

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní



Diplomová práce

**Analýza mechanických vlastností 3D tištěné maraging
oceli**

**Analysis of mechanical properties of LPBF printed
maraging steel**

Vypracoval: Bc. Václav Hořký

Studijní program: Výrobní inženýrství

Zadávací ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hořký** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **466701**
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:

Analýza mechanických vlastností 3D tištěné maraging oceli

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of mechanical properties of LPBF printed maraging steel

Pokyny pro vypracování:

- 1) Přehled aditivních technologií
- 2) Popis technologie DMLS (LPBF)
- 3) Dostupné materiály
- 4) Kritická rešerše vědeckých publikací
- 5) Analýza vlastností na poskytnutých vzorcích

Seznam doporučené literatury:

ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing - General principles – Terminology Technical Report, International Organization for Standardization, 2015.
ASTM E8/E8M-11: Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM International, 3.01 (2011).
BADIRU, Adedeji Bodunde, Vhance V. VALENCIA a David LIU, ed. Additive manufacturing handbook: product development for the defense industry. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2017]. System innovation series. ISBN 9781482264081.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Zdeněk Pitrmuc
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci s názvem: „Analýza mechanických vlastností 3D tištěné maraging oceli“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Pitrmuce a s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Podpis



PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi za odborné vedení, cenné rady a čas, které mi značně pomohly k vypracování této diplomové práce.



ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora: Bc. Václav Hořký

Název DP: Analýza mechanických vlastností 3D tištěné maraging oceli

Anglický název: Analysis of mechanical properties of LPBF printed maraging steel

Rok: 2020/2021

Studijní program: Výrobní inženýrství

Obor studia: bez oboru

Ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vedoucí DP: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Bibliografické údaje: Počet stran: 93
Počet obrázku: 73
Počet tabulek: 23
Počet příloh: 0

Klíčová slova: DMLS, LPBF, maraging oceli, aditivní technologie, mechanické vlastnosti

Keywords: DMLS, LPBF, maraging steels, additive manufacturing, mechanical properties

Anotace: Diplomová práce se v teoretické části zabývá základním rozdělením aditivních technologií, podrobným popisem technologie DMLS (LPBF) a kritickou rešerší vědeckých publikací. V praktické části jsou analyzovány mechanické vlastnosti na poskytnutých vzorcích a získané hodnoty jsou porovnány s rešeršní částí.

Annotation: This Master's thesis is divided in two parts. The theoretical part examines basic sorts of additive manufacturing and includes a detailed



description of DMLS technology (LPBF) and critical research of scientific publications.

The practical part analyses mechanical properties on the provided samples and the obtained values are compared with the data in the theoretical part.



Obsah

1	Úvod	10
2	Přehled aditivních technologií	11
2.1	Historie.....	12
2.2	Rozdělení	12
2.2.1	Nekovové	12
2.2.2	Kovové.....	13
2.3	Binder Jetting (BJ)	13
2.4	Power Bed Fusion (PBF)	14
2.5	Sheet Lamination (SL).....	14
2.6	Direct Energy Deposition (DED)	14
2.7	Laser Direct Energy Deposition (L-DED).....	15
2.8	Electron Beam Direct Energy Deposition (EB-DED)	16
2.9	Electron Beam Power Bed Fusion (EBPBF)	17
3	Popis technologie DMLS (LPBF)	19
3.1	Princip	19
3.2	Postup při výrobě součásti	20
3.2.1	CAD model	20
3.2.2	Převod do formátu STL	20
3.2.3	CAM pro aditivní technologie	20
3.2.4	Nastavení stroje.....	21
3.2.5	Tisk	21
3.2.6	Vyjmutí součásti	21
3.3	Postprocessing	22
3.3.1	Odstranění prášku	22
3.3.2	Odstranění pnutí.....	23
3.3.3	Odstranění součásti od základové desky a podpěr.....	23
3.3.4	Obrábění.....	23
3.3.5	Horké izostatické lisování HIP	24
3.3.6	Povrchové úpravy	24
3.4	Kontrola	25
3.5	DMLS (LPBF) stroje	25
3.5.1	Výrobci strojů	25
3.5.2	Dostupné stroje	28
3.5.3	Parametry strojů.....	33



3.5.4	Příprava stroje	34
3.5.5	Čištění stroje po spékání a jeho údržba	34
3.6	Omezující parametry technologie DMLS (LPBF).....	34
3.6.1	Procesní parametry technologie.....	35
3.6.2	Pracovní prostor	35
3.6.3	Samonosné úhly	36
3.6.4	Otvory a kanálky	36
3.6.5	Převisy	37
3.6.6	Mosty	37
3.6.7	Vynucené mosty	37
3.6.8	Pozice a orientace součásti v rovině	38
3.6.9	Pozice a orientace součásti v prostoru	38
3.6.10	Štěrbiny	38
3.6.11	Výška prvků.....	39
3.6.12	Tloušťka stěn	39
3.6.13	Rozměr kolíku.....	39
3.6.14	Sbíhání	40
3.6.15	Pnutí	40
3.6.16	BOZP rizika	41
3.7	Výhody a nevýhody technologie DMLS (LPBF).....	41
4	Dostupné materiály	43
4.1	Ocelové prášky pro technologii DMLS (LPBF).....	43
4.1.1	Výroba prášku.....	44
4.1.2	Sledované vlastnosti	44
4.1.3	Stanovení základních vlastností kovových prášků	45
4.1.4	Úpravy prášku.....	45
4.2	Dostupné materiály pro DMLS (LPBF)	46
4.3	Maraging oceli	48
4.3.1	Tepelné zpracování maraging ocelí	49
4.3.2	Maraging 300	50
5	Kritická rešerše vědeckých publikací	51
5.1	Thomas Simson et al.....	51
5.2	Tarun Bhardwaj et al.....	52
5.3	Ludmila Kučerová et al.....	53
6	Analýza vlastností na poskytnutých vzorcích	57
6.1	Tahová zkouška	59



6.2	Zkouška tvrdosti dle Rockwella	65
6.3	Metalografie.....	68
6.4	Porozita	70
6.5	Zkouška mikrotvrdosti.....	72
6.6	Obrazová analýza.....	76
7	Závěr.....	80



1 Úvod

Aditivní technologie se v posledních letech staly velmi probíraným tématem v mnoha průmyslových odvětvích. Z počátku se tiskárny pro kovové materiály používaly především pro prototypování, ale v dnešní době jsou používány v leteckém, automobilovém a také v dentálním průmyslu.

V teoretické části je popsán základní přehled aditivních technologií v oblasti nekovového a kovového tisku. V další kapitole je hlavní pozornost věnována technologii DMLS (LPBF), kde je popis principu této technologie, postup při návrhu součásti až po postprocessing a kontrolu. Pozornost je věnována také dostupným strojům na trhu včetně dodávaných prášků a jejich výroby. V poslední kapitole je kritická rešerše vědeckých publikací, ve které jsou popsány zkoumané mechanické vlastnosti, kterými se jednotlivé kolektivy zabývaly.

V praktické části se provedla analýza mechanických vlastností na poskytnutých vzorcích. Provedla se tahová zkouška, za kterou chci poděkovat Ing. Vítku Novákovi a zkouška tvrdosti dle Rockwella. Po těchto zkouškách se provedlo metalografické zpracování vzorků s následným zkoumáním porozity, mikrotvrdosti a obrazovou analýzou. Hodnoty získané z provedených zkoušek se poté vyhodnocovaly a porovnávaly s rešeršní částí.

2 Přehled aditivních technologií

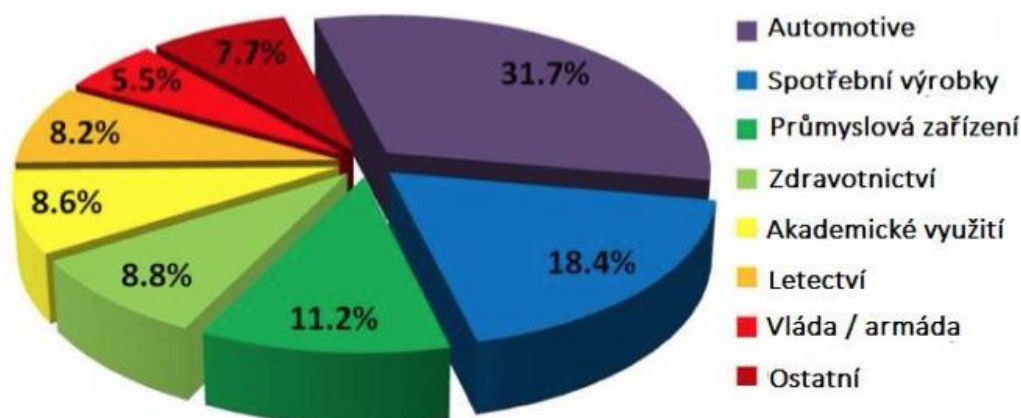
Termín aditivní technologie je souhrnný název pro technologie vytvářející trojrozměrné objekty z digitálních dat (modelu). Aditivní znamená, že objekt vzniká vrstvením materiálu neboli postupným skládáním jednotlivých 2D vrstev. Každá vrstva představuje tenký vodorovný řez finálním objektem.

Aditivní technologie umožňuje vyrábět tvarově komplexní díly s minimálními vstupními náklady na plánování výroby, stroje, nástroje a formy. Oproti obrábění, slévání, tváření a vstřikování plastů potřebujeme u aditivních technologií pouze 3D model objektu, základní porozumění, jak stroj pracuje a jaké materiály můžeme použít.

Z počátku se aditivní technologie využívaly především pro vytváření vizuálních modelů při vývoji. Za poslední roky ale dochází k obrovskému vývoji, a to zejména v medicíně, automobilovém a leteckém průmyslu a módě. Lze vytisknout téměř cokoliv, od nástrojů, dentálních náhrad, medicínských implantátů, až po lopatky s vnitřním chlazením do leteckých motorů.

Nejrozšířenější jsou tiskárny pro plastové materiály, vzhledem k nižší pořizovací ceně tiskárny a materiálů (v řádech tisíců až desetitisíců korun). Tyto tiskárny si může pořídit téměř kdokoliv. Kovové tiskárny se ale stále více rozšiřují, vzhledem k využití v automobilovém a leteckém průmyslu. U nich jsou pořizovací ceny v řádech statisíců až milionů korun.

[1] [2] [21] [22]



Obrázek 1 - Rozsah použití aditivních technologií [15]

2.1 Historie

1984 – Chuck Hull vynalezl stereolitografii a vytvořil první prototyp stroje.

1986 – Chuck Hull si nechal patentovat stereolitografii.

1989 – Carl Deckard na University of Texas vynalezl první experimentální zařízení pro laserové spékání kovů a nechal si patentovat technologii (firma DTM Corporation).

1990 – První komerční zařízení SLA 1.

1997 – Carl Deckard poskytl patent na SLS německé firmě EOS GmbH výměnou za práva k stereolitografickému tisku z plastových materiálů.

2004 – První komerčně dostupné zařízení DMLS (firma EOS GmbH).

2014 – Deckardův a Hullův patent vypršel, otevření technologií pro volný trh.

[2]



Obrázek 2 - Využití aditivních technologií [2]

2.2 Rozdělení

2.2.1 Nekovové

- FDM – Fused deposition modeling
- SLS – Selective laser sintering
- SLA – Stereolitography
- IJP – Ink-jet printing
- SHS – Selective heat sintering
- LOM – Laminated object manufacturing
- DLP – Direct light printing

[2]

2.2.2 Kovové

Norma EN ISO/ASTM 52921 (2015) klasifikuje aditivní technologie pro kovové materiály (MAM) do sedmi různých kategorií:

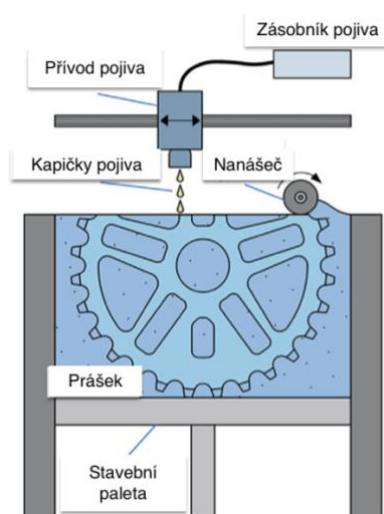
- Power Bed Fusion (PBF) – Spékání kovového prášku
- Direct Energy Deposition (DED) – Přímé nanášení
- Binder Jetting (BJ) – Nastříkávání pojiva
- Sheet Lamination (SL) – Plošné laminování
- Material Jetting (MJ) – Nastříkávání materiálu
- Material Extrusion (ME) – Vytlačování materiálu
- Vat Photopolymerization (VP) - Fotopolymerizace

Jako technologie pro nepřímou aditivní výrobu (pro kovy) se označuje nastříkávání materiálu, vytlačování materiálu a fotopolymerizace (součásti vyrobené ze směsí kovů s polymery). Technologie pro přímou aditivní výrobu se skládají ze čtyř kategorií.

[4]

2.3 Binder Jetting (BJ)

Tryskání pojiva na kovový prášek, který se spojí dohromady a tím se postupně vytvoří jednotlivé vrstvy součásti. Po dokončení tisku součásti se provádí sekundární proces slinování. Součást se umístí do vysokoteplotní pece, aby se kovové částice spojily dohromady a vypálilo se pojivo. Zvýšení hustoty při slinování způsobuje zmenšení součásti a snížení rozměrové přesnosti, které jsou považovány za hlavní nevýhody této technologie. [4] [17]



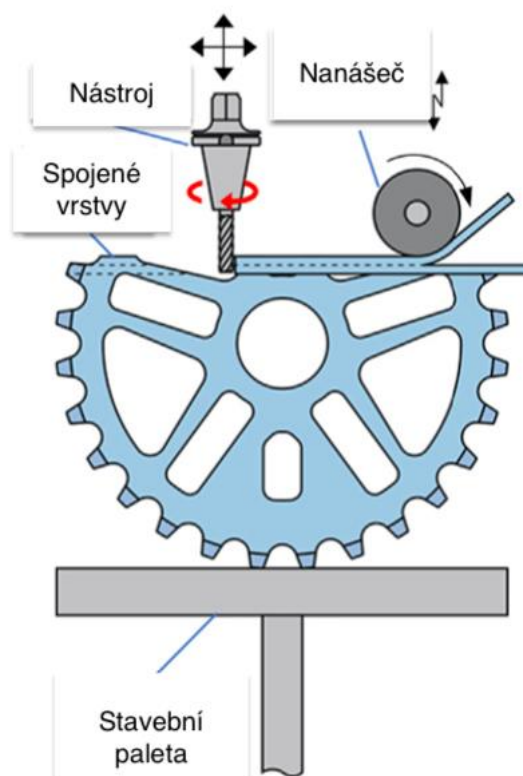
Obrázek 3 - Schéma technologie BJ [4]

2.4 Power Bed Fusion (PBF)

Pro spojení kovového prášku se využívá tepelný zdroj energie. Prášek je spojován vrstvu po vrstvě po předem definované dvojrozměrné dráze. Tato technologie bude podrobně vysvětlena v následující kapitole. [4]

2.5 Sheet Lamination (SL)

Princip této technologie spočívá ve spojování tenkých plechů. Může se provádět buď vyřezáním obrysu vrstvy a nanesení další vrstvy, nebo nanesením všech vrstev a následným vyřezáním obrysu. Tato technologie se dále dělí dle principu spojování jednotlivých vrstev, a to lepením, ultrazvukovým svařováním, svařováním třením a dalšími způsoby. [4] [18]

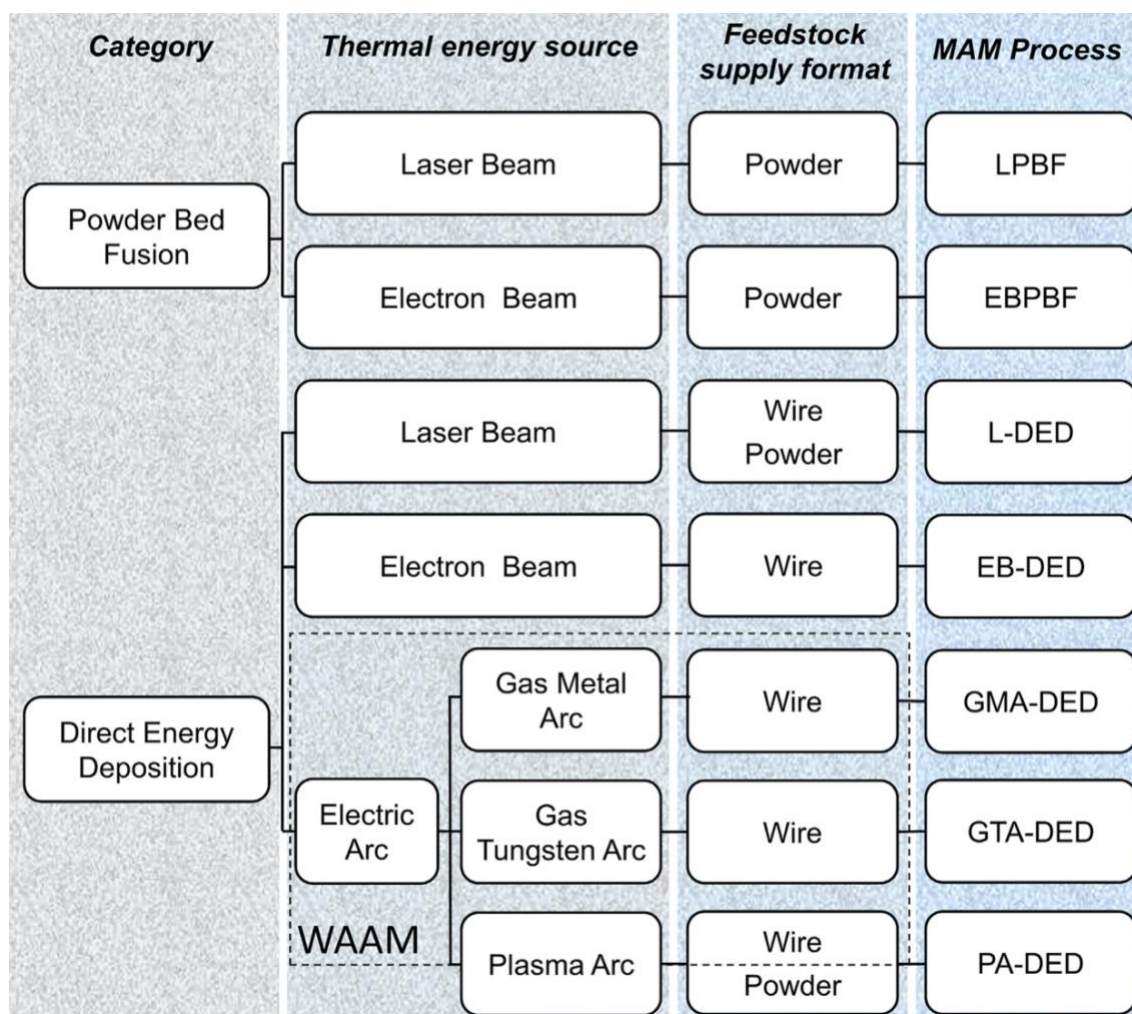


Obrázek 4 - Schéma technologie SL [4]

2.6 Direct Energy Deposition (DED)

Materiál je přidáván pomocí trysky ve formě drátu nebo prášku. Materiál se taví zdrojem tepelné energie v přesnou dobu nanášení na dané místo, kde následně ztuhne. Tato technologie se velmi často využívá při opravě součástí a její výhodou je pohyb trysky v různých směrech. [4] [18]

Obrázek 5 představuje klasifikaci hlavních aditivních technologií pro kovové materiály (MAM). Nejčastěji se využívá dvou kategorií, kterými jsou PBF a DED. Specifikace technologie tavení kovového prášku (PBF) se dále rozděluje dle použitého zdroje tepelné energie na laserové spékání kovového prášku (LPBF) a na spékání kovového prášku elektronovým svazkem (EBPBF). U přímého nanášení (DED) je rozdělení dle zdroje tepelné energie obdobné jako u PBF. Rozdíl je ve formě materiálu, kdy u přímého nanášení laserem (L-DED) může být materiál ve formě prášku nebo drátu a při přímém nanášení elektronovým svazkem je materiál ve formě drátu. [4]

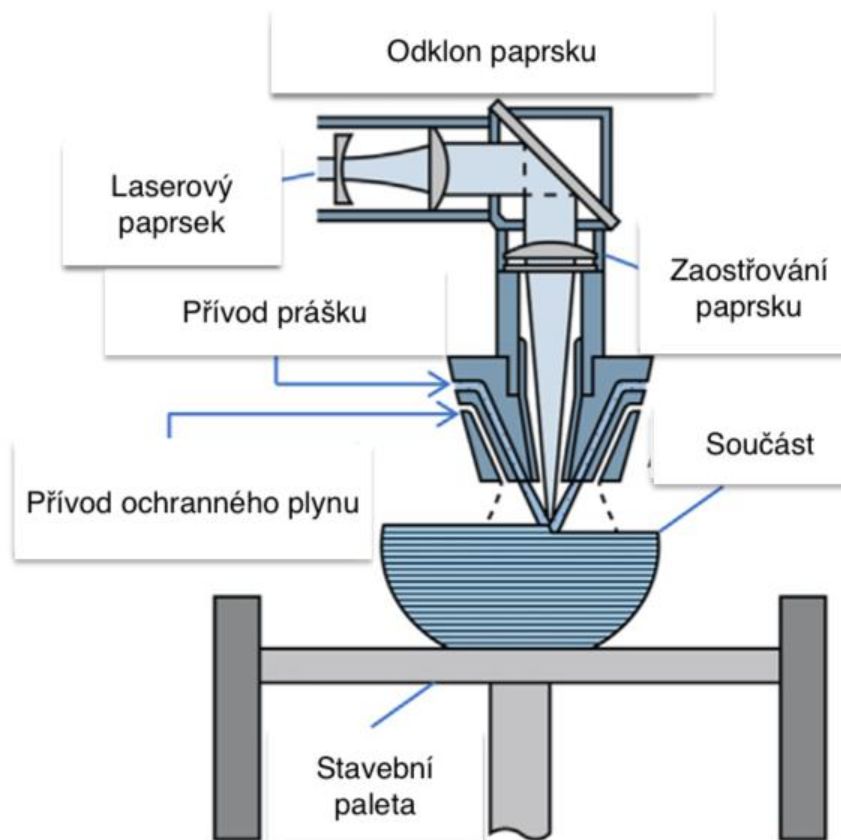


Obrázek 5 - Klasifikace aditivních technologií pro kovy (MAM) [4]

2.7 Laser Direct Energy Deposition (L-DED)

Materiál může být ve formě prášku nebo drátu. V případě prášku je materiál přiváděn laserovou hlavou a v případě drátu je materiál přiváděn pomocí nezávislého systému odděleného od laserové hlavy. Při použití drátu můžeme dosáhnout rychlosti nanášení až

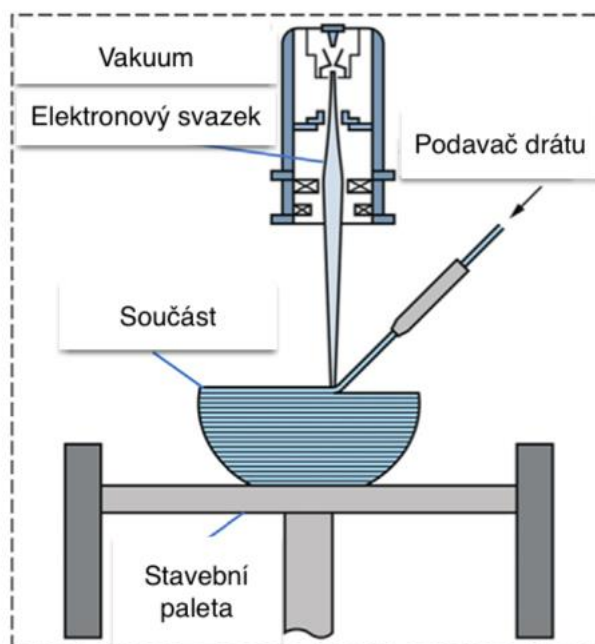
2 kg/hod. K ochraně tavné lázně se používají ochranné plyny proudící z laserové hlavy, které kromě ochrany před oxidací, slouží také jako nosiče, které napomáhají přenosu prášku do tavné lázně. Výhodou této technologie je možnost robotizace (nevyžaduje použití komor s ochrannými plyny). [4]



Obrázek 6 - Schéma technologie L-DED [4]

2.8 Electron Beam Direct Energy Deposition (EB-DED)

Princip této technologie je podobný jako u L-DED. S tím rozdílem, že jako zdroj tepelné energie se zde používá elektronový svazek, který pracuje za podmínek řízeného vakua. Materiál je výhradně ve formě drátu, kvůli špatné manipulaci kovového prášku ve vakuu (vliv na konečnou kvalitu a přesnost součásti). Rychlost nanášení materiálu je zde vyšší než při použití laserového paprsku, pohybuje se kolem 3 až 10 kg/hod v závislosti na materiálu a požadovaných vlastnostech součásti. [4]



Obrázek 7 - Schéma technologie EB-DED [4]

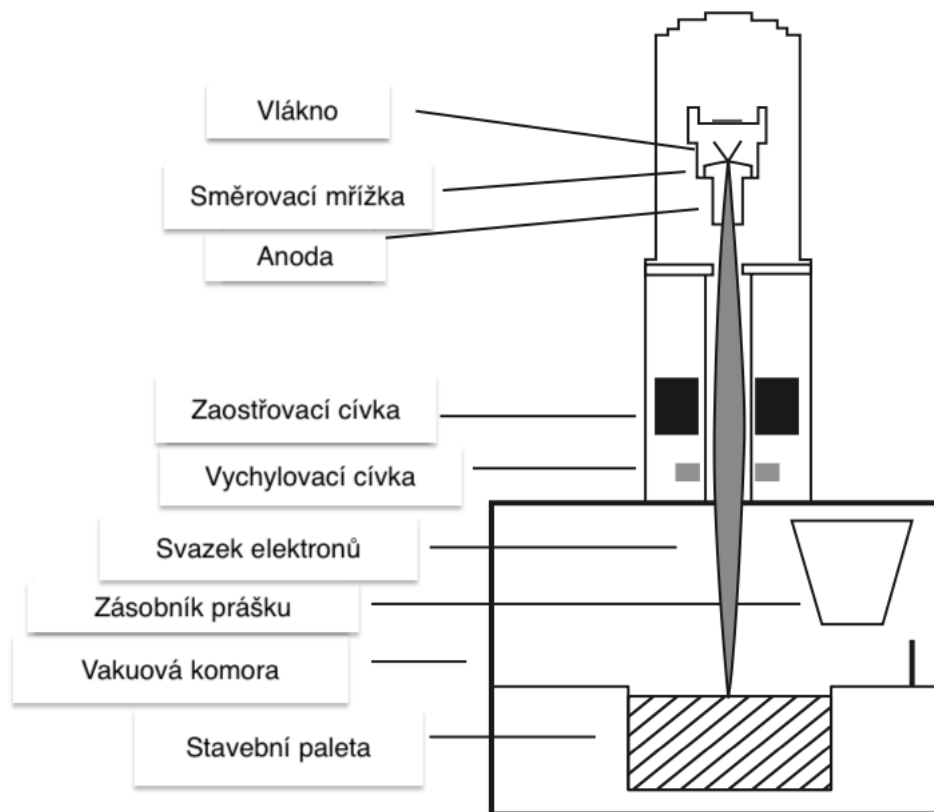
2.9 Electron Beam Power Bed Fusion (EBPBF)

EBPBF je další aditivní technologií na bázi PBF. K selektivnímu tavení vrstvy prášku ve vakuové komoře se používá elektronový svazek. Tento proces je podobný technologii SLM s tím rozdílem, že místo laseru se používá jako zdroj energie elektronový svazek. [3]

Wolframové vlákno emituje elektrony vysokou rychlostí a ty jsou řízeny dvěma magnetickými poli (zaostřovací cívkou a vychylovací cívkou). Zaostřovací cívka zaostřuje svazek na požadovaný průměr a vychylovací cívka vychyluje zaostřený svazek na požadovaný bod práškové lože. Při kontaktu elektronů s práškem se kinetická energie přemění na energii tepelnou a dojde k tavení prášku. Každá vrstva prášku je skenována předehřívacím stupněm (svazek o vysokém proudu s vysokou rychlostí skenování) a tavným stupněm (svazek nízkého proudu s nízkou rychlostí skenování). Po dokončení jedné vrstvy se nanese další prášková vrstva a celý proces se opakuje, dokud nedojde k vytvoření součásti. Celý proces probíhá za vysokého vakua a přívod plynného hélia během tavení snižuje tlak vakua, což chladí součást a stabilizuje paprsek. [3]

Hlavními parametry této technologie je výkon elektronového svazku, proud, průměr ohniska, teplota předehřevu prášku a tloušťka vrstvy. Obvykle se používá tloušťka vrstvy 50 až 200 μm . Touto technologií můžeme zpracovávat širokou škálu materiálů (slitiny

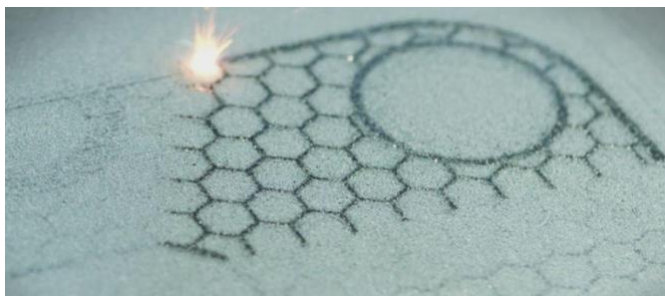
titanu, kobaltový chrom, inconel, nerezové oceli, nástrojové oceli, měď, slitiny hliníku a mnoho dalších materiálů). [3]



Obrázek 8 - Schéma technologie EBM [3]

3 Popis technologie DMLS (LPBF)

Tato metoda spočívá v laserovém spékání kovového prášku, kdy se vytváří složité geometrie. Patří mezi první komerčně dostupné aditivní technologie. Všechny ostatní metody s práškovými loži modifikují tento základní způsob. Mezi modifikace patří především jiné tepelné zdroje, více tepelných zdrojů a různé mechanismy pro přidávání a vyhlazování vrstev prášku. [1] [2] [23]



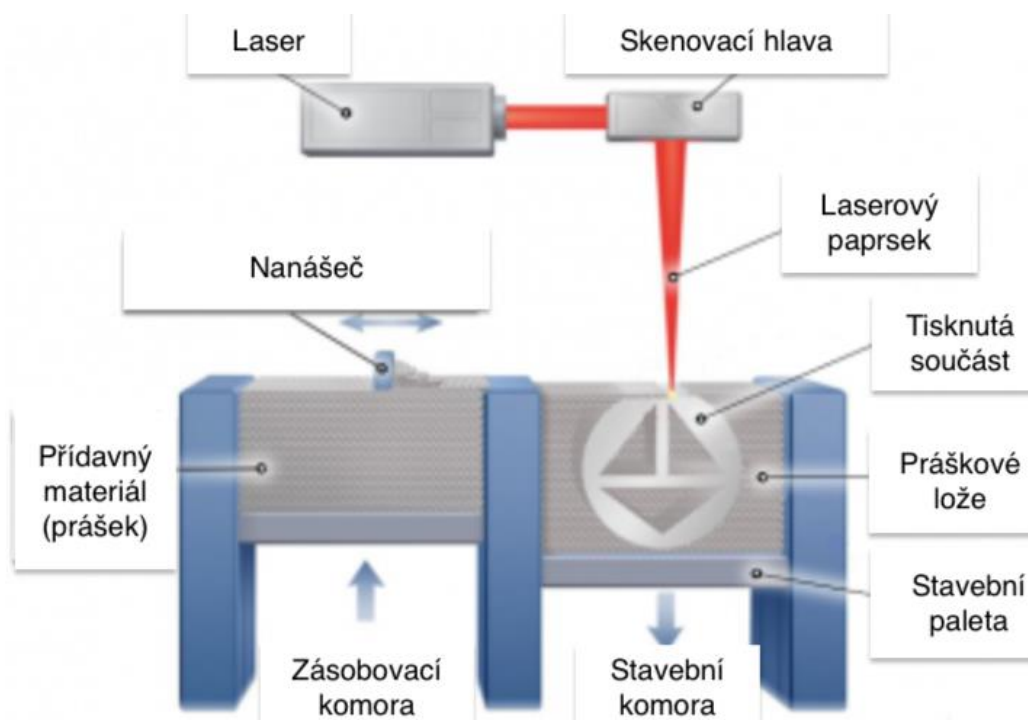
Obrázek 9 - Spékání kovového prášku [24]

3.1 Princip

Ze zásobovací komory je na základní stavební paletu nanášen přídatný materiál ve formě prášku v tenké konstantní vrstvě. Tepelným zdrojem v selektivních bodech dochází ke spojení jednotlivých částic prášku, které vytvoří jednu vrstvu vznikající součásti. Po dokončení jedné vrstvy dojde k poklesu stavební komory, vzestupu zásobovací komory a pomocí nanášedce dojde k nanesení další vrstvy prášku pro spékání. Tento proces se opakuje až do vzniku vyráběné součásti. [1] [25]

Okolní nespečený prášek slouží jako podpora pro následující vrstvy, čímž se v některých případech eliminuje potřeba podpěr. Po dokončení tisku je součást vyjmuta z komory a provádí se čištění od prášku, odstranění podpěr a v případě potřeby se provádí dokončovací operace. [1] [25]

Proces vytváření součásti probíhá v uzavřené komoře naplněné plynným dusíkem, aby se minimalizovala oxidace a degradace práškového materiálu. Aby v součásti docházelo k rovnoměrnému dosažení nízké teploty, je důležitý ochlazovací čas. Tento čas je podstatný kvůli následné manipulaci se součástkou a možností vystavení součástky okolní teplotě a atmosféře. Pokud je stavební komora nebo součást předčasně vystavena okolní teplotě a atmosféře, může dojít k znehodnocení prášku vlivem přítomnosti kyslíku, nebo deformaci (smrštění) součásti vlivem vysokého rozdílu teplot. [1] [25]



Obrázek 10 - Schéma technologie DMLS (LPBF) [25]

3.2 Postup při výrobě součásti

3.2.1 CAD model

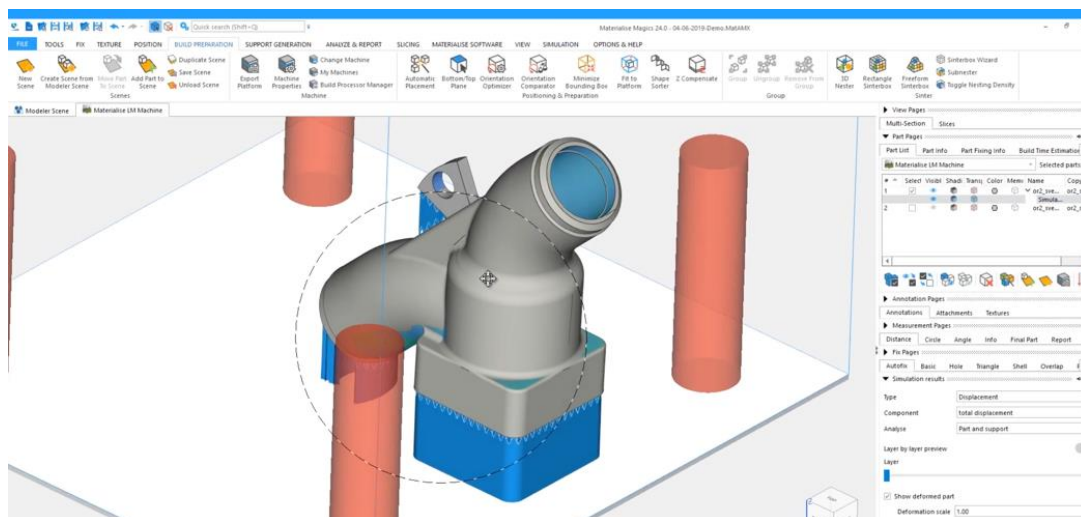
Musí vycházet ze softwarového modelu, který plně popisuje geometrii. Můžeme použít téměř jakýkoliv profesionální software CAD pro modelování těles, ale výstupem musí být model v nativním formátu (CATIA, Inventor, ProE, NX). [1] [2]

3.2.2 Převod do formátu STL

Jedná se o přenosový formát povrchových dat a tvoří základ pro výpočet řezů. Tento formát souboru se stal standardem a téměř každý stroj ho akceptuje. [1] [2]

3.2.3 CAM pro aditivní technologie

Zde se provádí obecné manipulace se souborem (příprava dat) jako je polohování, tvorba podpěr, rozvrstvení (slicing) a kontrola. Používá se Magics software (Materialise, 3Shape Cambridge). [1] [2]



Obrázek 11 - Prostředí Magics softwaru [26]

3.2.4 Nastavení stroje

Stroj musí být před začátkem tisku správně nastaven. Nastavení se týká především materiálu a jeho omezení, zdroje energie, tloušťky vrstvy a časování. [1] [2]

3.2.5 Tisk

Samotný tisk je převážně automatizovaný proces, a proto stroj může pracovat do značné míry bez dohledu. Je ale nutné monitorování stroje, aby nedošlo k chybám (nedostatek materiálu, energie a závady softwaru). [1] [2]



Obrázek 12 - Detail tisku součásti [23]

3.2.6 Vyjmutí součásti

Obsluha stroje musí mít ochranné pracovní pomůcky. Některé stroje mají bezpečnostní blokování kvůli nedostatečně nízké teplotě a pohybujícím se částem stroje. [1] [2]



Obrázek 13 - Vyjmutí součásti ze stroje [10]

3.3 Postprocessing

U 3D tisku představuje postprocessing až polovinu času a nákladů souvisejících s výrobou součástí. Vyžaduje zkušenost a zručnost pracovníka. Skládá se z mnoha operací podle rozměrových a geometrických tolerancí a mechanických vlastností součástí. [1] [28]

3.3.1 Odstranění prášku

Po dokončení tisku je součást pokryta kovovým práškem. Prášek musí být odstraněn a recyklován pro další použití. Tento proces se provádí odsáváním nebo ručně pomocí rukavic skrz uzavřenou komoru z důvodu poranění očí, plic a kůže. [2] [28]



Obrázek 14 - Čištění součásti od kovového prášku [28]

3.3.2 Odstranění pnutí

Vlivem nanášení jednotlivých vrstev dochází k opětovnému ochlazování a zahřívání, které způsobuje vnitřní pnutí v součásti. Abychom dosáhli požadovaných mechanických vlastností, musíme součást žíhat. [28]



Obrázek 15 - Žíhání vytisknutých součástí [28]

3.3.3 Odstranění součásti od základové desky a podpěr

K odstranění se nejčastěji používá pásová pila, elektroerozivní drátové řezání nebo ruční náradí. Tato operace se provádí po žíhání. Kdyby byla součást oddělena od stavební palety před žíháním, mohlo by dojít k zdeformování součásti. Stavební palety se následně frézují a mohou být znovu použity. [28] [29]

3.3.4 Obrábění

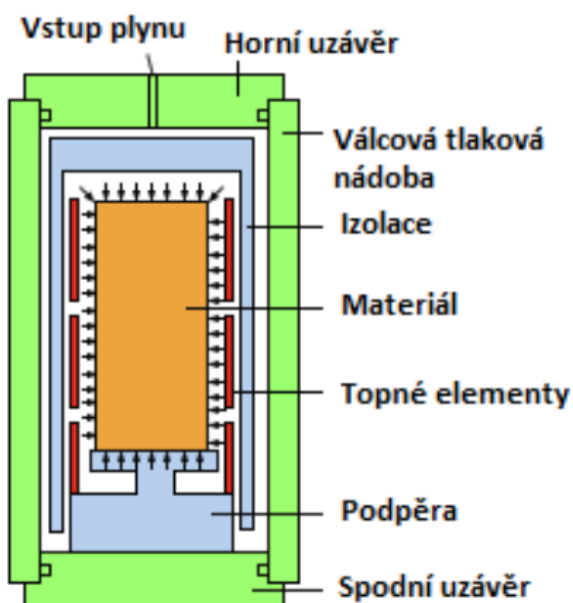
Součásti vyráběné metodou LPBF mají poměrně dobrou rozměrovou přesnost a drsnost povrchu. Pro dosažení předepsaných tolerancí je ale nutné součásti obrábět. Nejčastěji se provádí soustružením a frézováním. [28]



Obrázek 16 - Vliv obrábění na kvalitu povrchu tisknuté součásti [30]

3.3.5 Horké izostatické lisování HIP

Při tisku dosahujeme téměř 100% hustoty součásti. K potlačení zbývajících vnitřních mikroporozit se využívá horké izostatické lisování. Tato technologie využívá vysokou teplotu a rovnoměrný tlak. Jedná se o poměrně drahý proces, který se využívá především v leteckém průmyslu. [28] [29]



Obrázek 17 - Principiální schéma HIP [13]

3.3.6 Povrchové úpravy

V závislosti na aplikaci součásti se provádí povrchové úpravy (vyšší odolnost proti korozi, ořezu, zvýšení únavové pevnosti). [28] [31]



3.4 Kontrola

Na závěr musí být součást podrobena kontrole. Kontrola se provádí pomocí různých zařízení v závislosti na složitosti součásti. U jednoduchých součástí se kontrola provádí pomocí posuvného měřítka nebo třmenového mikrometru. U složitých součástí se využívají souřadnicové měřicí stroje kontaktní nebo bezkontaktní. Pro získání informací o vnitřní geometrii součásti se využívá výpočetní tomografie CT (rentgenové záření). K vyhodnocování kontury povrchu se používají drsnoměry. [2] [28]

3.5 DMLS (LPBF) stroje

Kovový 3D tisk se stal v posledních letech nejvýznamnější vývojovou technologií mezi aditivními technologiemi. První komerčně dostupný stroj uvedla na trh firma EOS roku 2004. Otevření této technologie pro volný trh nastal v roce 2014. V roce 2018 se prodalo o 80 % více tiskáren na kov než v předešlém roce a v dnešní době toto číslo stále roste. Na trhu se objevují stále noví výrobci, kteří vyvíjejí nové tiskárny a nové technologie. V posledních letech se objevilo více, než 40 nových výrobců. [2] [14]

3.5.1 Výrobci strojů

- **EOS GmbH**

Firma EOS je považována za průkopníky v oblasti kovového 3D tisku (LPBF). Tato firma je německého původu a je založena roku 1989. Kromě výroby tiskáren pro tisk kovu se zabývá také tiskárnami pro plastové materiály. Uživatel si může vybrat celkem z pěti druhů tiskáren, dle jeho požadavků na počet/výkon laseru, velikosti stavěcí komory a mnoho dalších parametrů. [14] [35]

- **Concept Laser GmbH**

Německá firma založená roku 2000 se zabývá výrobou LPBF a EBPBF strojů. V roce 2016 firma GE Additive koupila 75 % akcií společnosti Concept Laser a stala vedoucím akcionářem společnosti. V současné době mají na trhu 6 LPBF tiskáren, včetně tiskárny X Line 2000R, která je podle firmy největší LPBF tiskárnou na světě. Její velikost stavěcí komory je 800 x 400 x 500 mm a využívá duální laserový systém (2 x 1000 W). [14] [36]



- **Renishaw AM**

Britská společnost založena roku 1973. Tato společnost se zabývá nejen tiskárny na kov, ale vyrábí také konfokální mikroskopy, biologické a farmaceutické analyzátoři, sondy pro CMM a obráběcí stroje, a mnoho dalších produktů. V současné době má v nabídce dvě LPBF tiskárny, které se liší množstvím použitých laserů pro spékání. [14] [37]

- **SLM Solutions**

Německý výrobce LPBF tiskáren, který je na trhu 16 let a jako první uvedl na trh multi-laserový stroj. Tato firma je považována za lídra v oblasti prodeje a v současné době má v nabídce celkem 6 kovových 3D tiskáren. Se strojem NXG XII 600 zvedla firma průmyslovou laťku, neboť tento stroj má 12 laserů o výkonu 1 000 W. [14] [38]

- **3D Systems**

Americká společnost, která jako první společnost vstoupila na trh s 3D tiskárnou (v 80. letech představila stereolitografickou tiskárnu). V roce 2013 koupila francouzskou firmu Phenix Systems, aby expandovala do oblasti kovového 3D tisku. V nabídce mají celkem 6 LPBF tiskáren a jednu speciální na dentální výrobky DMP Dental 100. [14] [39]

- **Phenix Systems**

Francouzská společnost založená roku 2000. V roce 2013 prodala přibližně 80 % podílu firmě 3D Systems. [40]

- **AddUp**

Tato firma byla založena v roce 2016 jako podnik společností Michelin a Fives. Společnost vyvinula jednu tiskárnu LPBF (FormUp 350) a 3 tiskárny s technologií DED. [14] [41]

- **DMG Mori**

Německá společnost DMG Mori se spojila s japonskou společností a vznikla tak společnost DMG Mori Seiki. Tato firma se zaměřuje nejen na výrobu tiskáren na kov, ale nabízí CNC stroje pro soustružení, frézování a broušení. Výrobce má dvě tiskárny využívající technologii LPBF, pět tiskáren využívající L-DED, z nichž čtyři jsou hybridní stroje. [14] [42]



- **Trumpf**

Německá společnost založená v roce 1923, která se zaměřuje především na výrobu laserových řezacích strojů, ohraňovacích lisů a děrovacích strojů. Přivedla ale na trh také pět tiskáren LPBF a dvě tiskárny L-DED. [14] [43]

- **Aconity3D**

Německá firma prodávající stroje od roku 2014. Odlišnost této firmy je v možnosti konfigurování tiskáren dle vlastních požadavků. V současné době nabízejí celkem pět tiskáren LPBF, kde si může uživatel nakonfigurovat například velikost stavěcího prostoru, počet laserů, topné systémy a systémy pro monitorování procesu. Lze tedy přizpůsobit tiskárny aplikačním požadavkům a individuálním rozpočtům. [14] [44]

- **Velo3D**

Americký výrobce, který chce pomoci společnostem pomocí softwaru 3D Flow (zrychlený návrh součástí, snadná spolupráce zaměstnanců při návrhu a přípravě dílu pro tisk). Aby společnost mohla dokončit vývoj softwaru, vytvořila v roce 2018 svojí vlastní tiskárnu Sapphire vybavenou technologií Intelligent Fusion (tisk složitých součástí pomocí několika podpor). [14] [45]

- **Aurora Labs**

Australský výrobce, který přišel na trh v roce 2017. Nabízí cenově nejdostupnější tiskárnu v odvětví kovového 3D tisku (přibližně 65 000 USD). Jejich stroje jsou založeny na vícevrstevném souběžném tisku (technologie mezi PBF a DED). Výrobce uvádí, že stroje jsou 55x rychlejší než kterákoliv tiskárna založená na práškovém loži. [14]

- **Sharebot**

Italská společnost založená roku 2013. Firma se zabývá výzkumem a výrobou malých a středních kovových dílů (zubní a šperkařský průmysl). [14]

- **Xact Metal**

Firma založena roku 2017 v Pensylvánii. Jejich cílem je učinit 3D tisk kovů dostupnější pro více uživatelů. V současné době mají tři tiskárny založené na technologii LPBF. Poslední vyvinutý stroj XM300C nabízí velký stavební prostor, dva nebo čtyři lasery a má dvě komory se zásobníkem prášku, které zkracují dobu výroby a zvyšují tak produktivitu. [14] [46]



3.5.2 Dostupné stroje

EOS M 100

Tento stroj vyvinula firma EOS GmbH a spadá do malé a střední třídy tiskáren. Vyznačuje se snadnou výměnou a manipulací s práškem a také snadnou výměnou tisknutých součástí. Má velký potenciál pro zkrácení doby nastavení tisku, zvýšení produktivity, zlepšení ergonomie a bezpečnosti obsluhy stroje. Vybavený je 200 W vláknovým laserem, který je vhodný pro malé složité součásti pro lékařské aplikace (rychlá a efektivní výroba velkého množství malých dílů). Nastavení a vyčištění stroje je díky modulární vnitřní struktuře a zásobníku na prášek možné během několika minut. Materiál se snadno vyměňuje a údržba se provádí rychle. [28]



Obrázek 18 - Stroj EOS M 100 [28]



Parametry stroje:

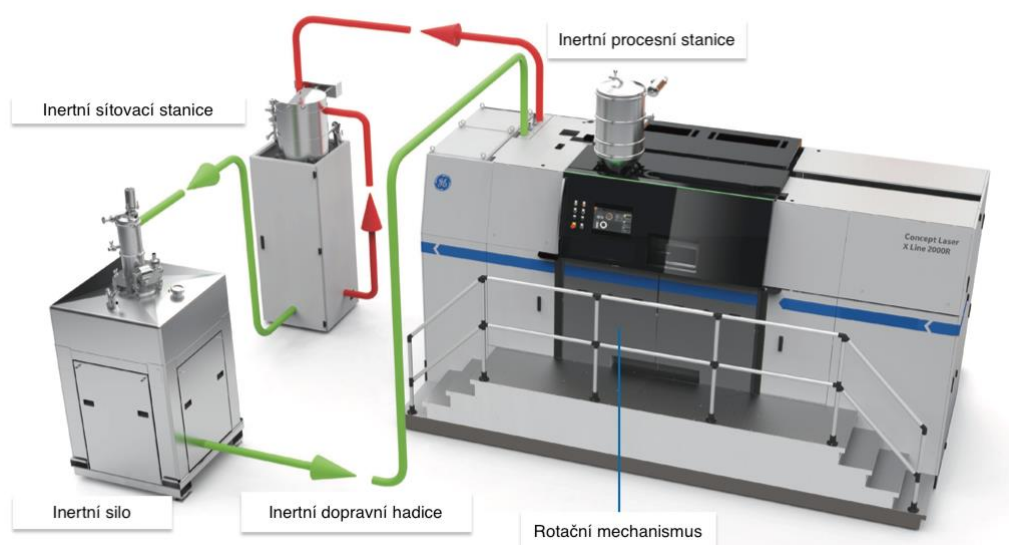
Tabulka 1 - Parametry stroje EOS M 100 [28]

Stavební prostor	Ø 100 mm x 95 mm
Laserový systém	Yb vláknový laser, 200 W
Optika	čočka F-theta, vysokorychlostní skener
Rychlost skenování	až 7 m/s
Průměr zaostření	40 µm
Napájení	200 ÷ 240 V
Spotřeba energie	max. 1,7 kW/průměrně 0,6 kW
Zásobování inertním plynem	max. 4 hPa, 50 l/min.
Spotřeba inertního plynu	pro zaplnění: do 600 l, během stavby: do 2,5 l/min.
Rozměry stroje (Š x H x V)	800 x 950 x 2 250 mm
Hmotnost	580 kg

X Line 2000R

Tiskárna od firmy Concept Laser GmbH, která se považuje za stroj s největší stavební komorou na trhu. Hlavní využití je v leteckém a automobilovém průmyslu. Tento stroj má komoru pro duální zpracování, které umožňuje obsluze nastavit nový tisk, zatímco se tiskne další. Mechanismus se otáčí o 180°, což snižuje prostoje a zvyšuje produktivitu. Inteligentní software zajišťuje, že lasery nikdy nepracují „in-line“, takže mají trvale čistou optickou trajektorii bez sazí. [47]

Obsahuje unikátní systém pro manipulaci s práškem, který se automaticky dopravuje v uzavřeném okruhu. Nepoužitý prášek z přepadových nádob jde do inertní prosévací stanice (odstranění velkých částic), následně do sila a poté zpět do stroje. Tím se vylučuje kontakt obsluhy s práškem a je zde vyšší bezpečnost při manipulaci s reaktivními materiály. [47]



Obrázek 19 - Stroj X Line 2000R se systémem pro manipulaci prášku [47]

Parametry stroje:

Tabulka 2 - Parametry stroje X Line 2000R [47]

Stavební prostor	800 x 400 x 500 mm (x, y, z)
Tloušťka vrstvy	30 ÷ 150 μm
Rychlost výroby	až 120 $\text{cm}^3/\text{hod.}$ (v závislosti na materiálu, geometrii a parametrech)
Laserový systém	2x 1 000 W vláknové lasery
Max. skenovací rychlost	7 m/s
Průměr zaostření	100 ÷ 500 μm
Spotřeba energie	průměrná spotřeba 13 kW
Napájení	400 V, 50 A, 50 ÷ 60 Hz
Zásobování inertním plynem	1 plynová přípojka
Spotřeba inertního plynu	17 ÷ 34 l/min.
Rozměry (Š x H x V)	5 235 x 3 655 x 3 604 mm
Hmotnost	9 500 kg

NXG XII 600

Stroj vyrobený firmou SLM Solutions je navržen pro velkoobjemovou sériovou výrobu a považuje se za revoluční stroj v aditivní výrobě. Při návrhu tohoto stroje byl kladen důraz na produktivitu, velikost, spolehlivost a bezpečnost.



S 12 lasery o výkonu 1 000 W se zvýšila produktivita a snížily náklady na výrobu součástí. Tento stroj je až 20x rychlejší než standartní stroj s jedním laserem, 5x rychlejší, než stroj se 4 lasery a je schopný vyrobit až 10 000 kg součástí ročně. Stroj je optimalizován pro výrobu velkých součástí pro letecký a automobilový průmysl. [48]



Obrázek 20 - Stroj NXG XII 600 [48]

Parametry stroje:

Tabulka 3 - Parametry stroje NXG XII 600 [48] [49]

Stavební prostor	600 x 600 x 600 mm (x, y, z)
Rychlost výroby	1 000 cm ³ /hod.
Laserový systém	12x 1 000 W laser
Průměr zaostření	80 ÷ 160 μm
Vyrovnávací nádrž	235 l
Max. stavební objem	216 l
Přibližná cena	13 mil. Kč



XM200C

Tiskárna od americké firmy Xact Metal, která je vhodná především pro univerzity, laboratoře a malé a střední podniky. Hlavní využití je v oblasti prototypování nástrojů nebo u odlitků malého objemu. Technologie tisku je postavena na patentované platformě „Xact Core“, neboli vysokorychlostní portálový systém, který se pohybuje po ose x a y. Udržuje tak konstantní laserový úhel (paprsek je neustále kolmý na celou plochu práškového lože), což zaručuje stejné vlastnosti v celé tisknuté součásti. Zajímavostí je nanášec, který čeká na udělení patentu. Má tvar „žárovky“ a poskytuje zhuštění obdobné klasickým nanášecům. Otevřená platforma umožňuje uživatelům vyvíjet vlastní tiskové parametry a používat vlastní prášek. Výhodou tiskárny je snadná manipulace díky nízké hmotnosti a čtyřem kolečkám, na kterých je umístěna. [32] [34]



Obrázek 21 - Tiskárna XM200C [34]



Parametry stroje:

Tabulka 4 - Parametry stroje XM200C [34]

Stavební prostor	127 x 127 x 127 mm (x, y, z)
Laserový systém	100 W Yb vláknový laser (200 W)
Průměr zaostření	větší než 20 μm
Skenovací rychlost	650 mm/s
Napájení	120/240 V, 50/60 Hz
Spotřeba energie	1,5 kW (max. 2 kW)
Uživatelské rozhraní	7“ dotyková obrazovka
Rozměry (Š x H x V)	610 x 610 x 1 295 mm
Hmotnost	205 kg

3.5.3 Parametry strojů

Výrobci si sami volí jednotlivé parametry strojů a nelze určit kritérium, podle kterého lze stroje řadit do kategorií. Nejčastěji se ale kupující zaměřují na velikost stavebního prostoru, počet laserů a jejich výkon. [2]

Volba typu stroje závisí na potřebách zákazníka. Mezi hlavní parametry sinterovacích zařízení patří:

- Velikost stavebního prostoru – desítky až stovky mm
- Počet laserů – od jednoho laseru po desítky laserů
- Výkon laseru – desítky W až kW
- Rozmezí tlouštěk sinterované vrstvy – desítky μm
- Maximální rychlost pohybu laserového svazku [m/s]
- Příkon [kW]
- Typ laseru – CO₂ nebo vláknové lasery dopované prvkem Ytterbia
- Průměr ohniska – desítky až stovky μm
- Spotřeba inertního plynu

Mezi další parametry patří způsob provedení stroje a jeho příslušenství. Do těchto kategorií spadá hlavně provedení komory pro reaktivní plyny, dávkovač prášku, prosévací zařízení, integrovaný vysavač a generátory dusíku.

[2]



3.5.4 Příprava stroje

Před samotným zahájením tisku je příprava stroje nedílnou součástí všech aditivních technologií. Nejdříve si připravíme stavební paletu, kterou je nutné očistit, otryskat, odmagnetovat a v případě opakovaného použití frézovat zbytkový materiál (lepší spojení s prvními vrstvami a eliminace nebezpečí odrazu paprsku do optických čoček). V dalším kroku je důležité zkontrolovat čistotu stavební komory a nanášedce (včetně jeho demagnetizace) po předchozím tisku. Pokud pracujeme s reaktivními kovy (Al, Ti) je nutné všechno nářadí, měrky, štětce a upínací šrouby umístit do přípravné komory stroje a zaplavit je inertním plynem. V případě nedostatku kovového prášku je nutné jeho doplnění (ručně z lahve nebo přepuštěním z kontejneru). Posledním krokem před zahájením tisku je nastavení počátečního bodu na stavební paletě a nastavení počáteční vzdálenosti mezi nanášedcem a stavební paletou, které se provádí dotlačením nanášedce na položenou měrku. [2] [5]

3.5.5 Čištění stroje po spékání a jeho údržba

Po dokončení tisku se odstranění prášku provádí ručně (smetení a následné odsátí) nebo automatickým odsátím v uzavřené pracovní komoře. V případě použití jiného materiálu je důležité úplně vyčistit stroj a vyměnit filtry. [2]

V rámci údržby je důležité vyprazdňování filtrovací cartridge (jednou ročně její výměna), kontrola čoček, zda se neodlupuje povrch (pravidelně je čistit, každých 2 000 operačních hodin) a kontrola hadic přivádějících inertní plyn (tlaková zkouška). [2]

3.6 Omezující parametry technologie DMLS (LPBF)

Mezi podstatné parametry, které ovlivňují kvalitu tisku patří prášek, stroj, model a operátor. Kvalita kovového prášku hraje v aditivní výrobě velmi významnou roli, protože má výrazný vliv na mechanické vlastnosti. Kvalitu prášku před otevřením barelu stanovuje výrobce. Po otevření je na provozovateli, jak bude prášek udržovat v požadované kvalitě. [19]

Dalším významným faktorem, který má vliv na výsledek tisku je stroj. Provozovatel může tento faktor ovlivňovat správným provozem stroje a údržbou jednotlivých částí (především filtrů). [19]



Model je prvním faktorem, který má vliv na rozměrovou přesnost a drsnost součásti. Pokud je předem známo, že se součást bude vyrábět aditivním způsobem, je dobré součást konstrukčně přizpůsobit této technologii, aby se zefektivnila výroba a také kvalita součásti. [19]

Posledním faktorem ovlivňujícím kvalitu tisku je operátor, který nastavuje jednotlivé vstupní parametry výrobního procesu. Mezi hlavní parametry patří orientace součásti, podpůrné struktury, tloušťka vrstvy a parametry tisku. Tyto jednotlivé parametry mají výrazný vliv na výslednou kvalitu povrchu, pnutí, pórovitost a smrštění. [19]

3.6.1 Procesní parametry technologie

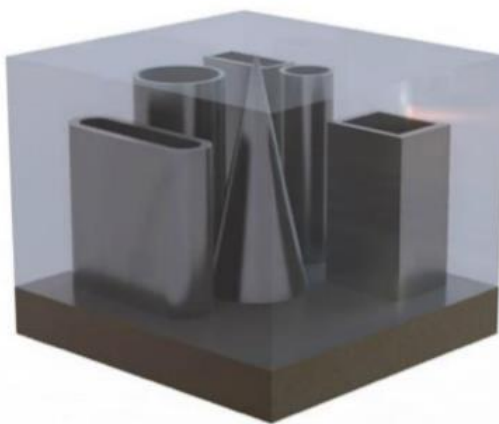
Konečné mechanické vlastnosti, stav povrchu, rozměrová přesnost, časová náročnost a výrobní náklady závisí na několika procesních parametrech, mezi které patří:

- Způsob podporování součásti
- Orientace součásti při tisku
- Tloušťka tisknuté vrstvy
- Hustota a strategie řádkování laseru
- Výkon laseru a tloušťka svazku
- Rychlost pohybu svazku
- Způsob expozice plochy a kontury

[2]

3.6.2 Pracovní prostor

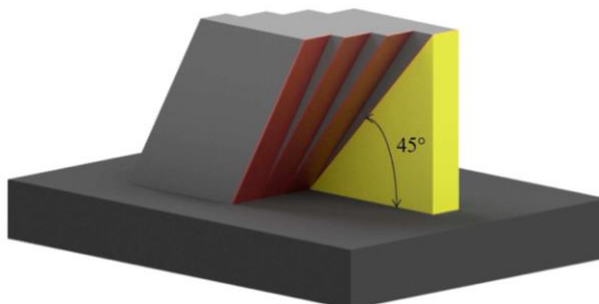
Stavební palety jsou vyráběny dle velikosti pracovního prostoru stroje. Obvykle o rozměrech 250x250 mm a výšce 215 mm nebo 315 mm. Z důvodu využití celého pracovního prostoru je vhodné skládat stejné součásti na sebe. Po dokončení tisku a odstranění součástí se zbytkový materiál na stavební paletě odstraní obráběním a ta se může znovu použít. [2] [33]



Obrázek 22 - Stavební paleta [33]

3.6.3 Samonosné úhly

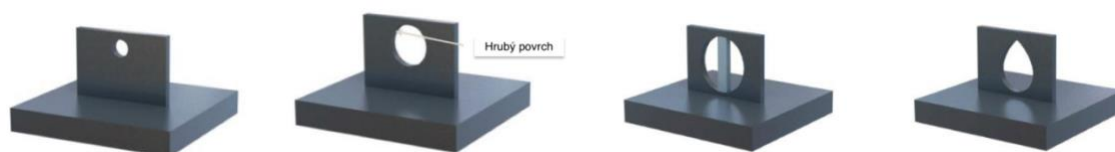
Tímto úhlem se rozumí úhel mezi stavební paletou a prvkem. Obecně platí, že je dobré se vyhnout samonosnému prvku, který je $<45^\circ$. Pokud je úhel menší než 45° , doporučuje se přidání podpěry, která zabrání zborcení prvku. Nevýhodou podpěr je jejich odstranění po dokončení tisku. Velikost samonosného úhlu je ovlivněna druhem použitého materiálu a také strojem. Některé stroje umožňují tisknout bez podpěr pod úhlem do 25° . Pro nerezové oceli je hodnota úhlu bez podpěr 30° , pro titan 20° až 30° a pro superslitiny a hliník 45° . [2] [33]



Obrázek 23 - Samonosné úhly [2]

3.6.4 Otvory a kanálky

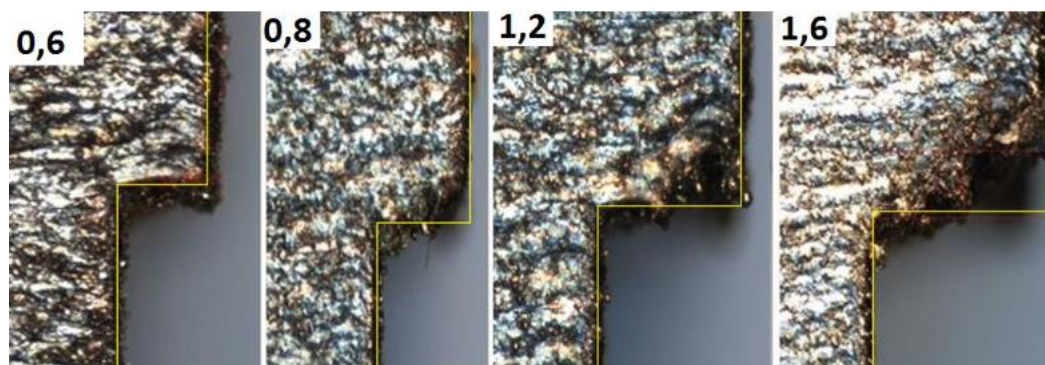
Obecně se doporučuje průměr nepodepřeného otvoru 6 až 8 mm. U otvorů s větším průměrem dochází k zdrsnění a deformaci horního povrchu a je nutné tyto otvory dodatečně obrábět. Proto se u otvorů, které jsou větší, než 8 mm doporučuje použití podpěr do středu otvoru nebo použití otvoru ve tvaru kapky nebo diamantu. Dolní hranicí otvorů je průměr 0,5 mm, neboť u takto malých průměrů může dojít k spojení stěn a zaplnění prázdného otvoru. [2] [33]



Obrázek 24 - Otvory při tisku [33]

3.6.5 Převisy

Za převisy považujeme změnu v geometrii součásti, kdy úhel s vodorovnou rovinou je větší než 45° . Nejčastěji se vyžadují podpěry u součástí, které mají převis větší než 0,5 mm. Nevýhodou těchto převisů jsou náklady na čas, energii, materiál a dodatečné opracování. Ideální je navrhnutí součásti bez podpěr, ale realita je taková, že jen zřídka je možné navrhnout takové součásti. Ideálním řešením je navrhnutí součásti se zkosením s konkávním nebo konvexním tvarem. [2] [33]



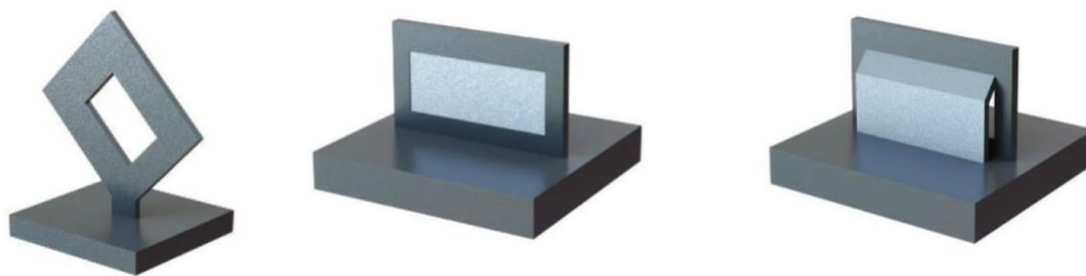
Obrázek 25 - Detail vytištěných převisů [19]

3.6.6 Mosty

U mostů je přípustná vzdálenost mezi jednotlivými prvky bez podpěr maximálně 2 mm. U delších vzdáleností je nutné použití podpěr, nebo vhodná změna tvaru. Součásti přesahující tuto vzdálenost mají špatnou kvalitu povrchu a jejich tvar neodpovídá návrhu. Pokud mají mosty u součásti funkci snížení hmotnosti, je vhodné použít půlkruhové zakončení. [2] [33]

3.6.7 Vynucené mosty

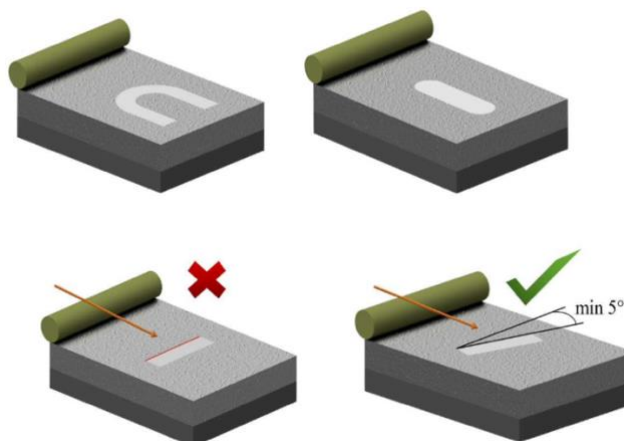
V případě vynucených mostů je podpora nezbytnou součástí. Může se jednat o podpěru, která zaplní celý otvor, nebo lze použít odsazenou podpěru, kterou lze snáze odstranit. Alternativním řešením je změna orientace součásti (otočení o 45°), kdy budou všechny plochy pod úhlem a odstraní se tak potřeba podpěr. [2] [33]



Obrázek 26 - Možnosti řešení vynucených mostů [33]

3.6.8 Pozice a orientace součásti v rovině

Orientace součásti v rovině má významný vliv na výrobní čas, kvalitu povrchu a smrštění součásti. Proto musí být provedena v závislosti na funkci součásti. Nanášec, který pokládá další vrstvu prášku může působit na nově vzniklou vrstvu silou, a proto je orientace součásti důležitá. Ideální geometrií je tedy kruhový profil, otevřený U-profil a jim podobné. Mezi nejhorší geometrie patří tenký dlouhý průřez rovnoběžný s nanášecem. V tomto případě je dobré pootočit ploché povrchy minimálně o 5° od roviny nanášече. [19] [33]



Obrázek 27 - Vhodná a nevhodná řešení orientace součásti v rovině [2]

3.6.9 Pozice a orientace součásti v prostoru

Při orientaci součásti v prostoru je vhodné řešení naklonění součásti, které má vliv na snížení ořepů a ostrých rohů, redukci počtu a velikosti podpěr, úsporu materiálu a minimalizace nákladů na dodatečné opracování. [2]

3.6.10 Štěrbiny

Při tisku štěrbin je stěžejní vliv pnutí, který u štěrbin o velikosti přibližně 0,05 mm způsobí neprůchodnost. U štěrbin o rozměru 0,1 mm se dosáhlo plné průchodnosti. [2]

3.6.11 Výška prvků

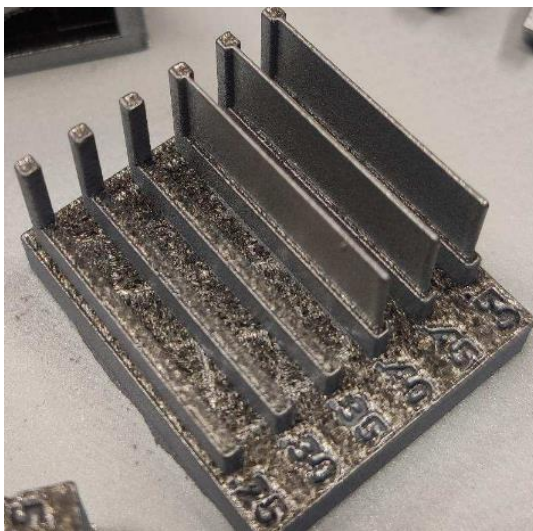
Platí pravidlo, že maximální poměr mezi výškou a tloušťkou součásti je 8:1. V případě vyšších poměrů hrozí nebezpečí ohnutí součásti nebo vytvoření nerovnosti působením síly od nanášeče. Přesné proporce závisí vždy na geometrii součásti, ale aby se těmto problémům předešlo provádí se přemostění vertikálních prvků. Nejvhodnější je obloukový most, u kterého odpadá nutnost použití podpěr. [33]



Obrázek 28 - Přemostění vysokých součástí [33]

3.6.12 Tloušťka stěn

Tloušťka stěn součásti se odvíjí od použitého stroje a materiálu a také od nastavených parametrů tisku. Například na stroji Concept laser M2 Cusing při tisku hliníkové slitiny CL31 AL (AlSi10Mg) je nejmenší možný tisk žebra o tloušťce stěny 0,4 mm. [2]



Obrázek 29 - Nejmenší možná tloušťka stěny u hliníkové slitiny CL21 AL [2]

3.6.13 Rozměr kolíku

Rozměry kolíků s kruhovým průřezem a čtvercovým průřezem jsou závislé na jednotlivých proměnných obdobně jako tloušťka stěn. Při tisku hliníkové slitiny CL31 AL na stroji Concept laser M2 Cusing se dosáhlo nejmenšího vytisknutého kolíku o

průměru 0,4 mm a u čtvercového kolíku minimální délky hrany 0,45mm. Při překročení délky kolíku v jednotkách mm dochází k jejich ohnutí a při manipulaci k ulomení. [2]

3.6.14 Sbíhání

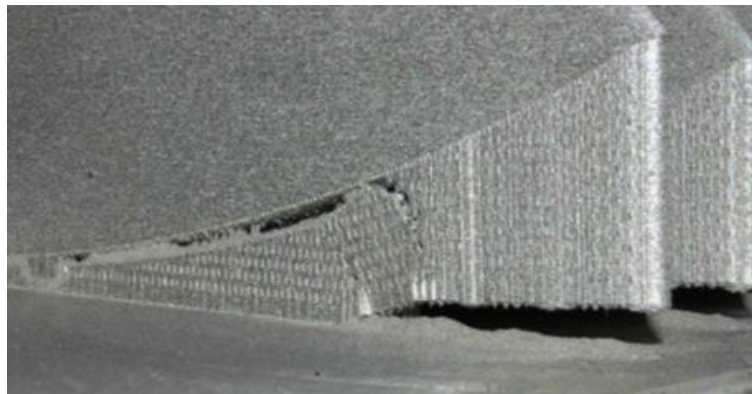
U součástí tvaru převráceného „v“ s rostoucí výškou klesá pevnost součásti a také hrozí riziko odklonění od navržené geometrie. V krajním případě může dojít k neprotnutí geometrií na vrcholu. Z toho důvodu vyžadují součásti jednoduchý podpůrný prvek uprostřed součásti, který zvýší její tuhost před jejím dokončením. Pokud je důvodem pro otevřenou strukturu pouze snížení hmotnosti, je vhodné součást perforovat děrami o průměru menším než 6 mm. Ty sníží výrazně hmotnost součásti a zároveň nevyžadují nutnost podpěr. [2] [33]



Obrázek 30 - Umístění podpěr a perforování součásti otvory [33]

3.6.15 Pnutí

Zbytkové napětí, které vzniká v součásti nanášením jednotlivých vrstev (opakovaný ohřev a ochlazování) může při dotyku součásti s velkou plochou stavební palety způsobit problémy. Pokud toto napětí překročí mez pevnosti v tahu tištěného materiálu nebo stavební palety, může dojít k deformaci, praskání, oddělení součásti/podpěr od stavební palety anebo k ohnutí stavební palety. Tyto problémy mohou způsobit poškození nanášeče při jeho nárazu do součásti a nepřesný tisk součásti. Z těchto důvodů je nutné dbát na vhodné umístění podpěr a úpravu geometrie na nejmenší stykovou plochu se stavební paletou. [2] [33]



Obrázek 31 - Oddělení podpor od stavební palety [33]

3.6.16 BOZP rizika

Při práci na stroji přichází obsluha do styku s reaktivními materiály a nebezpečnými plyny. Tyto prášky a plyny mohou způsobit nebezpečí výbuchu (v případě reaktivních materiálů), poranění očí, plic, kůže a mohou mít karcinogenní účinky. Z těchto důvodů je nutné používání ochranných pracovních pomůcek jako jsou rukavice, těsně padnoucí brýle, respirátor, uzemňující náramek, ochranný oděv (bavlněná kombinéza) a antistatickou obuv. Nebezpečí výbuchu nezpůsobují pouze plyny, ale také práškové materiály, a proto je důležité zohledňovat mezní teploty udávané v materiálových listech. Důležitý je také pravidelný úklid, aby se prach v laboratořích nehromadil, ale i pravidelný monitoring čistoty ovzduší. [2] [20]

3.7 Výhody a nevýhody technologie DMLS (LPBF)

Nevýhody:

- Nelze tisknout uzavřené dutiny, protože poté nelze odstranit prášek
- Horší přesnost při tisku oblouků, klenb a otvorů
- Při tisku ploch pod úhlem je nutné použití podpěrných prvků
- Vysoké pořizovací náklady
- Časová náročnost, drobná degradace laseru a optiky
- Postprocessing – žíhání pro odstranění vnitřního pnutí, obrobení funkčních ploch (vysoké drsnosti povrchu), odstranění podpěr/odstranění součásti od stavební palety
- Nutná korekce modelu z důvodu smršťování



Výhody:

- Minimální množství přebytečného materiálu
- Opětované použití přebytečného materiálu (snížení nákladů na výrobu)
- Prototypová výroba
- Redukce hmotnosti
- Výroba atypických dílů
- Malé série – absolutně pružný výrobní systém
- Vnitřní struktury výrobků jinou technologií nedosažitelné
- Úspora nákladů na složité nástroje

[2] [5]



4 Dostupné materiály

Materiály používané pro 3D tisk prošly dlouhým vývojem. Na trhu se objevuje velké množství různých materiálů v různých formách. Dle specifické aplikace a použité technologie volíme druh a formu materiálu. V praxi se můžeme setkat se třemi základními formy materiálu, které jsou v tekuté, práškové nebo pevné formě. Mezi nejpoužívanější druh materiálu patří plast a kov. Další materiály, které tvoří menšinovou oblast jsou keramika, pískové formy pro odlévání, kompozity, biomateriály a vosk. [2]

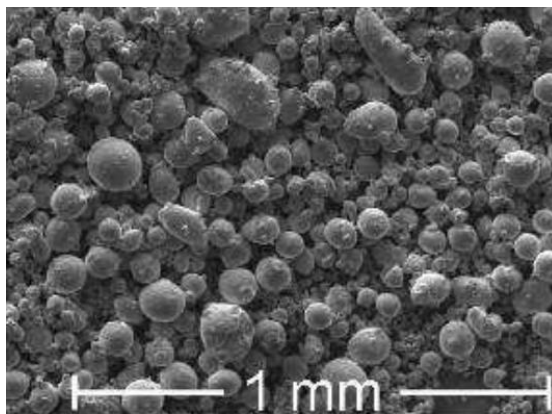
4.1 Ocelové prášky pro technologii DMLS (LPBF)

Pro metodu LPBF se používá plynem atomizovaný prášek s nezoxidovaným povrchem. Kvůli optimálnímu rozložení prášku v prostoru mají zrna sférického tvaru velikost 10 až 40 μm (dochází k maximální objemové hustotě prášku a maximálnímu vyplnění prostoru).

Nelze spékat jakýkoliv prášek na jakémkoliv stroji. Každý výrobce stroje ve většině případů prodává vlastní prášky. Aby se koncový uživatel z důvodu dosažení požadovaných vlastností výrobku vyhnul dlouhému a samostatnému zkoumání nastavení parametrů stroje, poskytuje tyto informace výrobce prášků. Pokud jsou tyto parametry špatně nastaveny, může se ve výrobku vyskytovat porozita, která snižuje korozivzdornost, způsobuje netěsnost výrobku a degraduje mechanické vlastnosti (hlavně KCU a KCV).

Při zpracování reaktivních materiálů (slitiny titanu a hliníku) disponuje prášek volným povrchem a může tak reagovat se vzdušným kyslíkem. Touto reakcí může dojít k nebezpečí výbuchu nebo k vytváření nežádoucích oxidických vrstev a následné degradaci výrobku. Z těchto důvodů je nutné zpracovávat tyto materiály na strojích s vnitřní ochranou atmosférou.

[2]



Obrázek 32 - Prášek pro metodu DMLS (LPBF) [2]

4.1.1 Výroba prášku

Výsledné vlastnosti prášku závisí na zvolené výrobní technologii. Největší rozdíly můžeme pozorovat ve velikosti, chemických vlastnostech a morfologii částic. Důraz je kladen na získání materiálu o relativně vysoké hustotě a dobrých tokových a homogenních vlastnostech.

Technologie výroby:

- Drcení a mletí
- Fyzikálně mechanické způsoby
- Chemická cesta
- Atomizace

[16]

4.1.2 Sledované vlastnosti

Chování prášku v průběhu procesu jejich přeměny závisí na mnoha parametrech. Čím více informací víme o výchozím prášku, tím lépe můžeme zhotovit konečný výrobek (s menšími odchylkami vlastností). Při charakterizaci prášků je důležité hodnotit jednak vlastnosti individuálních částic, ale i jejich kolektivní vlastnosti. [13]

Základní vlastnosti prášků jsou nejdůležitější a musí být co nejpřesněji definovány. Patří mezi ně velikost a tvar zrn, rozložení zrn, mikrostruktura, mikrotvrdost, pórovitost a měrný povrch částic. Technologické vlastnosti jsou vlastnosti velkého množství různých práškových částic a odvíjejí se od základních vlastností. Řadíme mezi ně sypký objem/hustotu, slinovatelnost a krycí schopnost prášku. Posledními skupinou jsou vlastnosti sdružené, které závisí na základních i technologických vlastnostech a jedná se

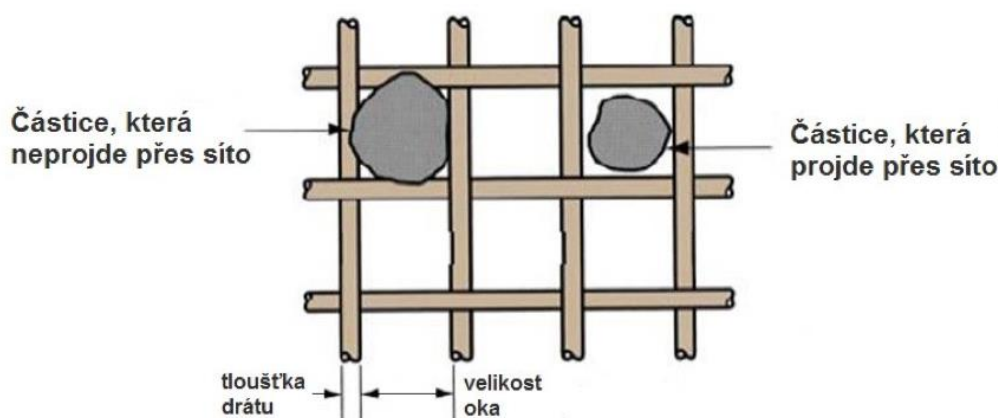
především o vlastnosti fyzikální povahy (elektrická a tepelná vodivost, magnetické vlastnosti, teplota tání a struktura krystalů). [13]

4.1.3 Stanovení základních vlastností kovových prášků

Ke stanovení velikosti zrna se nejčastěji používá síťová analýza, sedimentační metoda anebo stanovení velikosti a tvaru zrna pomocí mikroskopu.

Síťová analýza se používá pro stanovení distribuce velikosti částic $>50 \mu\text{m}$ (pomocí speciální sítě až $5 \mu\text{m}$). Detailní podmínky této metody jsou popsány v normě ČSN ISO 4497. Principem této metody je uvedení soustavy sítí do kmitavého pohybu (140 až 160 cyklů/min.), kdy částice propadávají do jednotlivých pater sítí, podle jejich velikosti. Jednotlivá síta jsou tvořena drátěným pletivem s přesně definovanou vzdáleností mezi jednotlivými dráty a tloušťkou drátu. Pomocí této soustavy sítí rozdělíme jednotlivé částice dle jejich velikosti.

[2] [13]



Obrázek 33 - Princip síťové analýzy [13]

Sedimentační metodou se určuje velikost částic na základě jejich rychlosti klesání v klidném prostředí (kapalina nebo vzduch). [13]

Mikroskopem se měří částice, které jsou menší než nejmenší síťová frakce. Mikroskop volíme podle jeho rozlišovací schopnosti (světelný mikroskop: $0,3$ až $0,5 \mu\text{m}$, elektronový mikroskop: 10 až $0,003 \mu\text{m}$). [13]

4.1.4 Úpravy prášku

Velmi často není vyrobený prášek připravený pro přímé aplikace a je nutné provádět jeho úpravu. Žiháním se odstraňují oxidické vrstvy, které vznikly vlivem okolních podmínek. Kvůli vysoké reaktivitě je důležité, aby se žiháný prášek co nejdříve zpracoval.

Žihání se provádí v pecích na slinování, v atmosféře vodíku nebo štěpného plynu s NH_3 . Kovy Al, Cr, Mo a Ti nelze žiháním zbavit oxidické vrstvy, a proto se musí vyrábět způsobem, který zabrání kontaminaci prášku kyslíkem.

Mezi další způsob patří legování, které má vliv na technologické vlastnosti prášku, slinovací proces a také na finální vlastnosti tisknutého výrobku. Rozdělují se od těchto tří skupin:

- Před legované prášky – tavenina má finální chemické složení a jednotlivá zrna jsou si chemicky podobná, připravují se atomizací taveniny a mají vysokou tvrdost.
- Částečně (difuzně) legované prášky – legující částice jsou pevně spojeny s původními zrny a omezuje se tak segregace během spékání, vyrábějí se mísením elementárních nebo předlegovaných prášků s následným difuzním žiháním.
- Směsné (hybridní) prášky – dolegování před spékáním, mísení předlegovaných nebo částečně legovaných prášků s elementárními (čistými) prášky, jsou náročné na zajištění homogenní směsi.

[2] [13]



Obrázek 34 - Způsoby legování prášků [13]

4.2 Dostupné materiály pro DMLS (LPBF)

Na trhu s práškovými materiály pro laserové spékání se můžeme setkat s velkým množstvím výrobců. Kromě samotných výrobců tiskáren, kteří vyrábějí svoje prášky se do výroby kovových prášků přidaly také velké metalurgické firmy. Vzhledem k narůstajícímu množství konkurenčních firem v dodávání prášku dochází k mírnému poklesu ceny. Podstatnou výhodou u výrobců prášků, kteří zároveň vyrábějí stroje je optimální sladění materiálu, parametrů procesu a stroje. Tato kombinace zajišťuje stejné vlastnosti součástí při opakované výrobě a uživatel nemusí zkoumat vhodné nastavení jednotlivých parametrů pro daný materiál a stroj. Kromě běžně dostupných

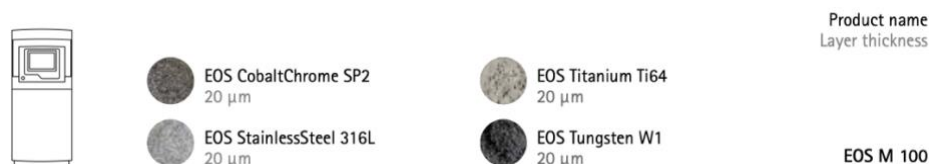
materiálů, nabízí firmy výrobu materiálu na míru (dle konkrétní aplikace nebo požadavků na materiál). [2] [50]

Na trhu s kovovými prášky se můžeme setkat s celou řadou materiálů jakou jsou korozivzdorné oceli, nástrojové oceli, rychlořezné oceli, maraging oceli a superslitiny na bázi Cr, Mo, Co, Mn, Ni, Ti a další. Výrobci prášků si označují jednotlivé materiály vlastními názvy. V tabulce 5 jsou uvedeny nabízené materiály od různých výrobců. [2] [50]

Tabulka 5 - Druhy materiálů a jejich výrobci [50] [51] [52] [53] [54] [55]

Výrobce/materiál	SS 316L	17-4 PH	AlSi10Mg	IN718	Ti6Al4V	Maraging (1.2709)
EOS GmbH		•	•	•	•	•
GE Additive	•	•	•	•	•	
3D Systems	•	•	•	•	•	•
Optomec, Inc.		•			•	
SLM Solutions		•	•	•	•	
Renishaw			•	•	•	•

Výrobci dodávají k práškům doporučení, ve kterých je uvedena kompatibilita prášků s jednotlivými stroji. Například u firmy EOS GmbH je pro stroj M 100 uvedena kompatibilita se 4 materiály (obrázek 35). Vzhledem k velikosti stavěcího prostoru a kompatibilních materiálů je vhodná především pro lékařské aplikace. Proto je při výběru tiskárny důležité brát ohled nejen na technické parametry stroje, ale také na kompatibilitu s jednotlivými prášky. Téměř každý výrobce dodává k práškům materiálové listy, ve kterém jsou informace o prášku, procesních parametrech, tepelném zpracování, fyzikálních a mechanických vlastnostech a o doplňujících informacích. Uživatel se díky těmto materiálovým listům vyhne zdlouhavému zkoumání vlivu jednotlivých parametrů a tepelného zpracování na konečné vlastnosti výrobku. [50]



Obrázek 35 - Kompatibilní materiály s tiskárnou EOS M100 [57]

Pro maraging ocel 1.2709 (EOS MaragingSteel MS1) tisknuté na stroji EOS M290 v ochranné atmosféře dusíku o tloušťce vrstvy 40 μm, minimální tloušťce stěny 0,3 až



0,4 mm a rychlosti stavby 4,2 mm³/s, s následným tepelným zpracováním (rozpuštěcí žihání při teplotě 940 °C po dobu 2 hodin s následným ochlazením na vzduchu + umělé stárnutí při teplotě 490 °C po dobu 6 hodin s ochlazením na vzduchu) uvádí firma EOS GmbH v materiálových listech následující dosažitelné vlastnosti (tabulka 6). [56]

Tabulka 6 - Materiálový list s vlastnostmi tištěné maraging oceli 1.2709 [56]

Hustota	8 ÷ 8,1 g/cm ³
Rozměrová přesnost	
Malá součást	přibližně ± 50 μm
Velká součást	přibližně ± 0,1 %
Drsnost povrchu po kuličkování	Ra 4 ÷ 6,5 μm
	Rz 20 ÷ 50 μm
Tvrдость	50 ÷ 57 HRC
R_m (horizontální)	2080 MPa
R_m (vertikální)	2080 MPa
R_{p0,2} (horizontální)	2010 MPa
R_{p0,2} (vertikální)	2000 MPa
A (horizontální)	4 %
A (vertikální)	4 %

4.3 Maraging oceli

Maraging oceli jsou speciální třídou vysokopevných ocelí. Tyto oceli se vyznačují velkým množstvím legujících prvků a z tohoto důvodu jsou oproti ostatním slitinám drahý materiál. Mezi přední vlastnosti patří vysoká pevnost, svařitelnost, tvrdost a tažnost. Uhlíku je v těchto ocelích velmi malé množství, neboť se považuje za nečistotu. Díky tomu se oceli lépe vytvrzují, jsou lépe tvářitelné a mají lepší kombinaci pevnosti a houževnatosti. Vytvrzení neprobíhá tvorbou karbidů, ani uhlíkovým martenzitem. Zajišťují ho intermetalické sloučeniny na bázi niklu. Hlavními legujícími prvky těchto ocelí jsou nikl, kobalt, molybden, titan a hliník. Díky vysokému obsahu niklu se snadno získává martenzitická struktura. [9] [10]

Objev Deckera a kolektivu o účinku kombinace přísad na jednotlivé vlastnosti oceli vedly na počátku 60. let k zavedení standartních tříd maraging ocelí, které jsou uvedeny v tabulce 7. Obecně se chemické složení maraging ocelí pohybuje obsahem uhlíku do



0,03 %, vyšším množstvím niklu (17 až 19 %), spolu s menším množstvím kobaltu (8 až 10 %), molybdenu (3 až 5 %), titanu (0,2 až 1,8 %) a hliníku (0,1 až 0,15 %). Dalším důvodem nízkého obsahu uhlíku je zabránění tvorby TiC, který výrazně snižuje houževnatost a tažnost. [11]

Tabulka 7 - Chemické složení a mez kluzu maraging ocelí [11]

Ocel	C [%]	Ni [%]	Co [%]	Mo [%]	Ti [%]	Al [%]	Teplota stárnutí [°C]	Mez kluzu [MPa]
18-NiCo(200)	<0,03	18	8,5	3,3	0,2	0,1	480	1316
18-NiCo(250)	<0,03	18	8	4,8	0,4	0,1	480	1635
18-NiCo(300)	<0,03	18,5	9	4,8	0,7	0,1	480	1835
18-NiCo(350)	<0,03	18	12	3,2	1,5	0,1	480	2427
18-NiCo(400)	<0,03	13	15	10	0,2	-	525	2530
18-NiCo(500)	<0,03	8	18	14	0,2	-	-	-

Termín „MarAging“ je odvozen ze slov „Martensite“ a „Age-hardening“. Maraging oceli se používají v mnoha vojenských a průmyslových odvětvích, především v leteckém a kosmickém průmyslu, ale také v automobilovém průmyslu. V leteckém průmyslu se velmi často používá pro podvozky letadel a vrtulníků, kryty motorů, hřídele tryskových motorů, výkyvné prstencové čepy a pružné hnací hřídele vrtulníků. V automobilovém průmyslu se používají pro hnací hřídele, spojovací tyče a pro konce převodovek a náprav. Ve vojenském průmyslu jako lehké přenosné mosty, kryty motorů a jako pružiny pro zpětný ráz děla. Velké zastoupení mají také v oblasti výrobních nástrojů, kde se z nich vyrábí zápustky pro kování (za tepla i za studena), formy pro odlévání, raznice a redukční trny. [9] [11] [12]

4.3.1 Tepelné zpracování maraging ocelí

Nejprve se provádí rozpouštěcí žhánání, při kterém dochází k rozpouštění a disperzi legujících prvků. Ohřev na teplotu přibližně 850 °C s výdrží kolem 1 hodiny, tedy do oblasti austenitu (austenitizace). Následným krokem je pomalé ochlazení, kdy vzniká martenzitická struktura. Teplota martenzitické transformace (M_s) závisí na obsahu niklu (vyšší obsah Ni, nižší teplota M_s) a u většiny maraging ocelí probíhá v rozmezí teplot 200 až 300 °C. Vzniká velmi měkký martenzit (BCC martenzit). [11]



Po rozpouštěcím žhání následuje proces stárnutí (precipitační vytvrzení), kdy se zvyšuje precipitací intermetalických fází pevnost velmi měkkého martenzitu. Provádí se ohřevem na teplotu přibližně 480 až 500 °C s dobou výdrže v řádech hodin. Precipitáty zabraňují pohybu dislokací a tím zvyšují pevnost. Mezi hlavní vzniklé precipitáty patří Ni_3Mo , Ni_3Ti , Ni_3Al a Fe_2Mo . Kobalt je důležitým legujícím prvkem a plní hned několik funkcí. Snižuje rozpustnost molybdenu a tím napomáhá ke zvýšení obsahu precipitátů bohatých o molybden. Dále také rovnoměrnému rozložení precipitátů, urychluje precipitační proces a tím snižuje dobu stárnutí. Při špatné volbě teploty a času může dojít k přestárnutí, které způsobí ztrátu pevnosti, rozpad martenzitu a návrat k austenitické struktuře. [11]

4.3.2 Maraging 300

V rešeršní části a v praktické části se budeme zabírat maraging ocelí s numerickým označením 1.2709, značenou jako materiál X3NiCoMoTi 18-9-5. Chemické složení dané oceli je uvedeno v tabulce 8. [8]

Tabulka 8 - Chemické složení oceli maraging 300 [56]

Složení	Obsah [hm. %]
Fe	Balance
Ni	17 ÷ 19
Co	8,5 ÷ 9,5
Mo	4,5 ÷ 5,2
Ti	0,6 ÷ 0,8
Al	0,05 ÷ 0,15
Cr	max. 0,5
Cu	max. 0,5
C	max. 0,03
Mn	max. 0,1
Si	max. 0,1
P	max. 0,01
S	max. 0,01



5 Kritická rešerše vědeckých publikací

Nejdůležitějšími a nejčastěji zkoumanými vlastnostmi u součástí vyrobených metodou LPBF jsou relativní hustota, pevnost v tahu, tažnost, drsnost, tvrdost a houževnatost. Mechanické vlastnosti se mohou lišit oproti konvenčně vyráběným materiálům z různých důvodů. Vzhledem k vysokým rychlostem skenování dochází ke krátkým interakčním časům, což vede k vysokým rychlostem ochlazování taveniny a vysokým teplotním gradientům. Vysoká rychlost ochlazování může způsobit vznik nerovnovážných fází, kvazi-krytalických fází nebo fází s širokým rozsahem chemického složení. Při dostatečně vysokých rychlostech ochlazování můžeme získat velice jemnozrnnou strukturu, která má vliv na výsledné vlastnosti součástí. [6] [7]

Vlastnosti vyráběných součástí jsou závislé na mnoha faktorech. Z hlediska tisku se nejčastěji mění strategie řádkování, orientace polohy součástí, výkon laseru, rychlost skenování, tloušťka vrstvy a rozteč šrafování. Největší vliv na konečné mechanické vlastnosti má teplené zpracování. To je jedno z hlavních témat, kterým se zabývá většina vědeckých článků. [6]

5.1 Thomas Simson et al.

Thomas Simson et al. se zabývali vlivem orientace součástí a tepleným zpracováním na mechanické vlastnosti, které porovnávali s tvářenou ocelí. Materiálem pro zkoumání byla ocel maraging 300 (od firmy EOS Finland Oy) o velikosti částic 30 μm . Vzorky byly tisknuty ve směru horizontálním a vertikálním. [6]

Tabulka 9 - Parametry experimentu 1 [6]

Stroj:	EOS M 290
Ochranná atmosféra:	dusík
Strategie skenování:	klikaté řádkování s pootočením o 67° mezi vrstvami
Výkon laseru:	285 W
Rychlost skenování:	960 mm/s
Rozteč šrafování:	0,11 mm
Tloušťka vrstvy:	0,04 mm
Předehřev stavěcí palety:	40 °C



Po dokončení výrobního procesu provedli precipitační vytvrzení. Vzorke nejprve žíhali (820 °C, 1 hodina, argonová atmosféra, chladnutí na vzduchu) a poté následovalo stárnutí (490 °C, 6 hodin, chladnutí na vzduchu). [6]

Výsledky mechanických vlastností jsou shrnuty v tabulce 10, kde hodnoty ukazují průměrné hodnoty z několika vzorků. Z výsledků je patrné, že vyrobené vzorky pomocí technologie LPBF jsou srovnatelné s tvářeným materiálem. Změna orientace součásti (horizontální a vertikální) také nemá výrazný vliv na změnu mechanických vlastností. Velmi významný vliv na konečné mechanické vlastnosti má precipitační vytvrzení, kdy došlo k zvýšení hodnot tvrdosti (333 ÷ 341 HV10 na 640 ÷ 656 HV10), meze pevnosti v tahu (1 056 ÷ 1 096 MPa na 1 964 ÷ 2 102 MPa) a meze kluzu v tahu (805 ÷ 916 MPa na 1 954 ÷ 1 977 MPa), ale k výraznému poklesu tažnosti a houževnatosti. [6]

Tabulka 10 - Porovnání výsledných mechanických vlastností experimentu 1 [6]

Vzorek	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	HV10	A [%]	KV [J] (20 °C)
Horizontální	1 081	805	337	15,5	98
Horizontální + TZ	1 982	1 977	640	4,5	13
Vertikální	1 096	839	341	16	102
Vertikální + TZ	1 964	1 954	648	3,6	14
Tvářený	1 056	916	333	11,3	103
Tvářený + TZ	2 102	1 963	656	2	12

5.2 Tarun Bhardwaj et al.

Tarun Bhardwaj et al. se zabývali účinky orientace součásti na drsnost povrchu a tvrdost. Použili ocel maraging 300 (od firmy EOS GmbH) o velikosti částic 15 ÷ 45 μm. Vzorke o velikosti 45 x 45 x 5 mm tiskli ve třech polohách vůči základní stavební paletě (0°, 45° a 90°). [7]



Tabulka 11 - Parametry experimentu 2 [7]

Stroj:	EOSINT M280
Výkon laseru:	285 W
Rychlost skenování:	960 mm/s
Rozteč šrafování:	0,11 mm
Tloušťka vrstvy:	40 μm
Předehřev stavěcí palety:	40 °C

Výsledky zkoušek jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce 12. Pro orientaci vzorku 0° nedošlo k výrazným odchylkám drsnosti ani tvrdosti. Hodnota drsnosti povrchu se u vzorků 45° a 90° zvyšuje do výšky 20 mm od počátku tisku. Za touto hodnotou, ale dochází k snížení drsnosti důsledkem vysokého tepelného toku ve vytisknutých vrstvách (uzavírání pórů a trhlin). Obdobně je tomu tak u vertikálního tisku (90°), kdy je drsnost nižší, než u vzorku tištěném pod úhlem 45° (vysoký teplený tok u vertikálního tisku). U vzorků tisknutých pod úhlem 45° a 90° dochází ke snížení tvrdosti, které je způsobeno rychlejším nanášením dalších vrstev (delší doba ochlazování způsobuje hrubozrnnou strukturu). [7]

Tabulka 12 - Výsledné vlastnosti vzorků experimentu 2 [7]

Vzorek	Ra [μm]	HV
0°	2,45 \pm 0,23	408,2 \pm 4,84
45°	3,83 \pm 0,49	396,93 \pm 6,55
90°	2,26 \pm 0,49	388,15 \pm 6,98

5.3 Ludmila Kučerová et al.

Ludmila Kučerová et al. se zabývala zkoumáním mikrostruktury a mechanických vlastností oceli maraging 300. Zkoumaná byla 3D tištěná ocel od firmy EOS GmbH, označována MS1 a konvenčně vyráběná ocel od firmy Bohdan Bolzano s.r.o., označovanou Vaco 180. Obě tyto oceli odpovídají třídě X3NiCoMoTi 18-9-5. Konvenčně vyráběná ocel byla válcovaná za tepla a následně žíhaná (820 °C, 1 hodinu) dodavatelem. Následně se připravily vzorky čtvercového průřezu 10 x 10 mm o délce 40 mm. Vzorky vyrobené 3D tiskem měly tvar válce o průměru 9 mm a výšce 75 mm. Všechny vzorky byly při tisku orientovány stejně (osa válce byla kolmá ke stavební paletě). [8]



Tabulka 13 - Parametry experimentu 3 [8]

Stroj:	EOS M 290
Ochranná atmosféra:	dusík
Výkon laseru:	258 W
Rychlost skenování:	960 mm/s
Rozteč šrafování:	110 μm
Tloušťka vrstvy:	40 μm

Vzorky z konvenčně vyráběné oceli Vaco 180 testovaly ve stavu dodaném. Tištěné vzorky zkoumaly ve třech různých variantách: ve stavu po tisku, ve stavu žíhaném na 820 °C po dobu 1 hodiny (zastaralé doporučení od dodavatele prášku) a ve stavu žíhaném na 940 °C po dobu 2 hodin (nové doporučení od dodavatele prášku). Všechna tepelná zpracování se prováděla v ochranné atmosféře argonu a po žihání byly vzorky ochlazeny v peci. Stárnutí se provádělo ohřevem na teplotu 250 °C až 550 °C s dobou výdrže 0 až 6 hodin (označení „0“ – po dosažení dané teploty se vzorky ihned vyjmuly z pece) a následným ochlazením na vzduchu. [8]

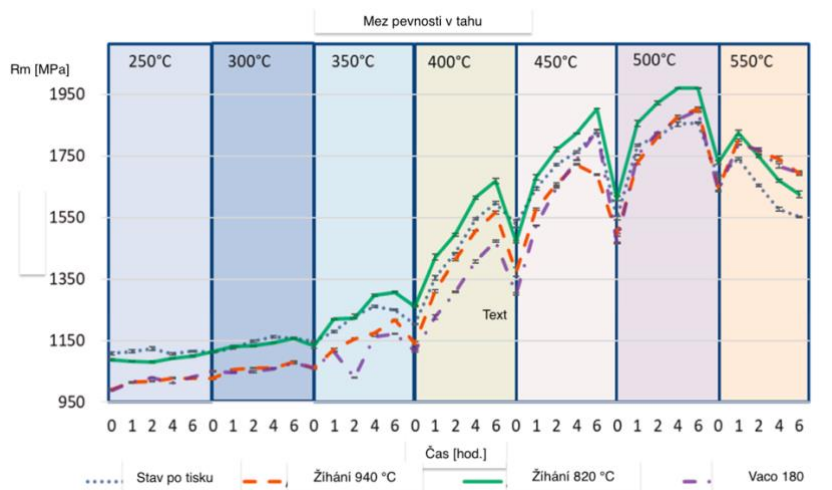
Před procesem stárnutí nejprve vyhodnotily mechanické vlastnosti jednotlivých vzorků. Podle výsledných hodnot v tabulce 14 vykazuje nejlepší mechanické vlastnosti (R_m , R_e a HV10) vzorek ve stavu po tisku a konvenčně vyrobená ocel Vaco 180. Nejnižší hodnoty meze kluzu, meze pevnosti a tvrdosti vykazovala ocel žíhaná na 940 °C po dobu 2 hodin. Mírné rozdíly v mechanických vlastnostech žíhaných vzorků (820 °C a 940 °C) mohou souviset s různým stupněm rekrystalizace a velikostí zrna. Žiháním při nižší teplotě (820 °C) vznikla spíše jemnozrnná struktura, díky které se dosáhlo vyšších hodnot meze pevnosti a tvrdosti než u hrubozrnné struktury získané žiháním při vyšší teplotě (940 °C). [8]

Tabulka 14 - Mechanické vlastnosti vzorků před stárnutím experimentu 3 [8]

Vzorek	R_m [MPa]	R_e [MPa]	A [%]	HV10
Stav po tisku	955	815	19	371
Žihání (820 °C, 1 hod.)	943	758	23	330
Žihání (940 °C, 2 hod.)	929	729	22	318
Vaco 180	941	864	22	318

Z obrázku 36 je zřejmé, že pevnost všech čtyř vzorků se zvyšující se teplotou (do 500 °C) a dobou výdrže rostla. Za touto teplotou dochází k přestárnutí a u vzorků došlo

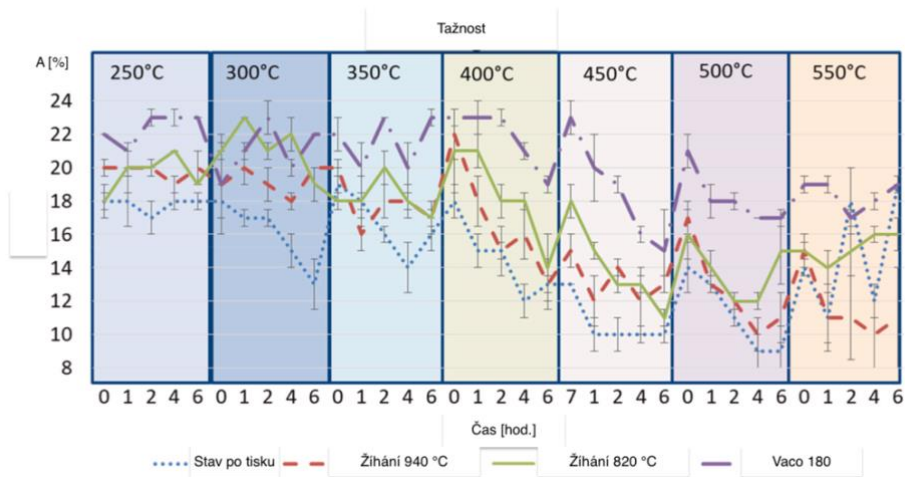
k poklesu meze pevnosti a meze kluzu (vyšší obsah austenitu: 13 až 32 %). K mírnému zpevnění ocelí docházelo již po 6 hodinách při teplotě 250 °C a 300 °C. Výraznější zpevnění bylo pozorováno po 4 hodinách při teplotě 350 °C. K nejstrmějšímu nárůstu pevnosti došlo po 6 hodinách při teplotách 400 až 500 °C. Z experimentu vyplývá, že nejvhodnějším tepelným zpracováním pro získání vysoké pevnosti je žíhání na teplotu 820 °C po dobu 1 hodiny s následným stárnutím při teplotě 500 °C po dobu 6 hodin. [8]



Obrázek 36 - Závislost meze pevnosti na TZ jednotlivých vzorků [8]



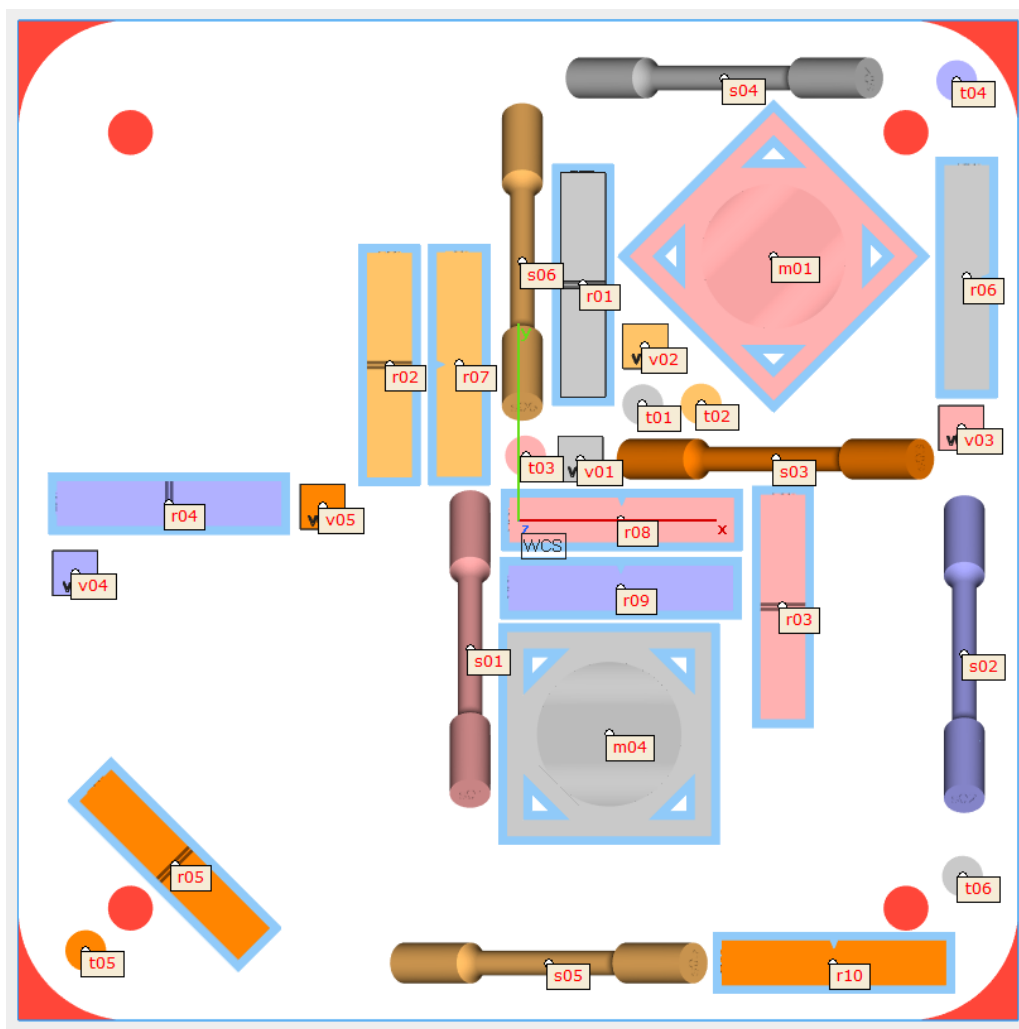
Obrázek 37 - Závislost meze kluzu na TZ jednotlivých vzorků [8]



Obrázek 38 – Závislost tažnosti na TZ jednotlivých vzorků [8]

6 Analýza vlastností na poskytnutých vzorcích

Analýza vlastností byla prováděna na poskytnutých vzorcích z nástrojové oceli pro práci za tepla 1.2709 typu maraging. Tisk zkušební palety se provedl na stroji Concept Laser M2 Cusing dual laser. Firma Concept Laser dodává tento typ práškového materiálu pod názvem CL50 WS. U vybraných vzorků se provedlo tepelné zpracování, kdy se vzorky ohřály na teplotu 530 °C (100 °C/hod) s výdrží 6 h na této teplotě a následným chladnutím v peci 100 °C/hod. Sestava vzorků na zkušební paletě je zobrazena na obrázku 39. Ze zkušební palety byly vybrány vzorky, na kterých se prováděla analýza vlastností. Podrobný rozpis vybraných vzorků je pro rázovou zkoušku uveden v tabulce 15 a pro tahovou zkoušku uveden v tabulce 16.



Obrázek 39 - Pozice jednotlivých vzorků na zkušební paletě



Tabulka 15 - Popis jednotlivých vzorků pro rázovou zkoušku

Rázová zkouška	Tisk	Dno vrubu	Vrub předtištěn
R01	vodorovně	hladina XZ	Ano
R02	vodorovně	hladina XZ	Ano
R03	vodorovně	hladina XZ	Ano
R04	vodorovně	hladina YZ	Ano
R05	vodorovně	pootočený (45°)	Ano
R06	vodorovně	kolmo	Ano
R07	vodorovně	kolmo	Ano
R08	vodorovně	kolmo	Ano
R09	vodorovně	kolmo	Ano
R10	vodorovně	kolmo	Ano

Tabulka 16 - Popis vzorků pro tahovou zkoušku

Zkouška tahem	Tisk
t01 až t06	vertikálně
s01 až s06	pod 45°



6.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška probíhala na univerzálním elektromechanickém zkušebním stroji LabTest Model 5.100SP1, dle zkušební normy DIN EN ISO 6892-1.



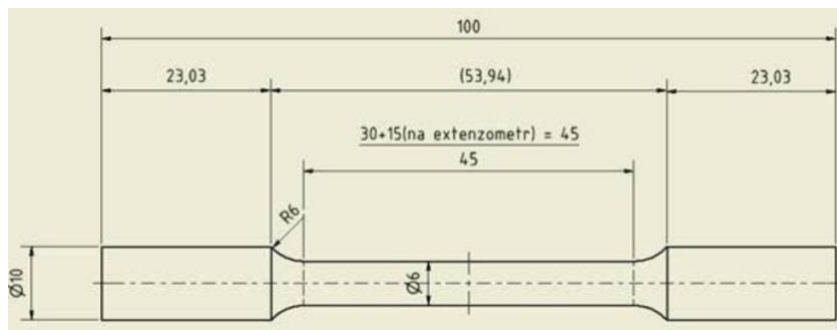
Obrázek 40 - Stroj LabTest 5.100SP1

Ukázka nastavení zkušebních parametrů pro vzorek s03 je uvedena v tabulce 17.

Tabulka 17 - Příklad zkušebních parametrů pro tahovou zkoušku vzorku s03

Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu – DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100 kN
Průtahoměr:	extenzome
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	D = 6,1 mm
Zadání délek:	Le = 29,96 mm; Lc = 50 mm; L0 = 50 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 1,5 mm/min; V1 = 1,5 mm/min
Přepínací body:	F0 = 100 N
Kritérium ukončení zkoušky:	Síla = 8500 N; dF = 85 %

Prodloužení bylo měřeno pomocí extenzometru a dvou svorek, které se umístily na kraj zkušební tyče. Z tohoto důvodu se prodloužila redukovaná část z 36 mm na 45 mm (v souladu s normou). Rozměry zkušebního tělesa jsou na obrázku 41.

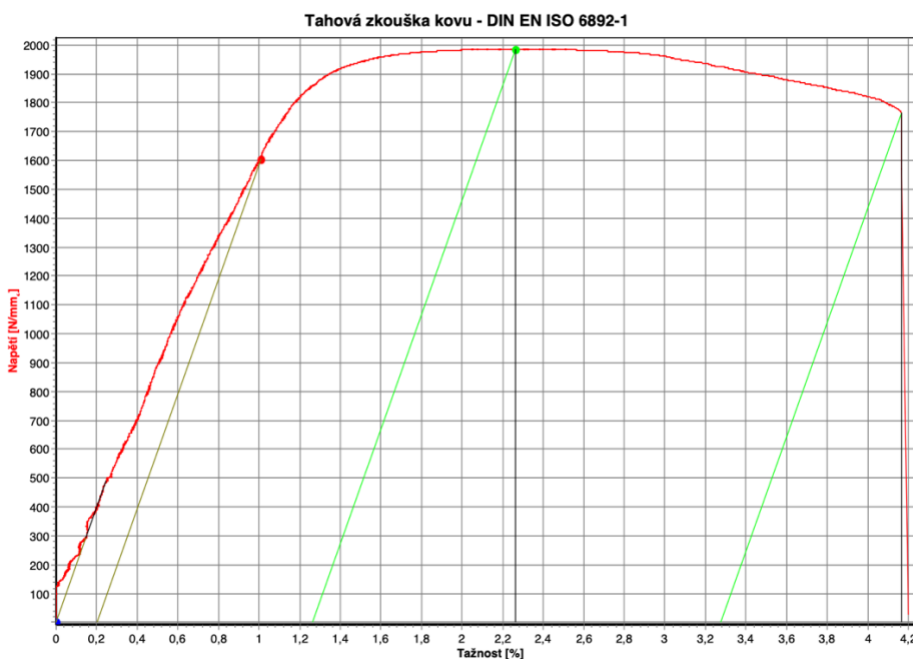


Obrázek 41 - Rozměry zkušebního tělesa

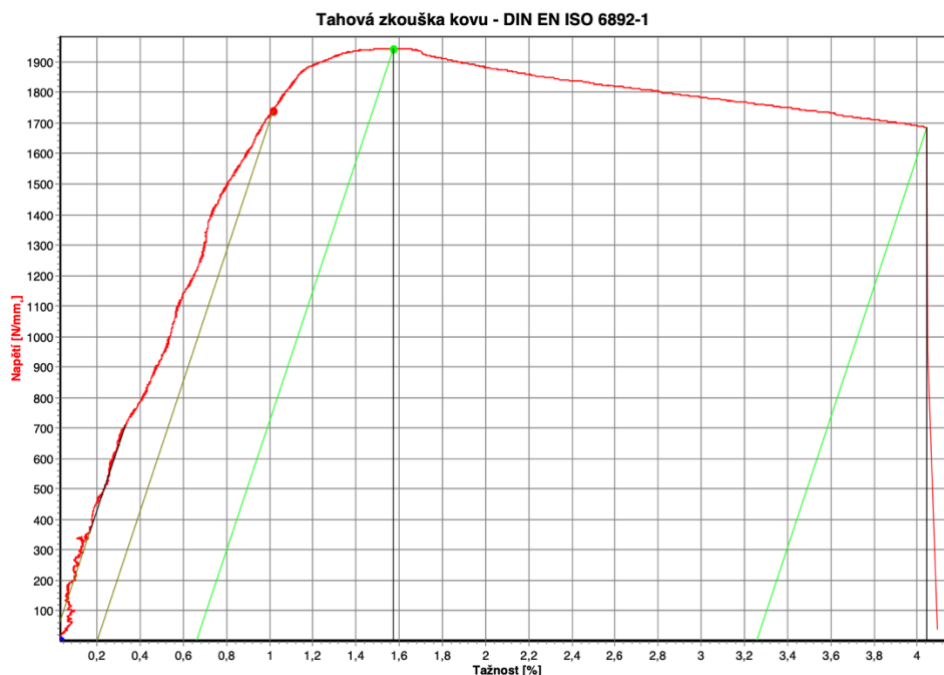
Mezi základní charakteristiky, které chceme vyhodnocovat patří:

- R_m [MPa] – Mez pevnosti v tahu
- $R_{p0,2}$ [MPa] – Smluvní mez kluzu
- A [%] – Celková tažnost
- E [GPa] – Modul pružnosti

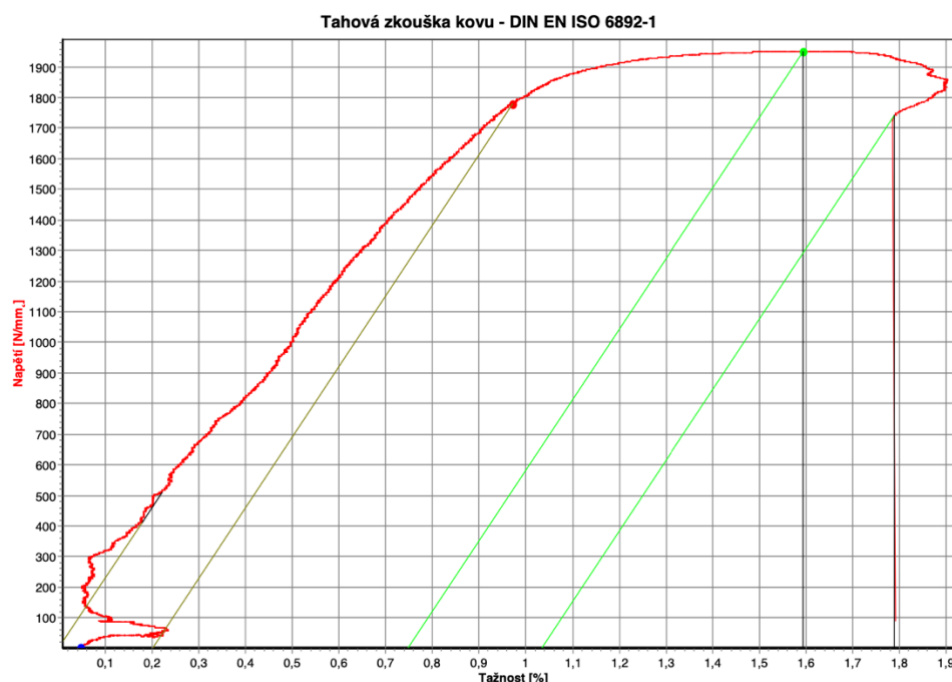
Na obrázku 42 je znázorněný diagram průběhu tahové zkoušky pro vzorek s03, který je ve vytvrzeném stavu a tisknutý pod úhlem 45° . Na obrázku 43 je diagram průběhu tahové zkoušky pro vzorek t06, který je také ve vytvrzeném stavu, ale je tisknutý vertikálně.



Obrázek 42 - Diagram z tahové zkoušky vzorku s03



Obrázek 43 - Diagram z tahové zkoušky vzorku t06



Obrázek 44 - Diagram z tahové zkoušky vzorku s02

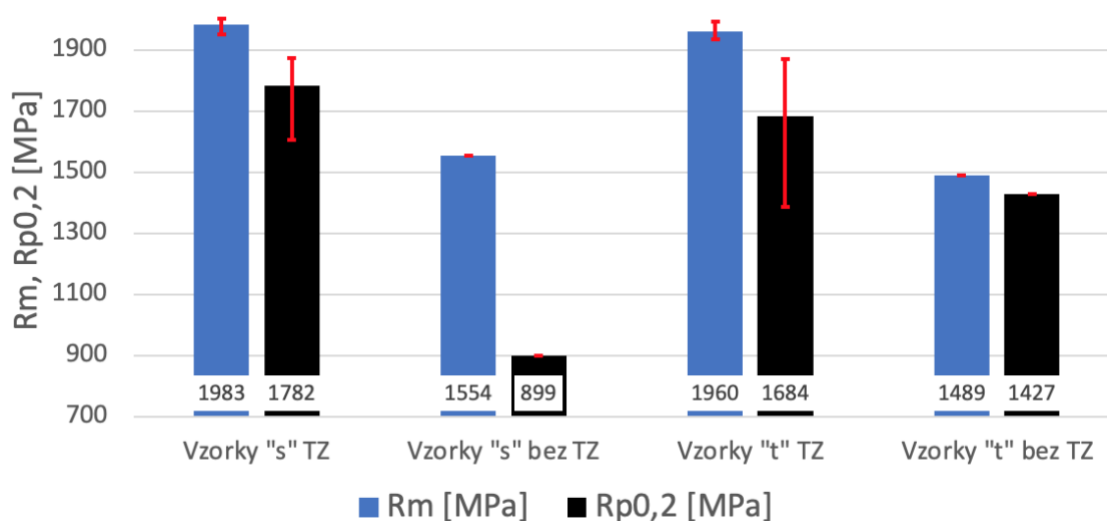
Z obrázku 44 je patrné, že tažnost u tohoto vzorku nebylo možné hodnotit, neboť došlo k přetržení zkušební tyče v místě, kde byla umístěna svorka. Tento problém nastal u většiny vzorků (v tabulce 18 jsou tyto tažnosti označeny červeným písmem). Vhodnějším řešením mělo být nahrazení svorek reflexními pásky, aby mohla být tažnost vyhodnocena a porovnána u všech vzorků. Skokový průběh na začátku diagramu byl



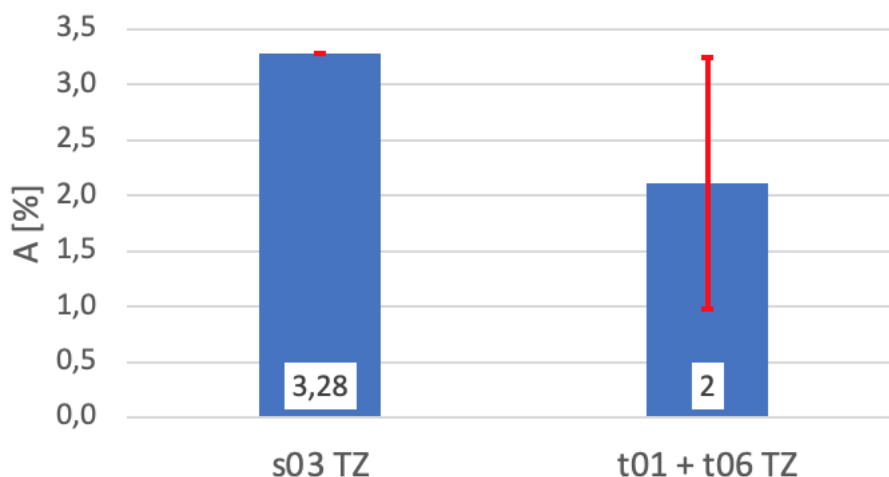
způsobený nedostatečným upnutím vzorku a jeho prokluzem, kdy bylo nutné následné dotažení. Základní charakteristiky z tahových zkoušek pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tabulce 18.

Tabulka 18 - Výsledky zkoušek tahem

Vzorek	Mechanické vlastnosti			
	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Celková tažnost A [%]	Modul pružnosti E [GPa]
s01	1 554	899	2,88	214
s02	1 951	1 778	1,03	231
s03	1 985	1 605	3,28	199
s04	1 972	1 819	3,05	206
s05	2 001	1 874	2,29	223
s06	2 004	1 836	1,12	225
t01	1 963	1 820	0,98	202
t02	1 957	1 385	0,75	224
t03	1 972	1 869	0,77	216
t04	1 943	1 606	1,79	214
t05	1 489	1 427	0,78	221
t06	1 994	1 738	3,25	213



Obrázek 45 - Hodnoty R_m a $R_{p0,2}$ vzorků z tahové zkoušky



Obrázek 46 - Tažnost vzorků z tahové zkoušky

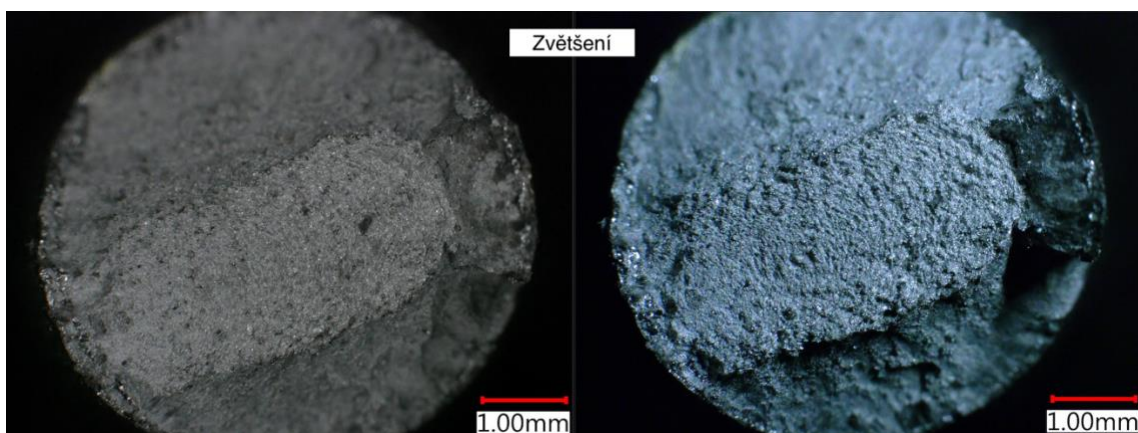
Hodnota meze pevnosti v tahu vyšla u vzorků „s“ a „t“ (TZ) s rozdílem 1,2 %, takže vliv orientace součásti při tisku (vertikální a pod úhlem 45°) nemá výrazný vliv na hodnotu meze pevnosti. Také hodnota smluvní meze kluzu vyšla s rozdílem pouhých 5,5 %. K podstatnému rozdílu došlo u vzorků „s“ a „t“ (bez TZ), kdy hodnota smluvní meze kluzu je u vzorku „s“ o 37 % nižší, než u vzorku „t“ (vertikální tisk). Thomas Simson et al. [6] zjistil u vzorku tisknutém vertikálně s následným TZ hodnotu meze pevnosti v tahu 1 964 MPa, což je totožné s naším experimentem, kdy jsme naměřili hodnotu 1 960 MPa. Vyšší rozdíl je u smluvní meze kluzu, která se liší o 14 %. Ludmila Kučerová et al. [8], uvádí ve svém experimentu obdobné hodnoty meze pevnosti v tahu a meze kluzu jako v našem experimentu, a to hlavně pro vzorky, které byly precipitačně vytvrzené na teplotu 500 °C, po dobu 6 hodin (vertikální tisk).

Z provedené tahové zkoušky a z kritické rešerše lze usoudit, že orientace součásti při tisku nemá příliš velký vliv na tahové vlastnosti materiálu (vertikální tisk, horizontální tisk a tisk pod úhlem 45°). Největší vliv na konečné tahové vlastnosti má tepelné zpracování, které je patrné z experimentu Ludmily Kučerové et al. [8]. Takto zpracované materiály mají obdobné vlastnosti jako konvenčně vyráběné materiály.

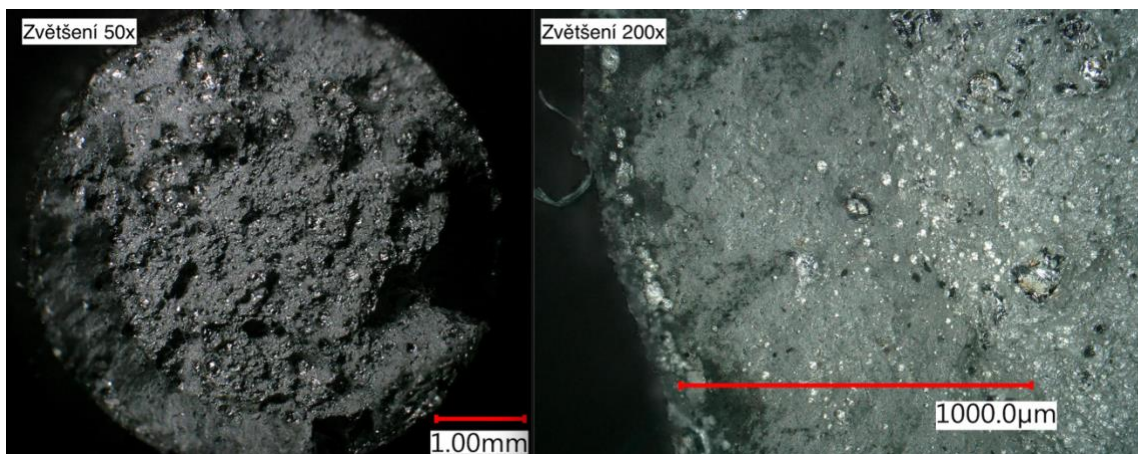
Na následujících obrázcích jsou znázorněny všechny vzorky po zkoušce tahem (obrázek 47) a také snímky vybraných vzorků zkoumaných na digitálním mikroskopu Keyence VHX – 6000.



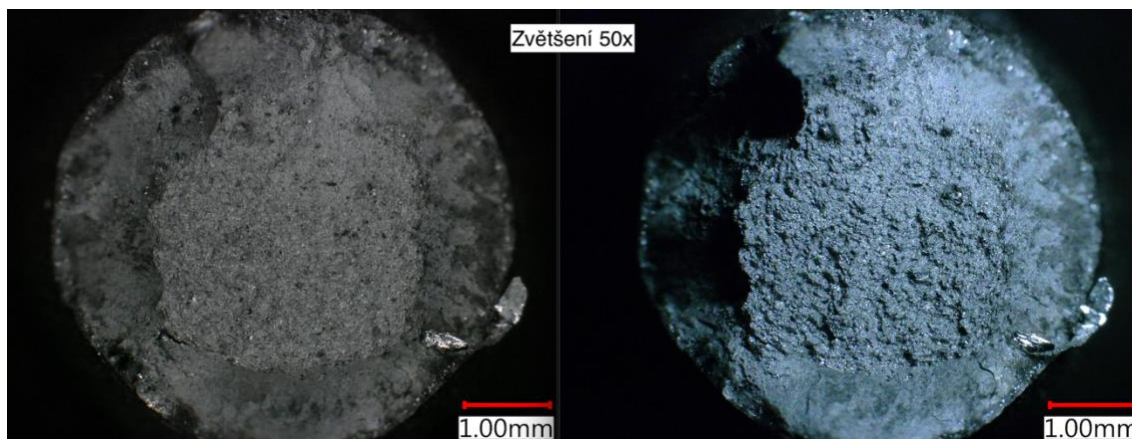
Obrázek 47 - Vzorky po zkoušce tahem



Obrázek 48 - Lom vzorku s01 po zkoušce tahem



Obrázek 49 - Lom vzorku t01 po zkoušce tahem



Obrázek 50 - Lom vzorku t02 po zkoušce tahem

6.2 Zkouška tvrdosti dle Rockwella

Na vzorcích z rázové zkoušky se následně provedla zkouška tvrdosti dle Rockwella. Zkouška se provedla na tvrdoměru WPM, který je na obrázku 51. Vnikacím tělesem byl diamantový kužel, kterým se nejprve provedlo předběžné zatížení a po 10 sekundách se zatížilo těleso celkovým zatížením 150 kp. Poté se ze stupnice zapsala hodnota tvrdosti HRC. Zkouška probíhala dle normy ČSN EN ISO 6508-1.



Obrázek 51 - Tvrdoměr WPM



Každý vzorek byl testován třemi vniky v rovině tisku (shora vzorku) a třemi vniky v rovině kolmé na rovinu tisku (bok vzorku). Hodnoty získaných tvrdostí jsou uvedeny v tabulce 19.

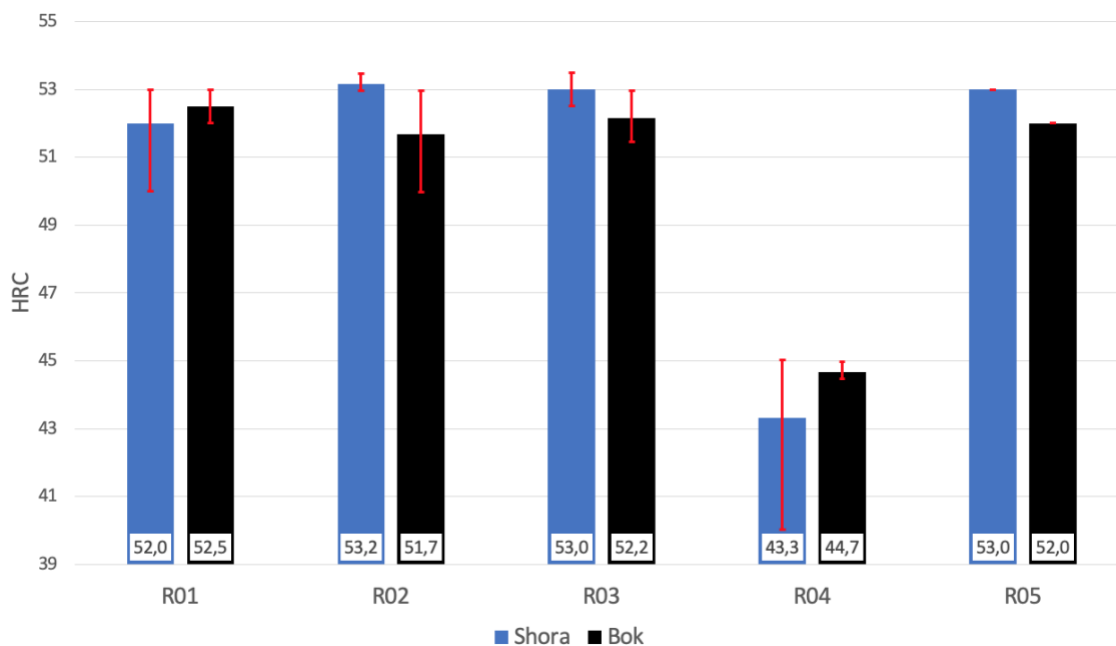


Obrázek 52 - Vzorky po zkoušce tvrdosti dle Rockwella

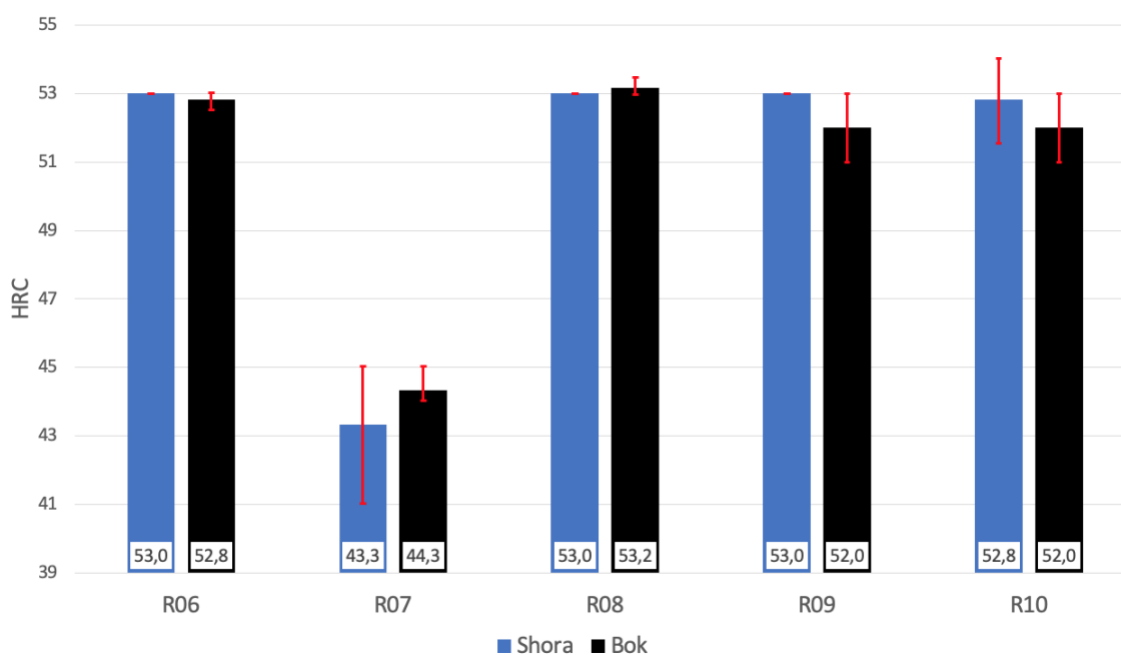
Tabulka 19 - Hodnoty naměřených tvrdostí dle Rockwella

Vzorek	Shora [HRC]			Bok [HRC]		
	1	2	3	1	2	3
R01	50	53	53	52	53	52,5
R02	53	53	53,5	50	52	53
R03	53	53,5	52,5	51,5	53	52
R04	40	45	45	44,5	45	44,5
R05	53	53	53	52	52	52
R06	53	53	53	53	52,5	53
R07	41	45	44	44	44	45
R08	53	53	53	53	53	53,5
R09	53	53	53	51	52	53
R10	54	51,5	53	52	51	53

Z těchto hodnot se následně provedlo grafické zpracování, kde se ze 3 naměřených hodnot udělal aritmetický průměr, který se vynesl do grafu společně s chybovými úsečkami.



Obrázek 53 - Tvrdost vzorků (R01 až R05) dle Rockwella



Obrázek 54 - Tvrdost vzorků (R06 až R10) dle Rockwella

U vzorků, které se tepelně zpracovaly vyšla hodnota tvrdosti shora vzorku totožně okolo 53 HRC. Vyšší rozdíly byly u tvrdosti prováděné z boku vzorku, která se pohybovala okolo 52,3 HRC. U tepelně nezpracovaných vzorků vyšly hodnoty shora i z boku stejně.

U vzorků R01, R04, R07 a R10 jsou odchylky vyšší než u ostatních vzorků. Jedná se však o různě orientované součásti (R01 – vrub v hladině XZ, R04 - vrub v hladině YZ,



R07 a R10 – vrub kolmý na rovinu tisku) v horizontální rovině, takže vliv natočení je v tomto případě také zanedbatelný.

6.3 Metalografie

Vybrané vzorky z rázové a tahové zkoušky se nařezaly na rozbrušovací pile Labotom-3 od firmy Struers.



Obrázek 55 - Pila Labotom-3 (Struers)

Následně byly odmaštěny v technickém líhu (Ethanol obecně denaturovaný, ES 200-578-6). Odmaštěné vzorky se zalisovaly na metalografickém lisu CitoPress-10 od firmy Struers. Vzorek se nejprve zasypal černou fenolovou pryskyřicí MultiFast, následně byl vložen papírek s popisem vzorku, který se zasypal akrylátovou pryskyřicí ClaroFast. Cyklus spékání probíhal po dobu 3 minut při teplotě 180 °C a tlaku 250 barů s 2 min ochlazováním.



Obrázek 56 - Metalografický lis CitoPress-10 (Struers)

Zalisované vzorky se poté brousily a leštily na stroji Tegramin-25 od firmy Struers (obrázek 57). **Broušení se provádělo ve 3 krocích:**

1. Broušení fólií SiC 120 – zatížení vzorku $F = 25 \text{ N}$, chlazení vodou, otáčky $n = 300 \text{ ot./min}$, čas $t = 3 \text{ min}$.
2. Broušení fólií SiC 320 – zatížení vzorku $F = 25 \text{ N}$, chlazení vodou, otáčky $n = 300 \text{ ot./min}$, čas $t = 3 \text{ min}$.
3. Broušení fólií SiC 500 – zatížení vzorku $F = 25 \text{ N}$, chlazení vodou, otáčky $n = 300 \text{ ot./min}$, čas $t = 3 \text{ min}$.

Leštění vzorků se provádělo tímto postupem:

1. Leštění MD Allegro $9 \mu\text{m}$ – diamantová suspenze $9 \mu\text{m}$, zatížení vzorku $F = 25 \text{ N}$, otáčky $n = 300 \text{ ot./min}$, čas $t = 3 \text{ min}$.
2. Leštění MD-Dac $3 \mu\text{m}$ – diamantová suspenze $3 \mu\text{m}$, zatížení vzorku $F = 25 \text{ N}$, otáčky $n = 300 \text{ ot./min}$, čas $t = 3 \text{ min}$.
3. Leštění $1 \mu\text{m}$ MD Plus – diamantová suspenze $1 \mu\text{m}$, zatížení vzorku $F = 25 \text{ N}$, otáčky $n = 300 \text{ ot./min}$, čas $t = 45 \text{ s}$.

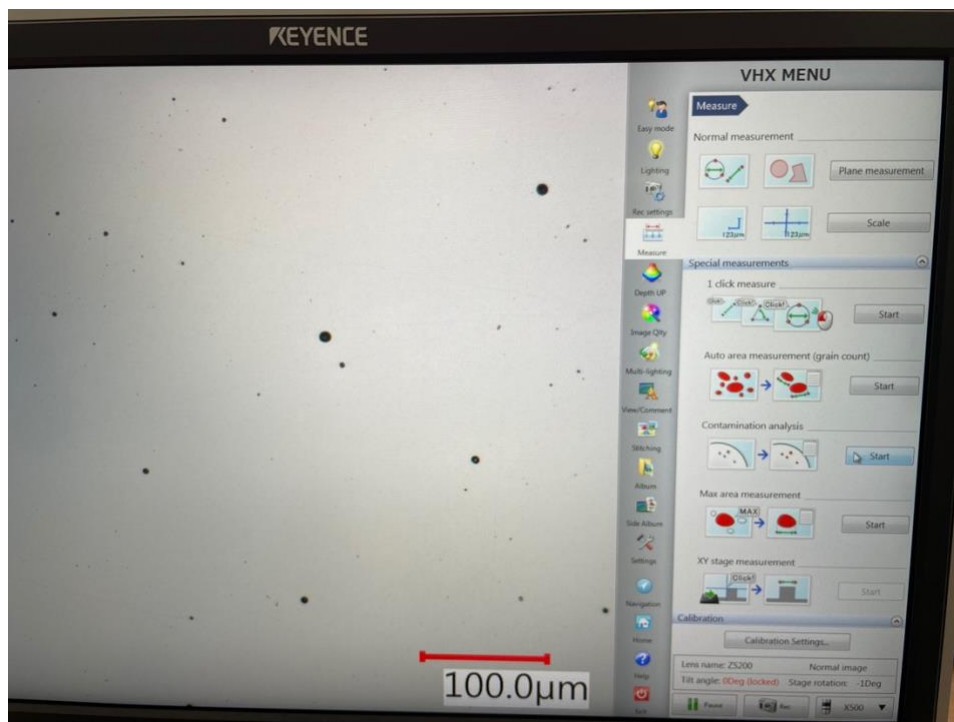


Obrázek 57 - Stroj Tegramin-25 (Struers)

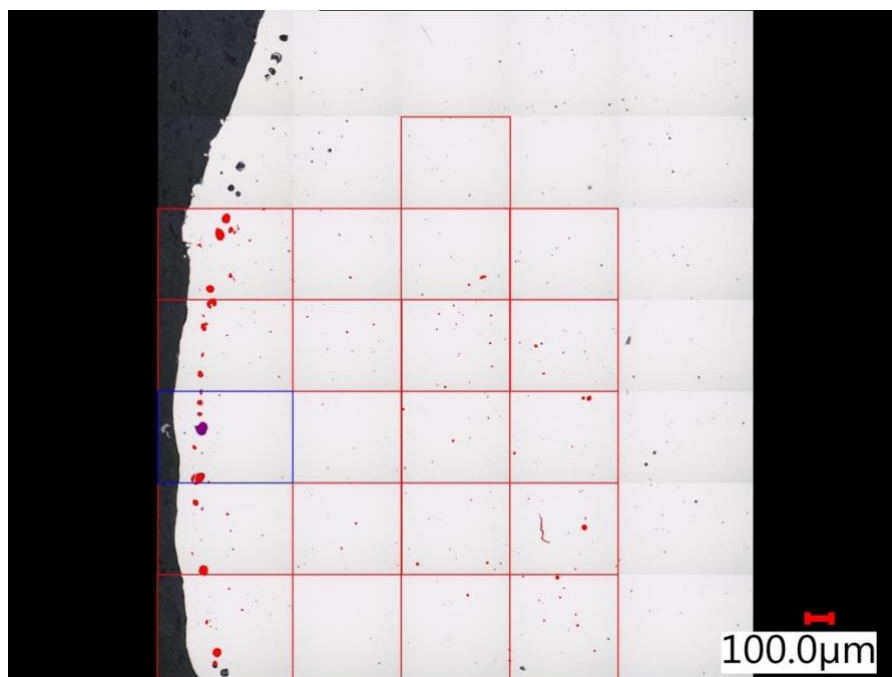
Leptání se provádělo ponorem po dobu 22 s do leptacího roztoku Fry's (150 ml destilované vody, 50 ml kyseliny chlorovodíkové, 20 ml chloridu měďnatého, 1 g skalice) s následným oplachem ve vodě a v technickém líhu (Ethanol obecně denaturovaný, ES 200-578-6).

6.4 Porozita

Porozita se měřila po stavu leštění na digitálním mikroskopu Keyence VHX-6000 se zvětšením 500x. Vzorek se vložil pod mikroskop a zvolila se vhodná strategie pro měření porozity (Contamination analysis). Následně se pomocí funkce Split recording definovala plocha na vzorku a její velikost. Program si nasnímal vybranou oblast, zkontrolovala se vybraná plocha a funkcí Batch application se vyhodnotily póry. Tento postup se aplikoval u všech vybraných vzorků.

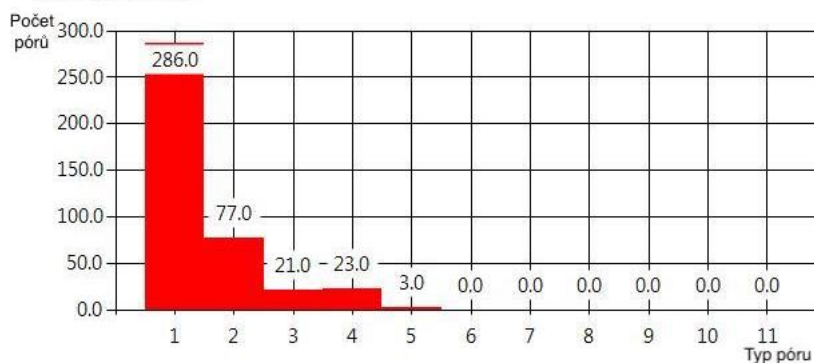


Obrázek 58 - Pracovní prostředí mikroskopu Keyence VHX-6000



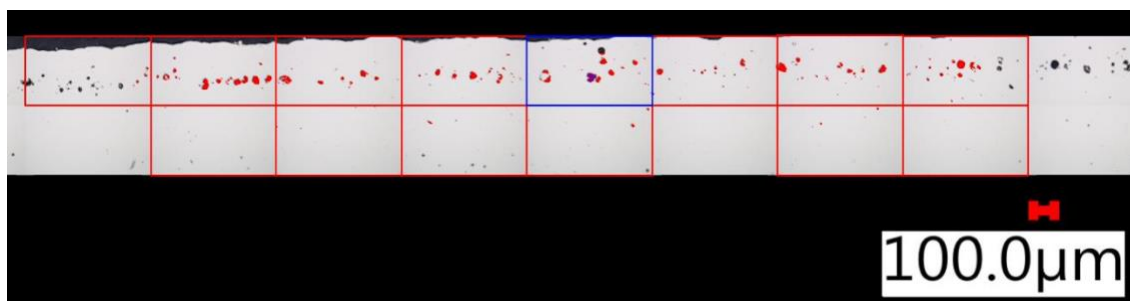
Obrázek 59 - Porozita vzorku t03

Získala se data v podobě excelového souboru, histogramu a fotografií snímaných ploch. Histogram je zobrazen na obrázku 60. Svislá osa udává počet pórů na celkové ploše a vodorovná osa udává dle číslic velikost pórů (1 pro póry $0 \div 5 \mu\text{m}$, 2 pro póry $5 \div 15 \mu\text{m}$, 3 pro póry $15 \div 25 \mu\text{m}$, 4 pro póry $25 \div 50 \mu\text{m}$, 5 pro póry $50 \div 100 \mu\text{m}$).



Obrázek 60 - Histogram kraje vzorku s04

Na obrázku 61 je znázorněna plocha, ze které se vyhodnocovala pórovitost na kraji vzorku s04.



Obrázek 61 - Vybraná plocha pro měření pórovitosti vzorku s04

	1 [0 ÷ 5 μm]	2 [5 ÷ 15 μm]	3 [15 ÷ 25 μm]	4 [25 ÷ 50 μm]	5 [50 ÷ 100 μm]	Pórovitost [%]
s04 jádro	230	18	4	0	0	0,112
s04 kraj	286	77	21	23	3	1,426
t03_2 kraj	344	61	12	13	3	0,593
R08_shora jádro	218	40	1	0	0	0,165
R08_bok jádro	213	46	4	0	0	0,112
R08_řez jádro	328	55	4	4	0	0,126

Obrázek 62 - Pórovitost a velikost pórů

Hodnota pórovitosti jádra vyšla u všech zkoumaných vzorků okolo 0,13 %. Vyšších hodnot nabývala pórovitost u kraje vzorků, kdy u vertikálního vzorku t03 stoupla na hodnotu 0,59 % a u vzorku tisknutém pod úhlem 45° (s04) na hodnotu 1,43 %. V těchto oblastech se také velmi často objevovaly póry větších rozměrů od 15 μm až po 100 μm.

Pórovitost v jádrech vzorků vyšla nad očekávání velmi nízká. Nepatrně vyšší je na krajích vzorků, což se může odstranit vhodnou volbou strategie nanášení pro kraj.

6.5 Zkouška mikrotvrlosti

Mikrotvrdot se měřila po stavu leštění na mikrotvrdoměru FUTURE-TECH FM-100, který je na obrázku 63. Zkouška probíhala dle normy ČSN EN ISO 6507-1.



Vyhodnocování mikrotvrdomosti se provádělo v softwarovém prostředí HDPS-ARS. Nejprve se provedlo odzkoušení pro volbu vhodného zatížení ve třech krocích:

1. HV0,1 (100 g) -> $d = 18 \mu\text{m}$
2. HV0,3 (300 g) -> $d = 30 \mu\text{m}$
3. HV0,5 (500 g) -> $d = 42 \mu\text{m}$

Pro vyhodnocování se zvolilo zatížení HV0,3, vzhledem k velikosti návaru při 3D tisku a vzhledem k nevytvrzenému stavu.



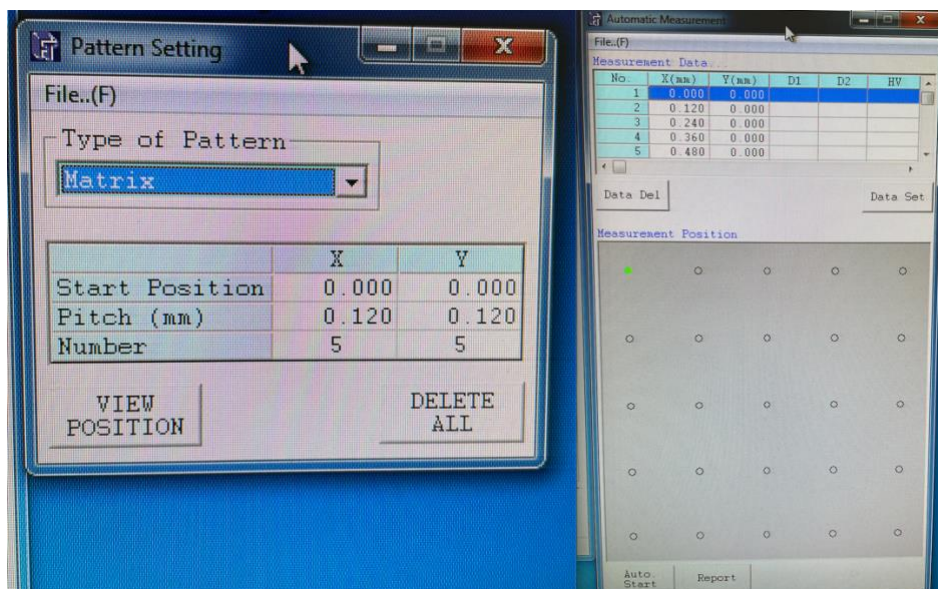
Obrázek 63 - Mikrotvrdoměr FUTURE-TECH FM-100

Postup po odzkoušení:

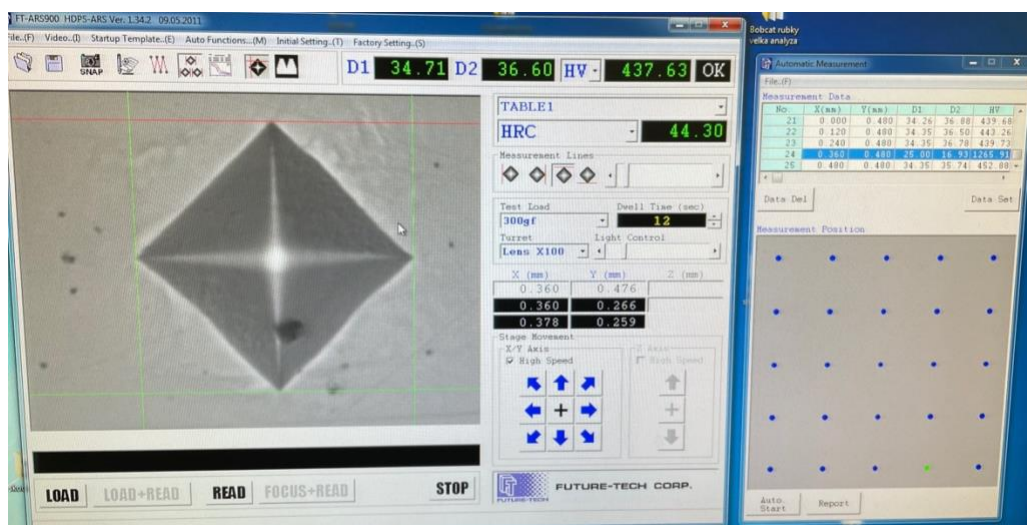
Vzorek se upnul do mikrotvrdoměru a v softwaru se přepnul obraz na aktuální (Live). Nastavilo se automatické měření se zvětšením 100x, zatížením po dobu 12 s a nastavila se matice 5x5. Minimální vzdálenost od okraje vtisku musela být $2,5 \times d$ a vzdálenost mezi vtisky $3 \times d$. Zvolila se tedy vzdálenost mezi vtisky $4 \times d$. Najelo se do přibližného středu vzorku, nastavily se počáteční souřadnice [0;0] a spustilo se automatické měření



pro matici 5x5 s krokem 0,12 mm v ose x a y. Po dokončení měření se pro jednotlivé vtisky provedlo zaostření a vyhodnocení každého vtisku s následnou kontrolou. Takto získaná data se exportovala do složky a provedlo se další měření. Zkoušce byly podrobeny vzorky R08 a R07 ve 3 rovinách (shora, bok a řez).



Obrázek 64 - Nastavení matice a kroku v softwaru HDPS-ARS



Obrázek 65 - Vyhodnocení vtisků v softwaru HDPS-ARS

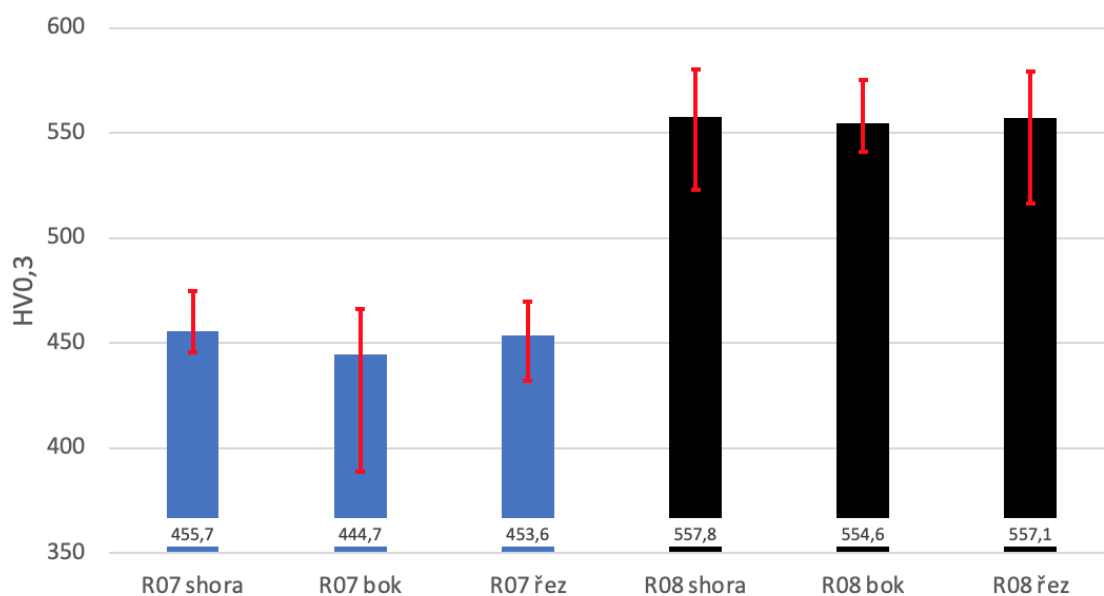
Tabulka 20 - Aritmetický průměr mikrotvrdosti vzorku R07

R07	HV	HRC
Shora	455,75	45,8
Bok	444,75	44,87
Řez	453,62	45,63



Tabulka 21 - Aritmetický průměr mikrotvrdosti vzorku R08

R08	HV	HRC
Shora	557,83	52,85
Bok	554,63	52,66
Řez	557,14	52,81



Obrázek 66 - Mikrotvrdost HV0,3 vzorků R07 a R08

Hodnoty ze zkoušky mikrotvrdosti vyšly téměř stejně, jako u zkoušky tvrdosti. U obou vzorků se hodnoty lišily v rádech desetin HRC, jen u vzorku R07 shora se tvrdost lišila o 2,5 HRC, ale u naměřených hodnot této tvrdosti byla poměrně vysoká odchylka měření.

Thomas Simson et al. [6] uvedl u horizontálně tisknutého vzorku bez TZ hodnotu tvrdosti 337 HV10 a u horizontálně tisknutého vzorku s TZ hodnotu tvrdosti 640 HV10. V porovnání s našimi hodnotami se u vzorečku bez tepelného zpracování dosáhlo o 25 % vyšší tvrdosti (450 HV0,3), ale u vzorečku s tepelným zpracováním tomu bylo naopak a tvrdost vyšla o 13 % nižší. Rozdíl je způsobený tím, že srovnání makro Vickerse (HV10) s mikro Vickersem (HV0,3) není objektivní a vysoký rozdíl tvrdosti je umocněný tím, že měření nižšími zatíženími obvykle dává vyšší tvrdosti, a to tento jev umocňuje.

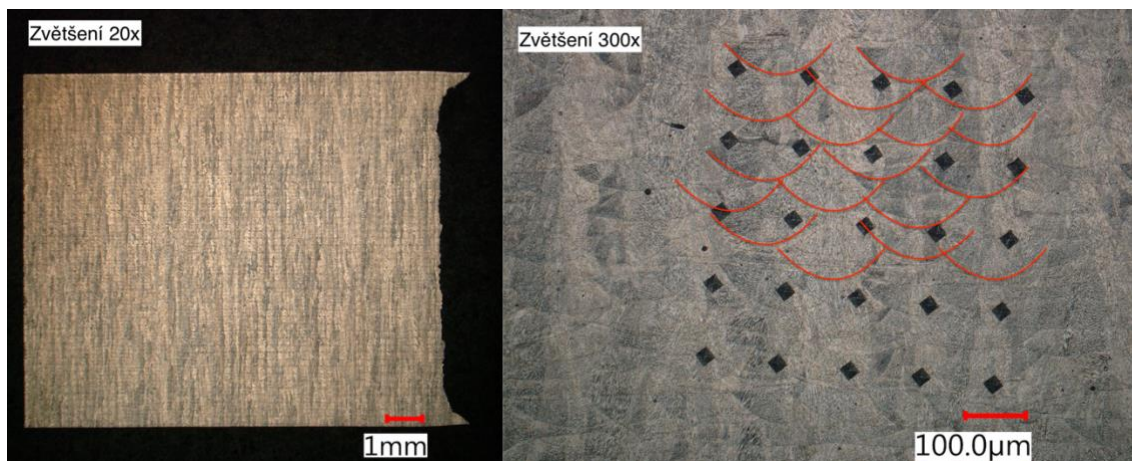
Tarun Bhardwaj et al. [7] ve svém experimentu dosáhl hodnot tvrdosti okolo 400 HV pro vzorky tištěné horizontálně, vertikálně a pod úhlem 45°. V tomto případě o 11 % nižší než námi naměřená tvrdost.

Zkouškou mikrotvrdomosti se dosáhlo obdobných hodnot HRC jako u zkoušky tvrdosti. V porovnání s hodnotami z kritických rešerší už byly rozdíly mezi tvrdostmi o něco vyšší. Tyto rozdíly mohly být způsobeny rozdílnou strategií tisku, neboť rozdíly byly znatelné i mezi vzorky bez tepelného zpracování.

6.6 Obrazová analýza

Obrazová analýza se prováděla po leptaném stavu a pozornost byla věnována především strategii navařování vrstev a jejich vlivu na mechanické vlastnosti materiálu. Tato analýza se prováděla na digitálním mikroskopu Keyence VHX-6000.

Na obrázku 67 je vidět umístění vtisků ze zkoušky mikrotvrdomosti mezi jednotlivé „melt pooly“. Dle hodnot uvedených v tabulce 22 můžeme vidět, že umístění vtisků na přechodech mezi jednotlivými „melt pooly“ nemá žádný vliv na hodnotu mikrotvrdomosti.

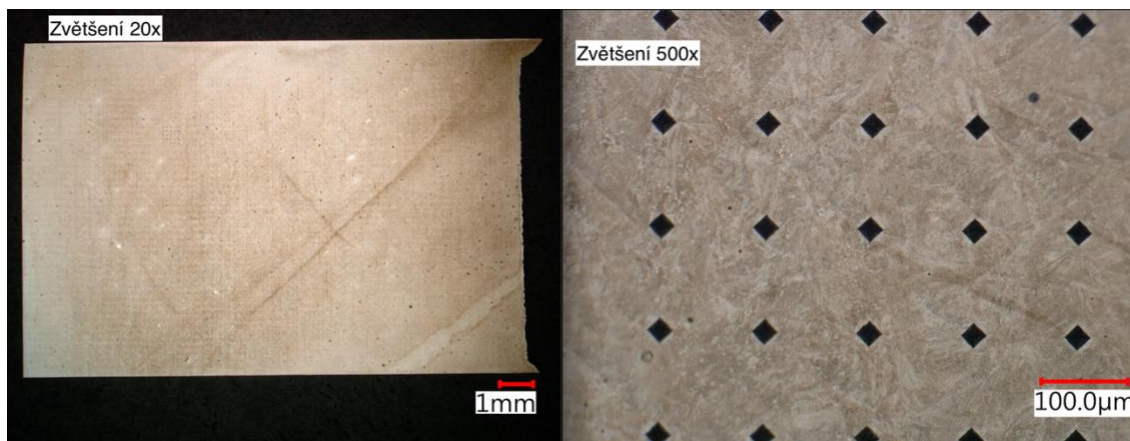


Obrázek 67 – Obrazová analýza vzorek R07 (bok)

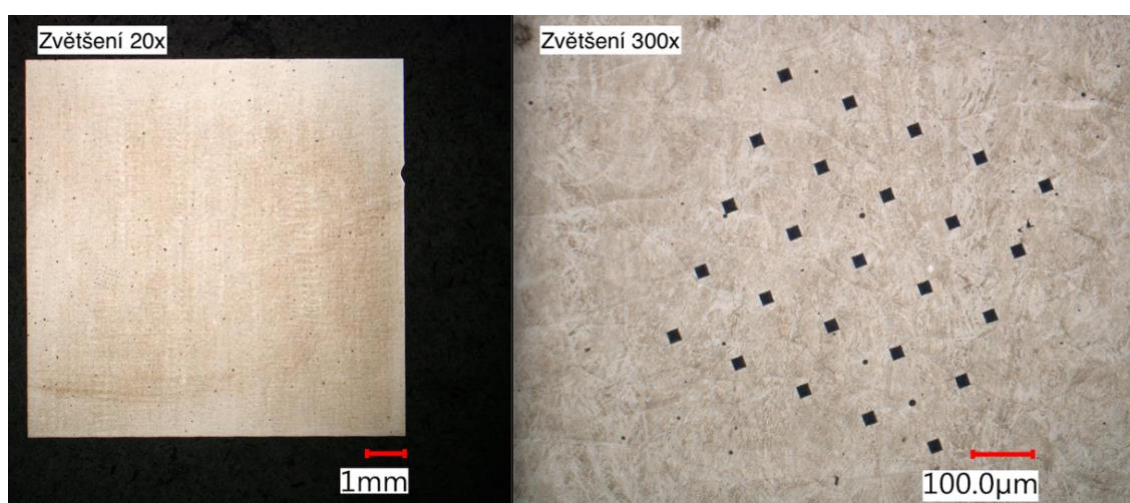
Tabulka 22 – Hodnoty mikrotvrdomostí k obrázku 67

HV0,3	1	2	3	4	5
1	438	389	442	448	449
2	455	443	458	458	454
3	450	442	441	445	448

Obdobných výsledků se dosáhlo také u vzorku R08 (obrázek 68 a 69). Na obrázcích můžeme vidět, že se opět některé vtisky nachází na přechodu „melt poolu“ a ani zde nedošlo k výrazným změnám mikrotvrdomosti.

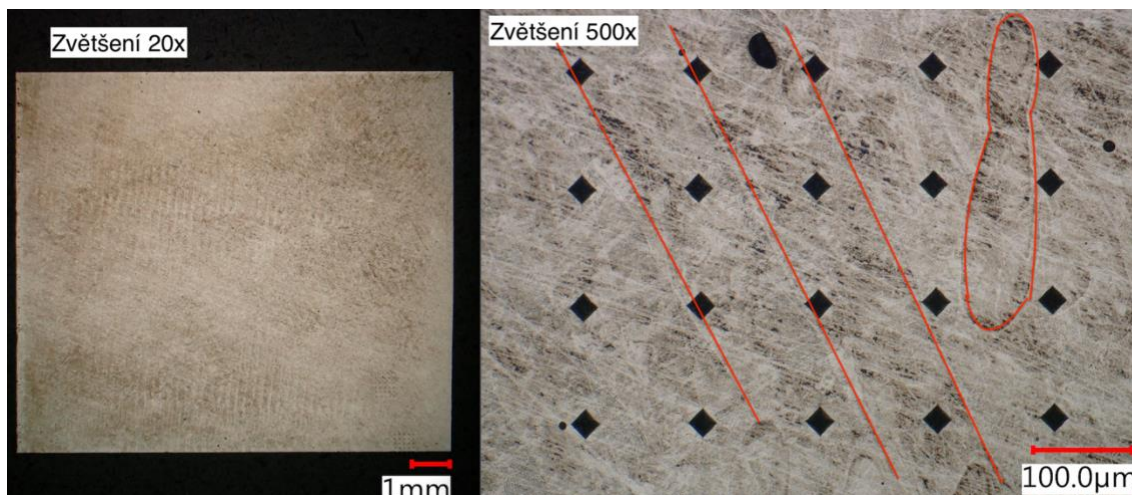


Obrázek 68 – Obrazová analýza vzorek R08 (bok)



Obrázek 69 – Obrazová analýza vzorek R08 (řez)

Na obrázku 70 je zobrazen vzorek R08 shora, kde jednotlivé vtisky prochází hranicemi spěkaných návarů. Ani v tomto případě nezáleží, zda je vtisk v místě přechodu mezi hranicemi spěkaného návaru, nebo uprostřed vrstvy. Tuto skutečnost potvrzuje tabulka 23, kde jsou uvedeny hodnoty mikrotvrdoosti pro vtisky zobrazené na obrázku 70.

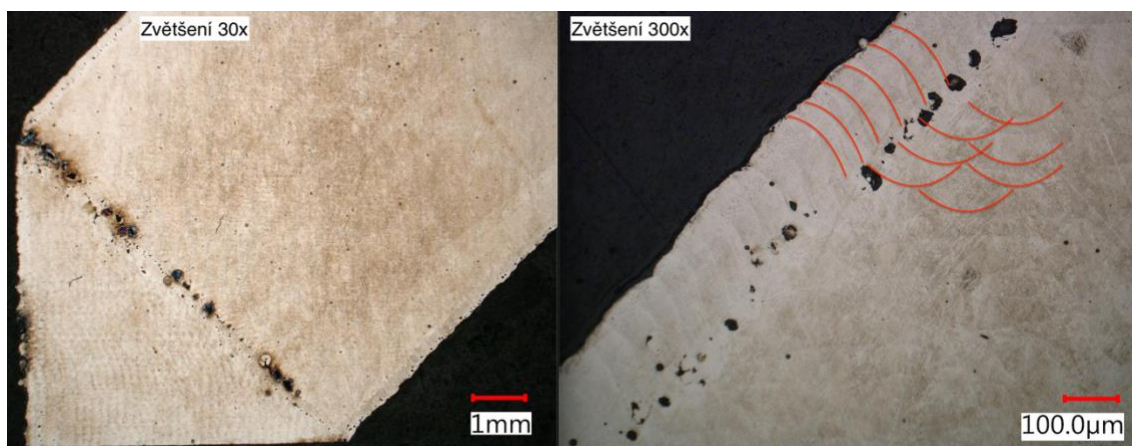


Obrázek 70 – Obrazová analýza vzorek R08 (shora)

Tabulka 23 - Hodnoty mikrotvrdosti k obrázku 70

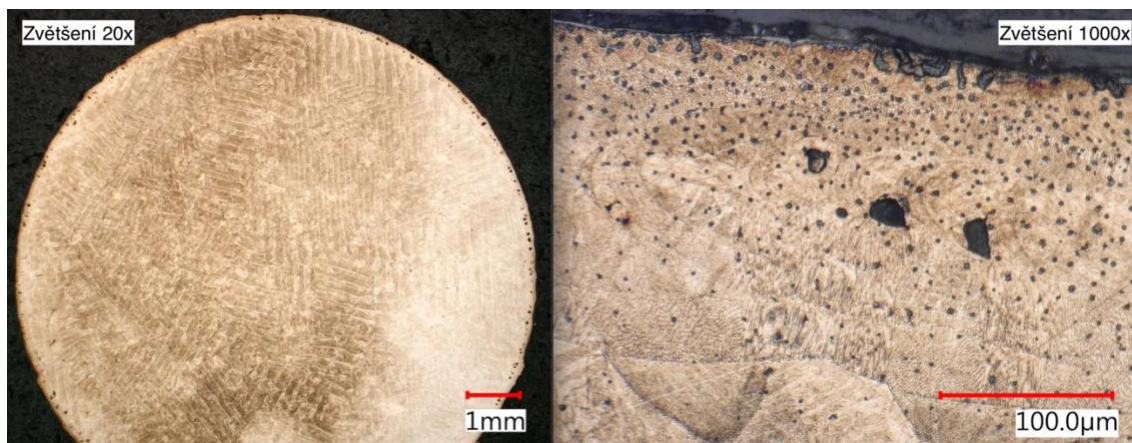
HV0,3	1	2	3	4	5
1	523	562	556	562	562
2	580	549	546	554	543
3	564	552	554	556	564

Na obrázku 71 můžeme vidět řadu pórů, které jsou mezi podpěrami a tisknutým vzorkem (snímek vlevo). K takto velké pórovitosti došlo zřejmě z důvodu odlišnosti strategií pro tisk podpěr a tisk součásti. Také na kraji součásti pozorujeme velký výskyt pórů, které by bylo možné odstranit vhodnou volbou strategie pro spékání kraje.



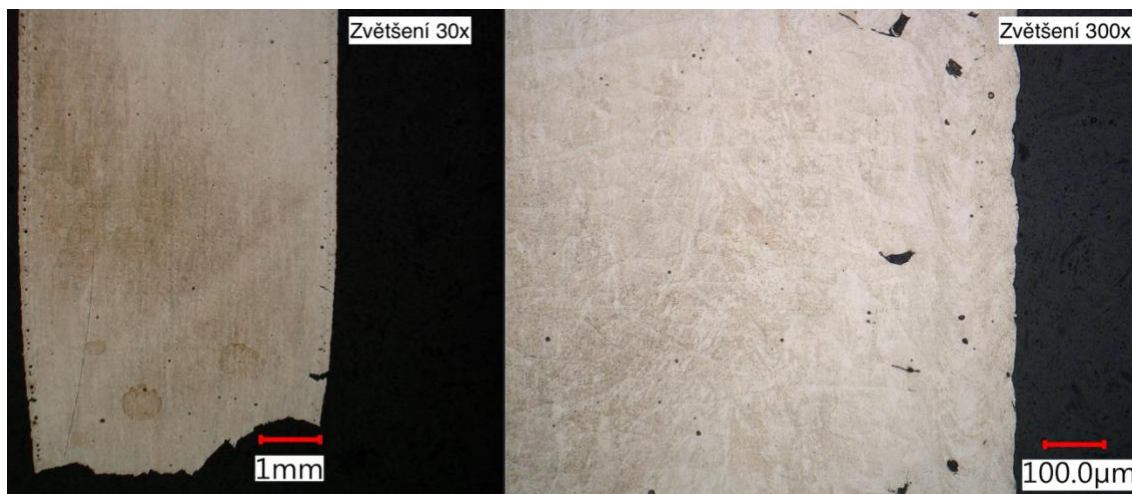
Obrázek 71 – Obrazová analýza vzorek S04 (bok)

U vzorku t03, který je na obrázku 72, můžeme vidět opět vysokou pórovitost kolem kraje celého vzorku (snímek vlevo). Na snímku vpravo je zobrazen kraj vzorku, na kterém je vidět velké množství vyloučeného karbidu chromu.



Obrázek 72 – Obrazová analýza vzorek t03 (řez)

Na obrázku 73 je vzorek t03 z tahové zkoušky, u kterého pozorujeme opět zvýšenou pórovitost na kraji vzorku. Ze snímku vpravo můžeme usoudit, že ke vzniku trhlin nedochází v místě „melt poolu“, ale náhodně v jakémkoliv místě spékané vrstvy.



Obrázek 73 – Obrazová analýza vzorek t03 (bok)



7 Závěr

V teoretické části diplomové práce byl proveden popis základního rozdělení aditivních technologií, podrobný popis technologie LPBF (DMLS), popis dostupných materiálů a kritická rešerše vědeckých publikací.

V praktické části byla hlavní pozornost věnována zkoumání mechanických vlastností v závislosti na strategii tisku a tepelném zpracování. Z tahové zkoušky porovnané s experimenty z kritické rešerše lze říct, že orientace vzorku při tisku nemá velký vliv na tahové vlastnosti materiálu. Největší vliv má na konečné tahové vlastnosti tepelné zpracování. Takto zpracované vzorky dosahují obdobných tahových vlastností jako konvenčně vyráběné materiály. Tato anizotropie mechanických vlastností je po zkušenostech s tiskem austenitických ocelí a AlSiMg slitin potěšujícím výsledkem.

U tepelně zpracovaných vzorků vyšla hodnota tvrdosti dle Rockwella 53 HRC a u tepelně nezpracovaných vzorků 44 HRC. Vzorky podrobené zkoušce byly tištěny v horizontální rovině s různou orientací/natočením a ani zde nepozorujeme podstatný vliv na hodnoty tvrdosti.

Po zkoušce tvrdosti se provedlo metalografické zpracování vzorků, ve kterém se vybrané vzorky zalisovaly do pryskyřice, a následně se brousily, leštily a leptaly.

Pórovitost vyšla u všech zkoumaných vzorků velmi nízká (přibližně 0,13 %). Podstatný rozdíl byl v porovnání jádra a kraje vzorku, kdy hodnota pórovitosti byla vyšší o přibližně 1 %. V oblasti kraje vzorku se vyskytovaly póry větších rozměrů. K potlačení zvýšené pórovitosti by mohlo dojít vhodnou volbou strategie navařování v oblasti kraje vzorku.

Hodnoty HRC ze zkoušky mikrotvrdosti a tvrdosti vyšly téměř stejné, s maximálními rozdíly mezi hodnotami v řádech desetin. Vyšší rozdíly hodnot HV byly při porovnání s kritickou rešerší a pohybovaly se okolo 11 až 25 %. Rozdíly mohly být způsobeny odlišnou strategií tisku, protože byly znatelné i mezi vzorky bez tepelného zpracování.

Z obrazové analýzy je patrné, že mikrotvrdost je stejná po celé ploše vzorku. Umístění vtisků na přechodu mezi jednotlivými „melt pooly“ a hranicemi návarů nemá vliv na výslednou mikrotvrdost. Ze snímků se také potvrdila vyšší pórovitost na kraji vzorků, která by se mohla potlačit vhodnou volbou strategie navařování. U vzorku po zkoušce tahem lze pozorovat, že ke vzniku trhlin nedochází na hranici „melt poolu“, ale nezávisle na jakémkoliv místě.



Seznam zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
CAD	[-]	Počítačem podporované navrhování
2D	[-]	Dvojměrný
3D	[-]	Trojměrný
SLA	[-]	Stereolitografie
SLS	[-]	Selektivní laserové slinování
DMLS	[-]	Laserové spékání kovového prášku
FDM	[-]	Fused deposition modeling
IJP	[-]	Ink-jet printing
SHS	[-]	Selective heat sintering
LOM	[-]	Laminated object manufacturing
DPL	[-]	Direct light printing
MAM	[-]	Aditivní technologie pro kovové materiály
PBF	[-]	Spékání kovového prášku
DED	[-]	Přímé nanášení
BJ	[-]	Nastříkávání pojiva
SL	[-]	Plošné laminování
MJ	[-]	Nastříkávání materiálu
ME	[-]	Vytlačování materiálu
VP	[-]	Fotopolymerizace
LPBF	[-]	Laserové spékání kovového prášku
EBPBF	[-]	Spékání kovového prášku elektronovým svazkem
L-DED	[-]	Přímé nanášení laserem
EB-DED	[-]	Přímé nanášení elektronovým svazkem
GMA-DED	[-]	Přímé nanášení obloukovým svařováním
GTA-DED	[-]	Přímé nanášení netavicí se elektrodou
PA-DED	[-]	Přímé nanášení plasmou
SLM		Selektivní laserové tavení
STL	[-]	Nativní formát souboru (stereolitografického programu)
CAM	[-]	Počítačem řízená výroba



HIP	[-]	Horké izostatické lisování
CT	[-]	výpočetní tomografie
GmbH	[-]	Společnost s ručením omezeným
CMM	[-]	Souřadnicový měřicí stroj
CNC	[-]	Počítačem řízený stroj
KCU	[J/cm ²]	Vrubová houževnatost (U vrub)
KCV	[J/cm ²]	Vrubová houževnatost (V vrub)
ČSN	[-]	Česká soustava norem
ISO	[-]	Mezinárodní organizace pro normalizaci
BCC	[-]	Kubická mřížka prostorově středěná
M _s	[°C]	Teplota martenzit start
A	[%]	Tažnost
R _m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R _e	[MPa]	Mez kluzu
R _a	[μm]	Průměrná aritmetická hodnota drsnosti
R _z	[μm]	Hloubka drsnosti
HV	[HV]	Tvrdost dle Vickerse
R _{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
KV	[J]	Nárazová práce



Seznam použité literatury

- [1] GIBSON. *ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES*. ISBN 9781493921126.
- [2] BERÁNEK, Libor. Aditivní a alternativní technologie [přenášky]. Praha: Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2020/2021. In: moodle-vyuka.cvut.cz [online]. [4.5.2021]. Záznamy dostupné z: <https://moodle-vyuka.cvut.cz/course/view.php?id=4128>
- [3] BADIRU, Adedeji Bodunde, Vhance V. VALENCIA a David LIU, ed. *Additive manufacturing handbook: product development for the defense industry*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2017]. System innovation series. ISBN 978-1-4822-6408-1.
- [4] PRAGANA, J.P.M., R.F.V. SAMPAIO, I.M.F. BRAGANÇA, C.M.A. SILVA a P.A.F. MARTINS. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* [online]. 2021, 2 [cit. 2021-5-22]. ISSN 26669129. Dostupné z: doi:10.1016/j.aime.2021.100032
- [5] YANG, Li, Keng HSU, Brian BAUGHMAN, Donald GODFREY, Francisco MEDINA, Mamballykalathil MENON a Soeren WIENER. *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017 [cit. 2021-5-22]. Springer Series in Advanced Manufacturing. ISBN 978-3-319-55127-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-55128-9
- [6] SIMSON, Thomas, Jürgen KOCH, Jakub ROSENTHAL, et al. Mechanical Properties of 18Ni-300 maraging steel manufactured by LPBF. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2019, 17, 843-849 [cit. 2021-5-22]. ISSN 24523216. Dostupné z: doi:10.1016/j.prostr.2019.08.112



- [7] BHARDWAJ, Tarun a Mukul SHUKLA. Direct Metal Laser Sintering of Maraging Steel: Effect of Building Orientation on Surface Roughness and Microhardness. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2018, **5**(9), 20485-20491 [cit. 2021-5-22]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2018.06.425
- [8] KUČEROVÁ, Ludmila, Karolina BURDOVÁ, Štěpán JENÍČEK a Iveta CHENA. Effect of solution annealing and precipitation hardening at 250 °C–550 °C on microstructure and mechanical properties of additively manufactured 1.2709 maraging steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2021, **814** [cit. 2021-5-22]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2021.141195
- [9] SHA, Wei a Zhanli GUO. *Maraging steels: Modelling of microstructure, properties and applications* [online]. Woodhead Publishing Limited and CRC Press, 2009 [cit. 2021-5-22]. ISBN 978-1-84569-693-1. Dostupné z: <https://1lib.cz/book/1199951/d36c6b?id=1199951&secret=d36c6b>
- [10] TIAN, Jialong, Wei WANG, M. BABAR SHAHZAD, Wei YAN, Yiyin SHAN, Zhouhua JIANG a Ke YANG. A New Maraging Stainless Steel with Excellent Strength–Toughness–Corrosion Synergy. *Materials* [online]. 2017, **10**(11) [cit. 2021-5-22]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10111293
- [11] Maraging Steel. *ScienceDirect* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/maraging-steel>
- [12] HABIBY, F., A. UL HAQ a A.Q. KHAN. The Properties and Applications of 18% Nickel Maraging Steels. *Materials Technology* [online]. 2016, **9**(11-12), 246-252 [cit. 2021-5-22]. ISSN 1066-7857. Dostupné z: doi:10.1080/10667857.1994.11785084
- [13] SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. *Prášková metalurgie: studijní opory : učební text, scénáře, testy*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3378-1.



- [14] D., Jamie. A comprehensive list of all the metal 3D printer manufacturers. *3D natives* [online]. 25.2.2021 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/metal-3d-printer-manufacturers/>
- [15] DVOŘÁK, Jan. *Technologické možnosti aditivních technologií* [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73084/F2-BP-2017-Dvorak-Jan-BP_Dvorak.pdf?sequence=-1. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [16] JANOVEC, Martin. *Užitné vlastnosti výrobků připravených pomocí technologie 3D tisku*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019, 138 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/45097>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav fyziky a mater. inženýrství. Vedoucí práce Smolka, Petr.
- [17] KOSTKOVÁ, Monika. *Technologičnost konstrukcí staveb kovového 3D tisku* [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84929/F2-BP-2019-Kostkova-Monika-BP_KOSTKOVA.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Lukáš Pelikán.
- [18] PROKOPOVÁ, Barbora. *Výroba modelů standardních a speciálních tvarových nástrojů pro výukové účely aditivní technologií 3D tisku* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/114735/PRO0161_FS_B2341_2303R002_2016.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Marek Pagáč, Ph.D.
- [19] ZETKOVÁ, Ivana. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj806mVmbDwAhVvpIsKHXYTB0QQFjABegQIBBA>



- D&url=https%3A%2F%2Fdspace5.zcu.cz%2Fbitstream%2F11025%2F28412%2F1%2FZetkova.pdf&usg=AOvVaw1pgZjTF4ts2ZLGbxmBTNu
K. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.
- [20] JAKEŠ, Jakub. *Aditivní technologie výroby* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/114746/JAK0059_FS_B2341_2303R002_2016.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
- [21] Základní principy aditivní výroby. *Sharplayers* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://sharplayers.cz/support/aditivni-vyroba/>
- [22] Co je aditivní výroba z kovů? *Renishaw* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/co-je-aditivni-vyroba-z-kovu--15240>
- [23] The complete guide to 3D printing metal parts with DMLS. *Stratasys* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/technologies/direct-metal-laser-sintering#what-is-dmls>
- [24] Direct metal laser sintering. *Engineering product design* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/direct-metal-laser-sintering/>
- [25] ŠPLÍCHAL, Jan. 3D tisk kovových materiálů. *Technický týdeník* [online]. 2020 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/poutaky/3d-tisk-kovovych-materialu_50018.html



- [26] STL editor Magics software. *X3D Systems* [online]. [cit. 2021-5-5].
Dostupné z: <https://x3d-systems.com/stl-editor-magics-software/>
- [27] *Bulletin průmyslu 4.0: Digitální dvojče/3D tisk* [online]. 2018/07, , 9 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.ncp40.cz/files/bulletin-prumyslu4-2018-07.pdf>
- [28] NARAMORE, Cameron. Post processing, the biggest hurdle for metal AM. *3D printing* [online]. 2019 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/metal/post-processing-the-biggest-hurdle-for-metal-am/>
- [29] Post-processing for metal 3D printing. *Protolabs* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/post-processing-for-metal-3d-printing/>
- [30] 3D post processing. *Bel Air* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://mk0belairfinish7bfyr.kinstacdn.com/wp-content/uploads/2019/10/3d-post-processing-systems-bel-air.pdf>
- [31] *Povrchové úpravy materiálů* [online]. , 7 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/podzim2016/UOPK_2007/um/Povrchove_uprav_y_materialu.pdf
- [32] Products. *Xact Metal* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://xactmetal.com/xm200c/>
- [33] Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering. *Crucible* [online]. 2015 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.crucibledesign.co.uk/images/uploaded/guides/bs7000-part-2-a-management-guide-download-original.pdf>
- [34] XM200C. *Xact Metal* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://xactmetal.com/wp-content/uploads/2020/02/XM200C-4.pdf>



- [35] About us. *EOS* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
<https://www.eos.info/en/about-us>
- [36] Who we are. *GE Additive* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
<https://www.ge.com/additive/who-we-are>
- [37] O společnosti Renishaw. *Renishaw* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
<https://www.renishaw.cz/cs/o-spolecnosti-renishaw--6432>
- [38] Machines. *SLM Solutions* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
<https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/>
- [39] Metal 3D printers. *3D systems* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
<https://www.3dsystems.com/3d-printers/metal>
- [40] Phenix systems. *Whiteclouds* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
<https://www.whiteclouds.com/3DPedia/phenix-systems.html>
- [41] About us. *AddUp* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
<https://addupsolutions.com/about-us/>
- [42] Additive manufacturing. *DMG MORI* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/aditivni-vyroba>
- [43] Systémy aditivní výroby. *Trumpf* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/systemy-aditivni-vyroby/
- [44] Machines. *Aconity 3D* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
<https://aconity3d.com/machines/>
- [45] Sapphire printer. *VELO 3D* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
<https://www.velo3d.com/sapphire-printer/>
- [46] About us. *Xact metal* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
<https://xactmetal.com>



- [47] Concept laser X Line 2000R. *GE Additive* [online]. [cit. 2021-5-4].
Dostupné z: https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-04/DMLM_X%20Line_Bro_8_US_EN_v1.pdf
- [48] NXG XII 600. *SLM Solutions* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z:
<https://www.slm-pushing-the-limits.com/specs#the-nxg>
- [49] SLM Solutions NXG XII 600. *ANIWAA* [online]. [cit. 2021-5-4].
Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/slm-solutions-nxg-xii-600/>
- [50] Metal 3D Printing Materials: DMLS Materials for Additive Manufacturing of Metal Parts. *EOS* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/dmls-metal-materials>
- [51] Powders. *GE Additive* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z:
<https://www.ge.com/additive/powders-overview>
- [52] 3D tisk kovů: Katalogové listy a případové studie. *Renishaw* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/katalogove-listy-aditivni-vyroba--17862>
- [53] Metal Materials. *3D Systems* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z:
<https://www.3dsystems.com/materials/metal>
- [54] LENS: LENS Materials. *Optomec* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z:
<https://optomec.com/3d-printed-metals/lens-materials/>
- [55] Materials. *SLM Solutions* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z:
<https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/powders/>
- [56] Material data sheet. *EOS* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z:
https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-



datasheet/werkzeugstahl_ms1_cx/ms1/ms-ms1-
m290_material_data_sheet_10-17_en.pdf

- [57] EOS Materials Metal: Portfolio Overview. *EOS* [online]. [cit. 2021-5-22].
Dostupné z: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/material_pdf/eos_materials_overview_metal_en.pdf



Seznam obrázků

Obrázek 1 - Rozsah použití aditivních technologií [15]	11
Obrázek 2 - Využití aditivních technologií [2]	12
Obrázek 3 - Schéma technologie BJ [4]	13
Obrázek 4 - Schéma technologie SL [4]	14
Obrázek 5 - Klasifikace aditivních technologií pro kovy (MAM) [4]	15
Obrázek 6 - Schéma technologie L-LED [4]	16
Obrázek 7 - Schéma technologie EB-DED [4]	17
Obrázek 8 - Schéma technologie EBM [3]	18
Obrázek 9 - Spékání kovového prášku [24]	19
Obrázek 10 - Schéma technologie DMLS (LPBF) [25]	20
Obrázek 11 - Prostředí Magics softwaru [26]	21
Obrázek 12 - Detail tisku součásti [23]	21
Obrázek 13 - Vyjmutí součásti ze stroje [10]	22
Obrázek 14 - Čištění součásti od kovového prášku [28]	22
Obrázek 15 - Žihání vytisknutých součásti [28]	23
Obrázek 16 - Vliv obrábění na kvalitu povrchu tisknuté součásti [30]	24
Obrázek 17 - Principiální schéma HIP [13]	24
Obrázek 18 - Stroj EOS M 100 [28]	28
Obrázek 19 - Stroj X Line 2000R se systémem pro manipulaci prášku [47]	30
Obrázek 20 - Stroj NXG XII 600 [48]	31
Obrázek 21 - Tiskárna XM200C [34]	32
Obrázek 22 - Stavební paleta [33]	36
Obrázek 23 - Samonosné úhly [2]	36
Obrázek 24 - Otvory při tisku [33]	37
Obrázek 25 - Detail vytištěných převisů [19]	37
Obrázek 26 - Možnosti řešení vynucených mostů [33]	38
Obrázek 27 - Vhodná a nevhodná řešení orientace součásti v rovině [2]	38
Obrázek 28 - Přemostění vysokých součásti [33]	39
Obrázek 29 - Nejmenší možná tloušťka stěny u hliníkové slitiny CL21 AL [2]	39
Obrázek 30 - Umístění podpor a perforování součásti otvory [33]	40
Obrázek 31 - Oddělení podpor od stavební palety [33]	41
Obrázek 32 - Prášek pro metodu DMLS (LPBF) [2]	44
Obrázek 33 - Princip síťové analýzy [13]	45
Obrázek 34 - Způsoby legování prášků [13]	46
Obrázek 35 - Kompatibilní materiály s tiskárnou EOS M100 [57]	47
Obrázek 36 - Závislost meze pevnosti na TZ jednotlivých vzorků [8]	55
Obrázek 37 - Závislost meze kluzu na TZ jednotlivých vzorků [8]	55
Obrázek 38 - Závislost tažnosti na TZ jednotlivých vzorků [8]	56
Obrázek 39 - Pozice jednotlivých vzorků na zkušební paletě	57
Obrázek 40 - Stroj LabTest 5.100SP1	59
Obrázek 41 - Rozměry zkušebního tělesa	60
Obrázek 42 - Diagram z tahové zkoušky vzorku s03	60
Obrázek 43 - Diagram z tahové zkoušky vzorku t06	61
Obrázek 44 - Diagram z tahové zkoušky vzorku s02	61
Obrázek 45 - Hodnoty Rm a Rp0,2 vzorků z tahové zkoušky	62
Obrázek 46 - Tažnost vzorků z tahové zkoušky	63



<i>Obrázek 47 - Vzorky po zkoušce tahem</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 48 - Lom vzorku s01 po zkoušce tahem</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 49 - Lom vzorku t01 po zkoušce tahem</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 50 - Lom vzorku t02 po zkoušce tahem</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 51 - Tvrdoměr WPM.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 52 - Vzorky po zkoušce tvrdosti dle Rockwella</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 53 - Tvrdost vzorků (R01 až R05) dle Rockwella</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 54 - Tvrdost vzorků (R06 až R10) dle Rockwella</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 55 - Pila Labotom-3 (Struers)</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 56 - Metalografický lis CitoPress-10 (Struers).....</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 57 - Stroj Tegramin-25 (Struers).....</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 58 - Pracovní prostředí mikroskopu Keyence VHX-6000</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 59 - Porozita vzorku t03</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 60 - Histogram kraje vzorku s04</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 61 - Vybraná plocha pro měření pórovitosti vzorku s04.....</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 62 - Pórovitost a velikost pórů</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 63 - Mikrotvrdoměr FUTURE-TECH FM-100</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 64 - Nastavení matice a kroku v softwaru HDPS-ARS.....</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 65 - Vyhodnocení vtisků v softwaru HDPS-ARS</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 66 - Mikrotvrdost HV0,3 vzorků R07 a R08</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 67 – Obrazová analýza vzorek R07 (bok)</i>	<i>76</i>
<i>Obrázek 68 – Obrazová analýza vzorek R08 (bok)</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 69 – Obrazová analýza vzorek R08 (řez)</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 70 – Obrazová analýza vzorek R08 (shora)</i>	<i>78</i>
<i>Obrázek 71 – Obrazová analýza vzorek S04 (bok).....</i>	<i>78</i>
<i>Obrázek 72 – Obrazová analýza vzorek t03 (řez).....</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 73 – Obrazová analýza vzorek t03 (bok).....</i>	<i>79</i>



Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 - Parametry stroje EOS M 100 [28]</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 2 - Parametry stroje X Line 2000R [47]</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 3 - Parametry stroje NGX XII 600 [48] [49]</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 4 - Parametry stroje XM200C [34]</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 5 - Druhy materiálů a jejich výrobci [50] [51] [52] [53] [54] [55]</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 6 - Materiálový list s vlastnostmi tištěné maraging oceli 1.2709 [56]</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 7 - Chemické složení a mez kluzu maraging ocelí [11]</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 8 - Chemické složení oceli maraging 300 [56]</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 9 - Parametry experimentu 1 [6]</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 10 - Porovnání výsledných mechanických vlastností experimentu 1 [6]</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 11 - Parametry experimentu 2 [7]</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 12 - Výsledné vlastnosti vzorků experimentu 2 [7]</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 13 - Parametry experimentu 3 [8]</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 14 - Mechanické vlastnosti vzorků před stárnutím experimentu 3 [8]</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 15 - Popis jednotlivých vzorků pro rázovou zkoušku</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 16 - Popis vzorků pro tahovou zkoušku</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 17 - Příklad zkušebních parametrů pro tahovou zkoušku vzorku s03</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 18 - Výsledky zkoušek tahem</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 19 - Hodnoty naměřených tvrdostí dle Rockwella</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 20 - Aritmetický průměr mikrotvrdosti vzorku RO7</i>	<i>74</i>
<i>Tabulka 21 - Aritmetický průměr mikrotvrdosti vzorku R08</i>	<i>75</i>
<i>Tabulka 22 – Hodnoty mikrotvrdostí k obrázku 67</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 23 - Hodnoty mikrotvrdostí k obrázku 70</i>	<i>78</i>