hodnota drsnosti ploch rovnoběžných s rovinou tisku byla Ra 4 a Rz 28,4. Z uvedených výsledků vyplývá, že celkově o něco lepších výsledků bylo dosaženo u vzorků tisknutých technologií BMD. Nutné je ovšem říci, že se jedná o orientační hodnoty, jelikož měření bylo provedeno ve směru největší drsnosti, kdy měřená délka vzhledem k rozměrům vzorků neodpovídala normě.

7.3 Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu byla provedena kyvadlovým kladivem s maximální nárazovou energií 150 J při teplotě 20 °C dle normy ČSN EN ISO 148-1.



Obr. 30 Kyvadlové kladivo pro zkoušku rázem v ohybu

Tab. 13 Výsledné hodnoty zkoušky rázem v ohybu - BMD

BMD		
Horizontální vzorky	KV [J]	KCV [J/cm ²]
H1	3,5	4
H2	4	5
H3	3,5	4
H4	3,5	4
H5	3,5	4
H6	3,5	4
H7	3	4

Tab. 14 Výsledné hodnoty zkoušky rázem v ohybu - DMLS

DMLS		
Horizontální vzorky	KV [J]	KCV [J/cm ²]
H1	8	11
H2	7,5	10
H3	7	9
H4	6	8
H5	6,5	9
H6	5	7
H7	4,5	6
H8	5	7
H9	5,5	8
H10	5,5	7
Vertikální vzorky		
V1	4	5
V2	3,5	5
V3	3,5	5
V4	4	5
V5	3,5	5

Tab. 15 Průměrné hodnoty KV a KCV

Průměrné hodnoty			
	Vzorek	KV [J]	KCV [J/cm ²]
DMLS	H1-H5	7,0	9,4
	H6-H10	5,1	7,0
	V1-V5	3,7	5,0
BMD	H1-H7	3,5	4,1

Z výsledných hodnot v tabulce 10 a 11 lze konstatovat, že tištěná ocel 17-4 PH ve stavu H900 je velmi náchylná ke křehkému lomu. V průměru byla největší nárazová práce $KV=7$ J a vrubová houževnatost $KCV= 9,4$ J/cm² u DMLS vzorků s vrubem v rovině tisku. Nejmenší hodnoty byly $KV=3,5$ J a $KCV= 4,1$ J/cm² u BMD vzorků s vrubem kolmým na rovinu tisku. Horizontální DMLS vzorky s vrubem kolmým na rovinu tisku dosahovaly průměrné nárazové práce $KV= 5,1$ J a vrubové houževnatosti $KCV= 7$ J/cm². Nejnižších hodnot z DMLS vzorků dosahovaly vertikálně tištěné vzorky s průměrnou nárazovou prací $KV=3,7$ J a vrubovou houževnatostí $KCV= 5$ J/cm².

Příčinou je zřejmě rovnoběžný směr nárazu kladiva s rovinou tisku, čímž je potřeba menší energie k přelomení vzorku.

Z výsledků je tedy patrné, že v případě vzorků zhotovených technologií BMD dosahovala nárazová práce a vrubová houževnatost hodnot podobných vzorkům vertikálních u technologie DMLS. Příčinou je pravděpodobně, stejně jako u tahové zkoušky, vysoká porozita a množství defektů popsanych v kapitole 5.

Hodnoty vrubové houževnatosti nebyly výrobcí uvedené, naměřené hodnoty tedy byly porovnány s hodnotou konvenčně zpracované oceli 17-4 PH ve stavu H900. V katalogu je pro tuto ocel uvedena hodnota nárazové práce $KV = 20 \text{ J}$. V případě obou technologií tisku této hodnoty nebylo dosaženo ani u jednoho vzorku. [28]

7.3.1 Analýza lomových ploch

Po provedení zkoušky rázem v ohybu byla u vzorků provedena analýza lomových ploch především z hlediska podílu houževnatého a křehkého lomu a z hlediska vnitřní struktury vzorku.

Obecně se u vzorků, v závislosti na materiálu a teplotě zkoušky, můžeme setkat s křehkým, houževnatým nebo kombinovaným lomem. Kombinovaný lom je tedy tvořen lomem křehkým a houževnatým v určitém poměru. Křehký lom se vyznačuje rovinným, krystalicky třpytivým vzhledem bez výrazné plastické deformace. Pro houževnatý lom je naopak typická plastická deformace vzorku a matný vzhled. [33], [38]

Všechny zkoumané vzorky se vyznačovaly lomem bez rozlišitelného křehkého a houževnatého podílu. Avšak vzhledem k tomu, že u vzorků nebyla patrná výrazná plastická deformace hran, tak se bude jednat o výrazně větší podíl křehkého lomu nad lomem houževnatým. Tomuto tvrzení nasvědčují i výsledky rázové zkoušky. Dále jsou uvedené snímky



Obr. 31 Lomová plocha vzorku H3 – DMLS

Na obrázku 32 je snímek lomové plochy vzorku H3 tištěného technologií DMLS s viditelnou minimální deformací hran a nejednoznačným podílem křehkého a houževnatého lomu. Ze snímku není tolik patrná strategie tisku, jako tomu je u horizontálně tištěných vzorků.



Obr. 32 Lomová plocha vzorku V1 - DMLS

Na obrázku 33 je snímek lomové plochy vzorku V1 zhotoveného technologií DMLS, z kterého je rovněž patrné, že podíl křehkého a houževnatého lomu není jednoznačný. Oproti horizontálním vzorkům je však zřetelný rozdíl v textuře lomové plochy, která je dána strategií tisku. Dle výsledků rázové zkoušky byly, ze vzorků tisknutých technologií DMLS, horizontální vzorky nejméně odolné vůči křehkému lomu. Odpovídají tomu i hrany, které nevykazují známky plastické deformace.



Obr. 33 Lomová plocha vzorku H6 - BMD

Na obrázku 32 je snímek lomové plochy vzorku H6 zhotoveného technologií BMD. U vzorku nebyl, jako v případě DMLS vzorků, patrný podíl křehkého a houževnatého lomu. U vzorku rovněž nedošlo k plastické deformaci a lomová plocha obsahovala viditelné, značně převažující, množství lesklých ploch. Zároveň je na snímku patrný velký výskyt pórů mezi jednotlivými stěnami tisku, které byly detekovány již pomocí počítačové tomografie. Výše uvedená pozorování jsou zřejmou příčinou nejnižších výsledných hodnot vrubové houževnatosti v případě BMD vzorků.

Výše uvedené snímky jsou charakteristické pro jednotlivé technologie a směry tisku. Lomové plochy ostatních vzorků vykazovaly velmi obdobné vlastnosti, které byly již výše zmíněny. U žádného ze vzorků nebylo tedy možné stanovit podíl křehkého a houževnatého lomu a všechny vzorky vykazovaly minimální plastickou deformaci. Dále byla u DMLS horizontálních vzorků patrná strategie tisku.

Z pozorování lomových ploch a výsledků zkoušky rázem v ohybu se rovněž potvrdilo, že horizontální vzorky budou vykazovat větší náchylnost ke křehkému porušení. Oproti tomu BMD vzorky tisknuté s vrubem kolmo k rovině tisku, u kterých se očekávaly srovnatelné výsledky s horizontálními DMLS vzorky, dosahovaly nejmenší vrubové houževnatosti ze všech vzorků. Příčinou ovšem je zejména velké množství defektů ve vzorcích.

8 Světelná mikroskopie

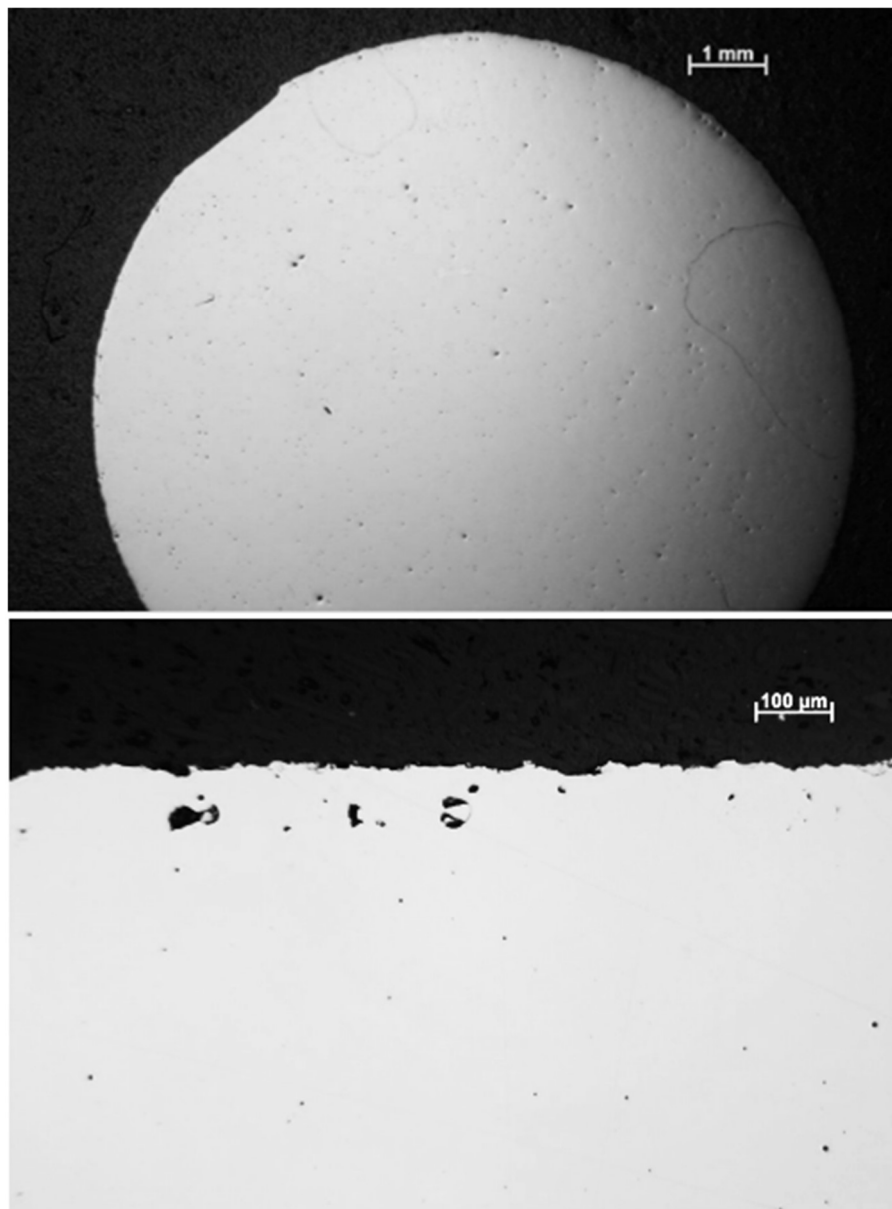
V rámci dalšího hodnocení vzorků byly zhotoveny metalografické výbrusy pro světelnou mikroskopii za účelem porovnání porozity a zjištění případného výskytu trhlin. Pro pozorování bylo vybráno několik vzorků ze zkoušky tahem a rovněž byly analyzovány vybrané vzorky ze zkoušky rázem v ohybu zhotovené technologií BMD, jelikož u nich byly zjištěné počítačovou tomografií vysoké hodnoty porozity.

Vzorky byly hodnoceny jak v příčném, tak podélném směru, kdy se nejprve vzorky rozdělily pomocí metalografické pily v příslušných směrech a pilníkem se odstranily vzniklé otřepy. Dále se vzorky očistily technickým lihem a lisovacím zařízením byly zalisovány do bakelitového materiálu. Následně byly vzorky za mokra broušeny řadou brusných pláten od nejhrubší zrnitosti po nejjemnější a na závěr byly vzorky vyleštěny.

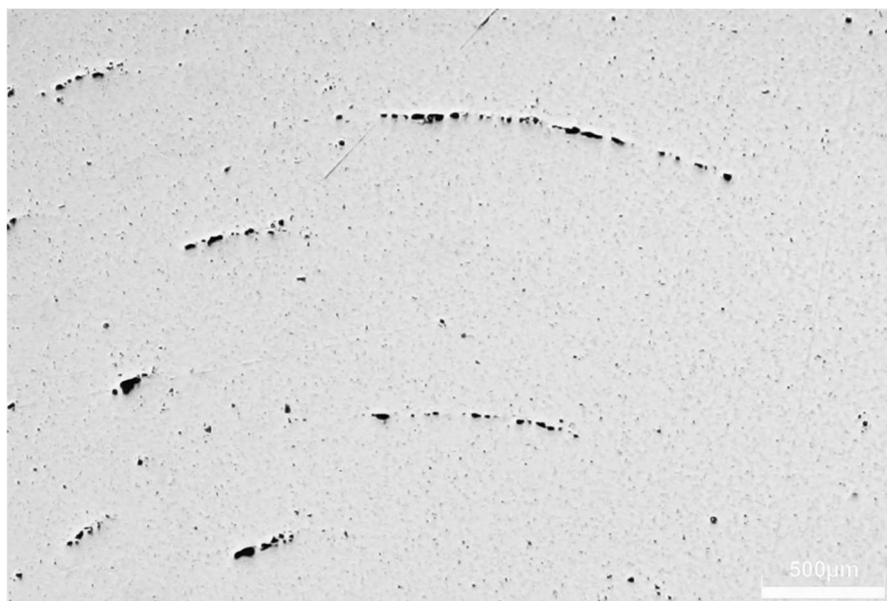


Obr. 34 Lisovací zařízení LECO MX400 (vlevo), metalografická bruska Tegamin 30 (uprostřed) a metalografická pila Struers Secotom 60 (vpravo)

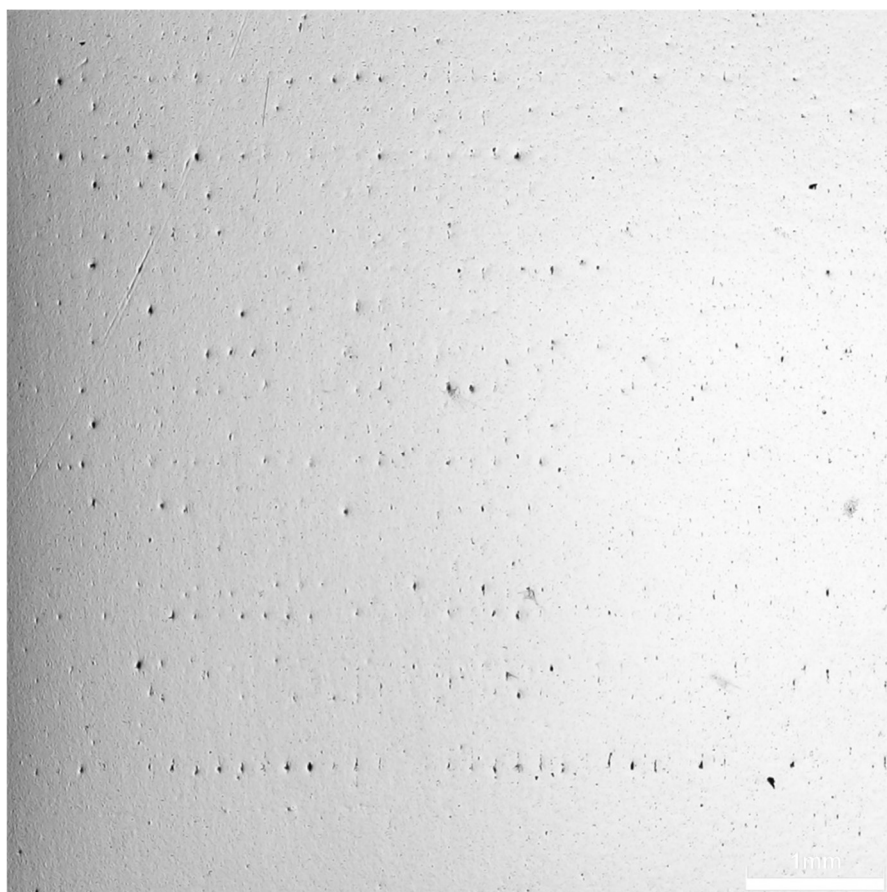
Dále jsou uvedeny příklady pořízených snímků pro názornost defektů, které se u vybraných vzorků vyskytovaly.



Obr. 35 DMLS vzorek T5 v příčném (nahore) a podélném směru (dole)



Obr. 36 BMD vzorek S1 v příčném (nahore) a podélném směru (dole)



Obr. 37 BMD vzorek H1 v příčném (nahore) a podélném směru (dole)

Na výše uvedených snímcích je patrné, že se u DMLS vzorků objevují defekty lokálně a v menší míře, než u BMD vzorků. V obou případech jsou defekty v podobě pórů a trhliny se u vzorků nevyskytovaly. V některých místech bylo u DMLS vzorků možné najít větší defekty, které byly pravděpodobně způsobeny nečistotou v prášku nebo špatným spečením. Oproti tomu u BMD vzorků byly zřetelné defekty v podobě pórů a podlouhlých mezer mezi vrstvami jak v příčných, tak podlouhlých řezech.

Z řady snímků jednotlivých vzorků byla následně vyhodnocena plošná porozita, která byla u DMLS vzorků přibližně stejná v příčném i podélném směru, kdežto u BMD vzorků se vzhledem k charakteru defektů na některých snímcích lišila. Ve výsledku se však porozita pohybovala u DMLS vzorků okolo 0,5%. U tahových vzorků zhotovených technologií BMD se porozita pohybovala v průměru okolo 4% a u vzorků pro zkoušku rázem v ohybu okolo 3%. Tedy pro orientační porovnání byla porozita BMD vzorků řádově vyšší.

V porovnání porozity BMD vzorků získané počítačovou tomografií oproti plošné porozitě vyhodnocené ze snímků světelné mikroskopie se výsledky u tahových vzorků výrazně neliší a jsou v obou případech okolo 4%. V případě vzorků pro zkoušku rázem v ohybu se výsledek v průměru liší o jednotky procent, což je zřejmě dáno tím, že snímky byly pořízeny z řezů v jedněch místech vzorků, která zrovna nevykazovala přítomnost větších defektů. Tím pádem bych se přiklonil k výsledkům počítačové tomografie, kde bych očekával reálnou porozitu mezi 4-6% .

9 Měření tvrdosti

U vzorků byla dále provedena zkouška tvrdosti, jelikož se jedná o jednu z dalších hodnot udávané výrobcí. Cílem měření tedy bylo ověřit, zda vzorky dosahují těchto hodnot jak v rovinách rovnoběžných se směrem tisku, tak i kolmých, a zda je možné dosáhnout srovnatelných výsledků u obou technologií.

Pro měření byla použita tři tělesa ze zkoušky rázem v ohybu vzhledem k jejich větší ploše a zároveň snadnější přípravě. V rámci přípravy bylo zapotřebí zbrousit měřenou plochu do roviny, aby byla zajištěna přesnost měření a také aby nedošlo k poškození indentoru. Dále proběhla již samotná měření dle Rockwella pomocí tvrdoměru Emcotest M4C 075/750. Tvrdost u jednotlivých vzorků byla měřena na plochách rovnoběžných s rovinou tisku kromě vzorků H2, u kterých byla měřena v rovinách kolmých.



Obr. 38 Univerzální tvrdoměr Emcotest M4C 075/750

Parametry zkoušky

- Tvrdoměr: Emcotest M4C 075/750
- Indentor: diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°
- Hlavní zatížení: 1 471,5N
- Doba hlavního zatížení: 5s

9.1 Vyhodnocení tvrdosti

Tab. 16 Výsledné hodnoty tvrdosti

DMLS		
	Naměřené hodnoty HRC	Průměrná hodnota HRC
H1	38	38
	39	
	37	
H2	36	36
	36	
	37	
H3	36	37
	38	
	37	
BMD		
	Naměřené hodnoty HRC	Průměrná hodnota HRC
H1	38	38
	37	
	39	
H2	37	37
	36	
	37	
H3	38	38
	38	
	39	

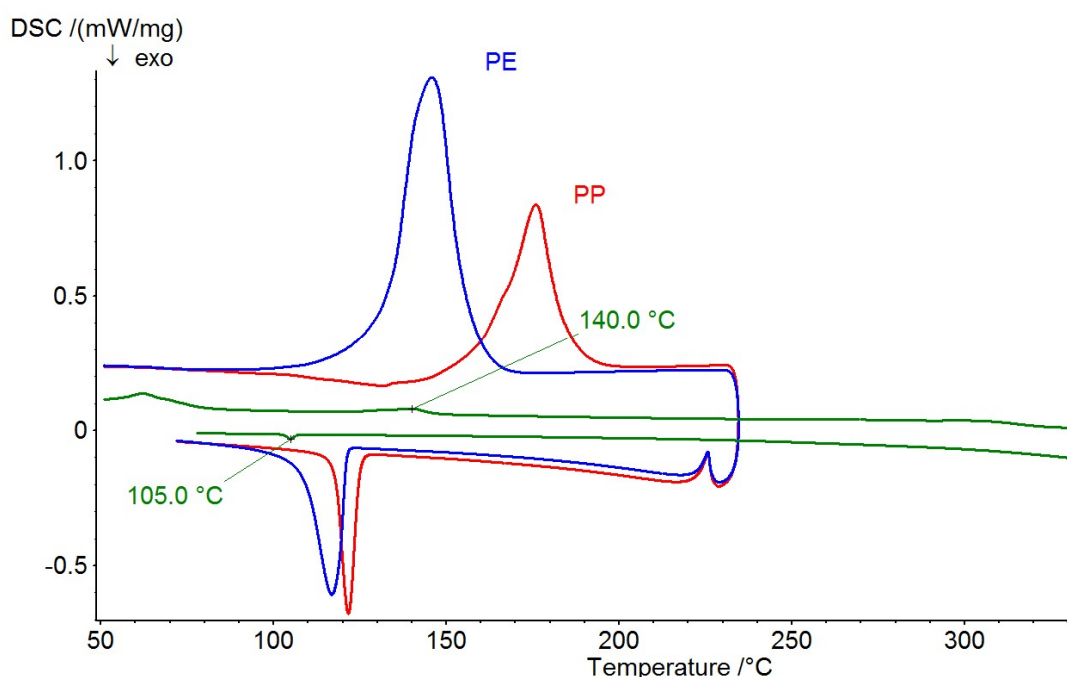
Z tabulky naměřených hodnot je patrné, že tvrdost u všech vzorků vychází velmi podobně pro obě technologie. Hodnota tvrdosti se pohybuje v rozmezí 36-38 HRC. Mírně nižší hodnoty vykazovaly vzorky H2, u kterých byla tvrdost měřena na plochách kolmých s rovinou tisku, ale tento rozdíl není nijak výrazný. V obou případech ovšem nebylo dosaženo hodnot tvrdosti udávanou výrobcem, která je pro DMLS vzorky 43 HRC a pro BMD vzorky 42 HRC

10 Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC)

Za účelem identifikace polymerního pojiva kovového prášku u technologie BMD byla u vzorku materiálu provedena termická analýza pomocí diferenciální skenovací kalorimetrie. DSC je jednou ze základních metod termické analýzy, při které se zkoumají tepelné vlastnosti materiálů. Jednou ze základních aplikací metody DSC je právě identifikace plastů, která se provádí na základě charakteristických teplot fázových přeměn. Tyto přeměny jsou provázeny změnou tepelné kapacity nebo entalpie a jejich teploty lze stanovit z grafu.[38]

Pro termickou analýzu polymerního pojiva byl použit vzorek vytlačeného kovového materiálu s pojivem. Analýza byla provedena na zařízení NETSCH STA 409PG LUXX při rychlosti ohřevu 10°C/min do teploty 350°C.

Graf 3 Porovnání DSC křivek pro zkoumaný materiál, PP a PE



V grafu 3 je možné vidět DSC křivku zkoumaného materiálu (zeleně). Pro porovnání byly použity DSC křivky polyethylenu(modře) a polypropylenu (červeně), které jsou běžně používané jako pojivový materiál technologie MIM. Pro analýzu byla použita hmotnost celého vzorku, což je důvod malé entalpie v grafu, nicméně teploty fázových přeměn napovídají, že se pravděpodobně jedná o polyethylen. [39]

11 Závěr

Cílem práce bylo ověřit, zda zhotovené vzorky dosahují mechanických vlastností deklarovaných výrobcem, jaký vliv na tyto vlastnosti má orientace tisku a zda je možné odlišnými technologiemi aditivní výroby dosáhnout srovnatelných výsledků.

V případě zkoušky tahem DMLS 45-stupňové vzorky dosahovaly hodnoty výrobce, horizontální vzorky těchto hodnot nedosahovaly. BMD 45-stupňové vzorky zdaleka nedosahovaly hodnot výrobce, tudíž nebylo ani dosaženo srovnatelných hodnot s DMLS vzorky.

V případě zkoušky rázem v ohybu nebyly hodnoty od výrobců uvedené a proto byla použita katalogová hodnota konvenčně zpracované oceli 17-4 PH ve stavu H900. Ani DMLS vzorky ani BMD vzorky této hodnoty nedosáhly. Nejlepších hodnot bylo dosaženo u DMLS horizontálních vzorků s vrubem rovnoběžně s rovinou tisku. BMD vzorky dosahovaly nejnižších hodnot vrubové houževnatosti ze všech vzorků. Tudíž ani v tomto případě nebylo dosaženo srovnatelných výsledků.

V případě měření tvrdosti vzorky z obou technologií dosahovaly srovnatelných hodnot jak v rovině kolmé na rovinu tisku, tak i rovnoběžné s rovinou tisku.

Závěrem je nutné říci, že nízké mechanické vlastnosti BMD vzorků byly značně ovlivněny velkým výskytem defektů. Při pozorování pomocí tomografu byla zjištěna porozita u těchto vzorků v rozmezí 4-6%, což zřejmě mělo značný vliv na výsledky. Rovněž se u vzorků vyskytovaly vruby mezi vrstvami, které jsou pro technologii extruze materiálu charakteristické. Pro dosažení směrodatnějších výsledků by bylo vhodné provést řádnou kalibraci tiskárny.

Celkově si ale myslím, že technologie BMD má velký potenciál v aditivní výrobě kovových dílů, jelikož se jedná o ucelené řešení, které je velmi uživatelsky přívětivé a oproti práškovým technologiím odpadá potřeba ochranných prostředků při manipulaci s materiálem.

12 Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] *Co je aditivní výroba z kovů?*[online]. Renishaw plc, © 2023[cit. 2022-6-18].
Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/co-je-aditivni-vyroba-z-kovu--15240>
- [2] *Základní principy aditivní výroby* [online]. Sharplayers s.r.o., © 2022 [cit. 2022-6-18]...
Dostupné z: <https://sharplayers.cz/support/aditivni-vyroba/>
- [3] GEBHART, Andreas,. *Understanding Additive Manufacturing*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN: 978-3-446-42552-1
- [4] *What is Additive Manufacturing (AM)?* [online]. engineeringproductdesign.com, ©2023[cit. 2022-6-18]. Dostupné z:
https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/additive-manufacturing-processes/#Additive_manufacturing_vs_Rapid_prototyping_vs_3D_Printing
- [5] *History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented?* [online]. All3DP, © 2023.
[cit. 2022-6-18].Dostupné z:
<https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [6] ROBERT. *3D Printing Revolution: Know Everything From Scratch* [online]. Printtopeer, © 2020 [cit. 2022-6-18].Dostupné z:
<https://www.printtopeer.com/3d-printing-revolution/>

- [7] *The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2022* [online]. 3DSourced , © 2023 [cit. 2022-6-18].. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/3d-printers/history-of-3d-printing/>
- [8] *The History of 3D Printing: From the 80s to Today* [online]. Sculpteo, © 2009. [cit. 2022-7-1].Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
- [9] You Can Now See the First Ever 3D Printer - Invented by Chuck Hull - In the National Inventors Hall of Fame [online]. 3DR HOLDINGS, Copyright © 2023 [cit. 2022-7-1].. Dostupné z: <https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>
- [10] *Náš příběh* [online]. Prusa Research a.s.Dostupné, © 2023. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/nas-pribeh_875/
- [11] *Na bydlení to zatím není. Česká 3D tiskárna budov má své první výsledky* [online]. KONSTRUKCE Media, s.r.o., © 2023. [cit. 2022-7-1]... Dostupné z:<https://konstrukce.cz/materialy-a-technologie/na-bydleni-to-zatim-neni-ceska-3d-tiskarna-budov-ma-sve-prvni-vysledky-1112>
- [12] Guide to the Metal Additive Manufacturing Process From Start to Finish [online]. Alpha Precision Group, © 2023. [cit. 2022-7-1].. Dostupné z: <https://www.alphaprecisionpm.com/blog/metal-additive-manufacturing-guide>
- [13] ARMSTRONG, Mark, Hamid MEHRABI a Nida NAVEED. *An overview of modern metal additive manufacturing technology. Elsevier* [online] December 2022, 84, pp. 1001-1029 [cit. 2022-8-11].ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060
- [14] *The seven categories of additive manufacturing technologies* [online]. Altair Engineering Inc, © 2023. [cit. 2022-8-11].]. Dostupné z: <https://gen3d.com/news-and-articles/the-seven-categories-of-am-processes/>
- [15] *Understanding the Seven Types of Additive Manufacturing* [online]. Firetrace International, © 2023. [cit. 2022-8-11].Dostupné z: <https://www.firetrace.com/fire-protection-blog/additive-manufacturing>
- [16] *The 7 Categories of Additive Manufacturing* [online]. Loughborough University, © 2023[cit. 2022-8-11].Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- [17] RAHMATI, S. Direct Rapid Tooling. *Comprehensive Materials Processing. Elsevier* [online] April 2014, 10, pp 303-344. [cit. 2022-8-11].. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01013-X>
- [18] 3D PRINTING - ADDITIVE [online]. Dassault Systèmes ,© 2023 [cit. 2022-8-11].. Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing>

- [19] Direct Metal Laser Sintering (DMLS) For 3D Printing Projects. [online]. Proto Labs ,© 2023 [cit. 2022-8-11]... Dostupné z: <https://www.protolabs.com/en-gb/services/3d-printing/direct-metal-laser-sintering/>
<https://www.protolabs.com/en-gb/services/3d-printing/direct-metal-laser-sintering/>
- [20] ADITIVNÍ TECHNOLOGIE- Souhrnný katalog [online]. Misan s.r.o, ©2023 [cit. 2016-10-18]. Dostupné z: https://www.misan.cz/download/concept-laser/Souhrnny_katalog_AdiTech.pdf
- [21] *The Complete Guide to Electron Beam Melting (EBM)*. [online]. 3Dnatives © 2023 [cit. 16.02.2023]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/>
- [22] *What is Electron Beam Melting (EBM)?* [online]. Copyright ©2023 Markforged. All rights reserved. [cit. 16.02.2023]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-electron-beam-melting-ebm>
- [23] AM 101: NanoParticle Jetting (NPJ) [online]. Gardner Business Media, Inc.,© 2023 [cit. 16.02.2023].
Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/am-101-nanoparticle-jetting-npj>
- [24] A Closer Look at Bound Metal Deposition™ [online]. Proto3000, © 2023 [cit.16.02.2023]. Dostupné z: <https://proto3000.com/3d-printing/metal-3d-printing/deep-dive-bound-metal-deposition/>
- [25] *Deep Dive: Bound Metal Deposition (BMD)* [online]. Desktop Metal, © 2022, Inc. [cit. 16.02.2023]. Dostupné z: <https://www.desktopmetal.com/resources/deep-dive-bmd>
- [26] *10 Important Developments in Additive Manufacturing Seen at Formnext 2022* [online] Gardner Business Media ,© 2023, [cit. 16.02.2023]. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/10-important-developments-in-additive-manufacturing-seen-at-formnext-2022-includes-video>
- [27] 3D Printing Industry Review of the Year: November [online]. 3D Print Industry, © 2017 [cit. 16.02.2023]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-industry-review-of-the-year-november-2022-219121/>

- [28] Armco 17-4 PH Stainless Steel [online]. AK Steel International B.V t, ©2023
[16.02.2023] Dostupné z:https://www.aksteel.nl/files/downloads/172888_armco_17-4_ph_pdb_euro_final_secured_89.pdf
- [29] Desktop Metal Studio System. [online] Desktop Metal, Inc., © 2019. [cit.] Dostupné z:
https://www.teximp.com/db_data/pag/services_documents/lib/Desktop%20Metal%20Studio%20System.pdf
- [30] Desktop Metal. Define the future. Make it real. | [online].Desktop Metal 2023
[cit. 16.02.2023]. Dostupné z: <https://www.desktopmetal.com/uploads/BMD1-SPC-MDS-174PH-210405.pdfh>
- [31] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [32] Zkouška tahem.[online]. MATCA Copyright, © 2023 [cit. 16.02.2023]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/zkouska-tahem/>
- [33] DIN 50125. Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben. Berlín: Deutsches Institut für Normung E.V. (DIN), 2016, 22s.
- [34] ASTM E8 / E8M – 21. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2021, 17s.
- [35] ČSN EN ISO 6892-1. Kovové materiály – Zkoušení tahem: Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2021.
- [36] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01507-6.,
- [37] ČSN ISO 148-1: Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2017.
- [38] DSC jako nástroj pro ověřování kvality plastů [online]. Copyright MM Průmyslové spektrum © 2001 [cit. 16.02.2023]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dsc-jako-nastroj-pro-overovani-kvality-plastu>
- [39] Powder binder formulation and compound manufacture in metal injection molding (MIM). Handbook of Metal Injection Molding, [online].Dostupné z: <https://sci-hub.ru/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857090669500042>

13 Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Tiskárna SLA-1 [9]</i>	11
<i>Obr. 2 Prusa Mendel Iteration 2 [10]</i>	12
<i>Obr. 3 Jedna z prvních 3D tisknutých budov v Česku [11]</i>	15
<i>Obr. 4 Princip tisku technologií DMLS 1) laserová jednotka 2) laserový paprsek 3) systém zrcadel, 4) zaostřený a usměrněný paprsek, 5) stavební komora 6) vyráběný díl 7), nanášecí břit, 8) zásobník prášku, 9) písky, 10) přepadová komora [18]</i>	21
<i>Obr. 5 Princip tisku technologií BMD [13]</i>	24
<i>Obr. 6 Schematický obrázek vzniku a) pórů mezi vrstvami tisku b) vrubů a schodového efektu [13]</i>	25
<i>Obr. 8 Výrobní zařízení Concept Laser M2 Cusing [20]</i>	29
<i>Obr. 9 Zařízení Studio System od společnosti Desktop Metal [2]</i>	31
<i>Obr. 10 a) 45-stupňový vzorek pro zkoušku tahem s raftem a podporami, b) vertikální vzorek pro zkoušku tahem s raftem a podporami, c) vzorek pro zkoušku rázem v ohybu s raftem..</i>	33
<i>Obr. 11 Ukázka vytisknutých vertikálních vzorků - nesintrované</i>	34
<i>Obr. 12 Ukázka vytisknutých 45-stupňových vzorků - nesintrované</i>	35
<i>Obr. 13 Ukázka vytisknutých vzorků pro zkoušku rázem v ohybu – nesintrované</i>	35
<i>Obr. 14 Umístění vzorků pro zkoušku tahem na keramických destičkách v grafitových podnosech</i>	36

<i>Obr. 15 Umístění vzorků pro zkoušku rázem v ohybu na keramických destičkách v grafitových podnosech</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 16 Výsledek sintrování vertikálních vzorků pro zkoušku tahem</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 17 Ukázka sintrovaných 45-stupňových vzorků pro zkoušku tahem</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 18 Ukázka sintrovaných vzorků pro zkoušku rázem v ohybu</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 19 Pec pro tepelné zpracování</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 20 Princip snímání objektu v kuželovém svazku [6]</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 21 Umístění vzorků v tomografu</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 22 Vzorek pro zkoušku tahem S1 s největší porozitou (v řezu).....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 23 Vzorek pro zkoušku rázem v ohybu H7 s největší porozitou.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 24 Vzorek S1 - poloha tří největších defektů</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 25 Vzorek S5 – poloha tří největších defektů</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 26 Výkres použitých zkušebních těles pro zkoušku tahem dle DIN 50125 [9]</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 27 Výkres použitých zkušebních těles pro zkoušku tahem dle ASTM E8 [10].....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 28 Zkušební zařízení LabTest 5.100 SP1</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 29 Schématický obrázek zkoušky rázem v ohybu</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 30 Výkres použitých těles pro zkoušku rázem v ohybu dle ČSN ISO 148-1 [12]</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 31 Kyvadlové kladivo pro zkoušku rázem v ohybu</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 32 Lomová plocha vzorku H3 – DMLS</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 33 Lomová plocha vzorku V1 - DMLS</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 34 Lomová plocha vzorku H6 - BMD</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 35 Lisovací zařízení LECO MX400 (vlevo), metalografická bruska Tegramin 30 (uprostřed) a metalografická pila Struers Secotom 60 (vpravo)</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 36 DMLS vzorek T5 v příčném (nahore) a podélném směru (dole).....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 37 BMD vzorek S1 v příčném (nahore) a podélném směru (dole)</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 38 BMD vzorek H1 v příčném (nahore) a podélném směru (dole)</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 39 Univerzální tvrdoměr Emcotest M4C 075/750</i>	<i>66</i>

14 Seznam tabulek

Tab. 1 Parametry tisku	30
Tab. 2 Seznam tištěných vzorků technologií DMLS.....	30
Tab. 3 Studio System- technické parametry zařízení [2].....	31
Tab. 4 Seznam tištěných vzorků technologií BMD	32
Tab. 5 Mechanické vlastnosti materiálu 17-4 PH H900 udávané výrobcí [4], [5]	40
Tab. 6 Hodnota porezity a velikosti největších defektů jednotlivých vzorků	45
Tab. 7 Výsledky zkoušky tahem - DMLS	49
Tab. 8 Výsledky zkoušky tahem - BMD	49
Tab. 9 Hodnoty drsností vzorků pro zkoušku rázem v ohybu - DMLS.....	54
Tab. 10 Hodnoty drsností vzorků pro zkoušku rázem v ohybu - BMD	55
Tab. 11 Průměrné hodnoty drsností	55
Tab. 12 Výsledné hodnoty zkoušky rázem v ohybu - BMD	56
Tab. 13 Výsledné hodnoty zkoušky rázem v ohybu - DMLS.....	57
Tab. 14 Průměrné hodnoty KV a KCV.....	57
Tab. 15 Výsledné hodnoty tvrdosti	67

15 Seznam grafů

<i>Graf 1 Porovnání meze pevnosti 45-stupňových a vertikálních vzorků - DMLS</i>	50
<i>Graf 2 Porovnání meze pevnosti 45-stupňových vzorků – DMLS/BMD.....</i>	51
<i>Graf 3 Porovnání DSC křivek pro zkoumaný materiál, PP a PE</i>	68