



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

TESTOVÁNÍ DÍLŮ VYRÁBĚNÝCH TECHNOLOGIÍ BOUND METAL DEPOSITION

TESTING OF PARTS PRODUCED BY BOUND METAL DEPOSITION TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Antonín Hradil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Antonín Hradil
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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

Testování dílů vyráběných technologií Bound Metal Deposition

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pouze několik let stará technologie aditivní výroby kovových dílů Bound Metal Deposition vychází z technologie plastického vstřikování kovů (Metal Injection Molding), kde se díl vyrábí ze směsi práškového kovu, vosku a polymeru, následně po výrobě se vypláchne přítomný vosk a po sintrování zůstanou v dílu pouze spečené kovové částice. Tato technologie je u zařízení Desktop Metal propojena s technologií 3D tisku FDM a umožňuje tak výrobu dílů bez forem. U této technologie ještě nejsou dobře zmapované mechanické vlastnosti vyráběných dílů a aspekty, které je mohou ovlivňovat.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je posoudit vnitřní strukturu a mechanické vlastnosti dílů vyráběných technologií Bound Metal Deposition v závislosti na orientaci při jejich výrobě.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- identifikace stěžejních parametrů ovlivňujících výsledné vlastnosti dílů,
- volba materiálu, návrh vzorků pro výrobu a návrh experimentů,
- výroba vzorků a realizace experimentů,
- analýza získaných výsledků, jejich vyhodnocení a vyvození závěrů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

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

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

Seznam doporučené literatury:

BOSE, Animesh, Christopher A. SCHUH, Jay C. TOBIA, et al. Traditional and additive manufacturing of a new Tungsten heavy alloy alternative. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials [online]. 2018, 73(June 2018), 22-28 [cit. 2019-10-25]. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2018.01.019. ISSN 02634368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263436817307461>

FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance [online]. 2014, 23(6), 1917-1928 [cit. 2019-10-25]. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-014-0958-z>

GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HOTTER. Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Cincinnati: Hanser Publications, [2016]. ISBN 978-1-56990-582-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce na téma Testování dílů vyrobených technologií Bound Metal Deposition. Cílem textu je získat mechanické vlastnosti výrobků vytvořených strojem Studio System.

Cíle bylo dosaženo provedením tahové zkoušky a optické metalografie.

Výsledkem práce jsou mechanické vlastnosti tahové zkoušky tzn. mez pevnosti, mez kluzu, modul pružnosti, protažení vzorku. Druhým výsledkem jsou mikroskopické snímky mikrostruktur materiálu.

Díky této práci se nám přibližuje fungování technologie Bound Metal Deposition. Vědecky přibližujeme její mechanické vlastnosti a mikrostrukturu povrchu výrobků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Additivní technologie, 3D tisk, Bound Metal Deposition, tahová zkouška, optická metalografie

ABSTRACT

Bachelor thesis on the topic Testing of parts produced by Bound Metal Deposition technology.

Aim of the work is to obtain mechanical properties of products made by Studio System.

We have achieved this by performing tensile test and optical metallography. The results of this thesis are mechanical properties of the tensile test. R_e , R_m , E , ϵ etc. Another results are microscopic images of microstructure of material.

Thanks to this work, we are getting closer to the technology Bound Metal Deposition. We approximate scientifically its mechanical properties and the microstructure of the product surface.

KEYWORDS

Additive technology, 3D printing, Bound Metal Deposition, tensile test, optical metallography

..

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRADIL, Antonín. *Testování dílů vyrobených technologií Bound Metal Deposition*. Brno, 2021. Dostupné také na: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129517> . Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojního a průmyslového designu. Vedoucí Tomáš Koutecký.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří za mnou stáli při studování na VUT. Zejména rodičům, přátelům a všem učitelům za trpělivost. Zejména pak vedoucímu práce za podporu a organizaci projektu bakalářské práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Tomáš Koutecký Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	10
2.1	Aditivní technologie	10
2.1.1	Využití a budoucnost	10
2.1.2	Základní princip	11
2.1.3	Klady a zápory	12
2.1.4	Historie 3D tisku	14
2.1.5	Přehled nejpoužívanějších technologií	15
2.1.6	Materiály	20
2.2	Technologie Bound Metal Deposition (BMD)	21
2.2.1	Vývoj	21
2.2.2	Specifikace	24
2.2.3	Výhody	24
2.2.4	Využití	25
2.2.5	Konkurence	25
2.3	Zkoušky materiálu	27
2.3.1	Statické	27
2.3.2	Dynamické	30
2.4	Analýza pórů/inkluzí	30
2.4.1	Optická metalografie [33] [34] [35] [36]	31
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	34
3.1	Analýza problému	34
3.2	Cíl práce	34
4	MATERIÁL A METODY	35
4.1	Testovací vzorek	35
4.1.1	Vzorek pro tahovou zkoušku	38
4.1.2	Vzorek pro optickou metalografii	39
4.2	Tahová zkouška	40
4.3	Optická metalografie	40
5	VÝSLEDKY	41
5.1	Tahová zkouška	41
5.2	Optická metalografie	44

6	DISKUZE	52
6.1	Porovnání tahové zkoušky s konkurenční technologií	52
6.2	Porovnání struktur	54
6.3	Zhodnocení práce	55
7	ZÁVĚR	57
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	62
9.1	Příklady použitých fyzikálních veličin	62
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	64
11	SEZNAM TABULEK	66
12	SEZNAM PŘÍLOH	67

1 ÚVOD

V této práci se budeme věnovat nové technologii výrobě kovů, a to pomocí technologie Bound Metal Deposition na zařízení Studio System. Jedná se o jednu z nejdostupnějších a nejpokročilejších technologií 3D tisku na aktuálním trhu, fungující na principu plastického vstříkávání kovů. Vývojem se může pyšnit společnost Desktop Metal, která spolupracuje s firmou MCAE a má sídlo v Kuřimi. Jako jedna z mála světových společností vyrábí kancelářské zařízení Studio System+ a Studio System 2. Stroje jsou velmi skladné, neuvěřitelně přívětivé na ovládání a zcela bezpečné. Tato pokročilá technologie dosahuje svým výrobním procesem velmi kvalitních součástí, jenž se dají využít v širokém spektru průmyslových odvětví jako funkční prototypy.

V rešeršní části této práce budeme seznámeni s aditivními technologiemi a jejich rychle vzrůstající důležitostí v průmyslové praxi. Poté přiblížíme, jak fungují tiskařská zařízení Studio System.

V současné době Desktop Metal experimentuje s mnoha materiály. V této práci jsme pracovali s tiskařským materiálem AISi 4140, jenž dosahuje velmi vysokých kvalit. Cílem této bakalářské práce bylo zmapovat novou technologii Bound Metal Deposition, a to pomocí vytvoření vzorků k tahové zkoušce, která byla následně realizována na vyspělém trhacím zařízení. Tím jsme získali přehled o pevnostních charakteristikách dle normy a porovnali s konkurencí.

Jelikož se jedná o technologii 3D tisku, musíme brát v potaz jednu z jejích nedostatků – vnitřní póry. Dalším krokem z toho důvodu bylo vytvoření testovacích vzorků, na kterých byly provedeny zkoušky vnitřních mikrostruktur ve vzorku, využitím technologie optické metalografie.

Výsledky jednotlivých zkoušek byly následně sjednoceny a poté porovnány s původními testy společnosti MCAE. Nakonec bylo provedeno porovnání s konkurencí.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Aditivní technologie

Aditivní technologie je bezesporu jednou z nevíce průkopnických technologií poslední dekády. Tlak konkurenčního boje mezi výrobci strojních součástí se silně projevil na rozvoji mnoha technologií, díky tomu se tento způsob výroby posunul mílovým krokem. Nezůstala jen „sezonním“ hitem, a každým rokem se tato technologie výroby zdokonaluje. Společnosti přichází s novými možnostmi, jak 3D tisk využít v praxi, a to nejen v strojírenském odvětví průmyslu. Pokud navštívíme jakýkoliv technický veletrh nemůžeme si nevšimnout nespočtu expozic firem, které se snaží zapůsobit právě výsledky zdokonalených aditivních technologií. Tento fakt není náhodný a můžeme si z něj odnést představu, jak velký vliv a hodnotu aditivní technologii mají i přes to, že se neustále vyvíjí a svůj zenit mají velmi daleko. Bezesporu se jedná o výrobní metodu, jež se velkým dílem podílí na nově přichozí průmyslové revoluci.

Původ slova „aditivní“ pochází z anglického slova „additive“ do českého jazyka se překládá jako kumulativní, tedy v našem případě kupení materiálu postupným přidáváním. Jak napovídá název, princip této technologie spočívá v postupném vrstvení vybraného materiálu do požadovaného tvaru. Metod pro jeho výrobu existuje mnoho, ale všechny mají společný princip. Projekt vždy začíná vytvořením modelu v modelovacím programu (např. SolidWorks či Inventor), dále jeho rozporcováním ve sliceru a následné vytvoření strojového kódu, podle kterého součást vyrábí 3D tiskárna. Jedná se o velmi vyspělou technologii vyrábění složitých dílů v malé i střední výrobě. [1] [3]

2.1.1 Využití a budoucnost

Na počátku aditivních technologií se 3D tisk používal jen kvůli výrobě levných a rychlých **prototypů** před započítím hromadné výroby. S příchodem moderních technologií šla ovšem cena 3D tiskáren rychle dolů a začaly se využívat i na výrobu hotových výrobků na míru. Nejlepším příkladem je malosériová výroba, která by se jinak nevyplatila z důvodu nákladů na přípravu výrobního procesu. Dalším příkladem je jednoduchá možnost úpravy 3D modelů výrobků po zpětné vazbě zákazníka. [1]

Pro širokou veřejnost je největší výhodou personalizovaná výroba. Každý zákazník si může nechat vytisknout náhradní díly do domácnosti či k opravě starožitností. Běžně se můžeme setkat i s 3D tiskem modelu domů či staveb pro lepší představu problémů ve stavebnictví a architektuře.

Aditivní technologie se v praxi využívají čím dál častěji. Pokud se podíváme na statistiky posledních let z odborných zdrojů, dostaneme se k velmi zajímavým číslům. Z celkové průmyslové výroby se v roce 2019 aditivní technologie pohybovali okolo 1% procenta, avšak existují odvětví průmyslu, kde se tento podíl pohybuje okolo 15 %, těmi jsou například strojírenství, automobilový průmysl, letecký průmysl, spotřební zboží a nelze opomenout i medicínu. [1]

Při pohledu na statistiku se můžou tyto čísla zdát zanedbatelné, musíme ovšem brát v potaz fakt, že ještě v roce 2015 bylo použití aditivních technologií téměř na desetinu aktuálního. Pokud tento trend bude, s největší pravděpodobností, pokračovat, můžeme předpokládat, že za následující desítky let by celkové využití aditivních technologií mohlo tvořit i 50% celkové průmyslové produkce. [1]

2.1.2 Základní princip

Princip 3D tisku začíná vždy vytvořením požadovaného 3D modelu v modelovacím programu (např. CAD, Solidworks aj.) a následným převedením do formátu STL. Tento formát je označován za přechodový mezi modelem a tiskárnou. Volí se kvůli obecnému programu slicer. Dalším krokem je zadání parametrů do již zmíněného sliceru. Nyní si můžeme určovat kvalitu, teplotu, či rychlost a další parametry výroby, díky kterým můžeme optimalizovat požadovanou součást. [5] [7]

Po určení těchto podmínek slicer rozřeže model na pomyslné tenké vrstvy, naplánuje nejlepší trasu, a vytvoří připravený soubor formátu G-code. Tento soubor už je neměnný, z praktických důvodů se proto používá formát STL a konečný soubor si každý uživatel vytvoří dle používané tiskárny.

Po obdržení souboru tiskárna již dokáže samostatně nanášet jednotlivé vrstvy. V současné době se můžeme setkat s mnohými způsoby výroby aditivních technologií, které se od sebe liší provedením právě tohoto kroku. Velkou výhodou oproti ostatním technologiím výroby je bezesporu rychlost zahájení výroby, kdy není nutnost připravovat předvýrobní komponenty jako tomu je například u odlévání, postačí pouze doplnit zásobníky požadovaných polotovarů plastových, kovových či jiných. Během výroby součásti také provádíme namátkovou optickou kontrolu, která je u této technologie snadno přístupná.

Za poslední krok výroby označujeme postprocessing. Jedná se o vyjmutí součásti z tiskárny, očištění od přebytečných částic, a nakonec dokončovací operace dle vybrané metody a předvýrobních požadavků. Po dokončení postprocessingu získáváme hotovou součást. [5] [7]

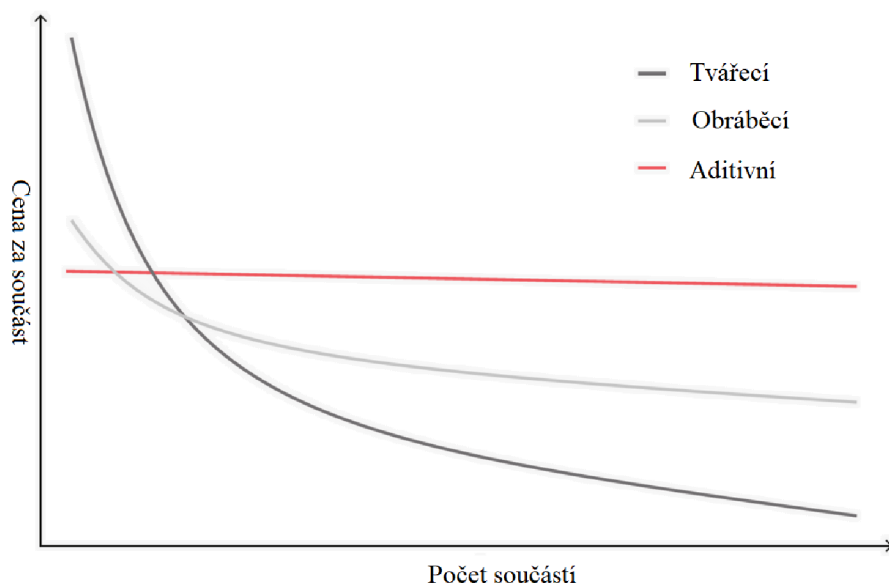


Obr. 2-1 Obrázek procesu výroby aditivních technologií [28]

2.1.3 Klady a zápory

Když se podíváme na jakoukoliv výrobní technologii, vždy se dostaneme k otázce ceny. Právě ta je nejdůležitějším faktorem moderního světa. Při pohledu na aditivní technologie zjistíme, že největším problémem aditivních technologií jsou právě pořizovací náklady 3D tiskáren.

Na druhou stranu však musíme uvést náklady provozní, které se samozřejmě mění dle použité metody aditivních technologií a množství součástí, ale můžeme s jistotou tvrdit, že u většiny vyrobených dílů se úspora nákladů za materiál udává okolo 50 % oproti dílům vyrobených obráběcí technologií na CNC strojích. Důvodem je tisk komplexních tvarů, které bychom běžně vytvářeli obráběním polotovárů s velkým množstvím odpadu. Tímto způsobem šetříme peníze za množství materiálu, především v maloseriové výrobě. [18] [16]

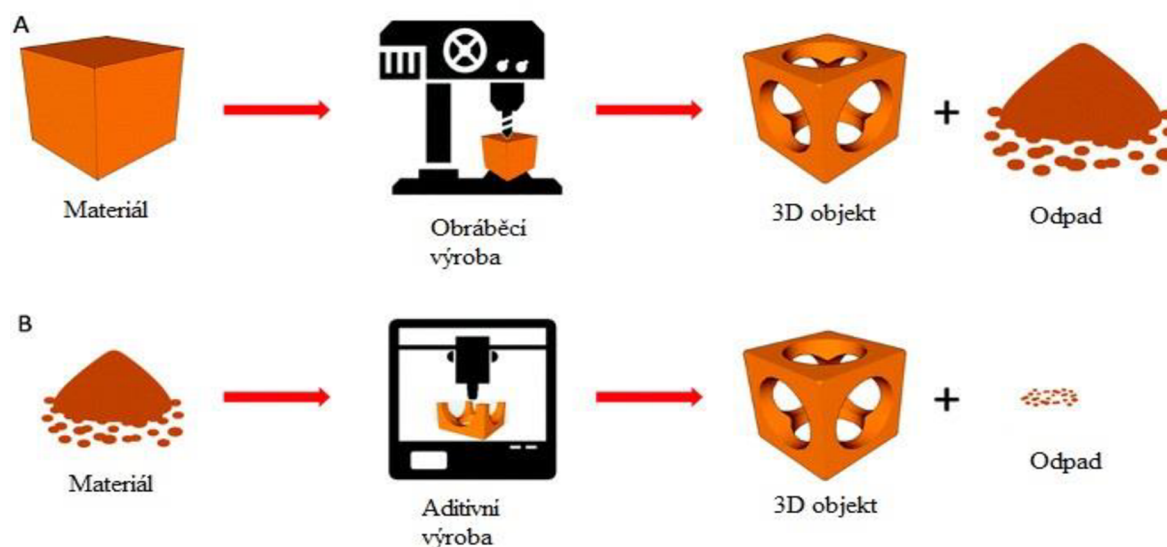


Obr. 2-2 Graf závislosti ceny výrobků na počtu vyrobených výrobků [19]

Na obr. 2-2 můžeme vidět jak se mění cena za součást v závislosti na počtu vyrobených dílů. Aditivní technologie mají konstatní provozní náklady, z toho důvodu jsou ideální do malosériové výroby.

Dalším kladným elementem je úspora času. Pokud porovnáme výrobu dílů v malosériových firmách vyrobených aditivní technologií a dílů vyrobených CNC obráběním, zjistíme že vytisknuté díly jsou v celkovém výrobním čase vyrobeny značně rychleji (firma DM udává i okolo 40%). V technické praxi znamená každá ušetřená vteřina peníze, obzvláště u větších firem. [15]

Jedním z nejdůležitějších faktů jsou mechanické vlastnosti, a to především hmotnost. Pomocí této technologie jsme schopni vytvořit velice komplikované součásti, které ostatními technologiemi není možné, minimálně ne jako celek. Oproti ostatním výrobním metodám aditivní technologie také dokáží ve výrobě značně ušetřit odpadní materiál, což je velmi vyhledávaným jevem nejenom v automobilovém a leteckém průmyslu, navíc je výroba s minimem odpadu, ekologičtější a u některých metod i přesnější. [20]



Obr. 2-3 Využití materiálu při 3D tisku oproti CNC stroji [20]

V neposlední řadě mezi velice důležité vlastnosti patří mobilita, nebo také výrobní kompatibilita. V praxi by tedy export motoru auta mohl být jen exportem dat do další výrobní haly. Tento fakt je navíc velmi diskutovaný ve spojení s automatizací výroby. Ta by způsobila postupné hromadné propouštění zaměstnanců, což je ovšem nevyhnutelný jev spojený s průmyslovou revolucí.

Mezi zápory musíme rozhodně zmínit využití v hromadné výrobě. Aditivní technologie nejsou v současné době schopny konkurovat velkosériové výrobě z časových i finančních důvodů, vítězí ovšem ve většině aspektů při výrobě kusové a malosériové.

2.1.4 Historie 3D tisku

Prvopočátky technologie 3D tisku se datují k přelomu osmdesátých a devadesátých let, kdy byla původně označována jako Rapid Prototyping. Název vycházel z funkce technologie, měla totiž za účel rychle a efektivně vytvářet prototypy na vyzkoušení ještě předtím, než se dostanou do sériové výroby. [2] [10] [12]

Roku 1986 se zapisuje Chuck Hull s prvním patentem pro aditivní zařízení pojmenované stereolitografický přístroj (SLA). Tato prvotní metoda využívala k vytváření objektů postupné vytvrzování polymerů, pomocí UV záření. Po relativně velkém úspěchu založil firmu Systems Corporation (nebo také 3D systems) zaměřující se na aditivní technologie, která funguje dodnes ve stejném odvětví průmyslu. Stereolitografie později využívala UV laser a tekutý fotopolymer. [2]

Hull dále pokračoval ve zdokonalování své metody a koncem osmdesátých let se znovu zapsal do historie se zařízením SLA-1. Jednalo se o první 3D tiskárnu, která se stala základem pro vývoj CNC strojů a 3D tiskáren jak je známe nyní. Označení jako 3D tiskárny se však objevilo a uchytilo až začátkem devadesátých let. [10]

Vedle Hulla se brzy postavil roku 1987 Carl Deckard, který vynalezl další technologii 3D tisku, spočívající ve změně sypkého prášku na pevnou látku pomocí laseru. Tím vzniká technologie Selective Laser Sintering (SLS). Na trhu se pro širokou veřejnost objevila až roku 2006. [10]

Dalším zlomovým okamžikem byl vznik technologie Fused Deposition Modeling (FDM) roku 1989 manželé Crumpovi. Tato dodnes používaná metoda využívá roztavení polymerového vlákna a nanáší ho po vrstvách do tvaru požadovaného 3D objektu. Později spojili své síly se společníky a založili společnost Stratasys. [10] [2]

Po úspěchu Hulla se v rychlém sledu objevilo mnoho dalších metod. Mezi nejznámější patří například Ballistic Particle Manufacturing (BPM) vyvinutá Williamem Mastersem. Dále Laminated Object Manufacturing (LOM) zapsaná Michaelem Feyginem, Solid Grounding Curing (SGC) patentovaná Itzhakem Pomerantzem, a trojrozměrný tisk (3DP) vytvořený Emanuelem Sachsem. Všichni vynálezci těchto technologií odehráli obrovskou roli v prvopočátcích aditivních technologií. [10] [12]

Kromě společnosti 3D systems vznikly další dodnes známe společnosti. Konkrétně roku 1996 firma Sanders Prototype, později přejmenovaná na Solidscape, a ZCorporation. [10]

Roku 1999 nabralo uplatnění 3D tisku nových rozměrů v oblasti medicíny, kdy se poprvé využili vytištěné orgány v chirurgii. Konkrétně jím byl močový měchýř, který byl pokrytý vlastními buňkami příjemce. Operace se zdařila a orgán se uchytil. [2] [10]

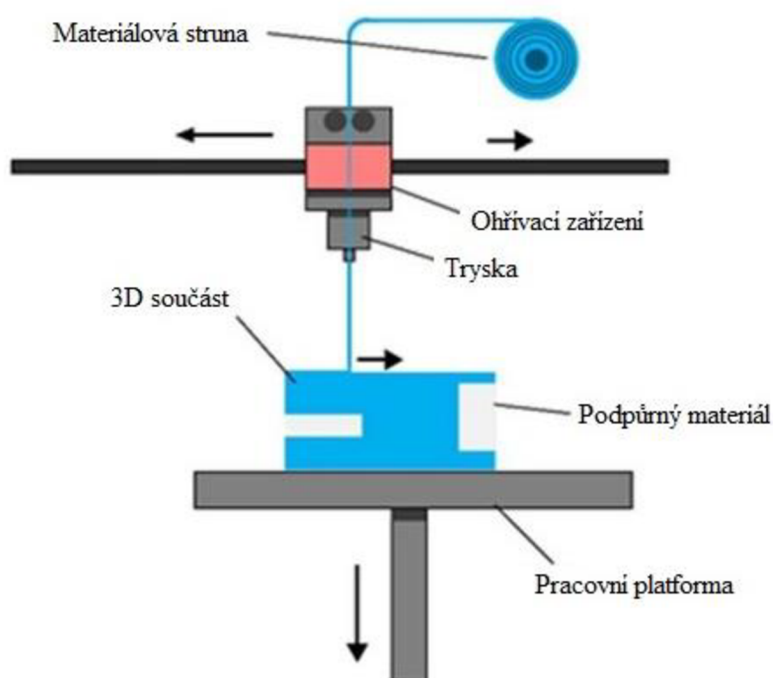
V dalších letech se aditivních technologie rozšiřovali do všech průmyslových odvětví. Důležitou změnu přineslo až dvacáté století, kdy se aditivní technologie začali používat i na přímé výrobní aplikace. Konkrétně Rapid Tooling (RT), Rapid Casting (RC) a Rapid Manufacturing (RM). [10] [12]

Možná největším zlomem v novodobé historii 3D tisku byl rok 2005, kdy byl založen projekt RepRap (replicating rapid prototyper) doktorem Adrianem Bowyerem. Projekt měl zpřístupnit 3D tisk široké veřejnosti licenci GNU (General Public Licence). Hlavní myšlenkou bylo zařízení, které může vyrobit svoje vlastní součástky. Po spuštění projekt rozšířil 3D tisk mezi fanoušky po celém světě a dodnes je nejrozšířenějším typem 3D tiskárny. [10]

V dalších letech se objevují první společnosti, které nabízí 3D tiskové služby, kde si lidé mohou vytisknout vlastní předměty a 3D tisk je celosvětově zpopularizován.

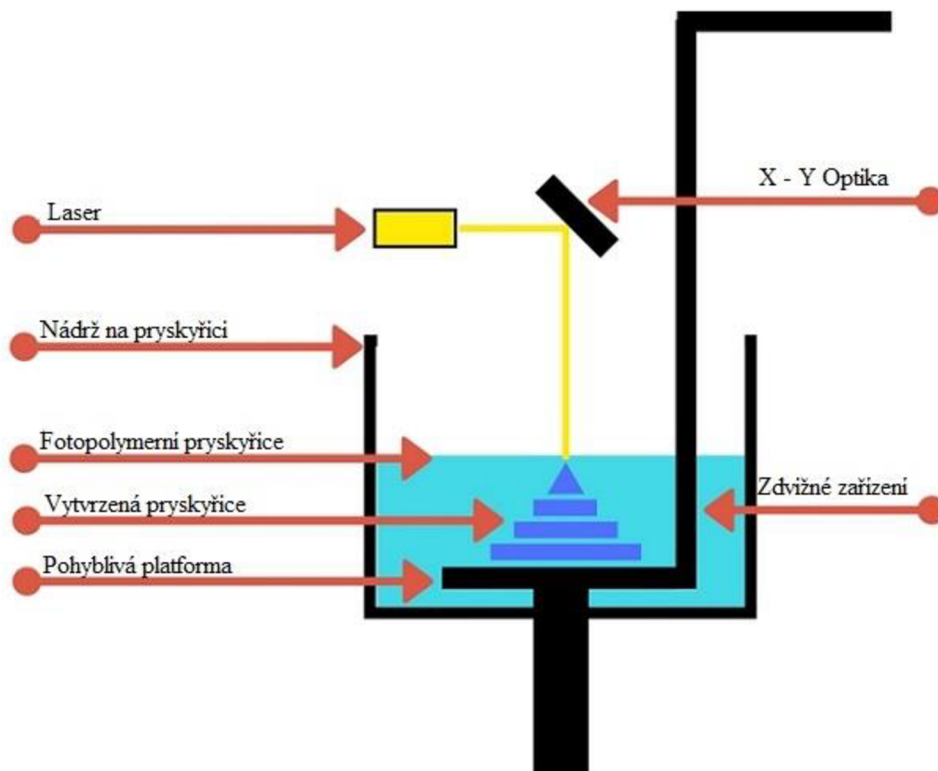
2.1.5 Přehled nepoužívanějších technologií

V současné době se můžeme nejčastěji s **technologií FDM či FFF**. Důvodem je nejvyšší cenová dostupnost na trhu, současně s univerzálním využitím jakožto u mezinárodních firem, tak i u menších soukromníků využívající 3D tisk pouze k osobnímu využití. Technologie spočívá v roztavení tiskové struny, která se následně po malých vrstvách nanáší do požadovaného tvaru. [21]



Obr. 2-4 Technologie 3D tisku FDM [21]

Jednou z nejstarších technologií 3D tisku je již zmíněná **SLA (Stereolitografie)**. Výroba součástí funguje na principu vytvrzování polymerů za působení záření, nejčastěji se užívá ultrafialové či lasery. Spojené struktury se dále nanáší po vrstvách do požadované podoby. Výhodou technologie je především rychlost výroby a přesnost. Nevýhodou jsou velmi vysoké pořizovací náklady, které ovšem v posledním desetiletí velmi výrazně klesli. [22]

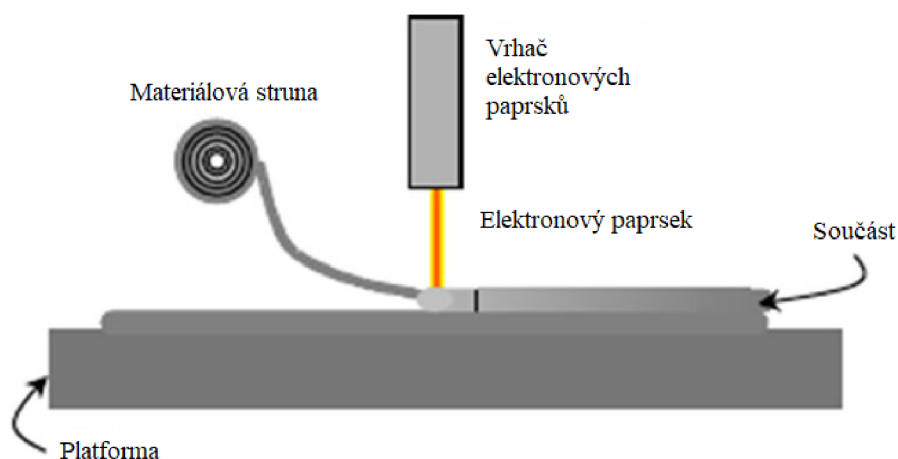


Obr. 2-5 Technologie 3D tisku SLA [22]

Technologie **DLP (Digital Light Processing)** vychází z SLA. Rozdílem je použití jiného zdroje světla než ultrafialového či laserů. Nejčastěji se můžeme setkat s tzv. DLP projektory, které jsou ovládány počítačem. Jedná se o levnější variantu SLA za cenu snížené rychlosti výroby. [22]

Další významnou technologií je bezesporu **EBF (Electron Beam Fabrication)**. Technologie byla vytvořena zaměstnanci NASA a představuje velký krok novým směrem 3D tisku. Při výrobě požadované součásti se využívá negativního nabití elektronů, které se vysílají paprskem, „sbírají“ pozitivně nabitě částice kovů, jenž se následně slučují a nanáší po vrstvách, podobně jako u technologie FDM. Výhodou technologie je velmi vysoká přesnost. Vytvořené součásti se často dále dokončují povrchovými úpravami pouze z estetických důvodů. Cílem NASA bylo vytvořit optimální technologii 3D tisku kovů, kterou lze bez větších komplikací využívat ve vesmíru. [23]

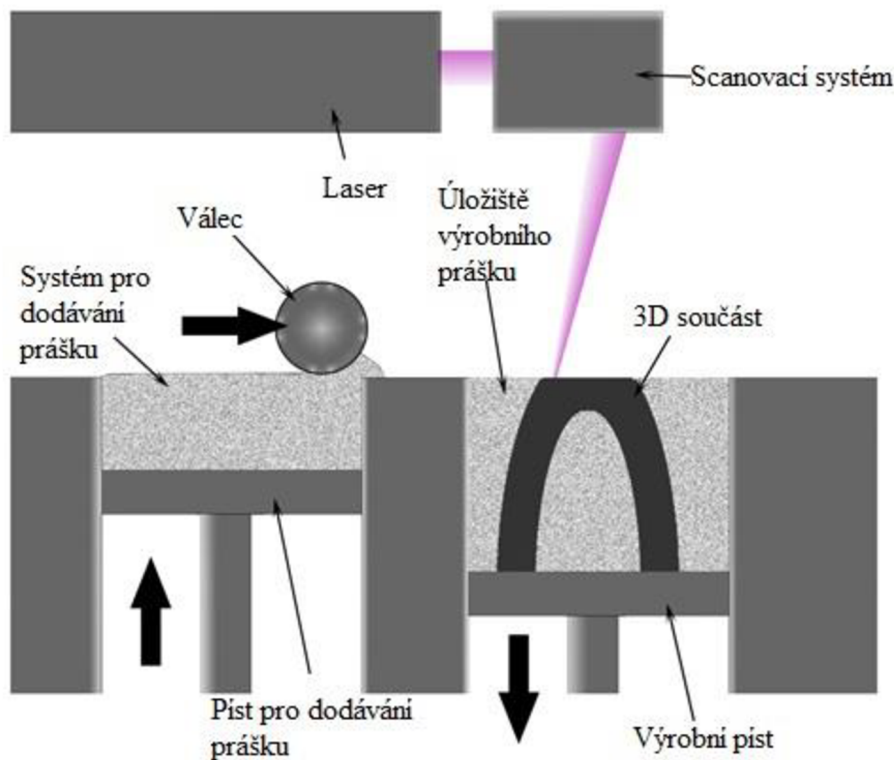
Vakuová komora



Obr. 2-6 Technologie 3D tisku EBF [23]

Technologie **EBM (Electron Beam Melting)** vychází z EBF, rozdílem je využití primárně slitin titanu v práškové podobě. Pro výrobu je klíčové vakuum, jelikož zabraňuje reakce roztaveného titanu se vzduchem. Výsledkem jsou extrémně pevné objekty z titanu, které teoreticky mají nulové množství vzduchových mezer, možných bodů napětí. Technologie je vytvořené společností **ARCAM** jako konkurence EBM technologie. V současné době se hojně rozšiřuje po celém světě a využívá se například ve vesmírných programech, či v medicíně. [23]

Mezi důležitou větev 3D tisku patří technologie **SLM (Selective Laser Melting)**. Ta využívá vstupní materiál ve formě kovového prášku, který se nanáší po vrstvách a poté se spéká pomocí laseru v určitých bodech. Běžně se můžeme setkat s uzavřenými komorami vyplněných dusíkem. Výsledný produkt nedosahuje kvalit jako u technologie EBM, ale výhodou je jednoduchá možnost výroby dutých otvorů, jelikož při výrobě nespečený materiál funguje jako pasivní opora. Tato vlastnost je ovšem i druhou stranou mince a způsobuje zdlouhavé čištění hotového výrobku. Další nevýhodou jsou velké výrobní náklady, možné problémy udržení vakua a pomalá rychlost výroby. [24] [25]

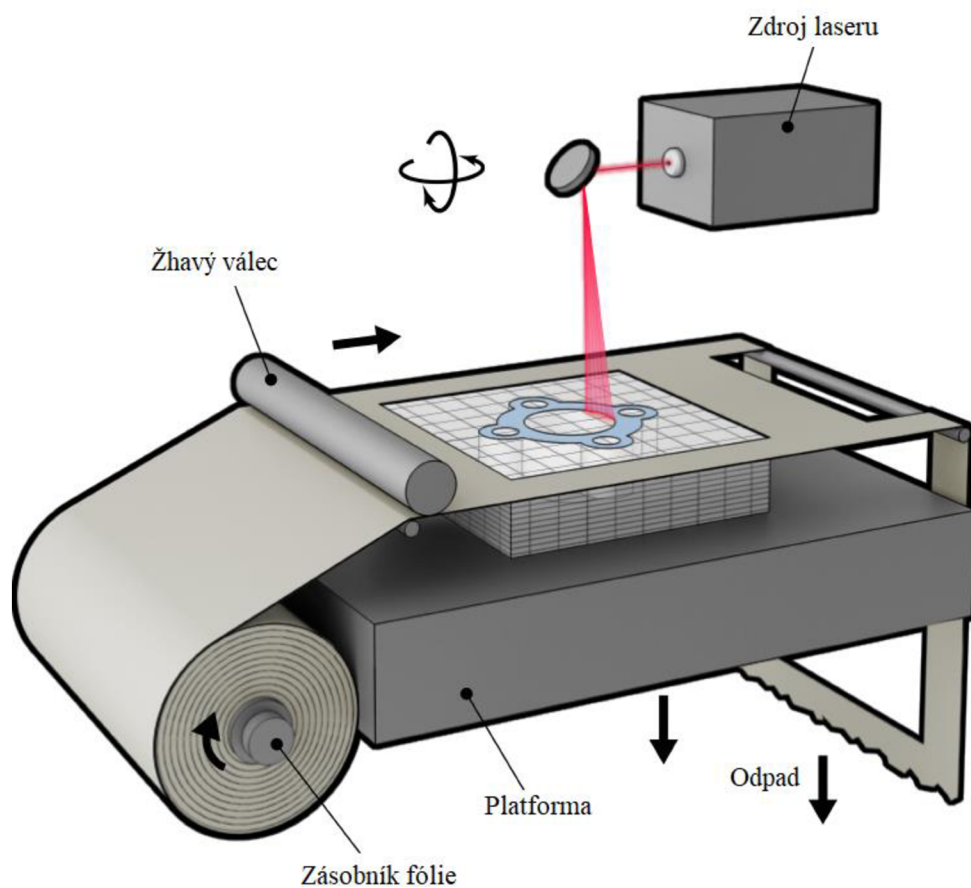


Obr. 2-7 Popis funkce technologie SLM [25]

Z technologie SLM dále vychází další metody 3D tisku. Mezi první patří **SLS (Selective Laser Sintering)**, která je v podstatě stejná technologie, jediným rozdílem je využití nekovových směsí, nejčastěji termoplastů. [24] [25]

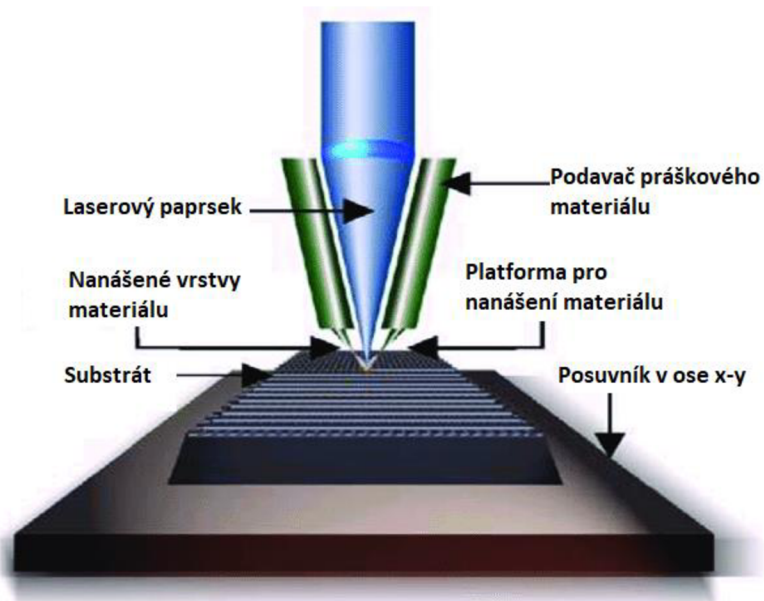
Další technologií vycházející z SLS je **SHS (Selective Heat Sintering)**. Tato metoda spočívá v zjednodušení původní a namísto spékání prášku laserem využívá jiné topné zařízení. Z toho důvodu jsou pořizovací náklady nižší a technologie SHS je hojně využívá k vytváření 3D demonstračních modelů. [24] [25]

V neposlední řadě stojí za zmínku technologie **LOM (Laminated Object Manufacturing)**. Při procesu výroby se na sebe vrstvy fólie, poté se vyřezávají laserem nebo nožem do požadovaných tvarů, a v poslední části se vrstvy spékají. Zajímavostí je oproti ostatním technologiím možnost využití např. laminátových látek a kancelářského papíru. Využití je především k výrobě modelů. [26] [27]



Obr. 2-8 Technologie LOM [26]

Další technologií, která stojí za zmínku je metoda LENS (Laser Engineered Net Shaping) známá také jako Direct Laser Deposition. Tato technologie funguje na principu laserového natavování kovového prášku dodávaného ze zásobníku okolo laserového paprsku. [44]



Obr. 2-9 Technologie LENS [43]

V praxi se dále můžeme setkat s řadou dalších technologií 3D tisku. Od doby vzniku první funkční metody se objevily desítky nových možností 3D tisku a stále počty rostou. S rozmachem reverzního inženýrství ovšem přichází problém kopírování těchto technologií, jelikož princip 3D tisku je v zásadě jednoduchý, a vcelku rychle po uvedení na trh se dá napodobit. Při prohledávání dostupně veřejných informací se tedy můžeme setkat se stovkami technologií, avšak většina z nich vychází z technologií popsanych výše.

2.1.6 Materiály

Aditivní technologie se rozvinuly ve 20. století na široké spektrum využití, tím donutily většinu společností konkurovat si nejen s typem technologie, ale i typem zvoleného materiálu. V současné době se k 3D tisku používají stovky různých směsí, které se mění v závislosti na zakázce, požadovaných mechanických a fyzikálních vlastnostech.

Každá technologie je však přizpůsobena na určitý typ materiálu. V zásadě můžeme rozlišovat tiskárny určené k tisku plastů, kovů a dalších materiálů (jako jsou například bio-inkoust, sklo, dřevo, vosk, beton, a další). Nejčastějším typem materiálu, se kterým se můžeme běžně setkat, jsou termoplasty.

2.2 Technologie Bound Metal Deposition (BMD)

Technologie Bound Metal Deposition je jednou z nejnovějších metod 3D tisku kovů. Jedná se o **Studio System+**, první kancelářské zařízení pro 3D tisk kovů na míru, jenž uvedla na trh firma **Desktop Metal** v roce 2018. Jedná se o snadno ovladatelné, přizpůsobitelné a bezpečné zařízení k vytváření 3D kovových dílů bez nutnosti speciálních pracovních prostorů. [18]



Obr. 2-10 3D tiskárna technologie BMD (vlevo tiskárna, vpravo sintrovací pec) [18]

Metoda vznikla vylepšením a spojením technologií MIM (Metal Injection Molding/plastické vstřikování kovů) a FDM (Fused Deposition Modeling). Dále si relativně nově vzniklou technologii představíme blíže. [18]

2.2.1 Vývoj

Technologie BDM vychází z metody Metal Injection Molding. Z toho důvodu si přiblížíme nejprve počáteční metodu MIM pro následné porovnání změn a pochopení, jak tato metoda funguje. [18]

2.2.1.1 Metal Injection Molding (MIM)

Metal Injection Molding (plastické vstřikování kovů) je moderní technologie 3D tisku drobných kovových součástí, doporučuje se hmotnost do 200 g. Předností této technologie jsou především přesné rozměry (udává se $\pm 0,3 \%$), vynikající kvalita povrchu, možnost volby různých materiálů (konstrukční ocel, nerezová ocel, měď, titan, wolfram, a další), a především poměrně nízké náklady na výrobu. Ideální pro malosériovou výrobu okolo 5000 dílů za rok. Velkou výhodou je výroba velmi komplikovaných součástí, které bychom ostatními metodami vyrobili jedině z více kusů. [14] [30]

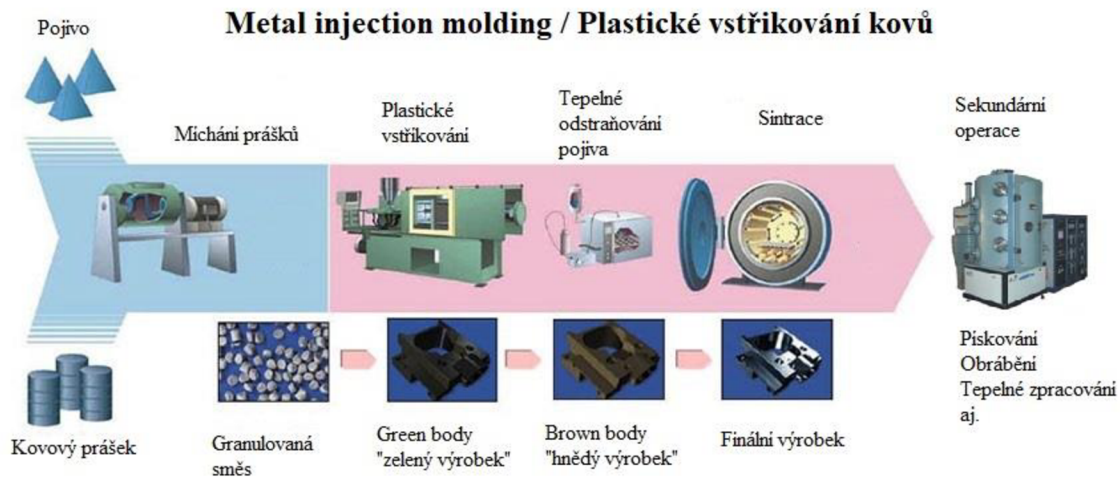
Technologie vychází z kombinace dvou nejběžněji používaných metod, a to z **technologie vstřikování termoplastů** spojené s **klasickou práškovou metalurgií**.

Klasická prášková metalurgie funguje na principu stlačování kovových prášků za vysokého tlaku do forem a poté jsou slinovány za vysokých teplot. Při slinování dochází ke spojení materiálu mřížkovou difúzí. [14] [30]

Oproti tomu u technologie MIM dochází ke vstřikování směsi jemného kovového prášku a pojiva na vstřikovacích lisech. Vstřikovací jednotka je rozehrátá na 150 – 200°C, při průchodu jednotkou směs plastifikuje působením teploty a tření. Následně je roztavená směs vstřikována do formy. Po ochlazení výrobku jej vyjmeme z formy a dostáváme tzv. **green body**. Pro zajištění funkce musí být celá tisková hlava chráněna povrchovou úpravou a pravidelně kontrolována na otěr, aby nedošlo k znečištění směsi během procesu. Používaná forma je temperována a musí se počítat se smrštěním konečného výrobku, dle použitého pojiva. [14] [30]

V dalším kroku je nutno odstranit pojivo. Odstraňovací metoda záleží na druhu použitého polymeru. Běžně se používají čtyři metody: tepelný rozklad, katalytický rozklad, rozpouštění pojiva a gelace s následným odpařením. Po této fázi je výrobek zbaven většiny pojiva a označujeme jej jako **brown body**. [14] [30]

Posledním krokem výroby je sintrace. Tím bývá označováno odstraňování všeho sekundárního pojiva, vzniku krčků mezi částicemi kovů a smrštěním vnitřních pór, které se objeví po odstranění pojiva. Jev sintrace (neboli spékání) se provádí v kontrolovaném prostředí. Nejčastěji v dusíku nebo vodíku za velmi vysokých teplot, které se blíží hranici bodu tání daného kovu. Sintrace je nejkritičtější bod výroby součástí metodou MIM, je velice důležité kontrolovat uložení výrobku v kontrolovaném prostředí. Pokud nenastane chyba získáváme hotový produkt velmi přesných rozměrů, a kvalitní povrch. Při kontrole se přísně hodnotí povrchové i podpovrchové vady, tvrdost a hustota. Hotový díl vyrobený metodou MIM by měl dosahovat stejných mechanických a fyzikálních vlastností jako díly vyrobené běžnými metodami. Výrobek lze dále tepelně zušlechťovat a povrchově zdokonalovat. [14] [30]



Obr. 2-11 Popis fungování technologie MIM [30]

Používaná směs obsahuje 80–90 % kovového prášku, zbytek tvoří pojivo. Běžně se tato sloučenina označuje jako feedstock. Kovový prášek vzniká atomizací kovu, kdy velikost částic kovu se pohybuje v rozmezí 5 až 20 μm . [14] [30]

Pojivo je tvořeno polymerem. Mezi nejběžnější typy patří polyethylenglykol (PEG), nutnost luhotvat ve vodě a termicky rozložit, a parafíny, které tvoří polyoxymethylen (POM). [14] [30]

Feedstock se poté granuluje a běžně se prodává jako připravený materiál vhodný pro přímé zpracování. Díky možnosti výběru kovového prášku se na trhu pohybuje široká škála připravených směsí. [14] [30]

2.2.1.2 Fused Deposition Modeling (FDM)

Technologie FDM používá jako materiál tiskovou strunu, ta prochází tiskovou hlavou, kde se částečně roztaví a materiál je nanášen vrstvou po vrstvě na podkladovou desku do požadovaných tvarů. Při komplikovanějších tvarech si tiskárna dokáže vypomoci tzv. podpůrnými strukturami. Technologie vyniká v rychlosti výroby a nízkých provozních nákladech. Vhodná je především na výrobky o rozměrech 1 až 40 cm. [21]

Struna má rozdílné mechanické vlastnosti dle použité směsi materiálů, nejpoužívanější jsou termoplasty. Společnosti udávají přesnost technologie cca 0,15 %. Jedná se o jednu z nejběžnějších metod výroby 3D součástí. Výhodou je vysoká přesnost s dobrými pevnostními charakteristikami a relativně rychlá výrobní doba. Nevýhodou je hrubý povrch hotové součásti, nutnost obrábět povrch součásti. [21]

2.2.2 Specifikace

Po pochopení metod MIM a FDM se nyní můžeme blíže podívat na novou technologii BMD. Oproti předchozí technologii, kde se využíval feedstock (směs kovového prášku a pojiva), využíváme jako výchozí materiál stmelené kovové pruty (kovový prášek stmelený voskem a polymerovými pojivy). Jeho složení je velmi podobné feedstocku, avšak namísto granulace vytváříme zmíněné pruty. [21] [30]

V prvním kroku získáváme znovu **green body**. Oproti technologii MIM ovšem nevstříkujeme roztavenou směs do formy, ale nanášíme pečlivě vrstvu po vrstvě kontrolovaným procesem stejně jako u technologie FDM.

Po dokončení prvního procesu nám vznikne surový výrobek, ze kterého je nutno odebrat pojivo. U Studia System+ se vytisknuté součásti umístí do pracího zařízení, ponoří ji do chemické lázně roztoku patentovaného společností BMD - **BMD-CD0004**. Součást je v lázni hermeticky uzavřena po požadovanou dobu. Poté se vytáhne a nechá vysušit. Tím získáváme **brown body**.

U novějšího Studia System 2 se uzavře díl z 3D tiskárny ihned položí do sintrační pece. Ta vysaje vzduch a nahradí ho Argonem. Poté se výrobek zahřeje do dostačující teploty, kdy se začne odstraňovat pojivo. Tato teplota záleží na typu pojiva, jeho množství, a také na použitém plynu.

Nyní je výrobek připraven na poslední dokončovací metodu **sintrování**. V této části probíhá vše obdobně jako u metody MIM. Položíme výrobek do kontrolovaného vakuovaného prostředí o teplotě blízké teplotě tání materiálu, a přítomnosti sintrovacího plynu. Tím dochází k odstranění sekundárního pojiva a díl se ztuhne v homogenní kovový celek. Během procesu se výrobek smrští, zatáhne póry vzniklé odstraněním pojiva a vzniká hotový díl.

V praxi se můžeme setkat se zařízením Studio System pro kancelářské využití od firmy Desktop Metal, které funguje jako kompaktní sada pro výrobu dílu metodou BDM. V první části se nachází 3D tiskárna, druhá obsahuje prací zařízení, a v poslední nalezneme Sintrovací pec. Jedná se o nové moderní multifunkční centrum 3D tisku kovů. Za poslední rok společnost vytvořila dokonalejší řešení a můžeme se již setkat pouze s 3D tiskárnou a sintrovací pecí. Nové zařízení již nevyžaduje prací zařízení a postačí teplé kontrolované prostředí pro odstranění primárního pojiva z „green body“. [18]

2.2.3 Výhody

Výhodou technologie BMD je oproti předchůdcům menší smrštění materiálu a vyšší hustota v poslední fázi sintrování, která má za důsledek největší výhodu této metody. Společnost uvádí možnost ušetření nákladů mezi 50 až 90 %, oproti vyráběním technologií CNC obráběním z plného kovového bloku. [18]

Důsledkem toho, že pruty nemusí být flexibilní a namotané na cívce, získáváme velkou výhodu prutů oproti struně. Zajišťuje nám možnost využití vyššího obsahu kovového prášku v prutech. Výměna materiálů zabere jen pár minut díky dobře přístupnému zásobníku, což urychluje možnost experimentů.

Další výhodou 3D tiskáren metodou BDM je volba tiskového rozlišení, dle požadovaných parametrů. Díky tomu můžeme vytvořit nefunkční prototyp v rapidním čase. Za zmínku také stojí možnost variabilní tloušťky stěn. Uživatel si může zvolit vnější i vnitřní tloušťku stěn spojených výplňovou mřížkou.

U této technologie se můžeme setkat s moderními jednokomorovými pracími zařízeními, které dokáží odstranit pojivo „za sucha“ (na počátku a na konci), a nevyžadují žádnou asistenci. Ke kontaktu s nebezpečnými rozpouštědly dochází pouze uvnitř zařízení. [18]

V neposlední řadě patří mezi výhody přizpůsobitelný software, kde po celou dobu pracujeme s digitálními soubory, které můžeme velmi jednoduše v průběhu výroby upravovat. Ukládání projektů nám dovoluje, abychom se k již vyrobeným dílům kdykoliv vrátili, a bez dalšího otálení objekty vytisknout znovu. [18]

2.2.4 Využití

Spektrum využití této technologie je totožné jako u metody MIM, avšak přináší jeho zdokonalení, především snížení nákladů. Ve strojírenství mezi důležité příklady využití můžeme zmínit například **funkční prototypování**. To nám v praxi dokáže rapidně zrychlit proces od návrhu k prototypu a následného uvedení na trh. Dalším vyzdvihovaným příkladem je výroba montážních přípravků a výrobních nástrojů, především velmi složitých dílů, jejichž výroba by jinou metodou trvala několikanásobně déle a za mnohem vyšší náklady. [18]

2.2.5 Konkurence

Žádná technologie není unikátní navěky. Na současném trhu se můžeme seznámit s dalšími 3D tiskárnami kovů fungujícími na stejném principu jako technologie BDM. Nejrozšířenější je technologie ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing). Výroba součástí zde funguje na stejném principu jako u BDM, tedy nejprve vytvořením 3D CAD modelu, převedení do formátu STL a připravením na tisk programem Eiger (funkce stejná jako u Sliceru). Při tisku se kovový prášek s dočasným pojivem vstříkne po vrstvách na platformu a tvaruje požadovanou součást. Následně se primární spojovací materiál omývá ve speciálním roztoku a součást pokračuje do sintrační pece v kontrolovaném prostředí. Zde dochází k odstranění sekundárního pojiva a vytvrzení materiálu. [31]



Obr. 2-12 Markforged Metal X (vlevo) vs Studio System 2 (vpravo) [31] [18]

MCAE poté vytvořil zdokonalenou verzi technologie BDM, a to Studio System 2. Zde není, oproti původní a ADAM technologii, nutné omývat součást ve speciální lázni pro odstranění primárního pojiva.

Tab. 2-1 Porovnání Markforged Metal X a Studio System 2 [31] [18]

	P o r o v n ě n ě c h a r a k t e r	
	Markforged Metal X	Studio system 2
Pořizovací cena	\$ 99 500	\$ 110 000
Rozlišení výtisku	50–200 μm	50 – 300 μm
Max. hmotnost výtisku	10 kg	6,5 kg
Tiskový objem	330 x 220 x 180 mm	300 x 200 x 200 mm

V tabulce 2.1 můžeme vidět několik důležitých charakteristik. První je samozřejmě cena. Obě metody se vyznačují přívětivou cenou jakožto kancelářské tiskárny, ovšem náklady za Markforged jsou téměř o 10 000 dolarů nižší, což není nepatrný rozdíl. Dále má vyšší dovolenou maximální hmotnost výtisku a o necelých 10 % větší tiskařský objem. Oproti tomu Studio System aktuálně nabízí kompaktnější 3D tiskárnu bez nutnosti jednotky s lázní.

Obě technologie mají mnoho dalších charakteristik, kterými se mohou pyšnit, například vyhřívanou podložkou na tisk součástí, kamerou uvnitř sintrační pece, bezpečnostními prvky a dalšími. [31]

2.3 Zkoušky materiálu

Zkoušení materiálu provádíme pro určení vlastností výrobku. Vyrobený díl musí vždy splňovat požadované hodnoty zadané výrobcem. Pokud je nesplňuje musíme změnit některý z jevů, jenž vlastnosti ovlivňuje, například materiál. V praxi nikdy nevyhodnocujeme vlastnosti jen z jedné zkoušky, ale několikanásobně opakovaným pokusem. V zásadě se testování materiálů rozdělit na tři části. Těmi jsou fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti. [11]

V této práci budeme testovat dle norem **mechanické vlastnosti** koncových výrobních dílů vytvořených technologií BMD. Tyto vlastnosti jsou úzce spojeny s technologií výroby a použitím. Mezi nejčastější typy namáhání materiálu patří tah, tlak, ohyb, stříh a krut. Při posuzování musíme brát v potaz kombinování těchto namáhání materiálu, a teplotu za které je materiál namáhán. Za účelem odolávání materiálu vůči těmto zatěžováním, je nutno mít určité hodnoty mechanických vlastností, mezi které řadíme pevnost, tvrdost, pružnost, tvárnost a další.

Pokud se blíže podíváme na typy namáhání, můžeme rozdělit testování mechanických vlastností na zkoušky statické, dynamické a technické. [11]

2.3.1 Statické

Podstatou provádění statických zkoušek je zatěžování daného zkušebního materiálu postupným, pomalým, zvyšováním zátěžné síly. Dle celkového času můžeme tyto zkoušky označit jako krátkodobé (v rámci minut), nebo dlouhodobé (dny až roky). [11]

U statického posuzování materiálu získáváme hodnoty **pevnosti** daného materiálu. Tuto vlastnost však dělíme dle druhu zatěžování na pevnost v tahu, tlaku, ohybu, stříhu a krutu.

Nejčastěji používanou zkouškou pevnosti je **zkouška tahem**. Provádíme ji téměř u všech materiálů, z důvodu získání nejzákladnějších hodnot potřebných k dalším výpočtům při vyhodnocování vlastností. Dle ČSN 42 0310 zjistíme normované podmínky pro testování, jako jsou tvar a rozměr. Zpravidla se používají zkušební tyče kruhové, které se mohou lišit tvarem úchytné hlavy, ten měníme dle vhodnosti pro zkoušený materiál a upínací zařízení na zkoušecím stroji. Délka tyče se poté odvíjí od průřezu. Před započnutím zkoušky je užitečné si vyznačit rysky po 1 cm, to nám později umožní přesně vypočítat poměrné prodloužení zkušební tyče. [11]

Při zkoušce dochází ve zkoušeném vzorku k vnitřnímu napětí, které je způsobeno působením vnějších sil. Hodnotu tohoto napětí vypočítáme jako podíl síly a plochy na kterou působí. Napětí rozdělujeme na normálové σ (**tah, tlak, ohyb**) a **tečné τ (smykové)**. U zkoušky tahem uvažujeme smluvní jmenovité napětí R, při kterém zanedbáváme změnu průřezu tyče a do výpočtu zapisujeme pouze počáteční průřez S_0 . [11]

Pevnost v tahu označujeme R_m a označuje smluvní hodnotu napětí, které získáme jako podíl nejvyšší zátěžové hodnoty a počátečního průřezu tyče S_0 .

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (\text{MPa})$$

Poměrné prodloužení se udává jako poměr změny délky tyče ku délce počáteční.

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (-)$$

Tažnost A je prosté vyjádření poměrného prodloužení v procentech.

$$A = \varepsilon * 100 \quad (\%)$$

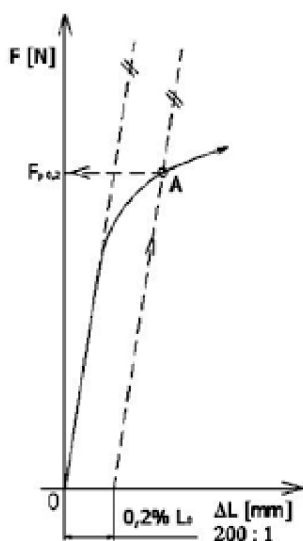
Kontrakce je analogií tažnosti, tentokrát nás však zajímá změna středního průřezu.

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} * 100 \quad (\%)$$

Pevnost v kluzu, také označována jako mez pevnosti v kluzu, je mezní hodnota napětí, při kterém dochází u zkušební tyče k výraznému prodloužení při nezvyšování zatěžující síly, naopak zátěžná síla v tomto procesu začne klesat. [11]

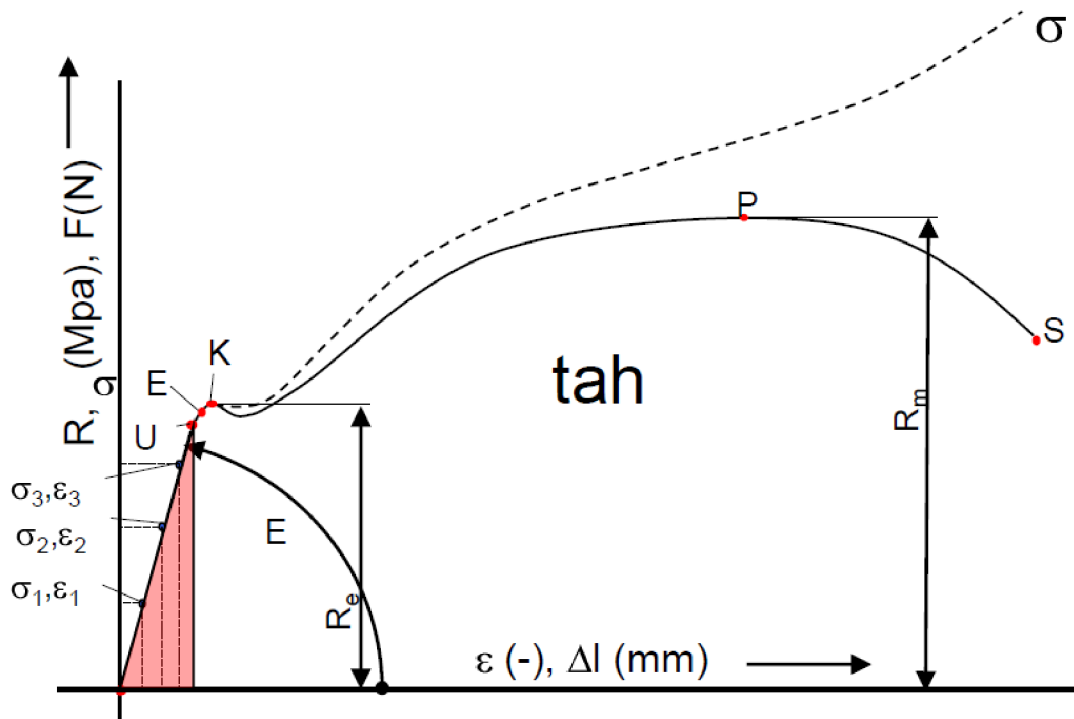
$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (\text{MPa})$$

V praxi se také velmi často setkáváme se **Smluvní mezí kluzu – $R_{p0,2}$** . Ta nám udává hodnotu napětí, při které vzorek dosáhne předepsané trvalé deformace v procentech, tzn 2%.



Obr. 2-13 Znárodnění smluvní meze kluzu

Zkoušecí zařízení je v současné době opatřeno zapisovacím zařízením, které nám průběh tahové zkoušky zapisuje elektronicky do řídicího systému, nebo v případě starších zařízení vykresluje proces na milimetrový papír. Po ukončení zkoušky tak získáváme pracovní diagram, který nám udává závislost poměrného prodloužení ε na napětí σ .



Obr. 2-14 Diagram tahové zkoušky [28]

Průběh zkoušky se zobrazuje jako diagram tahové zkoušky v závislosti zátěžného napětí na poměrném prodloužení. Využívá se k vyčtení získaných hodnot po provedení zkoušky. Na obrázku můžeme vidět dva průběhy. Smluvní je znázorněn plnou čarou a skutečný čárkovaně. V praxi vždy využíváme diagram smluvní, kde pracujeme s hodnotami napětí vztažených ku původnímu průřezu vzorku. Jednotlivé body digramu jsou pak tvořeny napětím ku původnímu průřezu a deformaci vztažené k přírůstku délky. [28]

Body U, E, K, P, S jsou nejdůležitějšími místy digramu.

σ_U - napětí na mezi úměrnosti

Napětí, do kterého zatěžování vzorku probíhá lineárně. Pohybujeme se v elastické charakteristice materiálu.

σ_E - napětí na mezi pružnosti

Po překročení napětí na mezi úměrnosti zatěžovací průběh přestává být konstantní. Stále se však pohybujeme v elastické oblasti. Pokud nepřekročíme bod E délka vzorku po odlehčení zůstane beze změny.

σ_K - napětí na mezi kluzu

Při dosažení tohoto napětí se objevují první stálé (plastické) deformace tělesa. Bez dalšího zatěžování se zvyšuje deformace vzorku. V praxi rozlišujeme mez kluzu výraznou a nevýraznou. U velmi křehkých materiálů se mez kluzu téměř neprojevuje. [28]

σ_p - napětí na mezi pevnosti

Dalším zatěžováním se vzorek rapidně začne deformovat a vytvoří krček. Postupným zvyšováním dosáhneme bodu P, po kterém se vzorek naposledy začne deformovat a praskne. Tento bod označujeme mez pevnosti v tahu.

Bod S nám udává místo, kdy dojde k prasknutí namáhané součásti. Součást se po překročení meze pevnosti rapidně začne prodlužovat, tím pádem napětí klesá a součást praskne. [28]

2.3.2 Dynamické

V technické praxi se téměř vždy a nejčastěji setkáme s různými druhy cyklického namáhání, tím označujeme jev při kterém na předmět působí určitý typ namáhání a jeho velikost se mění v čase. Podle rychlosti změny můžeme dynamické zatěžování rozdělit na dvě základní skupiny: Zkoušku rázem, kde se změna odehrává jednou a v rámci velmi malého okamžiku, a zkoušky cyklickým namáháním. [11]

2.4 Analýza pórů/inkluzí

Princip aditivních technologií nejčastěji spočívá v postupném nanášení tiskařského materiálu tiskovou hlavou, nebo spékáním prášku působením určitého druhu záření (laser, UV světlo, aj) na platformu. U technologie BMD se navíc setkáváme se sintrační pecí. Výrobek musíme v procentuální míře vyrobit větší, jelikož se vlivem teplotních nebo chemických scvrkne. Z logiky věci tedy musíme přemýšlet nad tím, jak probíhá ono smršťování a jestli uvnitř nemůžou zůstat nebezpečná místa ve kterých se shromažďují vzduchové bubliny, pojivo či další nežádoucí látky. Výrobci 3D tiskařských zařízení samozřejmě tento jev pilně studují od prvopočátku 3D tisku, pro vytvoření ideálních podmínek pro materiál, aby šance vytvoření pór bylo co nejnižší.

2.4.1 Optická metalografie

Tato metoda vyšetřování pór využívá ke zjišťování závad kovových součástí převážně mikroskop a lidské oko. Tento postup řadíme mezi destruktivní způsoby testování materiálu. Princip spočívá v pozorování předem připraveného vzorku pod mikroskopem. Vzorek však musí být náležitě upraven několika kroky před sledováním, v opačném případě bychom póry nikdy neobjevili. [33] [34] [35] [36]

V praxi se můžeme setkat se všemi druhy mikroskopů, nejběžnějším je mikroskop světelný neboli optický. Využívá se k zobrazení předmětů sotva viditelných běžným okem tzn. 0,2 mm až do 0,2 μm . Pokud chceme vidět menší předměty musíme si pořídit již speciální mikroskop, například elektronový, ten již nefunguje na principu lidského oka a dokáže rozlišit předměty až do 0,1 nm. Nutností je však použití vodivého materiálu. Přejdem mezi optickým a elektronovým jsou mikroskopy konfokální, které mají zhruba 10 ti násobně vyšší zobrazovací schopnosti oproti optickým. Dále existují velmi složité mikroskopy s možností vidět i menší části předmětů, ale jejich použití je vcelku nízké. [37]

V prvním kroku se vzorek odebírá destruktivně, nejčastěji řezáním či frézováním, pokud to není možné z důvodu těžce přístupných prostor, nebo z extrémně tvrdých materiálů, můžeme vzorek odebrat lámáním, rozbrušováním kombinovaném s chladicí kapalinou, nebo speciálními elektrickými rezačkami. Nejtěžším způsobem odebrání je preparace velmi malých vzorků, u kterých je nutno upravit následný postup. [36]

Důležité je přitom dbát na ochlazování odebírané plochy, jelikož bez ochlazování by teplo uvolněné třením mohlo nezvratně transformovat, v lepším případě, několik milimetrů zkoumané plochy. Tím bychom zničili testovací vzorek. Ihned po odebrání se doporučuje označit u vzorku směr který budeme testovat a jeho orientaci k původnímu objektu. [33] [34] [35] [36]

Velikost vzorku se volí dle uživatelných požadavků. Při použití běžných mikroskopů se volí co možná nejmenší vzorek. Nejčastěji mikroskopem zkoumáme jen menší oblasti, ale některé speciální mikroskopy nám dovolují využít i značně rozměrné vzorky. Důležité je brát v potaz také další plánované kroky. [33] [34] [35] [36]

Dalším důležitým rozhodnutím je místo odběru vzorku. Při testování vzorků vyrobených 3D technologií se zaměřujeme na oblast, kde je nejvyšší možnost hromadění materiálu. U tiskových hlav je tím místo, kde dochází ke zvedání hlavy z výrobního procesu. Například u dokončení jedné z tras. Běžně odebíráme z výrobků alespoň dva vzorky, málokdy se můžeme setkat s plně homogenním výrobkem. [33] [34] [35] [36]

Po získání vzorku následuje **zalévání za studena** s možností využití vakuové preparace. Princip zalévání za studena je položení vzorku zkoumanou stranou čelem ke dnu zalévací formy a následným zalitím hmotou. Formy se vyrábí z různých materiálů a všech velikostí. Nejčastěji se setkáváme s formou silikonovou a polypropylenovou, jelikož se dají použít opakovaně. Méně časté jsou formy na jedno použití, například sklo nebo fenol. Materiál formy se volí s ohledem na použitou zalévací směs. Jako směs se běžně volí pryskyřice smíchaná s tvrdidlem v určitém poměru. Samotných pryskyřic je několik druhů, proto je důležité vhodně vybrat, s tím nám nejčastěji pomáhá výrobce směsi a forem. [36]

Vakuum se využívá k odstranění vzduchu a tím k zajištění plného vstřebání hmoty, díky čemuž se ještě více zvýrazní póry a další nečistoty při pozorování. Pro nejlepší výsledek se může využít vakuové prostředí pod tlakem, kde směs tuhne. Samotné tuhnutí závisí na použitém materiálu. [33]

Další možností je **zalisování za tepla**. Tento krok funguje ve vložení vzorku do lisu, zasypáním pryskyřicí v práškové podobě a následným zahřátím mezi 100°C až 190°C a zatížením silou v rozmezí 30 – 50 KN. Výhodou je rychlost vytvoření přípravy, nevýhodou je nemožnost využít tuto možnost u vzorků, kde by teplota mohla změnit strukturu předmětu. Také je toho zařízení mnohem dražší. [36]

V dalším kroku můžeme začít **brousit** vzorek. Důvodem k broušení je odstranění ostrých hran a vytvoření ideálně hladkého vzorku, který je poté již možno pozorovat, ale můžeme pokračovat s dalšími úpravami pro zlepšení konečného výsledku. Broušení můžeme aplikovat ručně, poloautomaticky, či automaticky. V praxi se stále setkáváme se všemi postupy. Ruční spočívá v broušení vzorku několika brusnými papíry, a je nutno dodržovat postupy změny směru broušení po každé změně papíru. Automatické spočívá v uchycení vzorku a přitlačení brusného papíru, jenž je uchycen ve stroji a koná rotační pohyb. V obou případech je nutno vzorek omývat od malých částecek a ochlazovat. Při zanedbání je riziko vzniku Beilbyho vrstvy (deformačně zpevněná vrstva vzniklá z uvolněných brusných částic a vysoké teploty). K broušení využíváme doporučený papír od výrobce. Nejčastěji se setkáme s SiC a Al₂O₃ se zrnitostí od 60 do 2400 podle normy EPA. [36]

Dalším možným krokem je **leštění** vzorku. Princip je stejný jako u broušení, avšak dochází k minimální ztrátě materiálu. Místo brusného papíru využíváme samet, satén, flanel a další textilní materiály. Spolu s nimi lehká brusiva nejčastěji v tekutém stavu, např. Al₂O₃, nebo Cr₂O₃. Leštíme do zrcadlového lesku. Další možností je leštění elektrolytické. Průchodem elektrického proudu se vytváří na povrchu vzorku anodický film a zaplňuje mezery. [36]

Poslední možným krokem je **leptání** vzorku. Tento bod přípravy má za účel „vyvolat“ mikrostrukturu vzorku. Jedná se o nejsložitější krok při vytváření vzorků k pozorování. Existuje hned několik možných způsobů, a je důležité vybrat správný, jinak přijdeme o dosavadní postup. Základní rozdělení je na chemické leptání, elektrolytické a tepelné.

Chemické spočívá v nanesení leptadla, které zvýrazní reliéf rozleptáním jen některých vrstev. Dále se dělí na leptání **na hranici zrn** (využívají volné energie na hranici zrn k zobrazení a odlišení zrn), **plošné** (každé zrn se jinak rozleptá, dochází k barevnému odlišení) a **selektivní** (barevně od se zvýrazňují smíchané struktury například perlit tvořen feritem a cementem. [36]

Elektrolytické se využívá u vysoce odolných slitin, které běžným leptáním nepoškodíme. Funguje na principu rozpouštění vzorku v elektrolytu pomocí elektrického proudu. Princip zvýraznění zrn je ovšem stejný jako u leptání chemického.

Posledním typem je leptání **tepelné**. Principem je zahřát vzorek čímž vytvoříme oxidační vrstvu. Vrstva se liší podle charakteristik zrn, a tím zvýrazňuje jednotlivá zrna. Složitějším postupem je tepelné leptání ve vakuu. [36]

Posledním krokem je pozorování připraveného vzorku a jeho následné **vyhodnocení**. Vzorky můžeme hodnotit makroskopicky nebo mikroskopicky v leptaném nebo neleptaném stavu. Makroskopické zhodnocení spočívá v pohledu běžným okem, nebo při velmi malém zvětšení mikroskopu. Většinou využíváme pozorování mikroskopické. [36]

Při **hodnocení výbrusu v neleptaném stavu**, posuzujeme především nekovové částice, například oxidační póry a nechtěné vady. Na mikroskopu můžeme vidět tyto neduhy černou barvou. [36]

Oproti tomu u **hodnocení výbrusů v leptaném stavu**, můžeme vidět mikrostruktury kovových součástí, například hranice zrn. Používá se k detailnímu pohledu na vnitřní spojení dvou a více materiálů a jejich úpravy kterými prošli. [36]

V moderní době optická metalografie nekončí u pohledu do mikroskopu, ale zvětšené pohledy na struktury se přenáší běžně do počítače a můžeme je zpracovávat ve speciálních programech. Velmi užitečné je například automatické určení počtu částic, jejich poměrné zastoupení a rozložení. [33] [34] [35] [36]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Metoda Bound Metal Deposition je relativně novou metodou 3D tisku kovů. Vytisknuté předměty doposud nemají dostatečně otestované mechanické vlastnosti. Z toho důvodu budou provedeny testy.

Nedostatečně ověřené informace o mechanických vlastnostech by se mohly v praxi nevyhnutelně projevit, z toho důvodu je na místě provést statickou zkoušku materiálu a optickou analýzu pórů, která nám s naprostou určitostí vyhodnotí pevnostní charakteristiky a vnitřní strukturu.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je identifikovat stěžejní parametry, které definují výsledné mechanické vlastnosti dílů. Tento cíl se úzce pojí s předchozí rešeršní částí.

Dalším cílem práce je zmapovat nejdůležitější mechanické vlastnosti vyráběných dílů metodou BMT pomocí zkoušek v souladu s aktuálně platnými normami. Prvním krokem je výběr materiálu a vytvoření vzorků vhodných k testování mechanických vlastností. Poté provedeme experimenty.

Prvním experimentem je tahová zkouška. Která nám dá jasnou představu o pevnostních vlastnostech výrobků vytvořených zařízením Studio System od firmy MCAE.

Druhým experimentem pro analýzu pórů bude metoda optické analýzy.

Posledním krokem bude úvaha a analýza každé zkoušky a celkové zhodnocení technologie BMT. V diskuzi také rozebereme výsledky a možné pokračování.

4 MATERIÁL A METODY

Zařízení Studio System firmy MCAE aktuálně pracuje s 6 materiály. Nejčastěji využívaným je experimentální ocel **AISI 4140**. Jedná se o nízkolegovanou ocel s vysokou pevností a houževnatostí, která se v praxi běžně využívá v průmyslových odvětvích například k výrobě hřídelí. [18]

4.1 Testovací vzorek

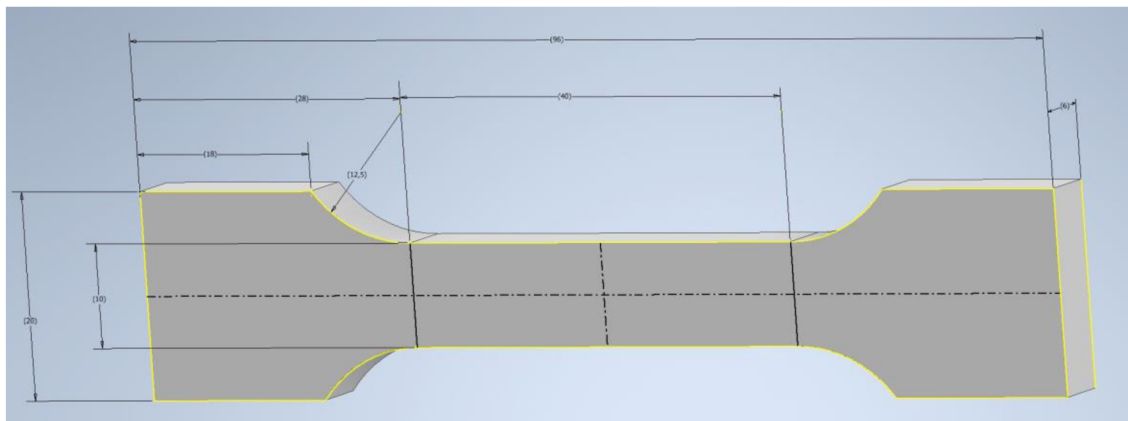
Po konzultaci s firmou Metal Desktop byla jako výchozí materiál pro zkoušky zvolena ocel AISI 4140.

Tab. 4-1 Složení vybraného materiálu [18]

S l o t e n ě	
AISI 4140	
Cr	0,8 - 1,2
Mo	0,2 – 0,3
C	0,3
Si	0,6 (max)
Mn	1,0 (max)
Fe	Balance

Následně bylo vytvořeno několik teoretických testovacích vzorků v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1. Po vytvoření návrhů byl vybrán optimální typ s ohledem na používanou technologii BMD a testovací zařízení pro zkoušku tahem. Z důvodu tisku 3D součásti nebylo optimální vybrat jako testovací vzorek pro tahovou zkoušku kruhový průřez. Z technologického hlediska je výroba drobných kruhových součástí problematická.

Druhou možností byl kvádrový polotovár, který je zároveň nejjednodušším tvarem pro výrobu tiskařského zařízení Studio System. Poté dle norem byl vybrán adekvátní vzorek s vhodnými rozměry (obr. 4-1). [38]



Obr. 4-1 3D model vzorku

Byl vybrán tento s těmito rozměrovými údaji:

- $a_0 = 6 \text{ mm}$ tloušťka
- $b_0 = 10 \text{ mm}$ výška
- $L_t = 96 \text{ mm}$ celková délka
- $L_c = 40 \text{ mm}$ délka střední části
- $R = 12,5 \text{ mm}$ poloměry zaoblení

Všechny vzorky vytvořil stroj Studio Systém společnosti MCAE. Při výběru testovacího vzorku bylo důležité zamyslet se nad tím, jak funguje tisková hlava technologie BMT. Ta koná přímočarý pohyb v přímkách, které mohou být rovnoběžné s celkovou délkou, nebo s ní být kolmé. Tento fakt jde jednoduše zvolit před započítím tisku a může značně ovlivnit mechanické vlastnosti hotové součásti.

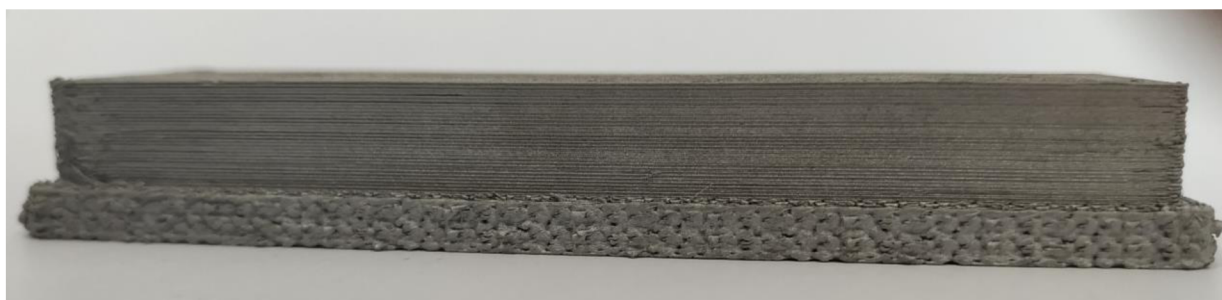
Po dřívějších zkušenostech firmy byl nakonec vybrán vzorek s obdélníkovými trasami nanášení materiálu, které můžeme pozorovat na obr. 4-2. Tato trasa by měla nejlépe fungovat a vytvářet nejvyšší, celkovou pevnost vzorku.

Výroba probíhala automatizovaně v zařízení Studio System. Nejprve se díl vytiskl ve 3D tiskárně. Poté byl vložen do držáku a vložen do chemické lázně odstraňující primární pojivo. Po vyjmutí jsme získali brown body a výrobek následně putoval do sintrovací pece. Zde probíhalo zahřátí ve vakuu při velmi vysokých teplotách a přítomnosti kontrolovaného plynu (primárně argonu). Tím došlo k odstranění sekundárního pojiva, zapečení prášku a získání kovové součásti. Poté byl již polotovár připraven k vyjmutí.

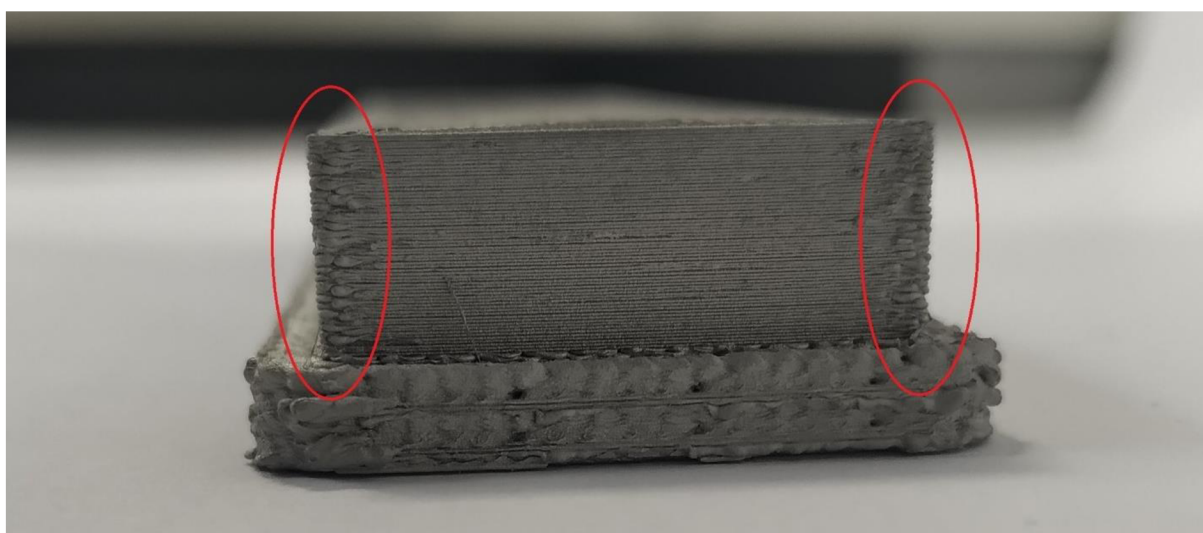


Obr. 4-2 Polotovar testovacího vzorku (pohled shora)

Místa začátku a konce (zvýrazněné na obr. 4-2) trasy tiskové hlavy budou důležitým místem při hodnocení výsledků, jelikož každé nekonstantní místo může teoreticky vytvářet póry a tím tedy i místa akumulující napětí.



Obr. 4-3 Polotovar testovacího vzorku (podélný pohled)

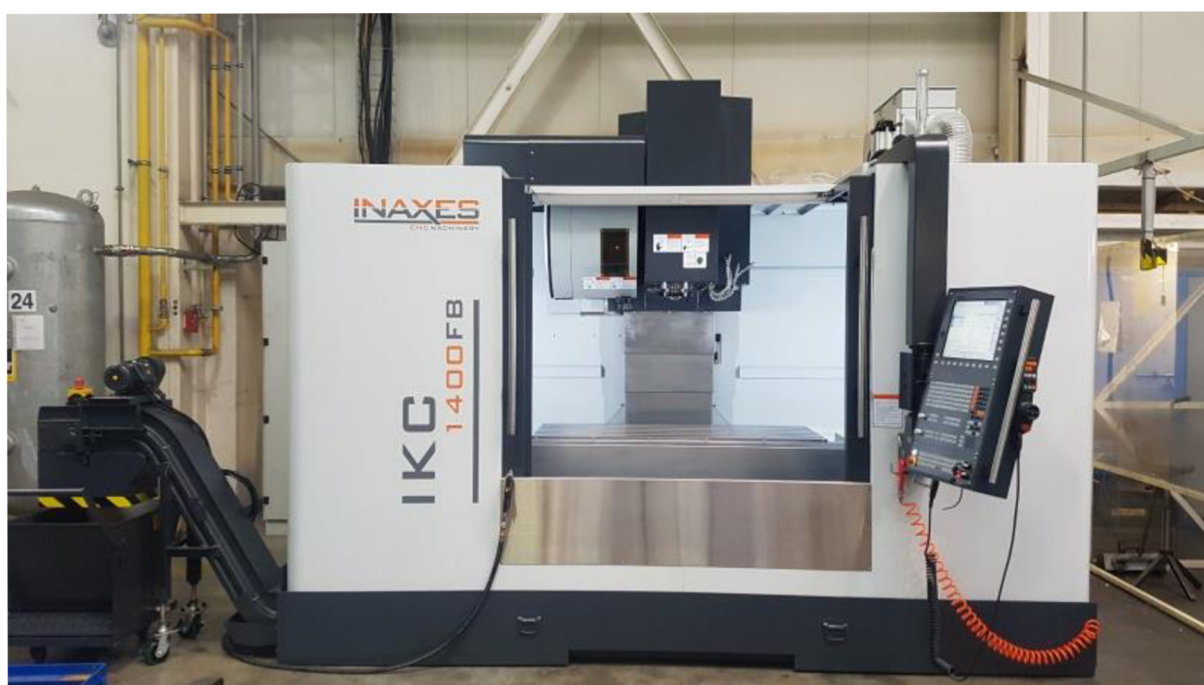


Obr. 4-4 Polotovar testovacího vzorku (pohled z boku)

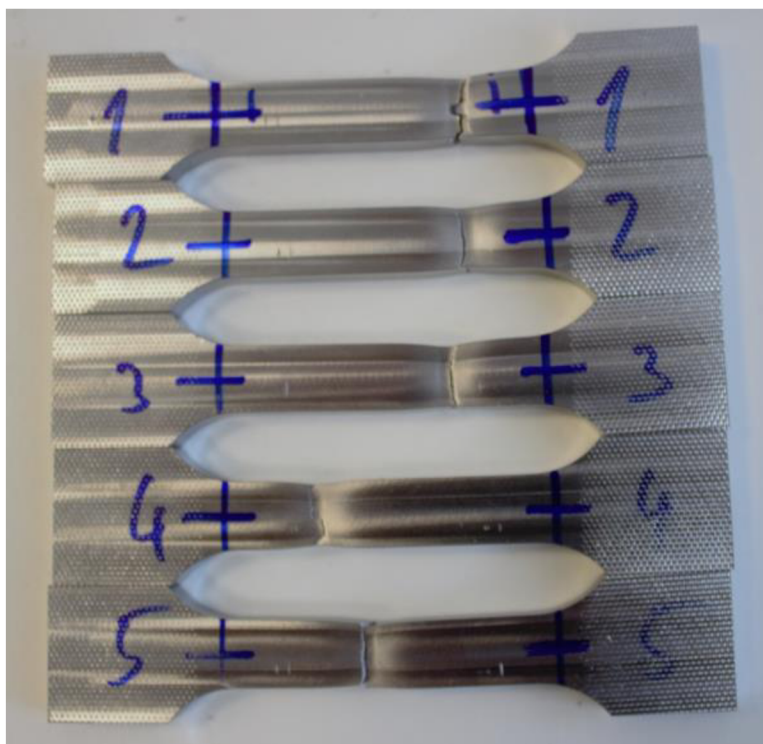
Na pohledech z boku a podélně (obr. 4.3 a obr. 4.4.) znovu vidíme linky tiskové hlavy a výrobní podstavu 3D tištěného výrobku. Nebezpečné by mohly být rohové oblasti vyznačené na obrázku, z důvodu kupení materiálu na okraji vzorku. V dalším kroku budou odstraněné obráběním na CNC stroji při vytváření konečného testovacího vzorku.

4.1.1 Vzorek pro tahovou zkoušku

Získaný polotovár byl poté předán do firmy Kovo Staněk na opracování do CNC stroje Inaxes ikc – 1400 FB. Obrábění proběhlo s kontrolovaným prostředím s přímým chlazením, které nám zajistilo teplotní stabilitu zabraňující fázovým změnám. Tímto způsobem jsme na míru obrobili všech 5 vzorků dle požadovaných rozměrů.



Obr. 4-5 Obráběcí CNC stroj na naše vzorky



Obr. 4-6 Vzorky po tahové zkoušce

4.1.2 Vzorek pro optickou metalografii

Jeden z polotovarů bylo rozhodnuto využít ke zkoušce optické metalografie. Ve firmě Kovo Staněk byl tedy jeden vzorek rozřezán na části. První vzorek byl vytvořen příčným řezem na okraji. V tomto řezu byly protnuty dvě místa změny směru nanášení vzorku, z toho důvodu bude očekávána právě zde největší pórovitost. Druhý vzorek byl odebrán uprostřed polotovaru pro reprezentaci homogenní části vzorku tvořené pouze podélnými stopami tiskové hlavy. Dále je těleso identické a nepředpokládali jsme další problémová místa.

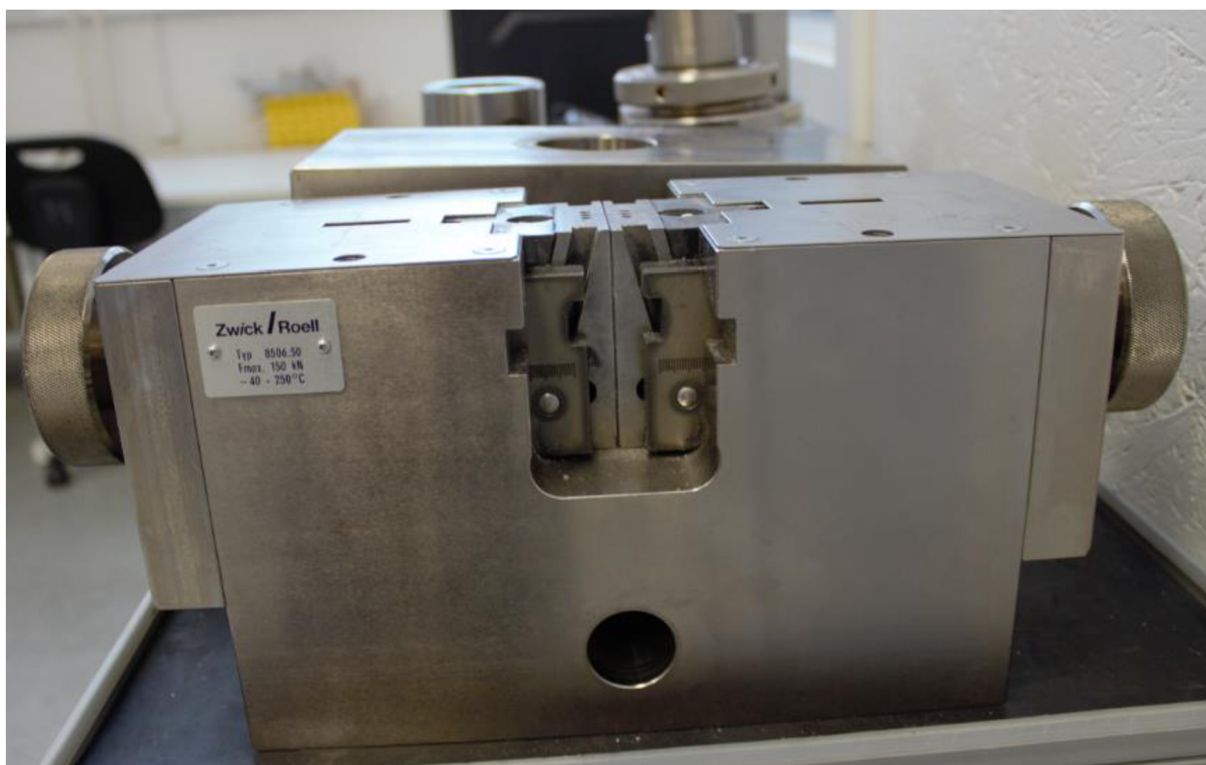


Obr. 4-7 Obrázek řezů vzorků

4.2 Tahová zkouška

Princip tahové zkoušky je popsán v kapitole 2.3.1. Zkouška byla poté provedena v laboratoři na VUT. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6892-1, kde se dozvídáme i přesný postup vyhodnocení mechanických vlastností na základě informací získaných z průběhu zkoušky. Důležitá byla však poslední úprava před testem. Vzorek byl upnut až v radiu, jak můžeme vidět podle otisku na obr. 4-6. Důvodem byla upínací hlava testovacího zařízení, která byla přizpůsobena na delší vzorky.

Zkoušku byla provedena na stroji Zwick/Roell Z250.



Obr. 4-8 upínací hlava

4.3 Optická metalografie

Pro praktické zhodnocení materiálu vyrobeného technologií BMD je nutné provést další zkoušku. Jelikož 3D tisk je založen na nanášení malých vrstev, je příhodné nahlédnout do jeho mikrostruktur, pro zjištění možných pór a prasklin uvnitř materiálu.

Zkouška byla provedena na VUT v laboratořích optické metalografie. K provedení bylo nutné připravit následující zařízení. Forma na prskyřici, souprava Technovit 2000 LC, mikroskop Keyence VHX-7000, zapékací zařízení Technotray Power a brousící zařízení QPOL A2-ECO.

5 VÝSLEDKY

5.1 Tahová zkouška

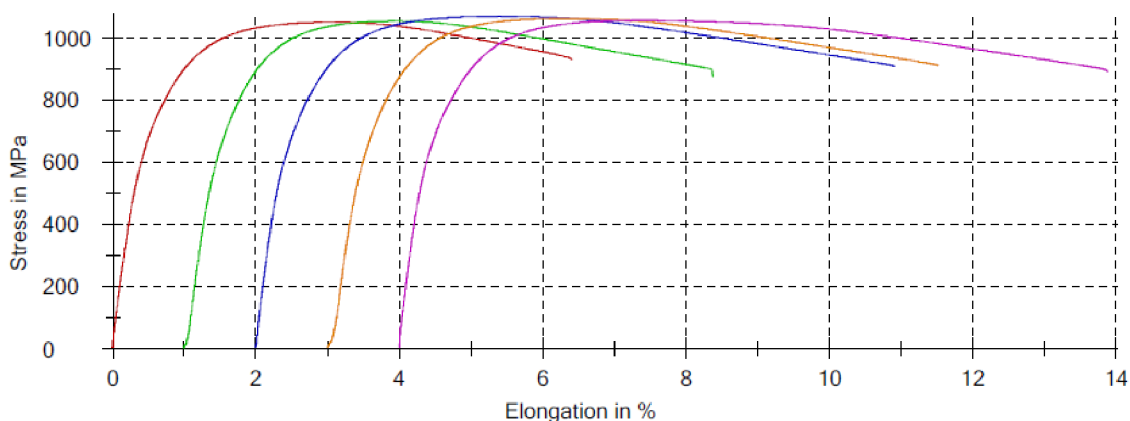
Vzorek byl upnut do svěřacích čelistí. Z důvodu relativně tvrdého materiálu AISi 4140 byly použity velmi masivní čelisti. Poté byl vzorek zatížen počáteční silou 2 MPa a začalo zatěžování. Dle normy stroj zatěžoval rychlostí 0,001 1/s. Průběh testu se ukládal pomocí zabudovaného měřicího zařízení přímo do počítače. Viz v příloze.



Obr. 5-1 Tahový stroj Zwick/Roell Z250.

Tahová zkouška poté probíhala učebnicově. Vzorek se začal natahovat elasticky, dokud nepřekročil hodnotu $R_{p0,2}$ poté se začaly projevovat trvalé deformace. Během zatěžovacího procesu se vzorek po překročení meze kluzu začal rapidně natahovat, jak můžeme vidět na obr. 4-6. Po překročení meze pevnosti R_m se vytvořil krček, který se po dalším namáhání rozšířil a vzorek praskl na hodnotě napětí R_b (break). Poté bylo ukončeno nahrávání zkoušky, odstraněn testovací vzorek a upnut další. Tento postup se opakoval celkem 5x.

Po provedení pokusů počítač poté vyhodnotil výsledky, vykreslil grafy a vytvořil tabulky a konečné statistiky jednotlivých pokusů.



Obr. 5-2 Graf tahové zkoušky všech vzorků

Tab. 5-1 Tabulka výsledků testů

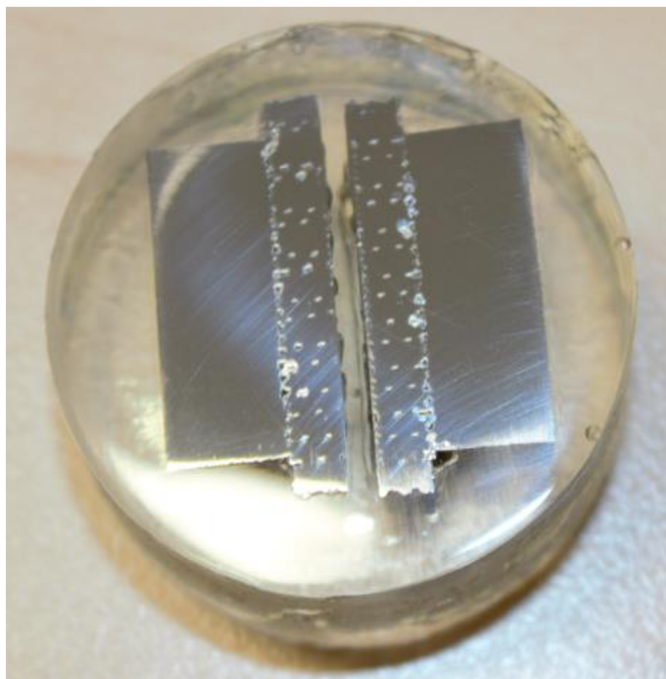
V ý s l e d k y t e s t ů										
	a_0 mm	b_0 mm	L_0 mm	E GPa	$R_{p0,2}$ MPa	F_m N	R_m MPa	R_b MPa	A_g %	A_{30} %
1	6,1	10,01	30	181,07	735,07	64145,27	1050,51	931,40	2,48	5,91
2	6,1	10,02	30	176,89	742,88	64437,75	1054,25	874,67	2,31	6,85
3	6,1	10,02	30	204,07	706,27	65343,34	1069,06	909,21	2,88	8,47
4	6,1	10,05	30	176,06	731,47	65115,59	1062,16	910,52	2,63	7,93
5	6,1	10,04	30	190,45	730,16	64698,22	1056,40	893,21	2,83	9,42

Tab. 5-2 Tabulka statistik zkoušky

	S t a t i s t i k a t e s t u									
	a₀ mm	b₀ mm	L₀ mm	E GPa	R_{p0.2} MPa	F_m N	R_m MPa	R_b MPa	A_g %	A₃₀ %
x	6,1	10,03	30	185,71	729,17	64748,03	1058,48	903,80	2,63	7,71
med	6,1	10,02	30	181,07	731,47	64698,22	1056,40	909,21	2,63	7,93
s	0	0,016	0	11,75	13,72	487,74	7,27	21,20	0,24	1,37

5.2 Optická metalografie

Prvním krokem bylo umístění vzorků do plastové formy vyšetřovanou stranou čelem ke dnu. Poté byla forma zalita z 80 % tekutou pryskyřicí soupravy Technovit 2000 LC a následně umístěna do vytvrzovacího zařízení Technotray Power na 20 min. Zařízení funguje na principu vytvrzování tekuté pryskyřice Technovit modrým světlem. Důvodem využití tohoto zařízení bylo rychlost výroby vzorku, nedosahuje ovšem takových kvalit jako lisování za tepla. Výhodou však je desetinová cena oproti zapékacímu lisu. Po 20 minutách byl vytažen vzorek a dolito zbylých 20% formy pryskyřičným lepidlem sady Technovit. Poté znovu zapékáme 10 minut. Důvodem druhé vrstvy je vytvoření pevnější struktury na spodní straně vzorku, praktičtější k upnutí i manuální práci.



Obr. 5-3 Zalité a vybroušené vzorky

Následně bylo provedeno broušení. Tato operace byla provedena na brousícím zařízení QPOL A2-ECO. Nejdříve byla očištěna platforma od nečistot. Poté byl na platformu nasazen brusný kotouč se zrnitostí 180 jednotek dle norem ETA a upevněn na platformu plastovým kotoučem. Papír byl z materiálu SiC. Nejdříve byla obroušena zhruba 1 mm okrajová část pryskyřice, aby se nedostala do vzorku během dalšího procesu. Poté byly nastaveny otáčky na 300 ot/min., stálý proud vody a ručně vzorek byl ručně přidržován proti brusnému papíru. Takto bylo setrváno do té doby, než byla vytvořena prvotní hladká vrstva na povrchu vzorků.

Postupně byly vystřídány v pořadí papíry se zrnitostí 180, 360, 600, 1000, 2400, 4000. Po každé výměně brusného papíru byl pootočen vzorek o 90° pro zajištění rovnoměrných otisků broušení. Po dokončení broušení papírem se zrnitostí 4000 bylo nakonec uznáno za možné uskutečnit pozorování mikroskopem.

Doba broušení byla u každého brusného papíru jiná. Prvotní vytvoření jednolité, rovnoměrné vrstvy dalo nejvíce práce, časově cca 75 minut. Důvodem tak dlouhé doby mohlo být použití již starého brusného papíru, který byl po určité době obměněn. Další papíry již šli mnohem rychleji v rámci 5-10 minut každý.

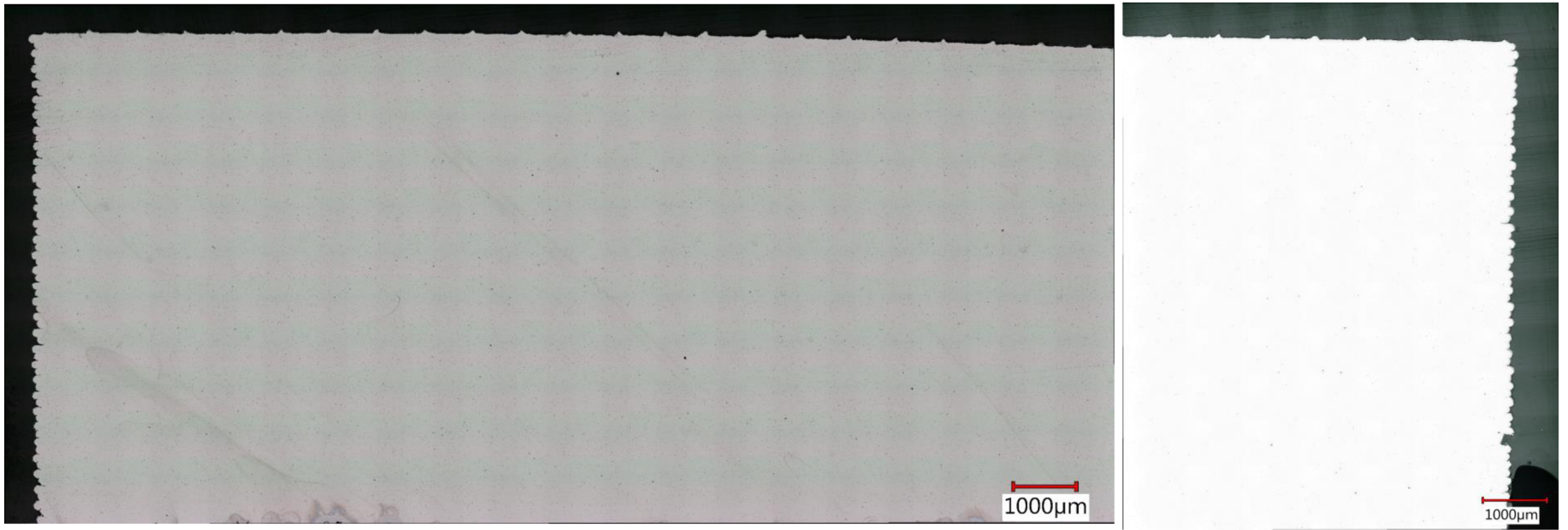
Dalším krokem bylo již pozorování pod mikroskopem. K tomu byl využit digitální mikroskop Keyence VHX-7000. Vzorek byl umístěn na platformu a zahájeno pozorování. Následně byly oba vzorky naskenovány a obdrženy požadované fotografie mikrostruktury.



Obr. 5-4 Mikroskop Keyence VHX-7000



Obr. 5-5 Originální mikrostruktura 1. vzorku

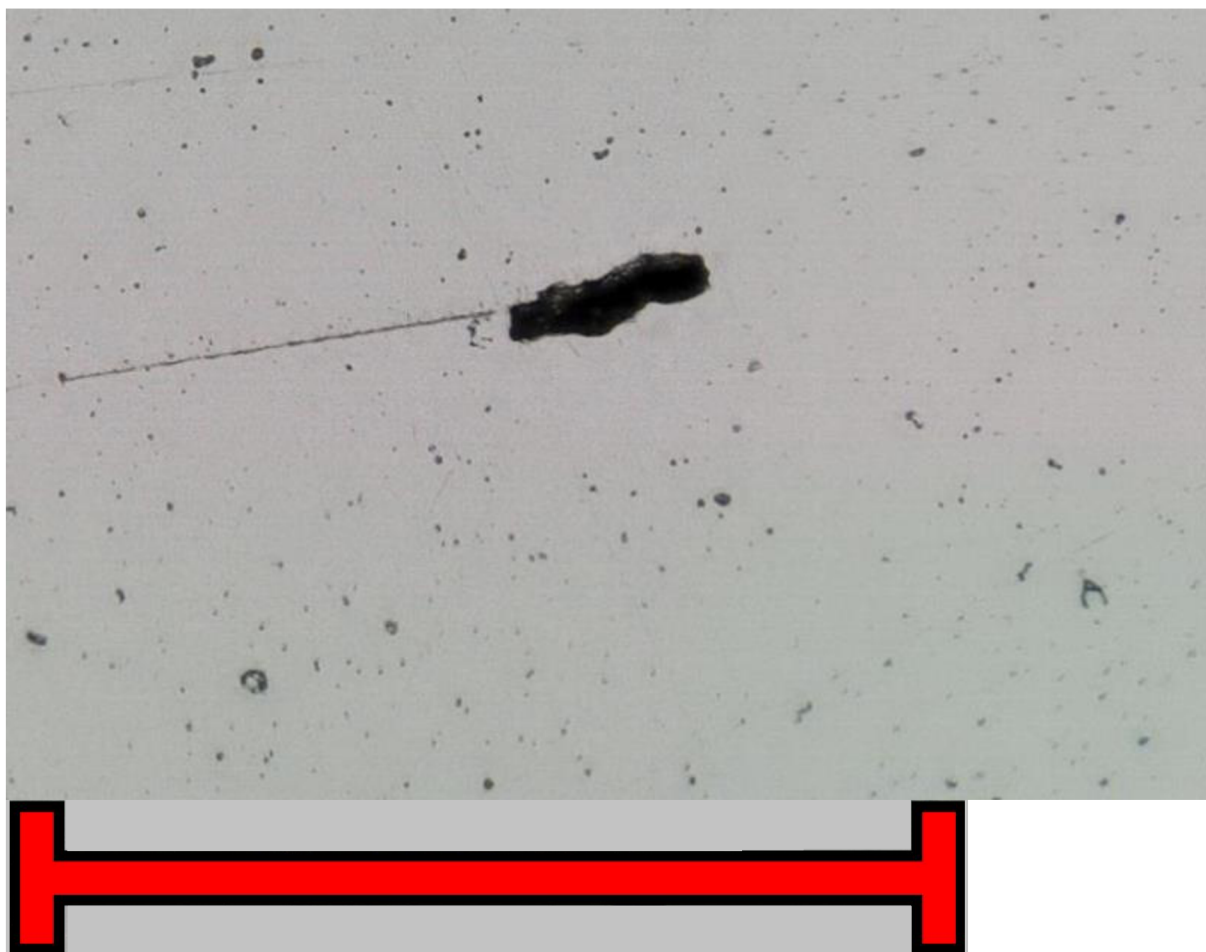


Obr. 5-6 Fotografie mikrostruktur v původní velikosti

Na obrázku 5.5 a 5.6 můžeme vidět původní velikost vzorků tvořené desítkami detailů. Z důvodu fungování mikroskopu musela být fotografie rozdělena na dvě části v obou případech. Důležité je, že i na takto zmenšených fotografiích můžeme vidět černé skvrny. Ty představují póry a další nečistosti uvnitř materiálu.

Nejčastěji se jedná o plyny, které se dovnitř dostali při sintraci v prostředí naplněném některým plynem. Nejčastěji se při tak vysokých teplotách užívá argon s možnou příměsí kyseliny uhličité, helia, vodíku nebo kyslíku. Další možností je nespečený materiál, nebo prasklina.

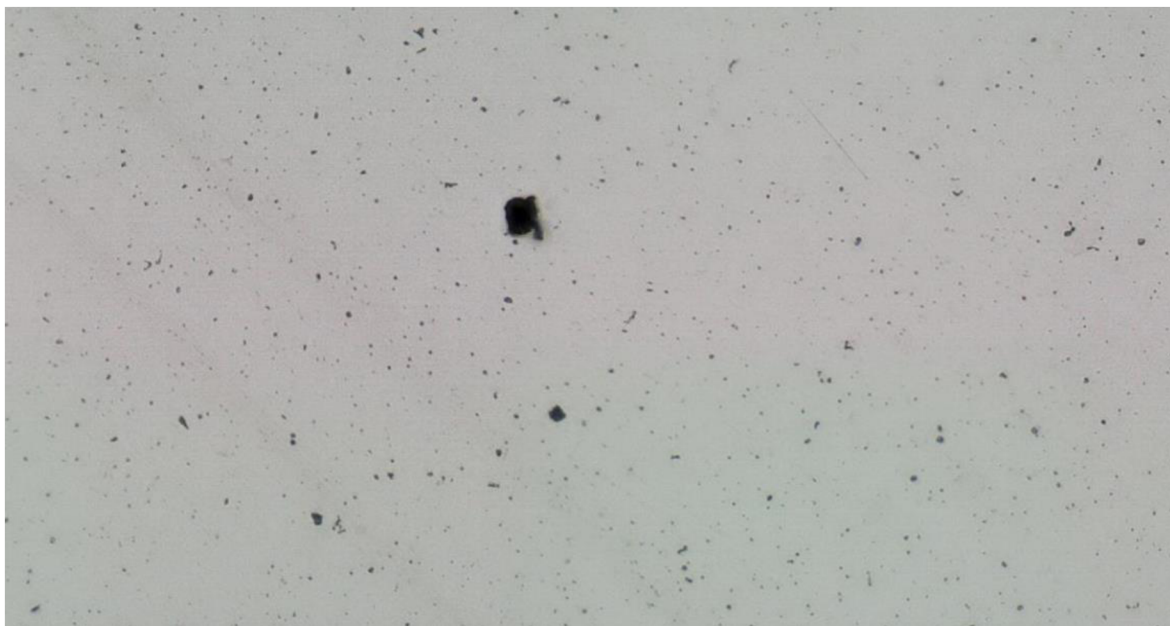
Na obrázcích můžeme vidět malinké tečky a dále větší skvrny. Malé tečky jsou ve většině případů póry obsahující zmíněné plyny. Větší prezentují nespečený prášek, materiál, nebo mikrostrukturní praskliny. Tenké čáry představují oděry od broušení papírem. První vzorek je odebrán v krajní části materiálu, druhý uprostřed.



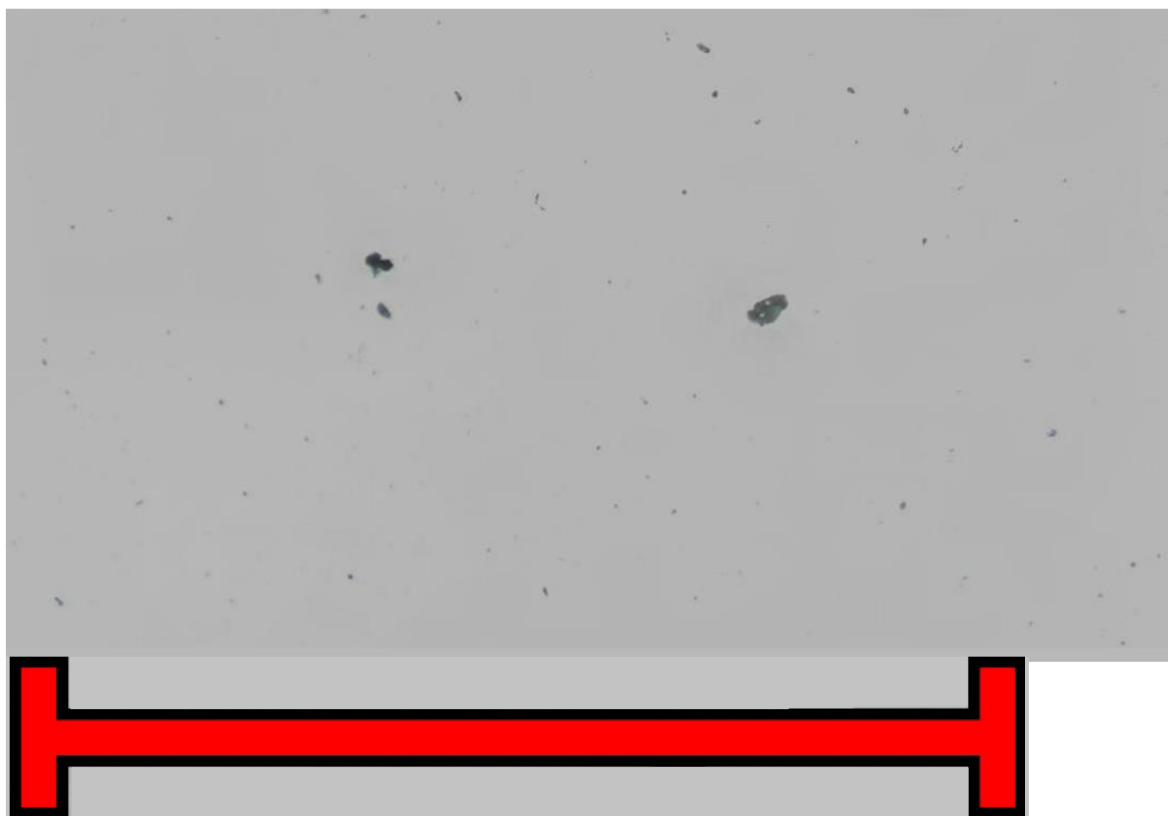
Obr. 5-7 První vzorek, první detail



Obr. 5-8 První vzorek, druhý detail



Obr. 5-9 Druhý vzorek, první detail



Obr. 5-10 Druhý vzorek, druhý detail

Velikost měřítka u fotografií je 1 mm.

Na první fotografii můžeme vidět velkou skvrnu, která reprezentuje nespečený materiál. Nádherně vidíme, jak přes tuto vadu přešel brusný papír a nějakou dobu s sebou táhl kusy prášku.

Na další fotografii prvního vzorku si okamžitě všimneme „hada“. Ten nejspíše reprezentuje prasklinu uvnitř materiálu a je nejnebezpečnějším typem vad. Další možností je spečená nečistota během výroby tisku.

U třetí fotografie si můžeme povšimnout jedné velké černé skvrny uprostřed, jedné menší pod ní, a nakonec obzvláště hojného množství malých skvrn. Velká skvrna znovu naznačuje na nespečený materiál uvnitř vzorku. Menší skvrny jsou plynové zbytky.

Poslední fotografie byla pořízená na druhém snímání vzorku a přesvícena. Z toho důvodu většina malých pór nelze vidět.

U posuzování kvality vzorku jakéhokoliv materiálu, hraje pórovitost obrovskou roli. Při jakékoliv výrobní metodě se snažíme získat předměty s nulovou pórovitostí a v ideálním případě i bez dalších větších vad. V metodě BMB jsme našli mnoho mikroskopických vad, ale jen málo z nich poměrně velkých. Na pohled běžným okem na opracované výrobky by nás hned nenapadlo, že se jedná o výrobek vyrobený 3D tiskem. Pod pohledem mikroskopickým můžeme jasně vidět maličké póry, které jsou ovšem velmi rozptýlené a nemusí znamenat velký problém pro pevnostní charakteristiky.

Výhodou experimentu prováděného tímto mikroskopem je výhoda automatické kalkulace pórovitosti vzorku. Tato kalkulace však nezabere z technických důvodů celý vzorek. Z původní velikosti 22x10 mm nám program vyhodnotil plochu 17x7 mm. U prvního vzorku blíže okraji zjišťujeme, že pórovitost je 0,034%. Oproti tomu druhý vzorek odebraný uprostřed má celkovou pórovitost 0.17%. Jedná se o téměř o **čtyř násobný počet pór**.

6 DISKUZE

6.1 Porovnání tahové zkoušky s konkurenční technologií

Prvním krokem při hodnocení výsledků bude srovnání s uváděnými hodnotami tahové zkoušky materiálu AISi 4140, která je dostupná na stránkách výrobce. Dokument přikládám v příloze

Tab. 6-1 Porovnání pevností [18]

	Zkoumaný vzor	Materiálový (teplotná zpr)
Pevnost v tahu	1050 MPa	1450 MPa
Mez kluzu	706 MPa	1060 MPa
Prodloužení při přetržení	9,4 %	5,5 %

Při porovnávání byli použity námi změřené minimální výsledky. Tímto způsobem pracujeme s nejhorsími naměřenými situacemi. Hodnoty materiálových listů společnosti Desktop Metal desktop jsou uváděny po tepelném zpracování v oleji při teplotě 857°C a následném temperování při 200°C po dobu dvou hodin. Z hodnot můžeme vidět, že tepelnou úpravou bychom se měli dost téměř o 50% výše s pevnostními charakteristikami, což je reálné. Důvodem porovnání bylo zjištění, zdali se hodnoty neliší extrémně, například o více než 100%.

Po získání konečných hodnot napětí aj. byli dále porovnány získané jednotky s konkurenčními metodami. Nejvhodnějším kandidátem k porovnání by byla technologie ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing), ta ovšem nepracuje s materiálem AISi 4140. [31]

Dalším technologií pracující s materiálem AISi při 3D tisku je metoda LENS (Laser Engineered Net Shaping) známá také jako Direct Laser Deposition. Tato technologie funguje na principu laserového tavení (viz. kap. 2.1.5.).

Tab. 6-2 Porovnání složení

	S l o t e n °	S l o t e n ° (
	AISI 4140 (BMD)	AISI 4140 (LENS)
Cr	0,8 - 1,2	1,0
Mo	0,2 – 0,3	0,21
C	0,3	0,44
Si	0,6 (max)	0,21
Mn	1,0 (max)	0,9
Fe	Balance	Balance

V tabulce 6-2 se dozvídáme chemické rozdíly ve složení používaných směsí obou technologií. Největším rozdílem je zřejmě množství použitého křemíku. Společnost Desktop Metal neposkytla přesné hodnoty směsi, jelikož se jeho složení často mění, neustále dochází k optimalizaci materiálu, pro dosažení co nejlepších výsledků.

Tab. 6-3 Porovnání pevnosti BMD LENS [44]

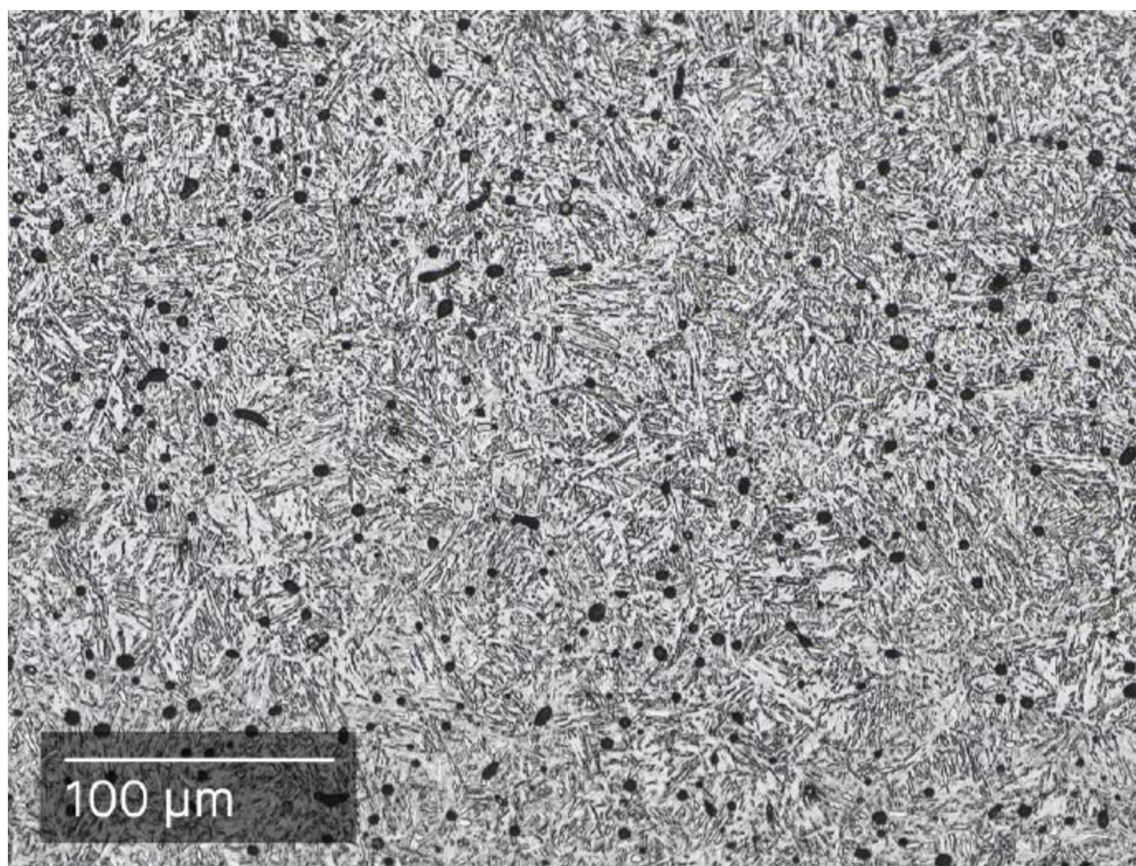
	Z ® k l a d n ° c h a r a k t e r i s t i	
	BMD	LENS
Pevnost v tahu	1050 MPa	720 MPa
Mez kluzu	706 MPa	655 MPa
Prodloužení při přetržení	9,4 %	4%

V tabulce 6-3 můžeme vidět velký rozdíl mezi vzorky vyrobených technologií BMD oproti konkurenční metodě LENS. Mez kluzu v obou případech je velmi podobná, avšak největší rozdíl je v mezi pevnosti, v té BMD dosahuje lepších kvalit o téměř 50%. Důvodem pro takový výsledek je rozhodně technologický postup. Největším rozdílem je proces sintrování. U technologie BMD se vzorek vytvrzuje v sintrační peci, kde odchází k odstranění zbytkového pojiva, ale také ke zpevnění součástí. Tento tepelný proces má nejspíše největší vliv na pevnost v tahu.

6.2 Porovnání struktur

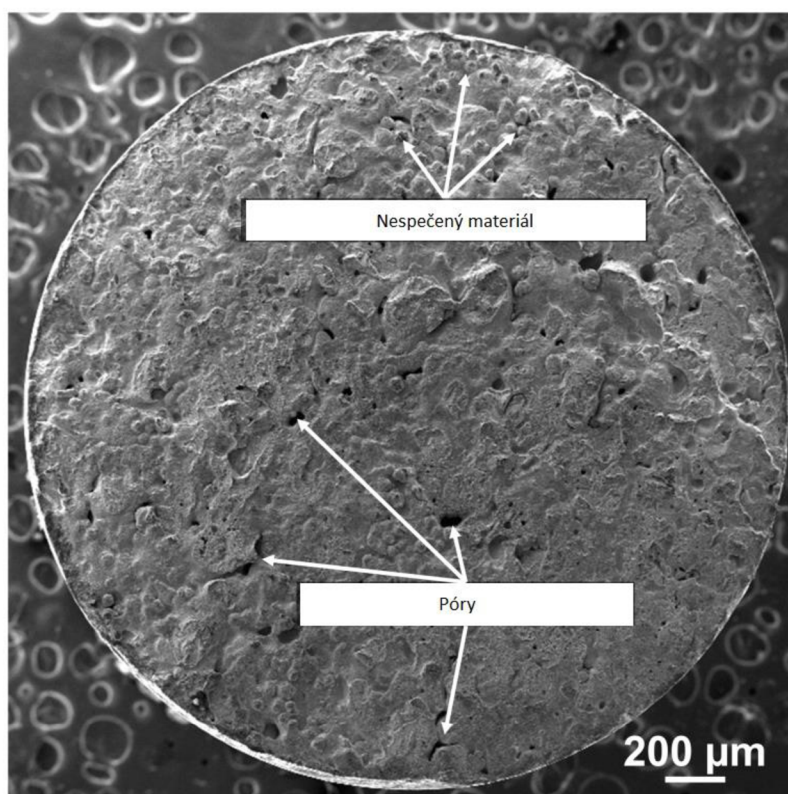
V praxi nám fotografie vždy vylepší pohled na věc, získáme mnoho důležitých informací, jak zdokonalit technologii a poučit se z chyb. Dalším krokem je porovnání výsledků, pro získání všeobecného nadhledu.

Pro první porovnání byla využita mikroskopická fotografie dostupná z webu společnosti Desktop Metal.



Obr. 6-1 Fotografie mikrostruktury společnosti MCAE [18]

Na obrázku 6-1 můžeme pozorovat mikrostrukturu dostupnou v dokumentaci u firmy Desktop Metal. Na první pohled můžeme vidět, že technologie využila leptání před mikroskopickým pohledem, čímž zvýraznila orientaci jednotlivých zrn kovové směsi. V této práci leptání nebylo provedeno z důvodu čistšího pohledu na póry součásti. Důležité je si povšimnout černých skvrn. Těmi jsou stejně jak v našem případě póry plyných látek, nejčastěji Argonu. U větších černých skvrn můžeme polemizovat, zdali se nejedná o nespečený materiál, či další vadu. V každém případě nám pohled dává podobnou představu jako fotografie pořízené na VUT. Vzorek má velké množství porů, které mohou být centrem napětí.



Obr. 6-2 Mikroskopický detail technologie LENS [44]

Další porovnatelným vzorkem je mikroskopický detail na póry a nespečený materiál vzorku AISi 4140 vytvořeného technologií LENS. Na obrázku pořízeným speciálním mikroskopem můžeme vidět detail na nespečené částičky materiálu a póry. Oproti technologii BMD jsou především póry mnohem větší i když možná méně časté. V konečném důsledku právě ony nejspíše můžou za mnohem horší mez pevnosti v tahu.

6.3 Zhodnocení práce

Prvním cílem bylo identifikovat stěžejní parametry ovlivňující výsledné vlastnosti dílů. Výsledkem bylo navržení vhodného nanášení materiálu při vytváření vzorku a jeho postavení. Pokud bychom například chtěli náš testovací vzorek tisknout na výšku, riskovali bychom nefunkčnost materiálu, stejně jako u dalších metod 3D tisku. Vedlejším důvodem je vytvoření nestabilního vzorku s vyšším těžištěm při tisku, které by se mohlo projevit při projíždění tiskové hlavy na povrchu tisknutého vzorku, avšak hlavním problémem je smršťování (doporučené velikosti předmětů pro BMD viz. Příloha). Před tisknutím vzorku také nastavujeme další důležité parametry. Nejdůležitějším z nich je volba materiálu, který se chová v tiskárně vždy trochu jinak z důvodu jiného chemického složení a projevuje se hned v několika dalších krocích výroby. Dalšími parametry jsou například rychlost tisku, teplota nanášeného materiálu z tiskové hlavy a volba pojiva.

Po vyrobení je důležitým parametrem výběr způsobu odstranění primárního pojiva. Naše vzorky byly vyrobeny na zařízení studio systém+ a prošly pracím zařízením. V lázni se nachází tekutina patentovaná společností Desktop Metal. Posledním parametrem při výrobě ovlivňující charakteristiky byla sitrovací teplota, která byla blízká teplotě tání materiálu.

Pokud bychom chtěli práci dále rozvést, rozhodně by stálo za zkoušku experimentovat právě dráhou nanášení materiálu a natočením vzorku.

Materiál byl navrhnout firmou MCAE. Jedná se o stále experimentální materiál, a proto byl ideálním kandidátem ke zkouškám. Tahový vzorek byl vybrán dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Při dalších pokusech bych zvolil menší vzorek kulatého průřezu, nebo bych u našeho vzorku prodloužil úchytné části i zkoumanou délku, abychom se nepohybovali na hraničních hodnotách. Vše záleží na finančním zhodnocení výrobních nákladů.

Výběr experimentů byl ideální. Pro další pokusy bych provedl leptání vzorků u optické metalografie a některé vzorky použil na dynamické zkoušení materiálu. Tím bychom diagnostikovali chování pórů při cyklickém namáhání. Pro lepší objektivitu by bylo vhodné provést více pokusů u obou experimentů. Důležitým bodem výsledků byla 4x větší pórovitost vzorku odebraného středem součásti. Tyto výsledky mohou být způsobeny snímanou oblastí, ale ne v takové míře. Rozdílem oproti okrajovému vzorku bylo nezměnění směru nanášení. Můžeme tedy předpokládat, že póry mají větší tendenci se objevovat právě v oblastech rovnoměrně nanášeného materiálu bez odbočování.

Z výsledků vyplývá, že výrobky vytisknuté na tiskárně dosahují velmi vysokých pevnostních hodnot a vnitřní póry nevytváří značně nebezpečná místa oproti podobným technologiím. Před začátkem měření jsme předpokládali větší defekty a menší stabilitu výrobku, technologie BMD nás mile překvapila. Při porovnávání s konkurencí měla úspěch a můžeme tvrdit, že se jedná o jednu z nejlepších technologií pro kancelářské použití.

7 ZÁVĚR

V této práci byla nejdříve přiblížena aditivní technologie ve světle moderní doby. Poté bylo detailně popsáno fungování tiskařského zařízení Studio System+ a Studio System 2 fungující na technologii Bound Metal Deposition.

V další kapitole byli vytvořeny návrhy vzorků, které byli následně vytisknuty a dokončovací metodou na CNC stroji získány funkční vzorky pro tahovou zkoušku a optickou metalografii.

Tahová zkouška proběhla na 5 vzorcích v budovách fakulty. Tím byla obdržena poměrně jasná představa o pevnostních charakteristikách, spolu s tahovým digramem a přehlednými tabulkami nejdůležitějších bodů měření. Hodnoty byli vyhodnoceny a porovnány s údaji, které udává společnost Desktop Metal. Bylo zjištěno, že společnost udává hodnoty vzorků po tepelných dokončovacích metodách, proto byli výsledky porovnány také s výrobky konkurenční technologie 3D tisku kovů LENS (Laser Engineered Net Shaping) využívají stejný výchozí materiál. Po srovnání můžeme jasně stanovit, že technologie BMD má mnohem vyšší hodnoty meze pevnosti.

Aditivní technologie obecně velmi trpí pórovitostí. Z toho důvodu jsme provedli optickou metalografii. Po připravení vzorků ze dvou částí vytištěného polotovaru, byli pozorováni pod mikroskopem a vytvořeny jsme snímky mikroskopických struktur. Dílčím výsledkem byl i procentuální výskyt pórů na ploše vzorku. Zjistili jsme, že technologie trpěla na pórovitost (značně především uprostřed součásti), avšak jednotlivé póry byly rovnoměrně roztroušené po celém vzorku a jen v malém množství případů se shlukovaly, aby vytvářely nebezpečná místa. Kromě pórů jsme objevili mnoho míst, kde se nacházel nespečený materiál. Tyto vady jsou běžným vedlejším produktem při použití sintrační pece.

Při porovnávání s mikroskopickou fotografií firmy Metal Desktop se pozorování velmi podobají. Dalším porovnání bylo s technologií LENS, využívající téměř stejný výchozí materiál. Výsledkem byla podobná struktura, ale s větší velikostí pórů, která měla zřejmě negativní vliv na mez pevnosti u tahové zkoušky.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. SEDLÁČEK, Karel. Aditivní technologie na vlně všeobecného zájmu. Technický portál [online]. 2018, 2018(16), 3 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/aditivni-technologie-na-vlne-vseobecneho-zajmu_43045.html
2. 3D printing from scratch. 3dprintingfromscratch [online]. 2017, 2017(15), 1 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://3dprintingfromscratch.com/common/history-of-3d-printing/>
3. Základy 3D tisku [online]. Praha: Prusa Research, 2014 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>.
4. 3D tisk [online]. Brno: Nová média, 2014 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>
5. All about 3D printing [online]. _: All about 3D printing, 2017 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://allabout3dprinting.com/types-of-3d-printing/>
6. 3dprinting [online]. _: _, ©2020 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://3dprinting.com>
7. Konstruktor [online]. Brno: Nová média, ©2017 [cit. 2020-1-04]. Dostupné z: <http://www.konstruktor.cz/2017/01/26/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-3-predvyrobnietapa-topologicka-optimalizace/>
8. Docplayer [online]. Dobřany: COMTEST FHT, ©2017 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3d-tisku-proceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>
9. Trendy 3D tisku [online]. Soquel: themerkle, ©2017 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://themerkle.com/top-4-3d-printing-trends-coming-2017/>
10. Historie 3d tisku. 3dfactory [online]. online: 3dfactory, 2016 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/>
11. Zkoušky materiálů [online]. <http://chemikalie.upol.cz/>, 2015 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf. Skripta.
12. Stručná historie 3D tisku. In: Silenceplease [online]. 2017 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: https://www.silenceplease.cz/images/files/strucna_historie_3d_tisku_alej_2018.pdf
13. Vibrom [online]. 2018 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: <http://www.vibrom.cz/cz/technologie-mim>
14. Technologie MIM. Materialise [online]. 2018 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/fused-deposition-modeling-fdm>

15. BOSE, Animesh, Christopher A. SCHUH, Jay C. TOBIA, et al. Traditional and additive manufacturing of a new Tungsten heavy alloy alternative. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. 2018, 73(June 2018), 22-28 [cit. 2019-10-25]. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2018.01.019. ISSN 02634368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263436817307461>
16. FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, 23(6), 1917-1928 [cit. 2019-10-25]. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-014-0958-z>Třeboňsko: velká cykloturistická mapa. [1:60 000]. Vizovice: Shocart, 2008. ISBN 978-80-7224-565-9.
17. GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Cincinnati: Hanser Publications, [2016]. ISBN 978-1-56990-582-1
18. MCAE Studio System [online]. Kuřim: MCAE, 2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/studio-system/>
19. Bitfab - Online 3D Printing Service [online]. Bitfab.io, 2021 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://bitfab.io/blog/additive-manufacturing/>
20. 3D NATIVES [online]. Paris: 3D natives, 2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/>
21. Seminar on FDM [online]. online: Slideshare, 2017 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/LeonardVishal/seminar-on-fdm-3d-printing-technology-aug-2017>
22. How Stereolithography (SLA) 3D Printing Works [online]. Magazine: manufactur3dmag, 2018 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/stereolithography-sla-3d-printing-works/>
23. Schematic of electron beam freeform fabrication (EBF) system components. ResearchGate [online]. online: ResearchGate, 2015 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-electron-beam-freeform-fabrication-EBF-system-components-13_fig1_305186543
24. MURPHY, James. SELECTIVE LASER MELTING (SLM). All3DP [online]. 2019, 2019 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/selective-laser-melting-slm-3d-printing-simply-explained/>
25. Selective laser melting. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting
26. Laminated Object Manufacturing, LOM. Manufacturingguide [online]. Stockholm: manufacturingguide, 2017 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/>
27. Laminated Object Manufacturing, LOM.

28. ŠIMÁČEK, Jiří a Karel Neuman.

42. HLUCHÝ, Miroslav. Strojírenská technologie 1 Nauka o materiálu. 2. vydání. Praha: SNTL, 1978. 360 s. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5706230/>
43. Základní proces tvarování sítě laserem.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

- Obr. 2-1** Obrázek procesu výroby aditivních technologií [28]
- Obr. 2-2** Graf závislosti ceny výrobků na počtu vyrobených výrobků [19]
- Obr. 2-3** Využití materiálu při 3D tisku oproti CNC stroji [20]
- Obr. 2-4** Technologie 3D tisku FDM [21]
- Obr. 2-5** Technologie 3D tisku SLA [22]
- Obr. 2-6** Technologie 3D tisku EBF [23]
- Obr. 2-7** Popis funkce technologie SLM [25]
- Obr. 2-8** Technologie LOM [26]
- Obr. 2-9** Technologie LENS
- Obr. 2-10** 3D tiskárna technologie BMD (vlevo tiskárna, vpravo sintrovací pec) [18]
- Obr. 2-11** Popis fungování technologie MIM [30]
- Obr. 2-12** Markforged Metal X (vlevo) vs Studio System 2 (vpravo) [31] [18]
- Obr. 2-13** Znárodnění smluvní meze kluzu
- Obr. 2-14** Diagram tahové zkoušky [28]
- Obr. 4-1** 3D model vzorku
- Obr. 4-2** Polotovar testovacího vzorku (pohled shora)
- Obr. 4-3** Polotovar testovacího vzorku (podélný pohled)
- Obr. 4-4** Polotovar testovacího vzorku (pohled z boku)
- Obr. 4-5** Obráběcí CNC stroj na naše vzorky
- Obr. 4-6** Vzorky po tahové zkoušce
- Obr. 4-7** Obrázek řezů vzorků
- Obr. 4-8** upínací hlava
- Obr. 5-1** Tahový stroj Zwick/Roell Z250.
- Obr. 5-2** Graf tahové zkoušky všech vzorků
- Obr. 5-3** Zalité a vybroušené vzorky
- Obr. 5-4** Mikroskop Keyence VHX-7000
- Obr. 5-5** Originální mikrostruktura 1. vzorku
- Obr. 5-6** Fotografie mikrostruktur v původní velikosti

Obr. 5-7 První vzorek, první detail

Obr. 5-8 První vzorek, druhý detail

Obr. 5-9 Druhý vzorek, první detail

Obr. 5-10 Druhý vzorek, druhý detail

Obr. 6-1 Fotografie mikrostruktury společnosti MCAE [18]

Obr. 6-2 Mikroskopický detail technologie LENS [44]

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Porovnání Markforged Metal X a Studio System 2 [31] [18]

Tab. 4-1 Složení vybraného materiálu [18]

Tab. 5-1 Tabulka výsledků testů

Tab. 5-2 Tabulka statistik zkoušky

Tab. 6-1 Porovnání pevností

Tab. 6-2 Porovnání složení

Tab. 6-3 Porovnání pevností BMD LENS

12 SEZNAM PŘÍLOH

1. MD materiál - AISI 4140.pdf
2. Materialise datasheet.pdf
3. DM-0003-Studio-System-Printer-Spec-Sheet-v4.2.1.pdf
4. Maly-section01.csv
5. Velky-section01.csv
6. Report Hradil, DP, tah nerez AISI4140 BMD, 6x10-35mm, 5ks, 20. 5. 2021 (1).pdf
7. Zdroj data-Hradil, DP, tah nerez AISI4140, BMD, 6x10-35mm, 5ks, 20, 5, 2021.xlsx
8. Zkusebni-vzorek-12/5.pdf
9. BMD-doporuceni-tvaru