

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav materiálového inženýrství



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv způsobu výroby na strukturu a vlastnosti
slitiny AlSi10Mg

Autor: Tomáš Barták

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jana Sobotová, Ph. D

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Barták** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **465363**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv způsobu výroby na strukturu a vlastnosti slitiny AlSi10Mg

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of production method on structure and properties of AlSi10Mg alloy

Pokyny pro vypracování:

1. Literární rešerše
2. Experimentální část
 - a. Kontrola pórovitosti materiálů pomocí NDT
 - b. Zkouška tahem
3. Zhodnocení výsledků, závěry, sepsání BP

Seznam doporučené literatury:

- [1] PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. Brno: CERM, c1999. ISBN 80-720-4130-4.
- [2] SOBOTOVÁ, J. Nauka o materiálu I. a II.: cvičení. Dotisk 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [3] SKOČOVSKÝ, P., P. PALČEK, R. KONEČNÁ a L. VÁRKOLY. Konštrukčné materiály. Žilina: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2000. ISBN 80-7100-608-4.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

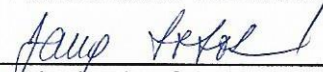
doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

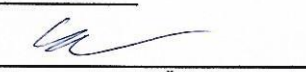
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **01.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

15.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Tomáš Barták

Rád bych poděkoval paní Doc. Ing. Janě Sobotové, Ph.D. za četné rady, věnovaný čas a trpělivost, které mi poskytla během vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jakobovi Horváthovi, Ph.D., panu Ing. Vladimíru Márovi, panu Ing. Janu Krčilovi, panu Ing. Janu Šimotovi a firmě ATG za pomoc s realizací experimentů provedených v rámci práce.

Anotace

Bakalářská práce se věnuje slitině AlSi10Mg a vlivu způsobu výroby na její vlastnosti, (pevnost, mez kluzu, tažnost, porozita a struktura). Pro porovnání byly experimenty provedeny na vzorcích pro tahovou zkoušku s kruhovým průřezem 8 mm vyrobených 3D tiskem, konkrétně metodou selective laser sintering (SLS) a dále na vzorcích konvenčně odlitých. Všechny vzorky byly dále podrobeny rozpouštěcímu žíhání při teplotě 520 °C po dobu 4 hodiny a následnému ochlazení ve vodě. Poté došlo ke stárnutí 9 hodin při 170 °C. Pro sledování porozity bylo použito dvou nedestruktivních metod zkoušení, a sice pozorování rentgenových snímků a metoda computer tomography. Dále bylo použito dvou destruktivních metod, a to zkoušky tahem a metalografické analýzy.

Klíčová slova

AlSi10MG, slitiny hliníku, metody 3D tisku, mechanické vlastnosti, porozita, struktura

Annotation

The bachelor thesis deals with the AlSi10Mg alloy and the influence of the used method of production on its properties (strength, yield strength, porosity and structure). For comparison the experiments were conducted on specimens built for tensile test with circular cross section 8 mm in diameter manufactured by 3D printing, specifically selective laser sintering (SLS) and then specimens manufactured by conventional casting. All of the specimens were also subjected to solution annealing with 520 °C for 4 hours and then cooling in water. Then aging in 170 °C for 9 hours. For specimens property evaluation two non-destructive methods were used, x-ray image observation and computer tomography. Then two destructive methods were used specifically tensile test and metalographic analysis.

Key words

AlSi10Mg , aluminum alloys, 3D printing methods, mechanical properties, porosity, structure

Seznam veličin a použitých zkratek

Označení	Veličina	Jednotky
K12	kubická plošně středěná mřížka	-
FCC	face centered cubic	-
%	procento	-
kg	kilogram	-
m	metr	-
°C	stupeň celsia	-
Al	hliník	-
MPa	megapascal	-
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
A	tažnost (nespecifikovaná zkuš. Tyč)	[%]
A _{5,65} (A ₅)	tažnost krátké zkušební tyče	[%]
A _{11,3} (A ₁₀)	tažnost dlouhé zkušební tyče	[%]
Z	kontrakce	[%]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
HV	tvrdost dle Vickerse obecně	-
HB	tvrdost podle Brinella obecně	-
HBS	tvrdost dle Brinella kuličkový indentor	-
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý	-
W	watt	-
K	kelvin	-
S	siemens	-
Mn	mangan	-
Mg	hořčík	-
Si	křemík	-
Cu	měď	-
Zn	zinek	-
Li	lithium	-
Ni	nikl	-

Fe	železo	-
Pb	olovo	-
Sn	cín	-
Ti	titan	-
tzv.	takzvaně	-
např.	například	-
HBS	Tvrдость dle Brinella	-
elox	elektrolytická oxidace hliníku	-
CAD	computer aided design	-
TZ	tepelné zpracování	-
horiz.	horizontálně	-
vertik.	vertikálně	-
FDM	fused deposition modeling	-
NDT	nedestruktivní testování	-
CT	computer tomography	-
a.s.	akciová společnost	-
s.r.o.	společnost s ručením omezeným	-
BP	bakalářská práce	-

Obsah

Seznam veličin a použitých zkratk	2
Úvod	6
1 Teoretická část	6
1.1 Hliník a jeho slitiny	7
1. 1. 1. Nevytvrditelné slitiny	10
1. 1. 2. Vytvrditelné slitiny	11
1. 1. 3. Slévárenské slitiny	12
1.2. 3D tisk kovových slitin	13
1. 2. 1. Fused deposition modeling (FDM)	13
1. 2. 2. Selective laser sintering (SLS) a Direct metal laser sintering (DMLS)	14
1. 2. 3. Hipování (Hot isostatic pressing - HIP)	16
1.3 Porovnání 3D tištěných vzorků oproti konvenčním metodám	19
1.3.1 Mechanické vlastnosti	19
1.3.2. Struktura	22
1.4. AlSi10Mg	23
1. 4. 1. Vlastnosti a chemické složení	23
1. 4. 2. Značení	26
2 Experimentální část	28
2. 1. Experimentální metody	30
2.1.1. Pozorování rentgenových snímků	30
2.1.2 Metoda Computer tomography (CT)	32
2.1.3. Tahová zkouška	33
2.1.4. Metalografická analýza	33
3 Výsledky a jejich diskuze	34
3.1. Vyhodnocení rentgenových snímků	34
3.2. Vyhodnocení metody computer tomography	35
3.3. Vyhodnocení tahové zkoušky	41
3.4. Vyhodnocení metalografických snímků	43
Závěry	46
Bibliografie	46

Úvod

Metoda 3D tisku je jednou z nejmodernějších technologií výroby. Hojně se uplatňuje například v lékařství pro výrobu implantátů, v letectví, nebo při výrobě prototypů v průmyslu. Výhodou 3D tisku je, že oproti konvenčním metodám jako je například slévání či tváření není tvarová rozmanitost výrobku překážkou. Navíc lze na jednom stroji bez modifikace vyrobit téměř jakoukoli součást, pokud je poskytnut dostatečný pracovní prostor. Na druhou stranu ale 3D tisk oproti konvenčním metodám zaostává v rychlosti výroby. [1]

3D tisk je tedy z hlediska charakteristiky výrobního procesu a operativnosti značně odlišný od konvenčních metod. Důležitým aspektem všech součástí vyrobených ve strojírenském průmyslu je rozpětí jejich vlastností, například mez kluzu, pórovitost nebo struktura.

Jednou ze slitin vhodných k 3D tisku je slitina AlSi10Mg, která je zároveň hojně využívána v automobilovém průmyslu (například pro výrobu kompresorů). Tento materiál má také velice dobré slévárenské vlastnosti hlavně zabíhavost. [2] [3]

Cílem práce je charakterizovat zmíněnou slitinu AlSi10Mg, některé metody 3D tisku a způsoby případné eliminace pórů v hotovém výrobku. Dále porovnat vzorky z této slitiny vyrobené metodou 3D tisku SLS s konvenčním odléváním. Srovnávána bude mez pevnosti, mez kluzu, tažnost, porozita a struktura za použití NDT i destruktivních metod testování. Dále proběhne komparace výsledků s mechanickými vlastnostmi uvedenými v technické literatuře pro tuto slitinu.

1 Teoretická část

1.1 Hliník a jeho slitiny

Předmětem práce je testování slitin hliníku, pro lepší pochopení problematiky jsou dále stručně popsány vlastnosti čistého hliníku.

Hliník je jedním z běžně využívaných kovů v oboru strojírenství, tvoří mřížku K12 (FCC), díky které má vynikající tvařitelnost za studena i za tepla. Patří mezi lehké kovy a jeho hustota je $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Hliník má poměrně nízkou teplotu tavení a sice $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Vlastnosti hliníku se mění v závislosti na jeho čistotě a velikosti zrna. Vliv čistoty hliníku na jeho mechanické vlastnosti je zaznamenán v Tabulce 1. [4] [5]

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti čistého hliníku v žíhaném stavu při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ [4]

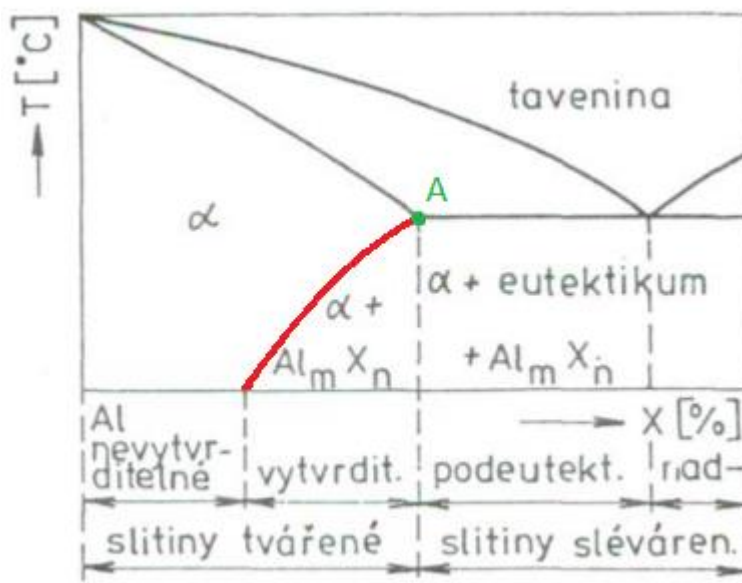
Druh (čistota Al)	Al 99,99	Al 99,5
Mez kluzu - $R_{p0,2}$ [MPa]	15	50
Mez pevnosti - R_m [MPa]	50	90
Tažnost - $A_{5,65}$ [%]	45	30
Kontrakce – Z [%]	90	70
Modul pružnosti v tahu – E [MPa]	71 000	71 000
Tvrdość (Dle Brinella) - HB	15	20

Z tabulky je patrné, že hliník má už při nárůstu pouhých 0,4 % příměsí mnohem větší mez kluzu a mez pevnosti, zvýšení čistoty také zmenší tvrdost o čtvrtinu. V souladu s tím tažnost a kontrakce jsou znatelně lepší u čistšího hliníku a nakonec modul pružnosti v tahu se podle tabulky příliš nemění. Z toho tedy plyne, že namáhání lépe odolává hliník s více příměsemi, ale pro tváření je vhodnější Al 99,99 tedy téměř čistý hliník.

Jedna z nejlepších vlastností hliníku, co se týče použití ve strojírenství, je jeho skvělá odolnost proti atmosférické korozi. Tato odolnost je dána oxidickou vrstvou Al_2O_3 , která zamezuje šíření koroze hlouběji do struktury, a navíc poměrně dobře odolává vyšším teplotám. Například práce [6] uvádí, že speciální hliníkový povlak vydrží teploty až $649\text{ }^\circ\text{C}$, právě díky tomu, že se na povrchu vytvoří dříve zmíněná vrstva oxidu hlinitého, který má teplotu tavení zhruba $2050\text{ }^\circ\text{C}$. Díky tomu se hliník často používá k pokovení součástí jako je třeba výfuk, kde by kvůli velkému množství tepla například zinková vrstva nevydržela. Také se používá v součástech stále ponořených ve vodě [7]. Dále se hliník vyznačuje skvělou tepelnou vodivostí ($209\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), i elektrickou vodivostí ($38\text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$). [4] Díky dobré elektrické vodivosti byl hliník dříve běžně používán jako materiál vodičů v elektrotechnice, výhodou je, že hliník je znatelně lehčí než měď (hustota mědi je $8960\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), která je dnes v této aplikaci častější. Při použití Al místo Cu bylo možno ušetřit až 50 % hmotnosti vodičů. Nevýhodou je dříve zmíněná malá pevnost (Tabulka 1), která vedla k použití ocelového lana jako jádra vodiče a hliník byl pouze obalem. [5] Díky značné tepelné vodivosti se hliník používá také například při výrobě chladících zařízení nebo jako fólie k uchování jídla (alobal). [5]

Jak již bylo uvedeno, čistý hliník má pro technické využití nevyhovující mechanické vlastnosti (Tabulka 1). Jeho slitiny tyto nedostatky částečně eliminují a zároveň si zachovávají i některé žádoucí vlastnosti jeho čisté podoby. Obecně platí, že čím více cizích látek je ve slitině, tím více se potlačují vlastnosti jeho čisté formy. [8]

Hliníkové slitiny se dělí na tvářené (vhodné pro tváření) a na slévárenské (vhodné pro odlévání). Toto rozdělení ukazuje rovnovážný binární diagram (Obrázek 1). Z něj je vidět, že slitiny s menším obsahem příměsí se řadí mezi slitiny tvářené, ty s větším obsahem jsou slitiny slévárenské. Tvářené se dále rozdělují z hlediska možnosti zlepšení jejich pevnosti na nevytvrditelné a vytvrditelné, kde vytvrditelné jsou slitiny vymezené čarou klesající rozpustnosti přísady v tuhém roztoku α do maximální rozpustnosti přísady v tuhém roztoku vyznačené bodem A. [9]

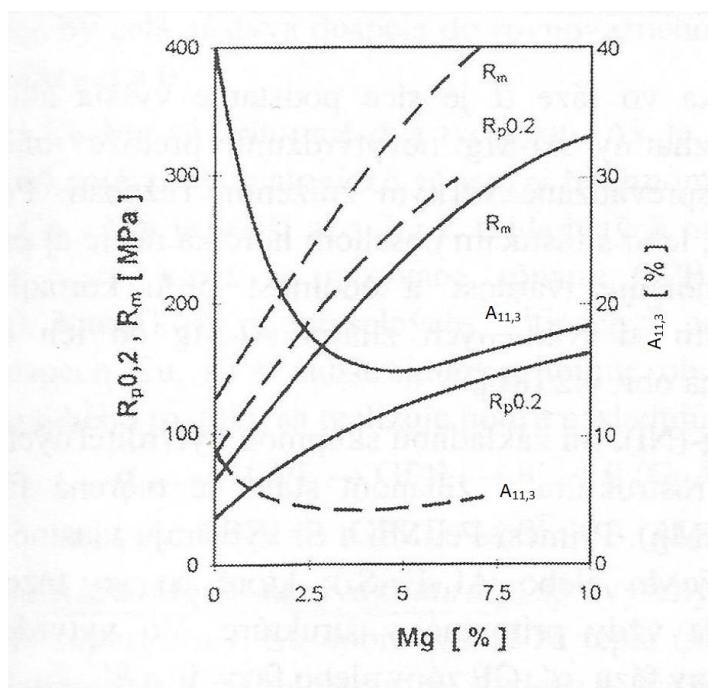


Obrázek 1: Schéma binárního rovnovážného diagramu Al-X [9], upraveno pro BP

Vytvrzování je děj, jehož cílem je zpevnění dané slitiny, jeho podstatou je rozpad přesyceného tuhého roztoku za vzniku jemných částic, které se pomocí difuze rovnoměrně rozptýlí. Tento děj se nazývá precipitace. Aby bylo možno toto uskutečnit je potřeba, aby daná slitina krystalizovala v rovnovážném binárním diagramu s klesající rozpustností v tuhém stavu (Obrázek 1). [10] Vytvrzování se provádí ohřevem slitiny do oblasti teplot existence tuhého roztoku, díky čemuž se rozpustí legující prvky. Následuje prudké ochlazení na teplotu okolí, tím vznikne metastabilní přesycený tuhý roztok legujících prvků, který se díky následnému rozpadu (stárnutí) dostává zpět do rovnovážného stavu. Zvýšení pevnosti je dáno tím, že vzniklý precipitát brání volnému pohybu dislokací ve struktuře. [10]

1. 1. 1. Nevytvrditelné slitiny

Patří sem dvojsložkové slitiny Al-Mn a Al-Mg, mangan má ve slitině malou rozpustnost, takže by slitiny s ním byly jen velmi málo vytvrditelné. [4] Zástupcem je slitina AlMn1, která má dobrou svařitelnost, korozní odolnost a tvařitelnost, její použití je v potravinářském průmyslu na nádoby a jejich kryty. [5] Slitiny s hořčíkem už nemají tak špatnou rozpustnost jako je tomu u manganových, ale jejich vytvrzením by došlo k poměrně malému zvýšení pevnosti na úkor velkého snížení tažnosti. [4], tato skutečnost je patrná z Obrázku 2.



Obrázek 2: Vliv obsahu hořčíku na mechanické vlastnosti tvářených slitin Al-Mg v žíhaném stavu (plná čára) a ve vytvrzeném stavu (přerušovaná čára) [4]

Uvedený pokles je pozorovatelný zhruba do 5% obsahu Mg, při dalším přidávání už tažnost neklesá, spíše mírně roste. Slitiny Al-Mg se používají na odlitky odolávající atmosférické korozi jako například materiál na stavbu lodí, nebo v chemickém a potravinářském průmyslu. [9]

1. 1. 3. Slévárenské slitiny

Na rozdíl od tvářených jsou slévárenské slitiny hliníku více legovány, vykazují horší mechanické vlastnosti, ale lepší technologické vlastnosti potřebné k správnému odlévání. Rozdíl mechanických vlastností je zaznamenán v Tabulce 2, slévárenské slitiny mají podle ní menší pevnosti než tvářené. Dále vykazují tvářené slitiny obecně i větší tažnost než slévárenské, kde v tabulce tvoří výjimku pouze slitina AlSi12. [5] [9]

Tabulka 2 Vybrané Al slitiny na tváření a na odlévání a porovnání jejich vlastností, převzato a upraveno z [9]

Druh	Slitina hliníku	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	HBS [-]
Na tváření	AlCu4Mg1	345	435	5	130
	AlCu2,5NiMg	270	380	4	110
	AlMn1	120	140	4	45
Slévárenské	AlSi7Mg	220	260	1	90
	AlSi10Mg	220	260	1	90
	AlSi12	80	170	5	55

Slitiny na bázi Al – Cu: Vykazují relativně dobrou odolnost proti opotřeбенí a s přísadou niklu jsou vhodné pro aplikaci odlitků pracujících za zvýšených teplot. [9]

Slitiny na bázi Al – Mg: Mají dobrou leštitelnost, korozní odolnost a nízkou měrnou hmotnost (2500 kg.m⁻³). Oproti jiným slévárenským slitinám jsou náchylnější k oxidaci a také hůře vyplňují formu, jejich zabíhavost je zhruba 3-krát menší než u siluminů (popsány později). Dále jsou náchylné ke tvoření pórů, kvůli širokému intervalu tuhnutí. [4] [9]

Slitiny na bázi Al - Si: také nazývané siluminy, mají poměrně nízkou měrnou hmotnost (2650 kg.m⁻³), vyznačují se dobrou zabíhavostí, malým smrštěním (0,5 %) a malou praskavostí. Také dobře odolávají korozi a příliš se nezadírají, nevýhodou je horší obrobiteľnosť. [9]

1.2. 3D tisk kovových slitin

V bakalářské práci je polovina testovaných vzorků vyrobena metodou 3D tisku, proto zde bude tato problematika stručně popsána.

3D tisk neboli prostorový tisk je metoda výroby součástí podle softwarového modelu. Tato metoda se od jiných metod výroby liší převážně tím, že se zde materiál neubírá jako je tomu například u soustružení, ale přidává postupným vrstvením. Toho se docílí tím, že se CAD model rozdělí na jednotlivé tenké vrstvy (20 až 40 μm) a podle nich se materiál nanáší. Vrstvy postupně tvrdnou a spojí se do konečné podoby předepsané CAD modelem. Výsledek 3D tištění je tedy hotový výrobek, velmi často je ale potřeba použít opory, které nejsou jeho součástí, musí být zahrnuty do 3D modelu ale po vytištění výrobku odstraněny. [11]

Výhodou této metody je, že se dá snadno regulovat a výsledné produkty jsou velice přesně vyrobeny. Dále umožňuje vytvořit víceméně jakoukoli součást a není třeba se tolik přizpůsobovat technologickým požadavkům jako je tomu u konvenčních metod. Na druhou stranu se setkává s problémem, že jiné metody výroby jsou rychlejší a lépe slouží při velkosériové výrobě. Je tedy vhodné 3D tisk použít hlavně pro malosériovou výrobu součástí, které jsou tvarově složité. [11]

Co se týče tepelného zpracování 3D tištěných výrobků, většinou je třeba pomocí něho redukovat vnitřní pnutí v součásti způsobené velkými teplotními výkyvy při samotné výrobě, k tomu se používá žihání ke snížení pnutí ihned po vyjmutí součásti z 3D tiskárny. Dále se pro zvýšení tvrdosti často používá vytvrzování, pokud je to pro daný materiál vhodné. [12]

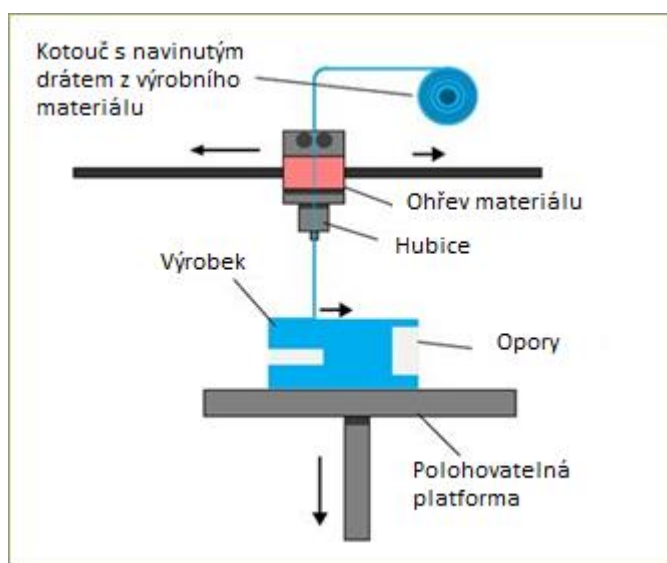
Dále jsou popsány některé metody 3D tisku.

1. 2. 1. Fused deposition modeling (FDM)

Tato metoda spočívá v nanášení roztaveného kovového drátu ve vrstvách, je cenově dostupná a nejvíce používaná, často slouží k vytvoření prototypů a vzorků výroby. Dráty se posouvají do hubice (*Obrázek 4*), kde jsou roztaveny a nanášeny na povrch výrobku. Pohyb hubice s drátem je řízen automaticky pomocí počítače, který přiložený 3D model přemění na souřadnice a hubici posouvá v ose X, Y a Z, jakmile se vytvoří celá vrstva, polohovatelný stůl s výrobkem klesne po ose Z o šířku vrstvy a začne se nanášet nová. Hotová součást se vyjme se z tiskárny a odstraní se z ní

opory, často postačí nástrojem či rukou. Doba tisku je závislá na rozměrech výrobku. FDM je jedna z pomalejších metod 3D tisku oproti jiným jako například Selective laser sintering. [11] [13]

Výhody jsou již dříve zmíněná cena a snadné použití. Takto vytvořené prototypy výrobků mají dobré mechanické vlastnosti, především pevnost. Dále je velkou výhodou, že velikost součásti je limitována pouze velikostí tiskárny, a tak je tedy teoreticky možno vyrobit libovolně velký díl za předpokladu dostatečného pracovního prostoru. [14]

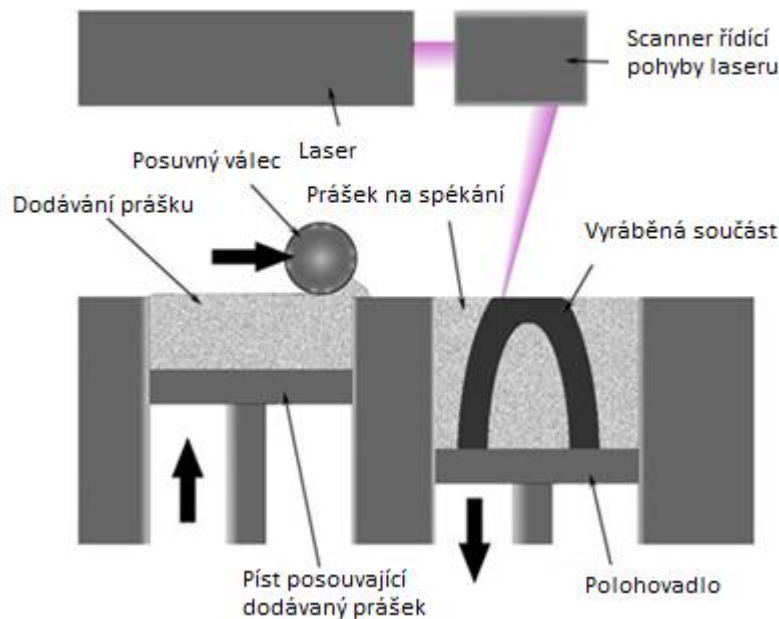


Obrázek 4: Schéma metody FDM [14], popisky přeloženy pro BP

1. 2. 2. Selective laser sintering (SLS) a Direct metal laser sintering (DMLS)

Podstatou této technologie je zapékání kovového prášku ve vrstvách pomocí laseru, při této metodě nedochází k tavení prášku. Nejprve se nanese prášek pomocí posuvného válce, který ho ze zásobníku přisune na místo tisknutí výrobku. Potom počítač získá informace z CAD modelu o tom, jakou vrstvu je nyní potřeba vytvořit. S touto informací ovládá laser, který září přímo na prášek, který se tak speče a vytvoří danou vrstvu. Následně se polohovadlo, které se nachází pod nově vytvořenou vrstvou, posune směrem dolů a tím vytvoří prostor pro další vrstvu. Potom se tento děj znovu opakuje, dokud není výrobek vytvořen celý. Princip je schématicky znázorněn na Obrázku 5 dále. Pracovní prostředí uvnitř tiskárny je regulováno

pomocí inertního plynu aby nedocházelo k nežádoucím chemickým reakcím, obvykle se jedná o argon hlavně kvůli jeho dostupnosti a ceně. [11] [14] [15]



Obrázek 5: Metoda laserového zapékání [13], popisky přeloženy pro BP

Po dokončení tisku se polohovadlo s výrobkem vysune do původní polohy a obsluha ho může vyjmout. Potom je třeba ještě součást očistit od nepoužitého prášku, odstranit případné podpory a následně obrousit některé části výrobku, které požadují menší drsnost povrchu. Také může následovat povrchová úprava dle použití součásti. [11] [14] [15]

Výhodou této metody je velká přesnost, díky níž je možno vytvořit velice tenké stěny. Je to také velice rozšířená technologie pro výrobu implantátů do lidského těla, jako jsou třeba kostní náhrady, významné uplatnění nachází i ve strojírenském průmyslu hlavně pro výrobu prototypů. Rychlost tisku je zhruba 5 cm³ materiálu za hodinu tisku, dosahuje se tím velmi malé porezity a velké homogenity materiálu, v drtivé většině případů potom není třeba provádět žádné další úpravy. Touto metodou je možno tisknout výrobky z různých kovů a slitin jako například zinek, různé bronzy, nástrojové a korozivzdorné oceli, titan, slitiny kobaltu a chromu a nebo právě hliníkové slitiny jako například AlSi10Mg. [11] [14] [15]

Tiskárny umožňují směrovou orientaci 3D tisku. Podle [11] se pevnost v závislosti na směru tisku liší minimálně, mírné rozdíly jsou uvedeny u tažnosti.

Tabulka 3 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg při různých směrech 3D tisku [8]

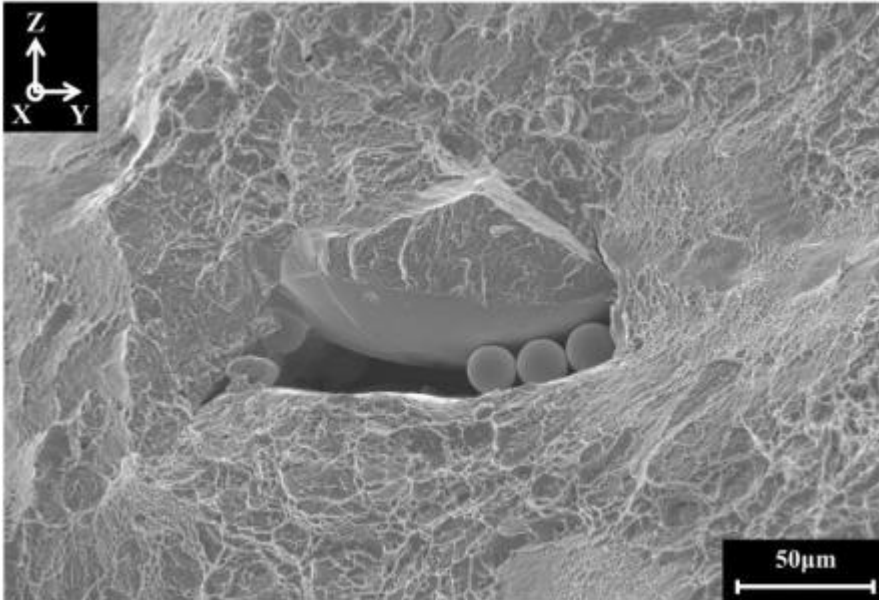
Směr pokládání vrstev při 3D tisku	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu v tahu R_e [MPa]	Tažnost A [%]
Horizontální	378	249	13
Vertikální	384	238	9,8
Diagonální	360	230	10,7

Z Tabulky 3 lze vyčíst, že pevnost je v závislosti na směru tisku skutečně téměř identická, ale tažnost se mírně liší. Nejvyšší tažnost má horizontálně tištěný vzorek a nejnižší má vertikálně tištěný vzorek, diagonální má tažnost větší zhruba o 1 % oproti vertikálnímu. Citovaná práce neuvádí, zda se jedná o tažnost krátké či dlouhé tyče.

1. 2. 3. Hipování (Hot isostatic pressing - HIP)

Pojem hipování je odvozen z anglického názvu, volně přeloženo znamená stlačování materiálu za vysokého tlaku a teploty. Jedná se vlastně o metodu tepelného zpracování, kde hlavním cílem je zlepšení určitých vlastností hotového výrobku, aby lépe plnil svojí funkci. Hipování se provádí tak, že se upravovaný materiál umístí do speciální uzavřené nádoby vytvořené přímo k tomuto účelu, v této nádobě je atmosféra tvořená nějakým inertním plynem (obvykle argonem), který zajistí, že se kvůli vysoké teplotě nebude měnit chemické složení povrchu upravované součásti. Jakmile je materiál umístěn ve správném prostoru a vnitřek nádoby je vyplněn požadovaným plynem, začne se dodávat teplo a zároveň působí tlak uvnitř komory. Izostatický tlak je způsoben dvěma faktory, prvním je práce mechanického kompresoru a druhý je ohřívání plynu, který tím zvětšuje svůj objem. Tlak působí na povrch tělesa a společně s teplem ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti. Hlavní výhodou hipování je, že se s jeho pomocí dají s velkou účinností odstranit póry, které často vznikají například při odlévání. [16] [17]

Hipování lze také využít pro tepelnou úpravu 3D tištěných výrobků s cílem odstranění pórů a současně změnu mechanických vlastností. Studie [18] uvádí, že pro titanovou slitinu Ti-6Al-4V vyrobenou metodou SLS (vysvětleno v kapitole 3D tisk kovových slitin) se po použití hipování při 1000 °C/150 MPa odstraní strukturní slabiny vzniklé při 3D tištění (Obrázek 6). [18]



Obrázek 6: Slitina Ti-6Al-4V, dutina vzniklá při 3D tisku metodou SLS [18]

Autoři [18] uvádí, že v průběhu uvedeného hipování došlo u slitiny Ti-6Al-4V ke změně původní martenzitické struktury α na lamelární $\alpha+\beta$ a působením tlaku a teploty se dutina efektivně uzavřela.

Práce [18] dále uvádí rozdíly v mechanických vlastnostech před a po hipování dané titanové slitiny (Tabulka 4). [18]

Tabulka 4 Mechanické vlastnosti 3D tištěných vzorků z Ti-6Al-4V v závislosti na směru tisku a před i po hipování při 1000 °C/150 MPa. [18]

Směr tištění	Stav	Relativní hustota [%]	Tvrdość HRC [-]	Pevnosť v ohybu [MPa]	Nárazová práce [J]
Vertikální	Po tisku	99,3	41	1490	5
Horizontální	Po tisku	99,3	42	2200	10
Vertikální	Hipován	99,8	34	2040	33
Horizontální	Hipován	99,8	34	1980	29

Z Tabulky 4 je patrné, že hipování zvýší relativní hustotu, což je dáno odstraněním dutin, dále se sníží tvrdost, hlavně kvůli změně fáze. Změna pevnosti v ohybu se liší podle způsobu výroby, u vertikálního se hipováním zlepšila u horizontálního spíše zhoršila. V obou případech se ale významným způsobem zvětšila nárazová práce potřebná k přeražení vzorku. [18]

Parametry hipování, což jsou teplota a tlak, závisí hlavně na materiálu, ze kterého je součást vyrobena, jako je tomu u ostatních TZ. Teplota většinou bývá zhruba 0,7 teploty tavení materiálu ve stupních celsia a běžná hodnota tlaku je 100 MPa. Parametry hipování pro některé vybrané materiály jsou v Tabulce 5 níže. Je patrné, že doporučený hipovací tlak se pro vybrané kovy a jejich slitiny nemění. [17]

Tabulka 5: Parametry hipování pro vybrané materiály [17]

Materiál	Teplota tavení [°C]	Mez kluzu* (pokojová teplota) [MPa]	Teplota hipování [°C]	Hipovací tlak [MPa]
Al a slitiny	660 (Al)	100 - 627	500	100
Cu a slitiny	1083 (Cu)	60 - 960	800 - 950	100
Oceli	1536 (Fe)	500 - 1980	950 - 1160	100
Ti a slitiny	1670 (Ti)	180 - 1320	920	100

*hodnoty závisí na chemickém složení a tepelném zpracování

1.3 Porovnání 3D tištěných vzorků oproti konvenčním metodám

Neoddiskutovatelnou výhodou 3D tisku oproti konvenčním metodám je jeho schopnost vytvořit téměř jakýkoli výrobek a technologická složitost se vůči konvenčním výrobním metodám příliš nezmění. Navíc je využit skoro všech materiálů a není tak během výroby vytvářen šrot. Oproti tomu například při odlévání je třeba uvažovat nad možností vyjmout výrobek z formy po ztuhnutí, nebo navrhovat odlitek tak, aby nevznikalo tolik staženin. Nevýhodný je 3D tisk při sériové výrobě, v té jsou konvenční metody mnohem lépe konkurenceschopné. Například při odlévání je možné mít mnoho forem na jednu pec tavící kov. Na 3D tištění je třeba použít velice nákladný stroj, který na jednom výrobku pracuje desítky hodin. [19] [20]

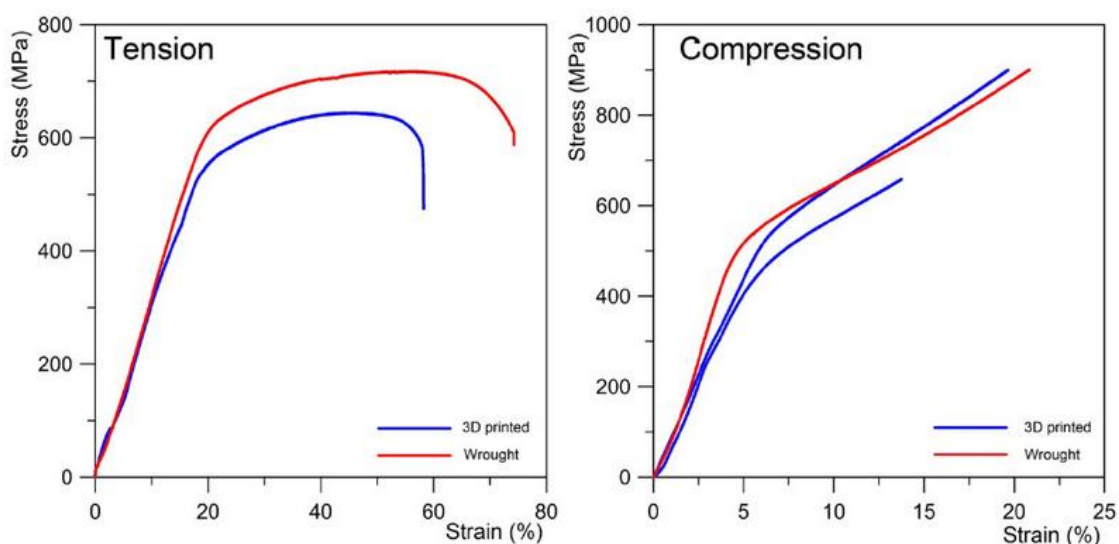
1.3.1 Mechanické vlastnosti

Například práce [20] porovnává vlastnosti korozivzdorné austenitické oceli AISI 316L, polovina sledovaných vzorků byla vytvořena tvářením za tepla a druhá metodou selective laser melting (SLM). Byly provedeny zkoušky tahem a tlakem. Příklad vzorku pro zkoušku tahem je na *Obrázku 7*.



Obrázek 7: vzorek z oceli AISI 316L pro porovnání mechanických vlastností 3D tištěných výrobků oproti za tepla tvářeným [20]

Na Obrázku 8 jsou deformační diagramy pro sledované stavy.



Obrázek 8: Porovnání deformačních diagramů oceli AISI 316L v závislosti na technologii výroby. [20]

Z výsledků práce [20] uvedených na Obrázku 8 a v Tabulce 6 je patrné, že zatímco pevnostní charakteristiky ze zkoušky tahem jsou přibližně o 10 % nižší pro 3D tištěnou ocel AISI 316L, ze zkoušky tlakem jsou porovnatelné. Tažnost 3D tištěné oceli je přibližně o 20 % nižší než u oceli tvářené a tvrdost je srovnatelná.

Tabulka 6 Vybrané mechanické vlastnosti 3D tištěné a tvářené korozivzdorné oceli AISI 316L [20]

Výsledky zkoušky	AISI 316L (3D tištěný)	AISI 316L (tvářený)
Tahem		
R _{p0,2} [MPa]	567	622
R _m [MPa]	635	717
A [%]	43	54
Tlakem		
R _{p0,2} [MPa]	497	505
Měření tvrdosti		
HV1	207	205

Z výsledků [20] lze usuzovat, že pokud je třeba dosáhnout maximálních mechanických vlastností, tvářený je u oceli AISI 316L výhodnější než 3D tisk. V citované práci není pro tažnost uvedena délka zkušební tyče.

Dále práce [21] uvádí pro slitinu AlSi10Mg rozdíl mechanických vlastností vzorků vyrobených metodou SLS a odlitých vzorků, dále podrobených stárnutí. V Tabulce 7 jsou zaznamenány hodnoty meze pevnosti, modulu pružnosti a relativního prodloužení zjištěné pomocí zkoušky tahem, dále byla na vzorcích změřena ještě tvrdost HV. Zde je patrné, že pro slitinu AlSi10Mg je dosaženo celkově lepších vlastností 3D tiskem metodou SLM než odléváním, modul pružnosti je srovnatelný, mez pevnosti je téměř stejná pro oba směry tisku, ale odlité vzorky mají tuto hodnotu zhruba o 90 MPa nižší. Prodloužení se liší u všech metod výroby, největších hodnot dosahuje horizontálně tištěný vzorek, dále vertikálně tištěný a nakonec odlitý, tím je dokumentována určitá anizotropie vlastností pro různé směry tisku. Tvrdost 3D tištěných vzorků je výrazně větší oproti odlitým a to zhruba o 30 HV .

Tabulka 7 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg v odlitém stavu po stárnutí a vyrobené metodou SLM [21], přeloženo pro BP

Způsob výroby	E [GPa]	R _m [MPa]	A [%]	HV
horizontální SLM	68 ± 3	391 ± 6	5,55 ± 0,4	127
vertikální SLM	68 ± 3	396 ± 8	3,47 ± 0,6	127
odlité + stárnutí	71	300 - 317	2,5 – 3,5	86

1.3.2. Struktura

3D tištěné výrobky vykazují určitou úroveň anizotropie způsobenou nanášením po jednotlivých vrstvách, takto vznikne rozdíl mezi mikrostrukturou vrstev a jejich hranicemi a materiál se chová jinak při zatížení v různých směrech. V součástech, při jejichž výrobě bylo použito metod SLS nebo SLM, dochází při tvorbě vrstev k zahřívání hotových částí materiálu a mění se tak mikrostruktura oproti jiným místům a vzniká její nehomogenita. [22]

Co se týče porozity, je značně omezena, protože vrstvy se vytváří postupně a není technologický důvod, jak by v samotné vrstvě pór vznikl. Mohou se projevit určité nedostatky při skládání vrstev na sebe, v tomto případě vznikají mezery mezi vrstvami a tvoří se tak póry, bývají ale spíše menší než malé staženiny vytvořené při odlévání, kvůli kterým jsou odlité výrobky často poměrně porézní. [22] Práce neuvádí velikost uvedených malých pórů.

Dále je třeba zmínit charakteristický povrch 3D tištěných výrobků, kde bývá patrná struktura vrstev, běžné hodnoty drsnosti jsou uvedeny v Tabulce 8 [1][20].

Tabulka 8 Obvyklé drsnosti povrchu součástí vyrobených metodami FDM a SLS [1]

Metoda 3D tisku	Ra [μm]	Rz [μm]
Fused deposition modeling (FDM)	8,8	88,4
Selective laser sintering (SLS)	13,1	90,5

V medicínských aplikacích, kde se 3D tisk hojně využívá a součást je zakryta jinou součástí, nebo je například uvnitř tkáně, není problém s větší drsností. V rámci letectví a kosmonautiky nebo stavebnictví je často vyžadována vyšší jakost povrchu a je potřeba 3D tisk ještě dále rozvíjet nebo použít metody snížení drsnosti povrchu jako například broušení. Pro případ, že je třeba součást povrchově upravit, může být vyšší drsnost přínosem, například při nástřiku tekutého kovu, kde členitost povrchu napomáhá k správnému přilnutí kovu k povrchu. [1] [22]

1.4. AlSi10Mg

1. 4. 1. Vlastnosti a chemické složení

Jak bylo doposud uvedeno, tato slitina patří do skupiny siluminů, které se vyznačují velice dobrými slévárenskými vlastnostmi jako je dobrá zabíhavost, malé smrštění a praskavost a dále dobrou korozní odolností. Na druhou stranu se hůře obrábí. [2] [5] [9]

V Tabulce 9 je uvedeno rozmezí chemického složení tohoto materiálu. Právě obsah křemíku zařazuje tuto slitinu mezi siluminy, díky obsahu Mg je vhodný pro vytvrzování. [2]

Tabulka 9 Chemické složení slitiny AlSi10Mg [2]

Prvek	Minimum podílu [%]	Maximum podílu [%]
Měď (Cu)	-	0,1
Hořčík (Mg)	0,2	0,3
Křemík (Si)	10	13
Železo (Fe)	-	0,6
Mangan (Mn)	0,3	0,7
Nikl (Ni)	-	0,1
Zinek (Zn)	-	0,1
Olovo (Pb)	-	0,1
Cín (Sn)	-	0,05
Titan (Ti)	-	0,2
Hliník (Al)	zbytek	zbytek



Obrázek 9: Odlitek ze slitiny AlSi10Mg [3]

Slitina se primárně používá na výrobu odlitků s tenkými stěnami a složitou geometrií, kde se uplatní jeho dobrá zabíhavost vlastní všem siluminům. Dále je poměrně pevná, tvrdá a má dobré mechanické vlastnosti (konkrétní hodnoty byly uvedeny v Tabulce 2). Díky tomu je volen pro součástky, které musí odolávat velkému náporu vnějších sil a zároveň je třeba, aby měly menší hmotnost. Typicky se používá v automobilovém průmyslu, například jako materiál pro výrobu kompresoru do klimatizace. [2] [3] viz Obrázek 9.

Jak již bylo uvedeno slitina AlSi10Mg patří do skupiny materiálů vhodných pro 3D tisk. Dále jsou dostupné informace z [23], kde není specifikováno použité tepelné zpracování po 3D tisku.

Tabulka 10 Charakteristické vlastnosti materiálu AlSi10Mg – 3D tisk [23]

Veličina	Rozmezí
Hustota	2,68 g/cm ³
Mez pevnosti	335 – 355 MPa
Mez kluzu	215 – 245 MPa
Prodloužení při přetržení	9 – 13%
Modul pružnosti v tahu	50 – 70 GPa
Tvrdość	114 – 124 HV5
Relativní hustota	>99,5 %
Obvyklá přesnost	± 0,2 %
Minimální tloušťka stěny	0,5 mm

V Tabulce 11 jsou uvedeny vlastnosti vzorků 3D tištěných horizontálním a vertikálním směrem metodou SLS, před a po žíhání ke snížení pnutí jak uvádí [3]. Z tabulky je patrné, že po žíhání k snížení pnutí došlo k poklesu pevnosti až o 100 MPa a tažnost narostla až dvojnásobně. Hodnoty v Tabulce 11 lze porovnat s hodnotami v Tabulce 3. Dá se předpokládat, že hodnoty v Tabulce 3 jsou po žíhání na snížení pnutí. V práci [3] byly dosaženy mírně nižší pevnostní charakteristiky než v práci [8], tažnost je srovnatelná. Obě práce ve shodě uvádějí, že v rámci směrodatné odchylky se pevnostní charakteristiky v závislosti na směru tisku výrazně neliší.

Tabulka 11 Vlastnosti slitiny AlSi10Mg připravené metodou SLS (Selective laser sintering) [3]

Mechanické vlastnosti:			
		bez TZ	s TZ*
Mez pevnosti (tah):	horizontálně	445 ± 20 MPa	335 ± 20 MPa
	vertikálně	405 ± 20 MPa	325 ± 20 MPa
Mez kluzu: (Rp 0,2%)	horizontálně	275 ± 10 MPa	225 ± 10 MPa
	vertikálně	230 ± 10 MPa	220 ± 10 MPa
Modul pružnosti:	horizontálně	70 ± 5 GPa	70 ± 5 GPa
	vertikálně	65 ± 5 GPa	65 ± 5 GPa
Tažnost:	horizontální	6,5% ± 2%	11% ± 2%
	vertikální	3,5% ± 2%	7% ± 2%
Tvrдость		120 ± 5 HBW	Není uvedeno
Únavová pevnost**		97 ± 7 MPa	Není uvedeno
Tepelné vlastnosti:			
Tepelná vodivost (při 20 °C):	horizontálně	103 ± 5 W/m°C	173 ± 10
	vertikálně	119 ± 5 W/m°C	W/m°C 175 ± 10 W/m°C
Tepelná kapacita:	horizontálně	920 ± 50 J/kg°C	890 ± 50
	vertikálně	910 ± 50 J/kg°C	J/kg°C 900 ± 50 J/kg°C

*Žihání ke snížení pnutí 2 hodiny při 300 °C

**Test únavy s frekvencí 50 Hz, měření ukončeno po $5 \cdot 10^6$ cyklů bez trhliny

1. 4. 2. Značení

Nejběžnější označení této slitiny je právě podle chemického složení neboli AlSi10Mg, kde jsou vyjmenovány hlavní složky slitiny, tedy křemík, hořčík a samozřejmě hliník (Tabulka 9 výše). Číslo 10 zde určuje minimální procentuální podíl křemíku ve slitině, tedy 10 %. [2]

Pro rozpoznávání slitin hliníku pro slévání se také využívá číselné značení podle evropské normy EN 1706, které určuje množství legujících prvků.

Obecně se značí takto:

EN AC – XXXXX

První dvě písmena označují použití předem zmíněné evropské normy, písmeno A definuje materiál jako slitinu hliníku a C jako slitinu na odlitky. Dále následuje 5 čísel, která pojednávají o chemickém složení, první číslo udává hlavní prvek kromě hliníku (Tabulka 12) a zbývající 4 číslice blíže určí podíl ostatních prvků. [2]

Tabulka 12 značení dle hlavních přísadových prvků [2]

Nelegovaný hliník	10000	Hliník – hořčík	50000
Hliník - měď	20000	Hliník – hořčík - křemík	60000
Hliník - mangan	30000	Hliník – zinek	70000
Hliník - křemík	40000	Jiné prvky	80000

Díky tabulce je vidět, že pro slitinu AlSi10Mg bude první z pěti číslo 4

Druhé číslo označuje skupinu slitin (u slitin AlSi)

Třetí číslo udává pořadí ve skupině

Poslední čísla jsou vždy 0

Celé značení je:

EN AC – 43000 [24]

2 Experimentální část

V experimentu byla použita slitina AlSi10Mg, jejíž obecné vlastnosti již byly popsány. Byly vyrobeny vzorky pro zkoušku tahem, průměr 8 mm a délka činné části 40 mm (viz *Obrázek 10*). Jedná se dohromady o 6 vzorků, z nichž polovina je vyrobena metodou 3D tisku a druhá polovina odlita a následně obrobena.



Obrázek 10: Vzorky použité pro experimentální část

Odlité vzorky vyrobila firma Slévárna a modelárna Nové Ransko s.r.o. a 3D tištěné vzorky byly vyrobeny ve společnosti Misan za použití metody SLS s tiskem horizontálním směrem.

Pro následné teplené zpracování byla použita pec LAC LH 30/13 MT 825A (*Obrázek 11*), jednalo se o rozpouštěcí žíhání při teplotě 520 °C po dobu 4 hodiny a následné ochlazení ve vodě.



Obrázek 11: Pec LAC LH 30/13 MT 825A

Dále bylo provedeno stárnutí v peci Memmert UF 55 (*Obrázek 12*) při teplotě 170 °C po dobu 9 hodin, parametry vytvrzování byly zvoleny na základě předchozích experimentů. Vytvrzování bylo provedeno shodně u všech sledovaných vzorků.



Obrázek 12: Pec Memmert UF 55

2. 1. Experimentální metody

Pro vyhodnocení vlastností zkoumaných vzorků, bylo použito dvou různých NDT metod a sice pozorování rentgenových snímků a metoda CT, nedestruktivní metody měly za úkol zhodnotit strukturu vzorků z hlediska pórů a staženin. Následovala zkouška tahem a metalografické pozorování.

2.1.1. Pozorování rentgenových snímků

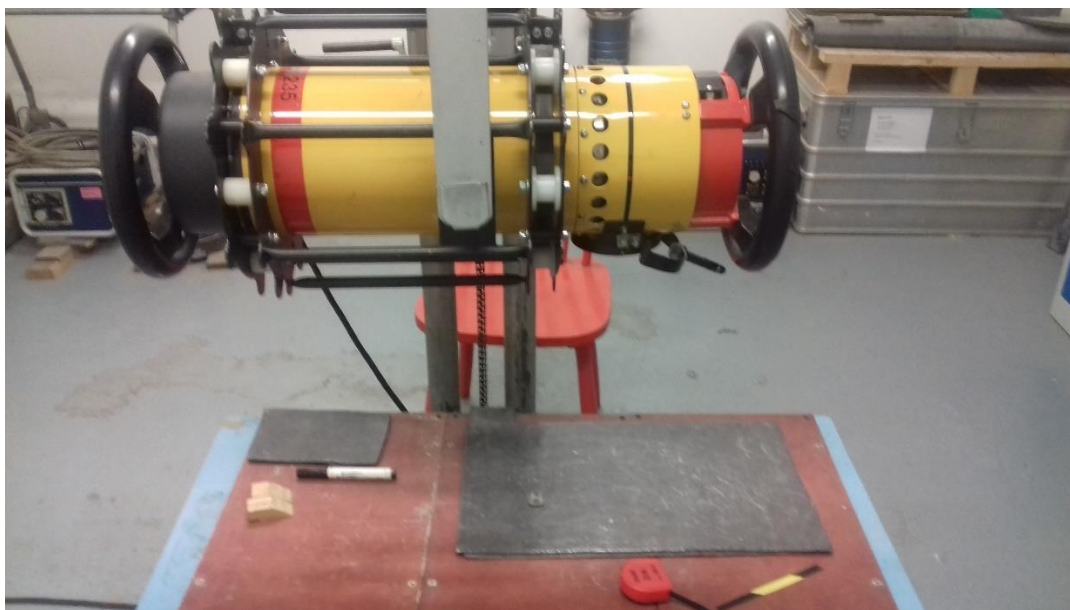
Tato NDT metoda spočívá v pořízení snímků pomocí rentgenového záření a filmové techniky a následné detekci diskontinuit ve struktuře zkoumaného materiálu. Vytvořené snímky projdou vizuálním zhodnocením kvalifikovaným pracovníkem a na základě toho lze usoudit, zda je výrobek defektní, či vyhovující. Tento způsob NDT testování se provádí podle normy ČSN EN ISO 5579. [25]

V rámci zkoušky je třeba doložit, že bylo použito správného nastavení pořizovacího rozlišení snímků, toho se docílí tak, že se kromě zkoumaných vzorků vloží pod emitor rentgenového záření speciální normované kovové drátky různých tloušťek (*Obrázek 13*). Pokud je dosaženo přesnosti požadované pro dané měření, či podle požadavků zákazníka, mělo by na snímku být vidět určité množství drátků. Obecně platí, že čím tenčí je drátek, tím je třeba větší přesnosti snímku, aby byl viditelný, z toho tedy vyplývá, že čím více drátků je vidět, tím přesnější je pořízený snímek. [25]



Obrázek 13: Měrné drátky pro určení přesnosti snímku

Pořízení snímků proběhlo ve firmě ATG v Praze v rentgenové laboratoři (*Obrázek 14*)



Obrázek 14: Příklad přístroje na emisi rentgenového záření z firmy ATG

Na olověnou desku na stole pod přístrojem se pokládají zkušební vzorky umístěné na rentgenovém filmu (Obrázek 15)



Obrázek 15: Vzorky připravené k pořízení rentgenového snímku

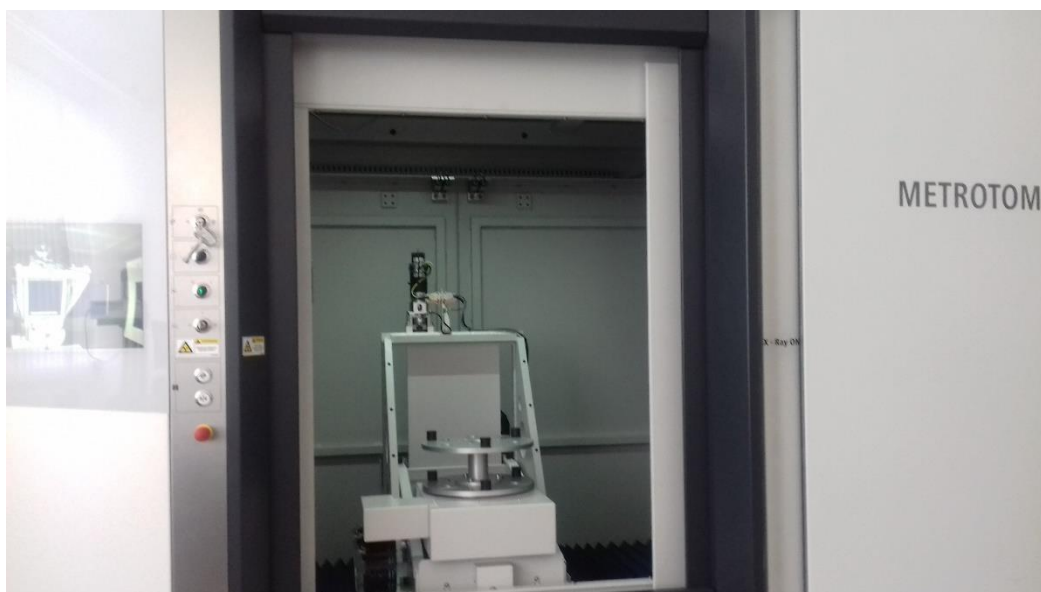
Na obrázku je vidět označení jednotlivých vzorků kovovou číslicí, drátková měřka určující přesnost snímku a použitý film Industrex Mx 125 Contactpak 10x24 cm.

V rámci experimentální části práce se na rentgenových snímcích vizuálně kontrolovalo množství a velikost pórů a staženin.

2.1.2 Metoda Computer tomography (CT)

Computer tomography je další z nedestruktivních metod, spočívá v ozařování zkoumaného vzorku rentgenovým nebo gama zářením a následném automatickém zpracování dat počítačovým algoritmem. Ten dále vytvoří 3D model daného zkoumaného tělesa, podobně jako CAD software. Model je možno dále prohlížet pomocí počítačového softwaru, který potom dokáže vyhodnotit celý objem vzorku a zjistit například četnost a velikost pórů či vměstků a s těmito daty dále pracovat. [26]

Výstupem z CT je tedy 3D model, který je možno prohlížet v softwaru a data zpracovaná přímo počítačem. V rámci experimentu bylo pro CT použito laboratoře Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze v Dejvicích (Obrázek 16) a vyhodnocení pomocí softwaru myVGL 3.2.3.



Obrázek 16: přístroj pro získání 3D modelu

Vzorky jsou vloženy do obalů z polystyrenové pěny a umístěny dovnitř komory, následně se celá komora uzavře a začne snímání. Uvnitř komory je emitor rentgenového záření a dále snímač, který data o vzorku přenesení do počítače, kde je vytvořen 3D model.

2.1.3. Tahová zkouška

Pro určení mechanických vlastností byla provedena Zkouška tahem ocelí dle ČSN EN ISO 6892-1, zkouška spočívá v postupném zatěžování vzorku tahovou silou, kde měření probíhá, dokud se neporuší spojitost tělesa. [7] V rámci této zkoušky byly zjišťovány tyto vlastnosti:

Mez pevnosti: $R_m = \frac{F_m}{S_0}$ [MPa]

Smluvní mez kluzu: $R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$ [MPa]

Tažnost: $A = \frac{(L_u - L_0)}{L_0} \cdot 100$ [%]

Kde F_m [N] je maximální síla před přetržením zkušební tělesa, S_0 [mm²] je počáteční plocha průřezu tělesa ve funkční části, $F_{p0,2}$ [N] síla na mezi kluzu, L_0 [mm] počáteční délka zkušební tyče a L_u [mm] je konečná délka zkušební tyče po přetržení.

Zkouška byla provedena ve společnosti UJP Praha a.s. Nad Kamínkou 1345, 156 10 Praha Zbraslav na zkušebním stroji Instron 5800R.

2.1.4. Metalografická analýza

Vzorky pro metalografické pozorování byly připraveny vyříznutím části tělesa pro zatavení do polymeru na pile Leco msx 255 M1, vyříznutá část byla fixována v přístroji Leco PR-4X. Dále byla vyhlazena funkční část vzorku nejprve bruskou MTH kompakt 1031 brusnými papíry v rozmezí od p80 do p1000, následovalo leštění na Leco GPX-300 za použití suspenze OP-S NonDry. Nakonec byla hodnocená plocha naleptána Nitalem.

Tento postup byl použit na vzorek číslo 2 z řady 3D tištěných a na vzorek číslo 2 z řady odlitých, tyto vzorky vykazovaly průměrné hodnoty sledovaných charakteristik.

Samotné pozorování bylo provedeno na světelném mikroskopu NEOPHOT 32 s kamerou umožňující fotografování snímků. Celý proces přípravy vzorků, pozorování a získávání snímků byl proveden v laboratořích Ústavu materiálového inženýrství Českého vysokého učení technického v Praze na Karlově náměstí.

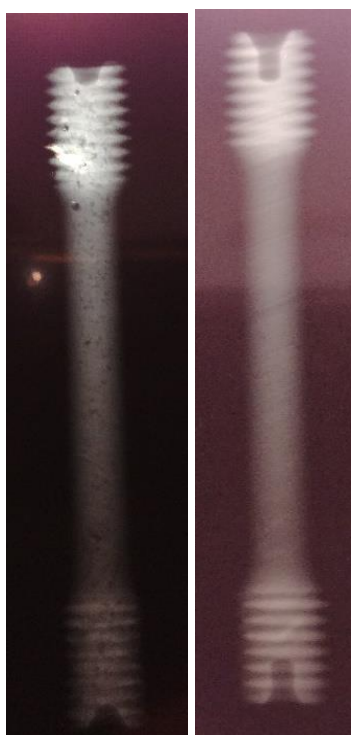
3 Výsledky a jejich diskuze

Tato kapitola pojednává o výsledcích výše popsaných metod v rámci experimentů provedených pro předloženou BP

3.1. Vyhodnocení rentgenových snímků

Pro pořízení snímků byl použit stroj Baltospot ceram 235, film Industrex MX 125 Contactpak 10x24 cm, ohnisková vzdálenost 500 mm, drátková měrka 10FekN – W15 s železnými drátky a doba expozice záření byla 2 minuty.

Snímků bylo pořízeno dohromady 6, s tím, že pro každý set tří vzorků jsou 3. Mezi tvorbou snímků se vzorky otáčely o 120°. Pozorování bylo provedeno pomocí rentgenového pracoviště podsvícením snímků přímo ve firmě ATG. Rozbor ukázal, že všechny vzorky vyrobené odléváním, mají výraznou pórovitost, viditelnou velmi zřetelně ze snímků, oproti tomu 3D tištěné vzorky neměly žádnou viditelnou pórovitost



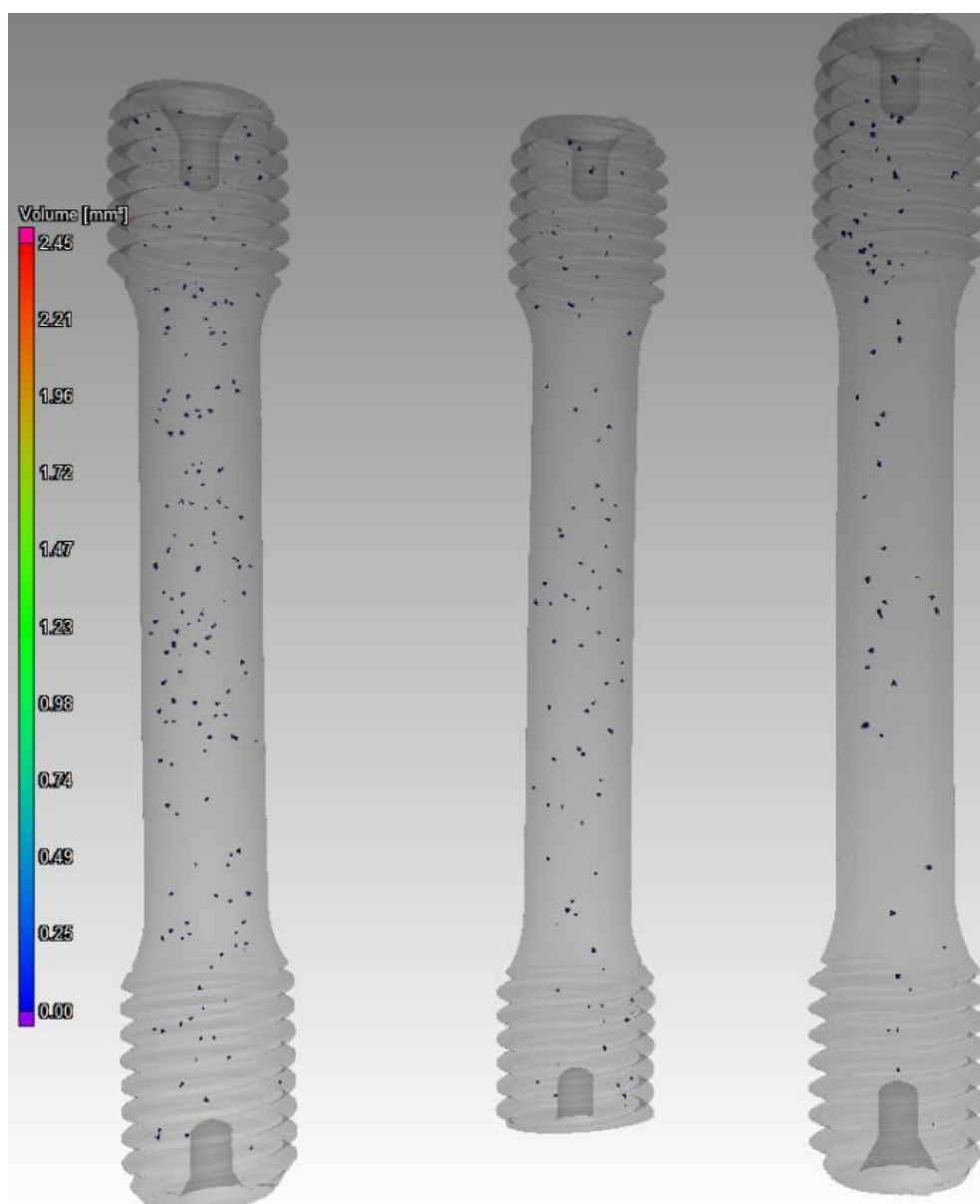
Pro ilustraci (*Obrázek 17*) byl vybrán vzorek 3 ze skupiny odlitých vzorků (vlevo) a vzorek 3 ze skupiny 3D tištěných vzorků (vpravo). Ačkoliv přefocení rentgenových snímků nelze získat kvalitní vypovídající obrázek, větší pórovitost u litého vzorku je patrná. Pro kvantitativní hodnocení pórovitosti se však tato metoda ukázala jako nedostatečná, proto byla později použita metoda CT pro podrobnější rozbor pórovitosti a její kvantifikaci.

Obrázek 17: AlSi10Mg - porovnání pórovitosti odlitého vzorku (vlevo) a 3D tištěného vzorku (vpravo)

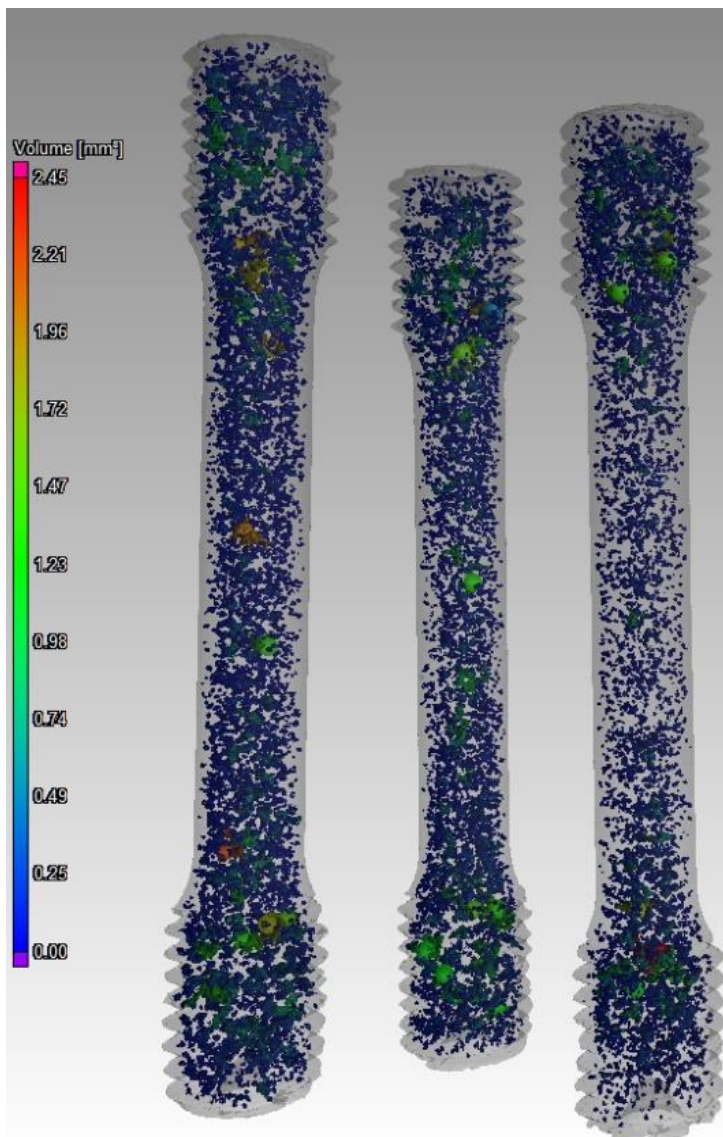
3.2. Vyhodnocení metody computer tomography

Pro sledované vzorky byl vytvořen 3D model pomocí dat snímaných v laboratoři, byly zaznamenány póry a defekty, dále byla data zpracována a vytvořen graf pro každý vzorek ilustrující množství defektů a jejich velikostní rozdělení, nakonec bylo v tabulce zaznamenáno i několik největších pórů a jejich velikost.

3D modely slouží jako náhled na celkové rozložení defektů (hlavně pórů) ve vzorku, vlevo od vzorků je barevná stupnice, která označuje velikost póru v mm^3 , následují modely 3D tištěných vzorků (Obrázek 18) a dále odlité vzorky (Obrázek 19).



Obrázek 18: AlSi10Mg - Modely 3D tištěných vzorků očíslované zleva 1, 2, 3

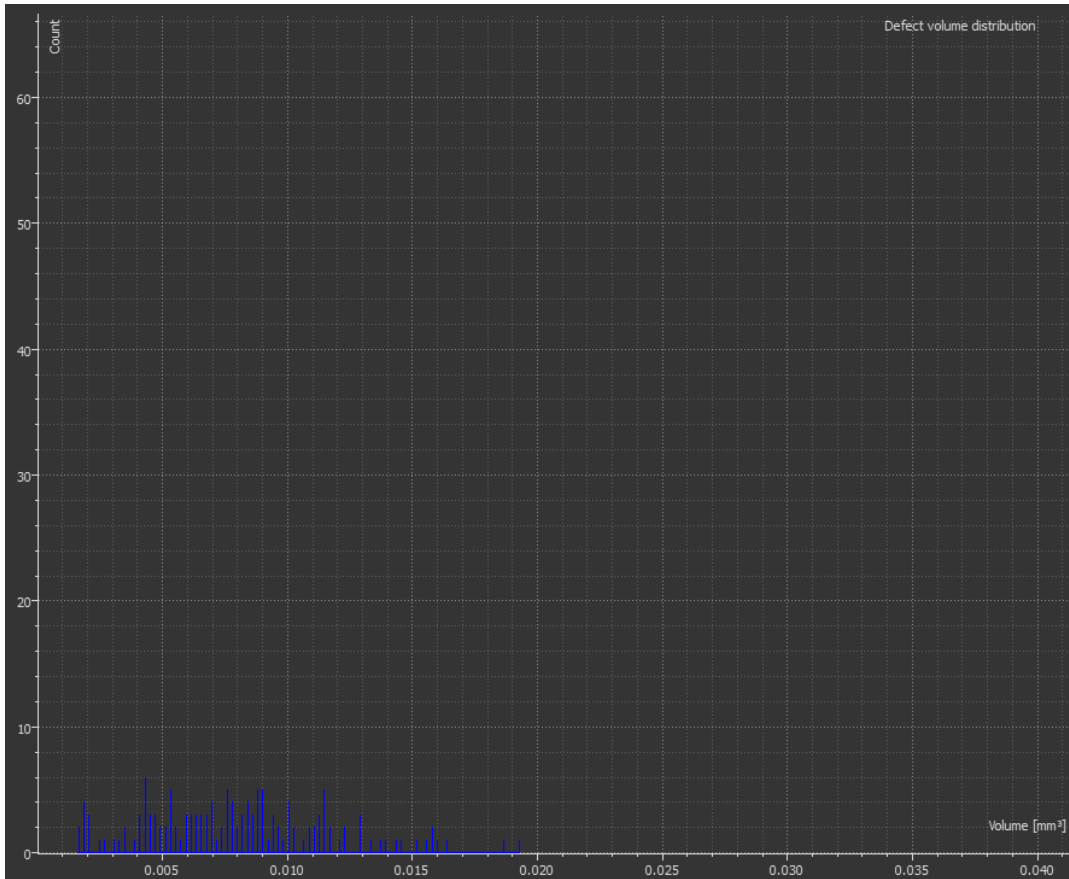


Obrázek 19: AISi10Mg - Modely odlitých vzorků očíslované zleva 1, 2, 3

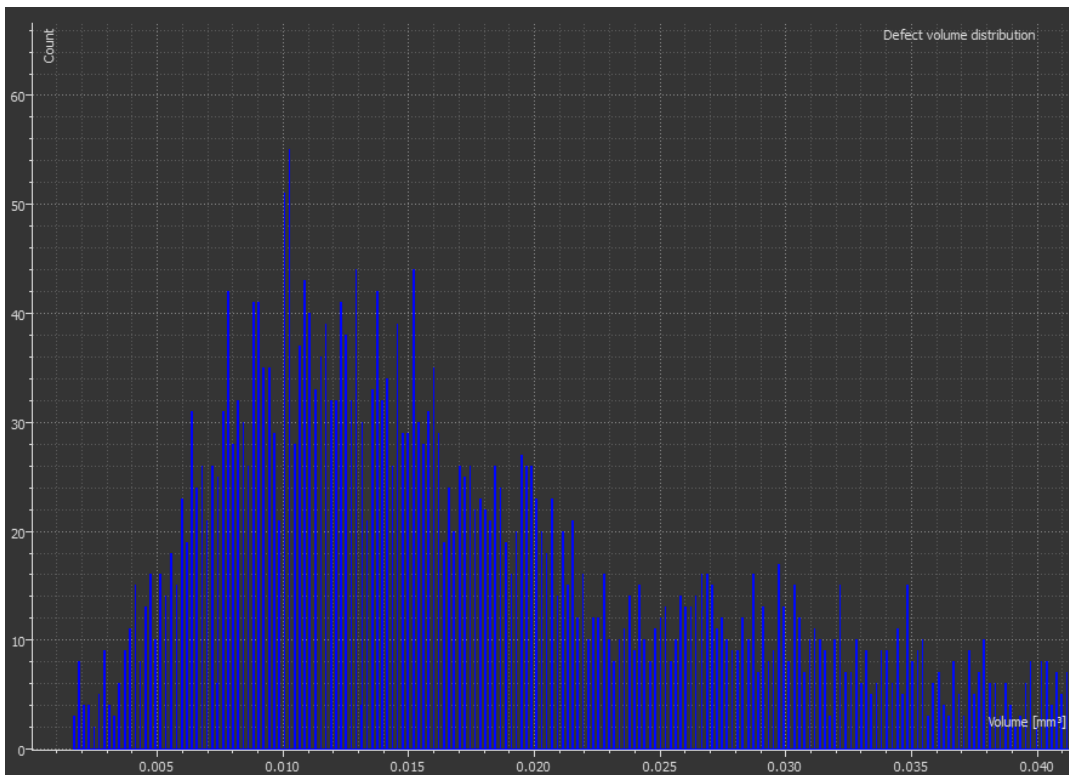
Z obou obrázků je vidět, že odlité vzorky mají mnohonásobně více pórů než vzorky po 3D tisku a také jejich rozměry jsou větší. U modelů 3D tištěných vzorků se vyskytují defekty pouze v tmavě modré barvě, což znamená objem pórů zhruba do $0,25 \text{ mm}^3$, naopak u odlitých vzorků jsou vidět různé barvy, největší sahající až do červené, což značí objem zhruba $2,2 \text{ mm}^3$.

Dále byly zjištěny histogramy popisující velikosti pórů jednotlivých vzorků a jejich množství, pro ilustraci výsledků byl vybrán vzorek číslo 1 z 3D tištěné skupiny a vzorek číslo 1 ze skupiny odlitků. V obou grafech bylo použito stejné měřítko, aby bylo dosaženo názornosti při porovnání, ze stejného důvodu je u grafu odlitku zobrazena pouze část s největší koncentrací pórů. Defekty se v něm v malém množství rovnoměrně vyskytují na vodorovné ose až do hodnoty 2,2 mm³.

Graf velikostního rozdělení pórů vybraného vzorku 1 ze sady vyrobené 3D tiskem je na *Obrázku 20* a pro vzorek číslo 1 z odlité sady na *Obrázku 21*.



Obrázek 20: AlSi10Mg - graf velikostního rozložení objemů pórů u 3D tištěného vzorku



Obrázek 21: AlSi10Mg – graf velikostního rozložení objemů pórů u odlitého vzorku

Ve shodě s *Obrázkem 18 a 19* grafy na *Obrázku 20 a 21* dokumentují zřetelný rozdíl v koncentraci pórů i jejich velikosti u obou typů vzorků. U 3D tištěného vzorku je patrná určitá malá koncentrace defektů v oblasti od 0,02 do 0,12 mm³ dále se vyskytuje pouze několik pórů z nichž poslední má velikost 0,19 mm³, u odlitého je koncentrace velká hlavně v intervalu od 0,02 do 0,22 mm³, dále množství pozvolně klesá až do hodnoty největšího póru vzorku o velikosti 2,2 mm³.

Rozměrově největší defekty, které byly metodou CT zaznamenány u všech vzorků jsou v Tabulce 13, zde jsou póry seřazeny podle velikosti v rámci těles a je uveden jejich objem.

Tabulka 13 Porovnání největších defektů – AlSi10Mg po 3D tisku a v odlitém stavu

Označení vzorků	Č.1 3D tištěný	Č.2 3D tištěný	Č.3 3D tištěný	Č.1 odlitý	Č.2 odlitý	Č.3 odlitý
Defekt	Objem defektu [mm³]					
1.	0,02	0,03	0,04	2,20	1,90	2,45
2.	0,02	0,02	0,03	2,04	1,63	1,76
3.	0,02	0,02	0,03	1,93	1,56	1,66
4.	0,02	0,02	0,03	1,91	1,52	1,49
5.	0,02	0,02	0,03	1,84	1,32	1,44
6.	0,02	0,01	0,02	1,81	1,30	1,41
7.	0,02	0,01	0,02	1,52	1,23	1,34
8.	0,02	0,01	0,02	1,35	1,16	1,22
9.	0,01	0,01	0,02	1,34	1,16	1,16
10.	0,01	0,01	0,02	1,31	1,16	0,96

Z Tabulky je patrné, že největší defekt v odlitém stavu má objem 2,45 mm³, ve stavu po 3D tisku je největší metodou CT detekovaný defekt 61,25x menší.

Tabulka 14 potvrzuje již dříve uvedené výsledky, 3D tištěné vzorky dosahují mnohem menších hodnot pórovitosti než odlité, důvodem je hlavně to, že při odlévání dochází k proudění plynů skrz objem tělesa a po ztuhnutí materiálu zůstanou jako póry. Navíc ještě hrozí tvorba staženin z důvodu smršťování odlitku při tuhnutí. U 3D tištěných vzorků teoreticky hrozí pórovitost kvůli spékání prášku jako je tomu u metod práškové metalurgie, technologie je ale dostatečně přesná, aby k tomu nedocházelo do velké míry, a tak jsou hodnoty pórovitosti relativně malé.

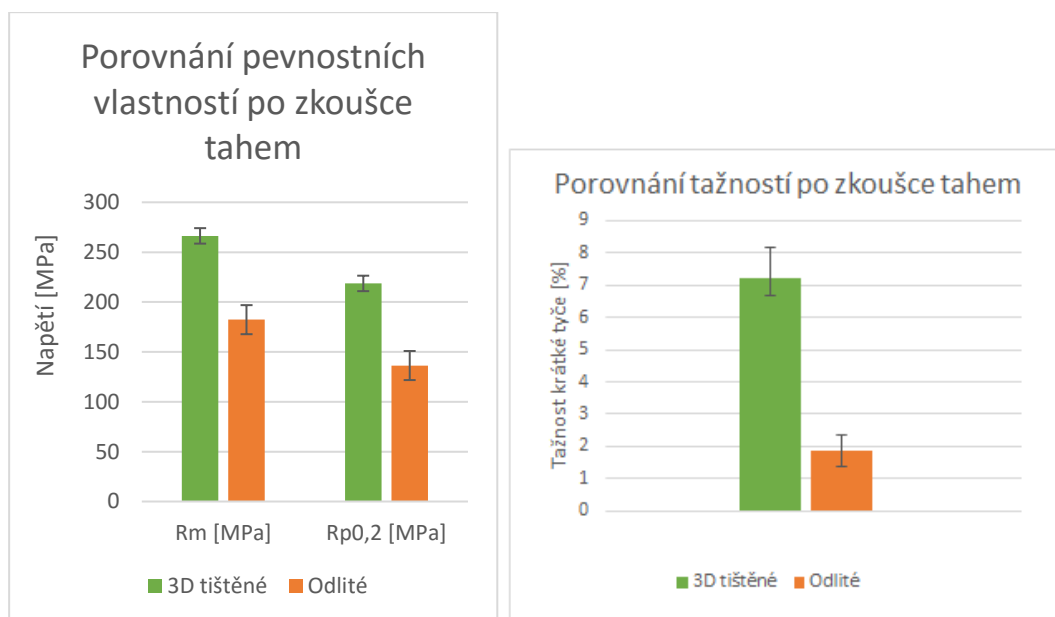
Tabulka 14 AlSi10Mg – pórovitost zkušebních těles po 3D tisku a odlévání

3D tištěné	Č. 1	Č. 2	Č. 3	Průměr
Celkový objem vzorku[mm ³]	4983,21	4771,85	5155,06	4970,04
Celkový objem pórů [mm ³]	1,29	0,72	0,83	0,95
Podíl pórů na objemu [%]	0,026	0,015	0,016	0,019
Odlité	Č. 1	Č. 2	Č. 3	Průměr
Celkový objem vzorku[mm ³]	5075,57	5152,05	5174,04	5133,89
Celkový objem pórů [mm ³]	244,57	231,01	182,20	219,26
Podíl pórů na objemu [%]	4,82	4,48	3,52	4,27

Zdá se, že relativní rozdíly v podílu pórů na objemu vzorku jsou menší u odlitých. Pro statistické doložení tohoto tvrzení však bylo sledováno málo vzorků, bylo by potřeba minimálně 10 kusů vyrobených oběma způsoby.

3.3. Vyhodnocení tahové zkoušky

Tahová zkouška dle ČSN EN ISO 6892 – 1 byla provedena na všech šesti vzorcích, zjišťovaly se hodnoty smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$ [MPa]), meze pevnosti (R_m [MPa]) a tažnosti ($A_{5,65}$ [%]). Jak již bylo dříve zmíněno jednalo se o vzorky kruhového průřezu o průměru 8 mm vyrobené z hliníkové slitiny AlSi10Mg a funkční délce 40 mm. Výsledky zkoušky jsou zaznamenány v grafu na *Obrázku 22* a *Obrázku 23*, jedná se o záznam průměrných hodnot pro obě výrobní metody. Následně Tabulka 15 ukazuje průměrné hodnoty zkoumaných veličin.



Obrázek 22: Porovnání výsledků tahové zkoušky

Tabulka 15 Hodnoty měření po zkoušce tahem

	3D tištěná tělesa	Odlitá tělesa
R_m [MPa]	266 ± 8	182 ± 10
$R_{p0,2}$ [MPa]	219 ± 7	136 ± 15
$A_{5,65}$ [%]	7,2 ± 1	1,9 ± 0,5

Z grafů a tabulky vyplývá, že všechny tři zjišťované hodnoty dosahují větších hodnot u 3D tištěných vzorků, dá se z toho tedy usuzovat, že i v otázce mechanických vlastností jsou tělesa vyrobená metodou SLS horizontálním směrem v tomto případě lepší, než tělesa odlitá. Co se týče meze pevnosti a smluvní meze kluzu, tak odlité vzorky mají obě tyto hodnoty zhruba o 50 MPa nižší než 3D tištěné. Tažnost těles vyrobených metodou SLS je dokonce více než 3,5 krát větší.

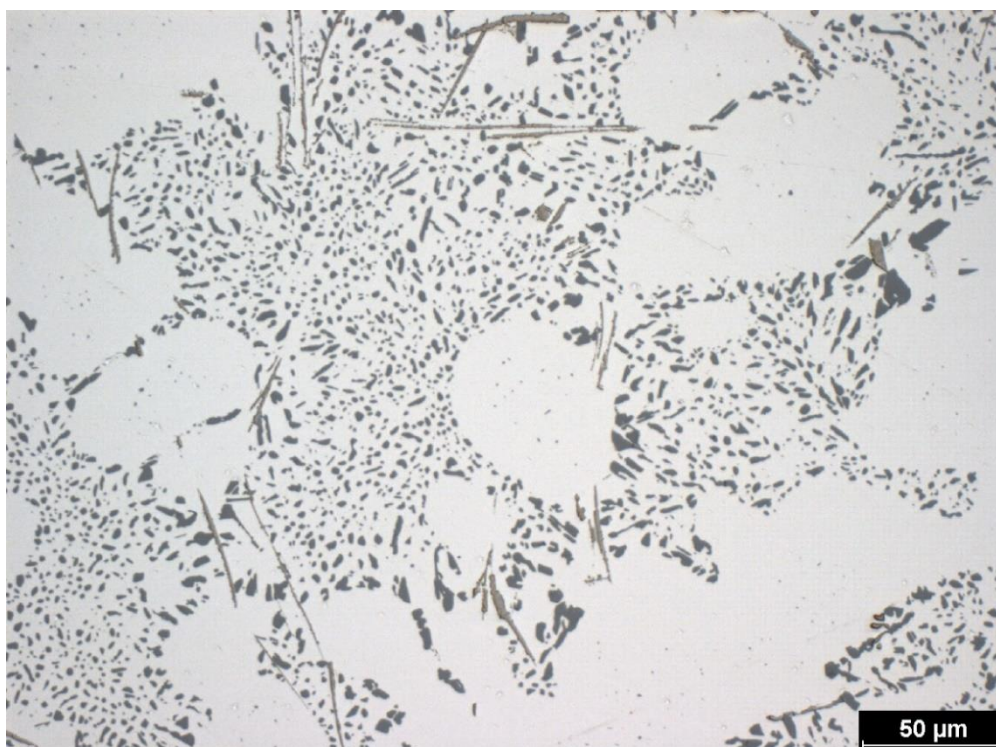
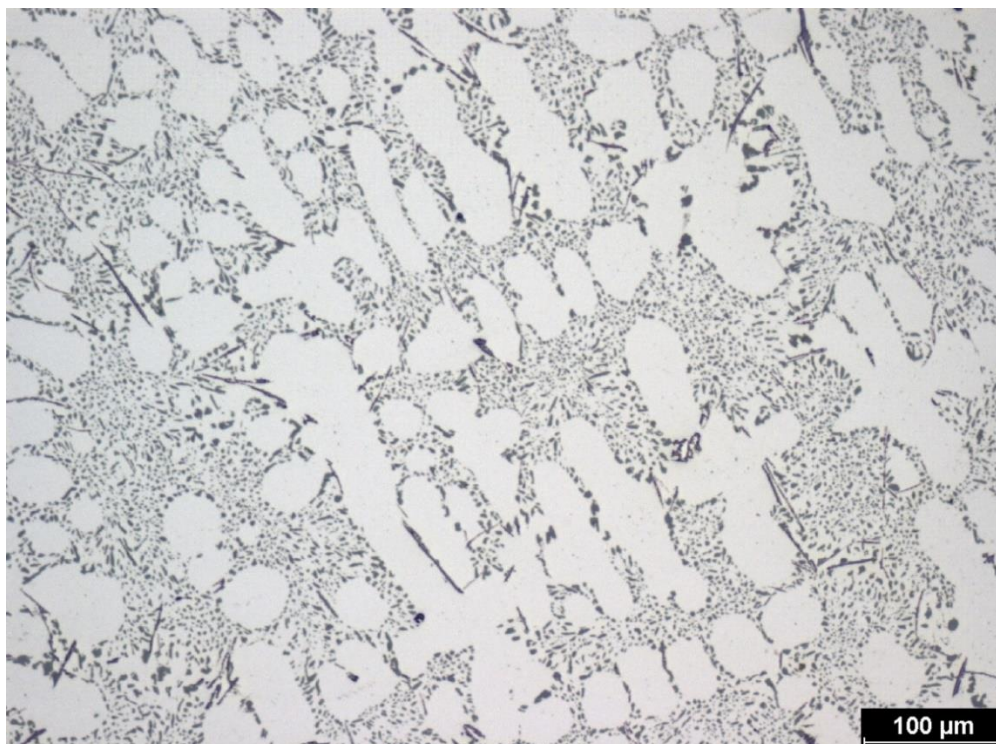
Získané výsledky zkouškou tahem pro AlSi10Mg lze pro horizontálně tištěné vzorky porovnat s hodnotami v Tabulce 11. Hodnoty pevnosti meze kluzu a tažnosti dosažené v rámci BP jsou nižší než uvádí [3]. Tato skutečnost může být způsobena použitým vytvrzováním, které v souladu s výsledky [27] snižuje pevnostní charakteristiky 3D tištěné slitiny AlSi10Mg.

U odlitých vzorků je možné získané hodnoty porovnat s Tabulkou 7. Proti očekávání jsou hodnoty pevnosti i tažnosti u sledovaných vzorků v porovnání s [21] výrazně nižší. U pevnosti lze předpokládat, že při zvolených parametrech vytvrzování již došlo k nežádoucímu přestárnutí. Předpoklad, že při nižší pevnosti bude mít materiál vyšší tažnost, nebyl u odlitků potvrzen. Je možné, že důvodem je pórovitost odlitých vzorků, která byla komentována v předchozí kapitole.

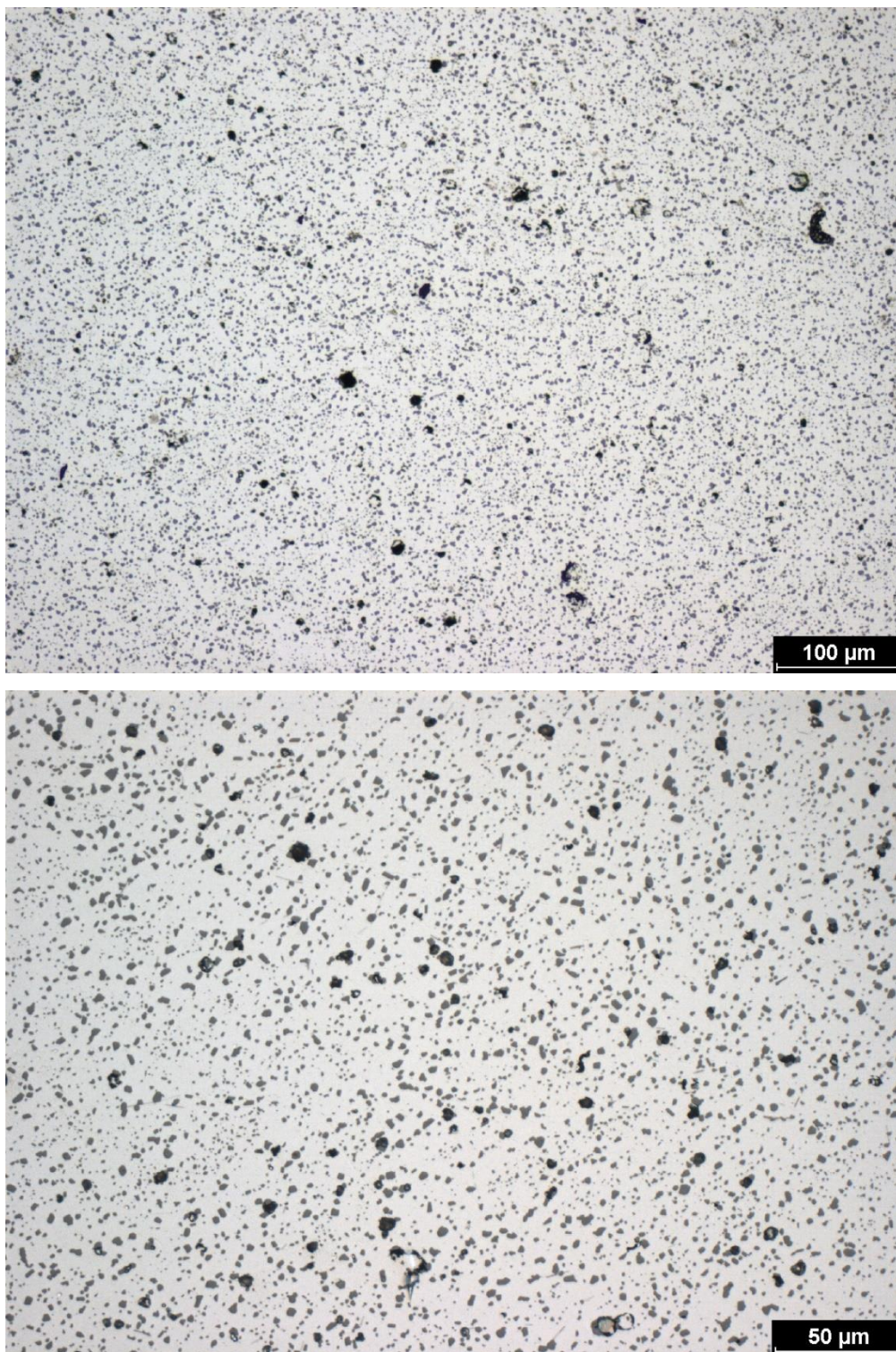
Dosažené výsledky by v další práci bylo vhodné ověřit na statisticky významnějším počtu vzorků, například 10 kusů.

3.4. Vyhodnocení metalografických snímků

Na *Obrázku 23* jsou snímky odlitého stavu, struktura je tvořena bílými dendrity primární α fáze hliníku a oblastmi výskytu eutektické fáze $\alpha + \text{Si}$.



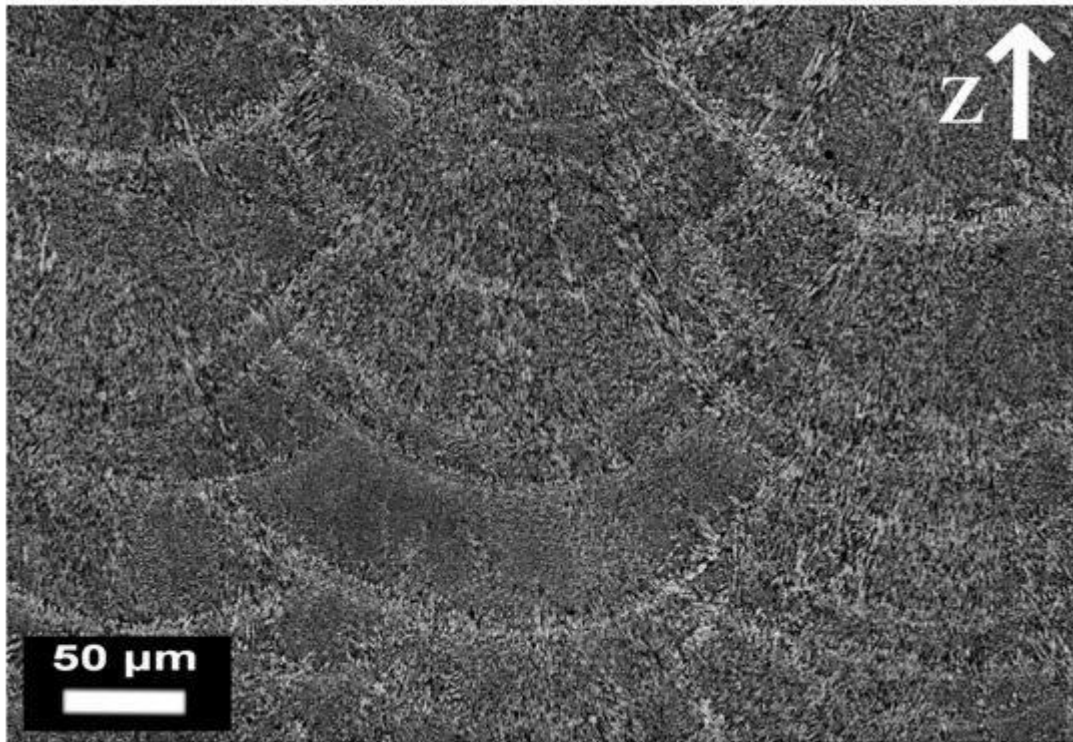
Obrázek 23: AlSi10Mg – metalografické snímky struktury v odlitém stavu po vytvrzení při různých zvětšeních



Obrázek 24: AlSi10Mg – metalografické snímky struktury v 3D tištěném stavu metodou SLS po vytvrzení při různých zvětšeních

V obou snímcích z *Obrázku 24* je patrný efekt vytvrzování u vzorků připravených metodou SLS, kde částice křemíku tvoří globulární precipitáty v matici α hliníku. Práce [28] uvádí, že podobná struktura je způsobena opakovaným ohříváním

a chladnutím při nanášení vrstev metodami 3D tisku a dále že hrubnutí globulárních precipitátů je úměrné době vytvrzování. Na snímcích je vidět efekt rozpouštěcího žíhání, je patrné, že vytvrzování AlSi10Mg odstranilo „obloučkovou“ strukturu, která je charakteristická pro 3D tištěné materiály (Obrázek 25).



Obrázek 25: Struktura AlSi10Mg po 3D tisku vykazující charakteristické obloučky [28]

Závěry

Byla charakterizována slitina AlSi10Mg, její vlastnosti a použití v praxi. Dále bylo rozebráno hipování a několik metod 3D tisku.

Na základě provedených experimentů lze konstatovat, že:

- 1) Metodou CT bylo zjištěno, že pórovitost odlitých vzorků je mnohonásobně větší než pórovitost 3D tištěných vzorků.
- 2) Největší pór nalezený v odlitých vzorcích má objem 2,45 mm³ a největší pór nalezený mezi 3D tištěnými vzorky má objem 0,04 mm³.
- 3) Průměrné hodnoty podílu pórů na celkovém objemu vzorků je pro odlité vzorky 4,27 % a pro 3D tištěné vzorky 0,019 %.
- 4) Mez pevnosti a mez kluzu jsou 1,5x vyšší u 3D tištěných vzorků než u odlitých. Tažnost je u 3D tištěných vzorků větší 3,8x.
- 5) Dle očekávání vytvrzování 3D tištěných vzorků snížilo pevnostní charakteristiky ve srovnání se stavem po žíhání na snížení pnutí.
- 6) Nižší pevnosti dosažené u odlitých vzorků jsou pravděpodobně způsobeny přestárnutím vlivem nevhodných parametrů vytvrzování.
- 7) Nižší tažnost odlitých vzorků je zřejmě příčinou nadměrné porozity.
- 8) Struktura odlitých vzorků je tvořena primární α fází hliníku a oblastmi výskytu eutektické fáze $\alpha + \text{Si}$.
- 9) Struktura 3D tištěných vzorků se skládá z primární α fáze hliníku a globulárních precipitátů Si vytvořených díky vytvrzování.
- 10) Rozpouštěcí žíhání 3D tištěných vzorků dle předpokladu odstraní obloučkovou strukturu pro ně charakteristickou.
- 11) Dosažené výsledky by v další práci bylo vhodné ověřit na statisticky významnějším počtu vzorků.
- 12) Cíle práce byly splněny

Bibliografie

- [1] The surface quality of 3D printed parts. *3Faktur.com* [online]. b.r. [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: <https://3faktur.com/en/the-surface-quality-of-3d-printed-parts/>
- [2] *Vliv způsobu výroby na základní mechanické vlastnosti a strukturu slitiny AlSi10Mg*. Praha, 2018. Projekt. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.
- [3] Material Specification, Aluminium AlSi10Mg. *3T RPD* [online]. 2012 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.3trpd.co.uk/wp-content/uploads/2013/03/aluminium-alsi10mg-2012.pdf>
- [4] SKOČOVSKÝ, P., P. PALEČEK, R. KONEČNÁ a L. VÁRKOLY. *Konstruktivní Materiály*. V Žilině: ŽU, 2000. ISBN 80-7100-608-4.
- [5] MACEK, K a P. ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
- [6] Technical Data Sheet High Temperature Heat Resistant Aluminum #AL-2402. b.r. *Hy-tech thermal solutions* [online]. b.r. [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <http://www.hytechsales.com/download/HiTemp%20Product%20Description.pdf>
- [7] WATERS, T. *Fundamentals of manufacturing for engineers*. Bristol, Pa.: UCL Press, 1996. ISBN 978-1857283389.
- [8] GULEC, A. *The effect of Zn on the microarc oxidation coating behavior of synthetic Al-Zn binary alloys*. 2012, , 159-165.
- [9] MACEK, K. a P. ZUNA. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2798-8.
- [10] ČIŽMÁROVÁ, E a J. SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [11] O 3D tisku. *O3D* [online]. b.r. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/3d-tisk/>
- [12] ZETKOVÁ, I. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem*. Plzeň, 2017. Disertační práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D. Akademický rok.
- [13] Live science. *Livescience.com* [online]. b.r. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>
- [14] The technology house. *Tth.com* [online]. b.r. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.tth.com/3d-printing/fdm-prototyping/>

- [15] Direct metal laser sintering. *ScienceDirect* [online]. b.r. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/direct-metal-laser-sintering>
- [16] Hipování (Hot isostatic pressing- HIP). *Bodycote* [online]. b.r. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://www.bodycote.cz/cs-CZ/services/hot-isostatic-pressing.aspx>
- [17] ATKINSON, H.V. a S. DAVIES. *Metall and Mat Trans A (2000)*. b.r. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-000-0078-2>.
- [18] WU, M-W a P-H LAI. The positive effect of hot isostatic pressing on improving the anisotropies of bending and impact properties in selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, **2016**(658), 429-438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.02.023>.
- [19] ESSA, K., P. JAMSHIDI, J. ZOU, M. ATTALLAH a H. HASSANIN. Porosity control in 316L stainless steel using cold and hot isostatic pressing. *Materials & Design*. 2018, **2018**(138), 21-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.025>.
- [20] FOUSOVÁ, M., D. VOJTĚCH, J. KUBÁSEK, D. DVORSKÝ a M. MACHOVÁ. *3D printing as an alternative to casting, forging and machining technologies*. 2015.
- [21] KEMPEN, K., L. THIJIS, J. VAN HUMBEECK a J.-P. KRUTH. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia*. 2012, **2012**(39), 439-446. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.059>.
- [22] NGO, T., A. KASHANI, G. IMBALZANO, K. NGUYEN a D. HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018, **2018**(143), 172-196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- [23] Aluminum (AlSi10Mg). *Materialise* [online]. b.r. [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/aluminum>
- [24] Types of 3D printers or 3D printing technologies overview: Printing from scratch. *3D Printing from scratch* [online]. b.r. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/>
- [25] ČSN EN ISO 5579. *Nedestruktivní zkoušení - Radiografické zkoušení kovových materiálů s použitím filmu a rentgenového nebo gamma záření: Základní pravidla*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkoušebnictví, 2014.
- [26] THOMPSON, A. a R. LEACH. Introduction to Industrial X-ray Computed Tomography. *Industrial x-ray computed tomography*. 1. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017, s. 1-23. ISBN 978-3-319-59571-9.

- [27] MANFREDI, D., F. CALIGNANO, M. KRISHNAN et al. Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs). *Light Metal Alloys Applications*. InTech, 2014, , 18-19. DOI: 10.5772/58534. ISBN 978-953-51-1588-5. Dostupné také z: <http://www.intechopen.com/books/light-metal-alloys-applications/additive-manufacturing-of-al-alloys-and-aluminium-matrix-composites-amcs->
- [28] TREVISAN, F., F. CALIGNANO, M. LORUSSO et al. On the Selective Laser Melting (SLM) of the AlSi10Mg Alloy: Process, Microstructure, and Mechanical Properties. *Materials*. 2017, **10**(1). DOI: 10.3390/ma10010076. ISSN 1996-1944. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/10/1/76>