

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VLASTNOSTI 3D TIŠTĚNÉ SLITINY AlSi10Mg  
PŘI TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ DO 200 °C

AUTOR: Lukáš Komanec

STUDIJNÍ PROGRAM: TZSI

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.

PRAHA 2024

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Komanec** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **492653**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vliv vybraných režimů tepelného zpracování na vlastnosti 3D tištěné slitiny AISi10Mg**

Název bakalářské práce anglicky:

**The effect of selected heat treatment modes on the properties of the 3D printed AISi10Mg alloy**

Pokyny pro vypracování:

1. Teoretická část
2. Experimentální část
  - a. Příprava vzorků
  - b. Měření tvrdosti
  - c. Stanovení průběhu zpevnění při zkoušce tahem
  - d. Metalografická a fraktografická analýza
3. Výsledky a jejich diskuse
4. Závěry

Seznam doporučené literatury:

- [1] FIOCCHI, J., A. TUISSI a C.A. BIFFI. Heat treatment of aluminium alloys produced by laser powder bed fusion: A review. *Materials and Design*. 2021, (204), 1-31. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2021.109651
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, c1999. ISBN 80-720-4130-4.
- [3] MACEK, K. a P. ZUNA. *Strojirenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2798-8.
- [4] 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.

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: **04.09.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.07.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

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

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ladislav Cvrček, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů

V Praze dne: .....

.....

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé bakalářské práce doc. Ing. Janě Sobotové, Ph.D., za odborné vedení práce, za její trpělivost a za čas, který mi věnovala při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Elišce Galčíkové a Ing. Janu Krčilovi Ph.D., za jejich čas a pomoc při realizaci experimentální části mé práce a Ing. Ludmile Růžičkové za přípravu a dodání experimentálního materiálu pro předloženou bakalářskou práci.

# Obsah

POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY .....	7
1 Úvod.....	9
2 Teoretická část.....	10
2.1 Hliník a jeho slitiny.....	10
2.2 Rozdělení slitin hliníku .....	11
2.3 Slitiny hliníku pro 3D tisk .....	13
3 3D tisk kovových materiálů.....	15
3.1 Metoda SLM pro kovové materiály .....	15
3.2 Vlastnosti kovových materiálů vyrobených 3D tiskem.....	17
3.3 Slitina AlSi10Mg .....	20
3.3.1 Mikrostruktura slitiny AlSi10Mg.....	21
3.3.2 Vliv TZ na vlastnosti 3D tištěné slitiny AlSi10Mg.....	21
4 Experimentální část .....	27
4.1 Experimentální materiál .....	27
4.2 Příprava vzorků .....	30
4.3 Experimentální metody použité pro BP.....	32
4.3.1 Metalografická analýza .....	32
4.3.2 Měření tvrdosti.....	34
4.3.3 Fraktografická analýza.....	35
5 Výsledky a jejich diskuse.....	36
5.1 Metalografická analýza pomocí světelné mikroskopie .....	36
5.2 Zkouška tvrdosti.....	41
5.2.1 Deformační zpevnění při zkoušce tahem.....	41
5.2.2 Tvrdost nezpevněné části vzorků.....	44
5.3 Fraktografická analýza SM .....	46

---

6	Závěr .....	48
7	Bibliografie .....	49

## POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY

A [%]	Tažnost zkušební tyče bez specifikace její délky
$A_{5,65}$ [%]	Tažnost krátké zkušební tyče
Al	Chemická značka pro hliník
$Al(OH)_3nH_2O$	Chemický vzorec pro bauxit
$Al_2O_3$	Chemický vzorec pro oxid hlinitý
Co	Chemická značka kobaltu
Cu	Chemická značka mědi
DMLS	Metoda 3D tisku
E [Pa]	Modul pružnosti v tahu
FCC	Plošně středěná krychlová mřížka
HB	Tvrdosti dle Brinella neodpovídající platné normě
hod.	Hodina
HV	Tvrdost dle Vickerse neodpovídající platné normě
HV0,5	Tvrdost dle Vickerse při zátěži 0,5 kilopondu
HV1	Tvrdost dle Vickerse při zátěži 1 kilopond
Mg	Chemická značka pro hořčík
$Mg_2Si$	Chemická značka silicidu hořečnatého
Min.	Minuta
$Na_3AlFe_6$	Chemický vzorec pro kryolit
PBF	Tisk z práškového lože
$R_m$ [MPa]	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$ [MPa]	Smluvní mez kluzu

---

So [mm <sup>2</sup> ]	Počáteční plocha průřezu
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
Si	Chemická značka pro křemík
SLM	Metoda 3D tisku
SM	Světelná mikroskopie
T5	Specifikace tepelného zpracování slitiny hliníku
T6	Specifikace tepelného zpracování slitiny hliníku
Ti	Chemická značka titanu
TZ	Tepelné zpracování
Z [%]	Kontrakce



# 1 Úvod

Slitina AlSi10Mg je nejpoužívanější slitinou hliníku pro 3D tisk. [1]

Je známo, že její mikrostruktura se výrazně liší od slitiny konvenčně vyráběné. [2]  
S touto skutečností souvisí fakt, že odezva na tepelné zpracování je u slitiny připravené 3D tiskem odlišná než v případě slitiny připravené konvenčním způsobem.

Vhodné tepelné zpracování slitiny AlSi10Mg připravené 3D tiskem je stále předmětem studie. Nejvhodnější se zdá být takové, které se pohybuje v oblastech teplot do 200 °C. [3]

Cílem předložené práce je studium vlivu TZ při teplotách 170 – 200 °C na strukturu a vlastnosti slitiny AlSi10Mg tištěné metodou SLM.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Hliník a jeho slitiny

Předložená práce se zabývá studiem vlastností a zpracováním slitiny hliníku AlSi10Mg pro 3D tisk. Pro přehlednost je následující kapitola věnována nejprve čisté podobě hliníku a jeho významným slitinám.

Čistý hliník je lesklý bílo - stříbrný kov s hustotou  $2700 \text{ kg/m}^3$  [4], řadí se tak mezi lehké kovy. Po železu je to druhý nejčastěji používaný kovový konstrukční materiál na světě.

Pro hliník je charakteristická jeho kubická plošně středěná krystalová mřížka (FCC), která zajišťuje vysokou tvářitelnost za tepla i za studena. Na kovový materiál má poměrně nízkou teplotu tání a to  $660 \text{ °C}$  [4].

Díky vysoké afinitě ke kyslíku hliník na svém povrchu tvoří pasivní oxidickou vrstvu oxidu hlinitého, která ho chrání proti další oxidaci, hliník je také odolný vůči solím, mořské vodě či kyselině dusičné [5]. Díky těmto vlastnostem se v průmyslu používá jako legující prvek do ocelí i do neželezných kovů. Právě u ocelí nebo například u slitin niklu se používá jako prvek, který zvětšuje korozivzdornost. [6]

Tabulka 1 uvádí nejdůležitější mechanické vlastnosti čistého hliníku.

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti čistého hliníku [7]

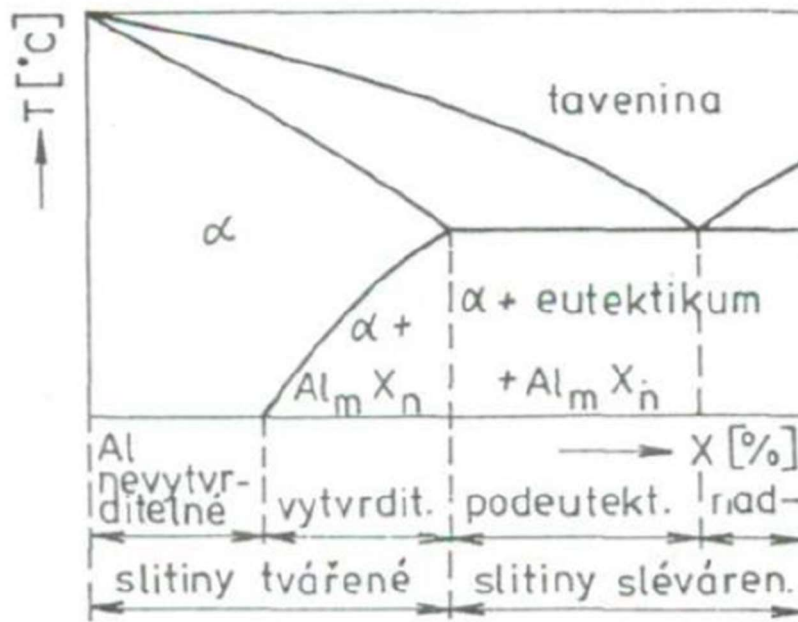
$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{5,65}$ [%]	Z [%]	E [GPa]	HB
15	50	45	90	71	15

Z tabulky je vidět, že čistý hliník sám o sobě nemá dostatečné mechanické vlastnosti, proto je jeho konstrukční a nosné využití značně omezeno. Nicméně, má vynikající tepelnou ( $209 \text{ W/mK}$ ) a elektrickou vodivost ( $38 \text{ MS/m}$ ) [7], díky těmto vlastnostem a jeho nízké měrné hmotnosti byl velice často používán jako vodič. V dnešní době je na tyto aplikace používána převážně měď. Hliník je vhodný také jako materiál

k výrobě chladících zařízení [4] [7]. Využití má i v potravinářství, kde se používá na výrobu potravinářských fólií. Z hlediska polotovarů je nejčastěji vyráběn ve formě plechů, drátů a tyčí.

Proces výroby hliníku je poměrně nákladný, nejprve se musí z bauxitu ( $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) získat oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) následně se čistý hliník získává elektrolýzou z roztoku oxidu hlinitého s kryolitem ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). bauxitu ( $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Kryolit snižuje teplotu tavení oxidu hlinitého z 2050 °C na 650 °C [5].

Častěji než s čistým hliníkem se lze setkat s jeho slitinami, které stručně popisuje následující kapitola. Dělení hliníkových slitin je patrné z obecného binárního diagramu na Obrázku 1. [8]



Obrázek 1 Schéma části binárního rovnovážného diagramu Al-X [8]

## 2.2 Rozdělení slitin hliníku

Nejčastější dělení hliníkových slitin bývá dle jejich zpracování na slitiny vhodné k tváření a na slitiny vhodné ke slévání. Slitiny ke tváření obsahují menší množství legujících prvků než slitiny pro slévání, je to proto, aby v mikrostruktuře převládal tuhý roztok  $\alpha(\text{Al})$ , který zajišťuje dobrou tvářitelnost. Legující prvky tvoří ve struktuře tvrdé a křehké fáze, které výrazně zhoršují tvářitelnost slitiny. [6]

Pro slitiny určené ke slévání je vhodnější, když obsahují větší množství legujících prvků než u tvářitelných slitin. U vysoko legovaných slitin vzniká eutektikum, které podporuje slévatelnost.

Další možnost dělení hliníkových slitin je dle možnosti jejich vytvrzení na slitiny vytvrditelné a nevytvrditelné. Vytvrditelnost je schopnost materiálu zvýšit svou tvrdost, pevnost a mez kluzu díky specifickému tepelnému zpracování. Proces spočívá v rozpadu přesyceného tuhého roztoku při vzniku jemných částic – precipitátů. [6]

### **Slitiny hliníku pro tváření**

Jak je z Obrázku 1 patrné, hliníkové slitiny pro tváření lze dále rozdělit na vytvrditelné a nevytvrditelné.

Ty se v zásadě liší v obsahu a druhu legujících prvků ve slitině, mezi vytvrditelné patří například slitiny Al-Cu, Al – Li nebo Al – Si a mezi nevytvrditelné Al – Mg nebo Al – Mn. [5] [6]

### **Slévárenské slitiny hliníku**

Ve srovnání se slitinami určenými pro slévání, nemají slitiny pro odlévání tak dobré mechanické vlastnosti. Vlastnosti také velmi ovlivňuje způsob odlévání. Největší a nejvyužívanější slévárenské slitiny hliníku jsou na bázi Al – Si a nazývají se siluminy. Slévárenské slitiny hliníku lze také vytvrzovat. Nicméně vytvrzovací efekt je nižší než u slitin pro tváření, z toho se vytvrzují jen slitiny, u kterých to přináší požadovaný efekt [4] [6].

Předmětem této práce je slitina ze skupiny siluminů, ale připravená 3D tiskem. 3D tisk.

## 2.3 Slitiny hliníku pro 3D tisk

Následující kapitola je věnována stručnému popisu slitin, které se v dnešní době používají k 3D tisku. Většina těchto materiálů je převzata ze slévárenských nebo z tvářitelných skupin slitin hliníku, nicméně v posledních letech vzniká snaha o vývoj nových hliníkových slitin vhodných pouze pro 3D tisk. Autor [9] však uvádí, že tento směr vývoje není zcela dokumentován, jedná se spíše o nahodilé experimentální pokusy. Nedá se říct, že by jedna slitina byla výrazně lepší pro 3D tisk než ostatní, velice závisí na metodě 3D tisku, obecně se dá ovšem říct, že slitiny vhodné pro odlévání jsou nejlepší a nejhojněji používané i pro 3D tisk. [9] [1] [10]

### Slitiny Al – Si

Jedná se o skupinu hliníkových slitin obsahujících jako nejdůležitější legující prvek křemík. V dnešní době je nejčastěji využívána pro 3D tisk. Tyto slitiny se při konvenční výrobě vyznačují vysokou tekutostí a malým smršťováním po ztuhnutí, díky čemuž je u nich relativně nízké vnitřní pnutí a snižuje se tím riziko vzniku prasklin při chladnutí. [9] [11]

Z této skupiny slitin je nejčastěji používána slitina AlSi10Mg, která je předmětem této práce, proto je jí věnována později celá kapitola. Ostatní hojně používané slitiny jsou například slitiny AlSi7Mg nebo AlSi12.

Slitina AlSi7Mg je lehká slitina hliníku vhodná pro tisk složitých geometrických částí. Má dobré mechanické vlastnosti i při vyšších teplotách. Hojně se používá v leteckém a automobilovém průmyslu. [12]

Další poměrně často využívanou slitinou je slitina AlSi12, je levná, dobře zpracovatelná, s nízkým bodem tavení, dobrou odolností proti korozi a vysokou pevností [11]. Slitina si udržuje svoji vysokou pevnost i za nízkých teplot, díky čemuž je využívána v kryogenice. Jinak je využívána například na výrobu tepelných výměníků nebo pístů spalovacích motorů.

Tabulka 2: Porovnání vybraných mechanických vlastností slitin hliníku pro 3D tisk a pro odlévání bez tepelného zpracování

Slitina		Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A* [%]	Zdroj
AlSi10Mg	As-built	370	250	4,5	[13]
	po odlití	180	97	2,5	[14]
AlSi7Mg	As-built	369	210	9	[15]
	po odlití	170	95	2,4	[14]
AlSi12	As-built	420	260	3,6	[15]
	po odlití	270	150	1,1	[14]

\*autoři [13], [14], [15] uvádějí tažnost A bez indexu, nelze tedy určit, zda byla použita dlouhá nebo krátká zkušební tyč, je tedy předpokládáno, že se jedná o tažnost krátké tyče neboli  $5,65\sqrt{S_0}$ , kde je  $S_0$  počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky. [16]

Tabulka 2 porovnává některé mechanické vlastnosti nejčastěji používaných odlévaných a 3D tištěných slitin hliníku ve stavu As-built, neboli bezprostředně potom co jsou vzorky vytištěny a po odlití, obojí bez následného tepelného zpracování (dále TZ). Z tabulky je patrné, že 3D tištěné slitiny mají ve stavu As-built v základě větší pevnost než slitiny odlévané. [17]

Nicméně, je, že po TZ dosahují v některých případech odlité slitiny vyšších pevnostních charakteristik naopak 3D tištěné slitiny mohou vykazovat pokles těchto vlastností ve srovnání se stavem As-built. Změny vlastností 3D tištěných slitin hliníku na bázi Al-Si, stejně jako v případě konvenčně vyráběných jsou značně ovlivněny parametry TZ. [11]

## 3 3D tisk kovových materiálů

3D tisk je způsobem aditivní výroby, jedná se o relativně novou metodu výroby součástí přímo z digitálně vytvořeného modelu. Tento technologický postup zvládne v relativně krátkém čase vytvořit pevné součásti s vysokou přesností. Velkou předností 3D tisku je jeho schopnost vyrábět i velice komplexní a složité tvary, které by se konvenčně daly jen těžko vyrobit. [18]

Princip této metody spočívá ve vrstvení materiálu ve formě prášku nebo drátu, který je postupně taven zdrojem energie, například laserem, do požadovaného tvaru navrhnutého v počítačovém programu. V zásadě se metody 3D tisku dají rozdělit do dvou skupin, na tisk z práškového lože (Power Bed Fusion) a na tisk řízenou uloženou energii (Directed Energy Deposition). Dále se tyto skupiny mohou rozdělit podle druhu použitého zdroje energie. [19] [20]

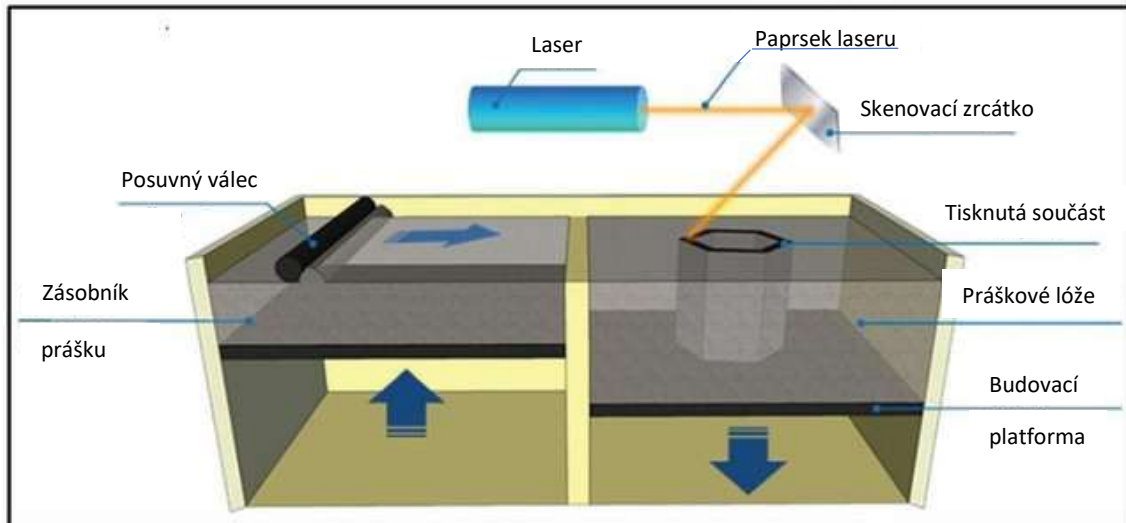
Nejčastěji používanou metodou a zároveň metodou, kterou používá tato práce je metoda Selective Laser Melting (SLM).

### 3.1 Metoda SLM pro kovové materiály

Jedná se o technologii, která vychází z tisku z práškového lože (PBF), uloženého v tiskárně za přítomnosti inertního plynu, například argonu nebo dusíku, jako ochranné atmosféry. Prášek, který je ve vrstvách nanášen na lože je postupně roztavován laserem. Metoda SLM dosahuje obecně vyšších teplot než například její sesterská metoda DMLS (Direct Metal Laser Sintering), která prášek pouze nataví, dokáže tedy zpracovat nejen slitiny, ale i čisté kovy, jako je třeba titan. Nejčastěji je metoda SLM využívána pro systémy na bázi hliníku, kobaltu, mědi železa nebo titanu. [19] [21]

Celý proces tisku metodou SLM vypadá následovně: do tiskárny se pomocí posuvného válce rovnoměrně rozprostře prášek vybraného tisknutého kovu. Dále je pak za pomoci laseru roztavena požadovaná část vrstvy ve tvaru výrobku. Celý systém se poté posune dolů a je nanesena další vrstva prášku. Tento postup se opakuje, dokud není součást vytištěna. Velikost vrstev záleží na volbě materiálu prášku a na metodě tisku. V případě metody SLM se velikost vrstvy pohybuje v řádech desítek až stovek mikrometrů. [18] [22]

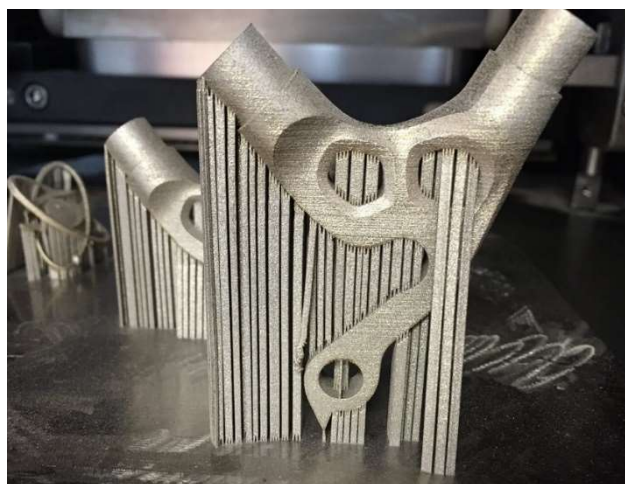
Na Obrázku 2 je vidět schéma 3D tiskárny pro metodu SLM [23]



Obrázek 2 Schéma 3D tiskárny pro metodu SLM, přeloženo [23]

Nedílnou součástí při 3D tisku jsou podpěry. Podpěry jsou přídavný materiál, který pomáhá držet celý tištěný díl pohromadě v místech, kde výrobek není celistvý či v místech, kde jsou například znatelné převisy a mohlo by dojít k jeho zborcení a také stavbu mechanicky upevňuje k platformě, na které se výrobek tiskne. Podpěry se vytváří společně s tištěným výrobkem během tisku, je proto potřeba navrhnout je dohromady s modelem již v počítači. Jsou nutné, ale prodlužují čas tisku i zvyšují náklady, jelikož se kvůli nim spotřebuje více materiálu, je také kvůli nim nutné zavést post-processing, kde se musí odstranit. Materiál odstraněných podpěr již nejde dále ve 3D tisku využít. [11]

Na Obrázku 3 je vidět výrobek, kde podpěry tvoří přibližně polovinu materiálu.



Obrázek 3 Vytisknutý výrobek s podpěrami [42]



### 3.2 Vlastnosti kovových materiálů vyrobených 3D tiskem

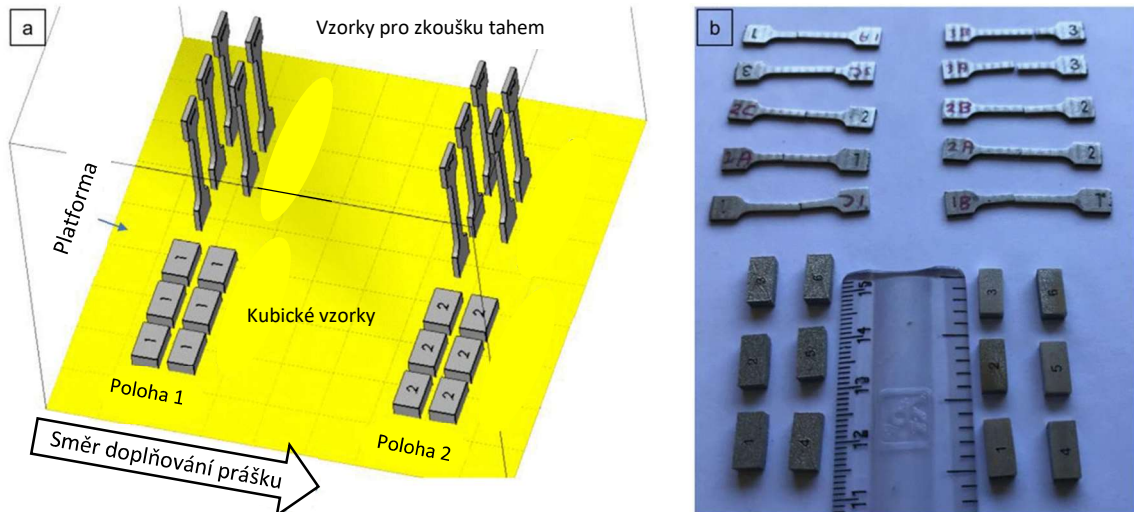
Samotné vlastnosti a kvalita tištěných dílů záleží na parametrech zvolených při tisku, dá se říct, že díly takřka stejných vlastností lze získat pouze tak, že budou tištěny na jedné platformě. Autorka [3] uvádí, že i vzorky tištěné za stejné konfigurace na stejné tiskárně, mohou vykazovat mírné změny vlastností. Parametry, které dále mohou ovlivňovat mechanické vlastnosti tištěných vzorků, jsou například orientace stavby- s tím spojený směr tisku [24], předehřátí lóže nebo také pouhé rozložení tištěných dílů na platformě. Práce [25] a [26] například uvádějí závislost orientace stavby při 3D tisku na výsledných mechanických vlastnostech. Orientace také do jisté míry, podle autorů uvedených prací, ovlivňuje pórovitost a drsnost povrchu materiálu. V Tabulce 3 jsou stručně shrnuty výsledky práce [25].

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti 3D tištěné slitiny AlSi10Mg metodou SLM v závislosti na jejím natočení při tisku (vytvořeno ze závěrů [25])

Orientace tisku	Hustota [kg/cm <sup>3</sup> ]	Pórovitost %	Tvrдость [HV]
XY	2,68 ± 0,013	0,037 ± 0,0002	127 ± 1
45°	2,68 ± 0,013	0,112 ± 0,0006	128 ± 1
Z	2,68 ± 0,001	0,149 ± 0,0008	126 ± 1

Z Tabulky 3 je vidět, že změna tvrdosti v závislosti na orientaci tisku je jen velmi malá a v rámci směrodatné odchylky se neliší. Nicméně, patrná odchylka je v hodnotách pórovitosti, kde nejmenší pórovitost má podle autorů orientace směru tisku XY. Vyšší hodnoty pórovitosti by mohly ovlivnit hodnoty pevnosti a zapříčinit větší náchylnost na poškození při únavových zkouškách. Nejvýhodnější orientace se tedy zdá být ve směru XY. Nicméně, autoři [25] prováděli ve studii zkoušku tahem a hodnota  $R_m$  pro směr tisku XY byla 460 MPa a pro směr Z o 13 MPa vyšší, v tomto případě tedy nebyla potvrzena domněnka, že vyšší hodnota pórovitosti může ovlivnit pevnostní charakteristiky tištěné součásti a dá se tedy předpokládat, že orientace tisku nemá zásadní vliv na pevnost v tahu tištěného dílu.

Studie [27] zkoumá změny vlastností spojené s polohou tištěného vzorku na platformě. Na Obrázku 4 je zaznamenáno použité schéma studie.



Obrázek 4 a) Schéma studie b) tištěné vzorky, upraveno pro potřeby BP, přeloženo [27]

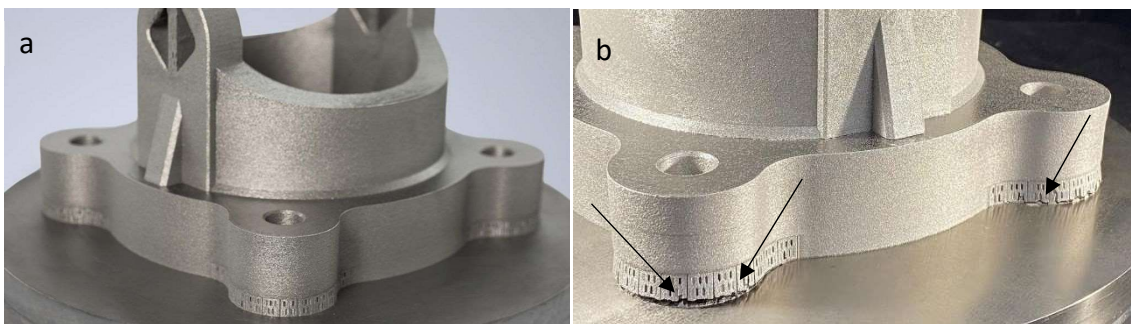
V této práci byly testovány mechanické vlastnosti kovových slitin ve stavu As-built. Vzorky byly tištěny metodou SLM, přičemž první skupina vzorků byla v místě, kde posuvný válec začíná doplňovat prášek na platformu tiskárny a druhá skupina vzorků byla na konci opačném. Následně byly testovány jejich vlastnosti v tahu a v tlaku a jejich pórovitost. Závěr studie prokázal, že vzorky v poloze 1 dosahují téměř ve všech ohledech lepších vlastností. Výsledky práce jsou shrnuty v Tabulce 4. U slitiny Ti-6Al-4V byl měřen pouze rozdíl hustot i v tomto případě byly hustoty lepší v pozici 1 než v pozici 2. [27]

Tabulka 4: Porovnání vybraných mechanických vlastností 3D tištěných slitin kobaltu a titanu metodou SLM ve stavu As-built v závislosti na jejich poloze [27]

Slitina	Poloha	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]	Mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [MPa]	Tažnost A* [%]
Co–Cr–W–Mo	1	8,60	980	742	6,5
	2	8,55	954	796	4,5
Ti-6Al-4V	1	4,27	-	-	-
	2	4,21	-	-	-

\* autor [27] uvádí tažnost A bez indexu, viz strana 11

Dalším parametrem tisku, který ovlivňuje mechanické vlastnosti tištěných výrobků je předehřev platformy. Předehřev může díky rovnoměrné distribuci tepla uvnitř tiskárny snížit například vnitřní pnutí, také snižuje riziko deformace částí stavby při odstraňování podpěr, které jsou navíc díky předehřevu potřeba jen v menší míře než u tisku bez předehřevu. Práce [28] uvádí, že předehřev snižuje pórovitost. Na Obrázku 5 je porovnání mezi dvěma díly tištěnými z titanové slitiny s a bez předehřevu. [28]



Obrázek 5 Porovnání mezi díly vytištěnými s předehřevem na 500 °C a) a bez předehřevu b) [28]

Na Obrázku 5b) je díl tištěný bez předehřevu. Na šipkou vyznačených místech jsou patrné trhlinky způsobené vnitřním pnutím a delaminací.

Výše uvedené vlastnosti 3D kovových materiálů připravených 3D tiskem platí velkou mírou pro všechny kovové materiály a jejich slitiny. Předložená práce je však zaměřena na slitinu AlSi10Mg, proto od následující kapitoly bude pozornost věnována výhradně jí.

### 3.3 Slitina AlSi10Mg

Tato kapitola je věnována vlastnostem AlSi10Mg pro 3D tisk, je uvedeno její nejčastější uplatnění a srovnání s konvenčně vyráběnou slitinou AlSi10Mg.

Slitina AlSi10Mg je, jak již bylo řečeno v kapitole 2.3, nepoužívanější slitinou hliníku pro 3D tisk. Složení slitiny dle normy je uvedeno v Tabulce 5.

Tabulka 5: Složení slitiny AlSi10Mg dle normy [29]

Obsah prvků [hm. %]

Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	Si	Sn	Ti	Zn	Jiné	Al
		max				max					
max	max	0,2	max	max	max	9	max	max	max	max	Zbytek
0,05	0,55	-	0,45	0,05	0,15	-	0,05	0,05	0,1	0,15	
		0,45				11					

Slitina se řadí do skupiny tzv. siluminů – slitin hliníku s křemíkem. Tato skupina slitin je díky své dobré zabíhavosti a malému smršťování vhodná pro slévání, ale také, jak již bylo zmíněno, pro 3D tisk, při kterém obecně dosahuje lepších mechanických vlastností ve stavu As-built než po odlití, což dokazuje Tabulka 2. Ke stejnému závěru došly práce [8] [30]. Díky příměsi hořčíku je konvenčně vyrobená slitina dobře vytvrditelná, jelikož umožňuje precipitaci částic Mg<sub>2</sub>Si. [8] [30]

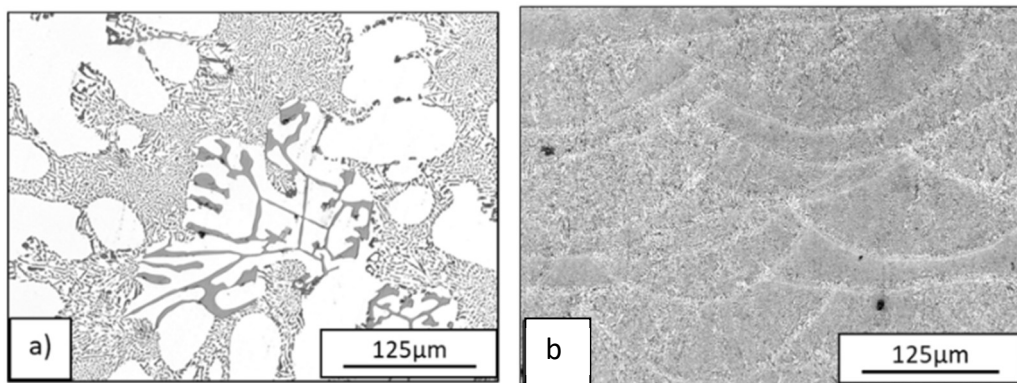
Konvenčně vyrobená slitina po odlití dosahuje pevnosti v tahu 160 MPa a po vytvrzení T6 (rozpuštěním žíhání při teplotách okolo 530 °C, po kterém následuje stárnutí při teplotách v rozpětí 150 – 180 °C) dosahuje 260 MPa [8]. Vytvrzování T6 u slitin tištěných naopak pevnost snižuje, jak je uvedeno v následující kapitole.

Jak slévárenská AlSi10Mg, tak 3D tištěná nacházejí svoje uplatnění v místech, kde je zapotřebí nízké hmotnosti, proto jsou využívány například v letectví, automobilovém průmyslu či lékařství, velkou výhodou těchto slitin je, že i při nízké hmotnosti mají relativně velkou pevnost. [8] [17]

### 3.3.1 Mikrostruktura slitiny AlSi10Mg

Je známo, že při výrobě slitin metodou SLM dochází, ve srovnání s odlévanými slitinami, k vysoké rychlosti tuhnutí, což je důvodem rozdílné mikrostruktury mezi odlévanými a tištěnými díly. [31]

Pomalejší rychlost tuhnutí při odlévání má za důsledek vznik fáze  $\alpha$ -Al na Obrázku 6a je patrná jako bílá plocha, obklopená jehličkovými částicemi Si. Na Obrázku 6b je pro porovnání mikrostruktura slitiny AlSi10Mg vytištěné metodou SLM. [32]



Obrázek 6 Porovnání mikrostruktury odlité a tištěné slitiny AlSi10Mg, převzato z [22], upraveno

Je patrné, že při pozorování pomocí světelné mikroskopie jsou ve struktuře 3D tištěné slitiny AlSi10Mg vidět bílé obloukové hranice, které jsou popisovány jako tzv. Fish - Scales [33].

### 3.3.2 Vliv TZ na vlastnosti 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

Jak již bylo řečeno nejčastěji používaná metoda TZ u konvenčně vyráběné slitiny AlSi10Mg je T6. Při tomto procesu dochází k precipitaci již dříve zmíněných precipitátů  $Mg_2Si$ , které zpevňují matici. U 3D tištěné slitiny AlSi10Mg se však ukázalo, že tento proces TZ snižuje pevnostní vlastnosti jako mez pevnosti v tahu nebo smluvní mez kluzu a naopak zvyšuje tažnost. [8] [34]

Práce [35] zkoumá efekt T6 na slitinu AlSi10Mg ve srovnání se stavem As-built. V Tabulce 6 jsou souborně zaznamenány výsledky práce.

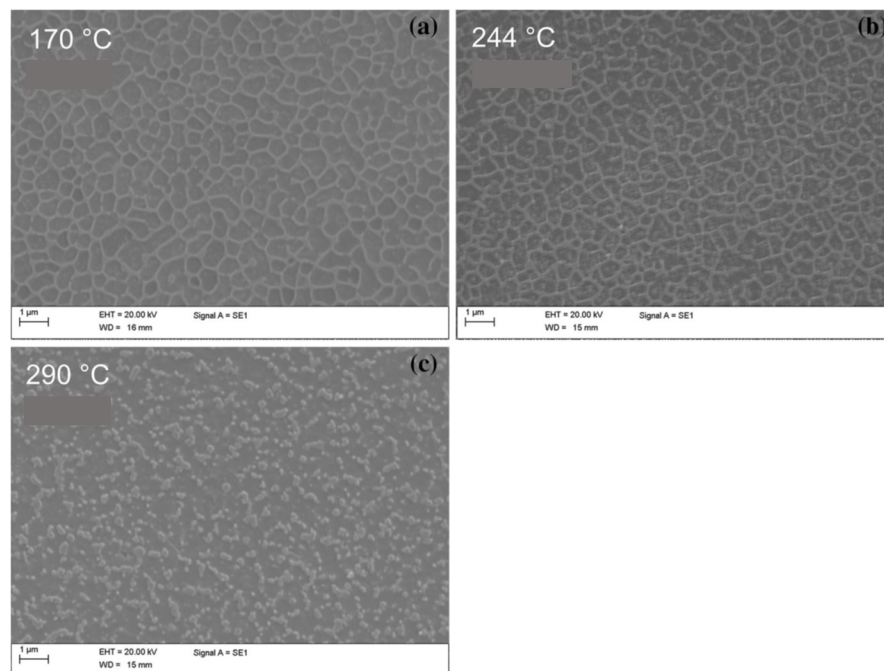
Tabulka 6: Vliv zpracování T6 na 3D tištěnou slitiny AlSi10Mg [35]

Stav materiálu	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A* [%]
As-built	$268 \pm 2$	$333 \pm 15$	$1,4 \pm 0,3$
T6 520 °C / 1 hod, 160 °C / 6 hod	$239 \pm 2$	$292 \pm 4$	$3,9 \pm 0,5$

\*autor [35] uvádí tažnost A bez indexu, viz strana 11

Z Tabulky 6 je vidět, že pevnost slitiny se po T6 snížila, což je nežádoucí pro další využití, proto je nutné využít jiného způsobu TZ. Hlavním důvodem tohoto snížení pevnosti tištěných slitin hliníku po T6 je rozpad křemíkového síťoví. Křemíkové síťoví, které je detekovatelné pomocí SEM, působí ve 3D tištěné slitině zpevňovacím efektem. Pokud se rozpadne při rozpouštěcím žíhání (520 °C/1 hod.) zásadním způsobem dojde k odpevnění. Práce [36] uvádí, že k rozpadu křemíkového síťoví dochází kolem teplot okolo 200 °C. Studie [37] zjistila, že k tomuto rozpadu může dojít až při 244 °C.

Rozpad síťoví s narůstající teplotou je zachycen na Obrázku 7. [37]

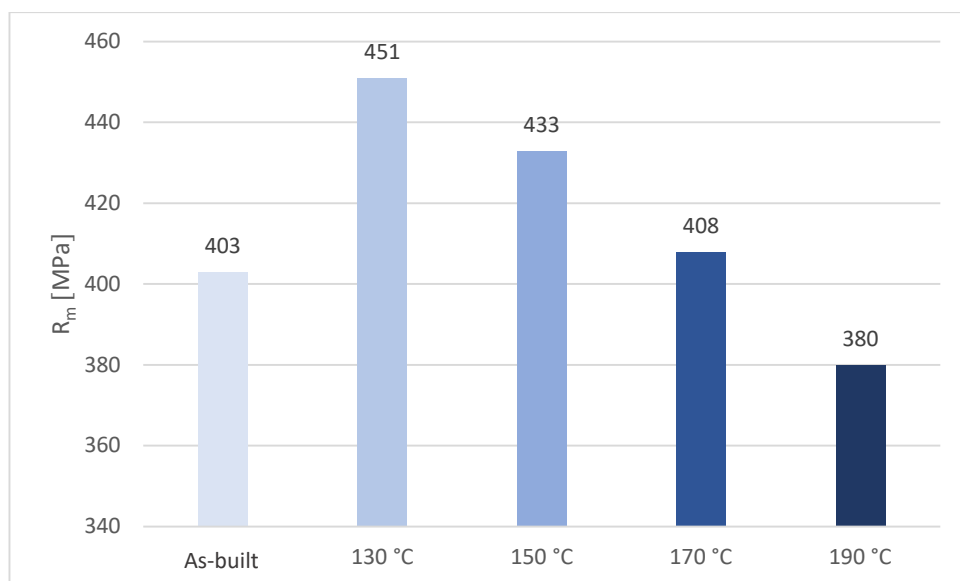


Obrázek 7 Rozpad křemíkového síťoví v závislosti na teplotě pro teplota a) 170 °C b) 244 °C a c) 290 °C [37] 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, SEM

Z Obrázku 7 se dá vypočítat, že struktura (křemíkové síťoví) slitiny ze studie [37] zůstává až do 244 °C prakticky neměnná.

TZ v oblasti teplot do 200 °C, tedy při teplotách, kdy nedochází k rozpadu křemíkového síťoví, by se dalo přirovnat k přímému stárnutí T5. Tato metoda se používá pro konvenčně vyráběné slitiny. Díky absenci rozpouštěcího žíhání na začátku TZ se u 3D tištěné slitiny nerozpadne křemíkového síťoví a dle autorů [37] tak nedochází k poklesu pevnosti ve srovnání se stavem As-built. Naopak, v závislosti na použitých parametrech TZ může v případě TZ v oblasti teplot do 200 °C dojít k nárůstu pevnostních charakteristik 3D tištěné slitiny AlSi10Mg.

Existuje několik studií, které zkoumají teplotu a dobu TZ, při kterých dochází k největšímu nárůstu pevnosti, studie [38] hodnotí vliv rozdílných teplot TZ (do teplot nepřekračujících 200 °C) po dobu stárnutí 4 hod. Na obrázku 8 jsou porovnány výsledky této studie.



Obrázek 8 Vliv teploty přímého stárnutí na pevnost 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, (čas stárnutí 4 hod), vytvořeno na základě [38]

Z Obrázku 8 je vidět, že největší pevnosti se při této konfiguraci dosáhlo v případě teploty 130 °C, při vyšších teplotách TZ pevnost slitiny klesá až na hodnotu 380 MPa při teplotě 190 °C, kdy je menší než u ve stavu As-built. Tyto výsledky se shodují s předpokladem ze studie [37], která říká, že při teplotách okolo 200 °C začíná docházet ke změně struktury (rozpadu křemíkového síťoví) a v důsledku toho poklesu pevnosti.

Studie [39] zkoumá změny mechanických vlastností 3D tištěné slitiny AISi10Mg v závislosti na době stárnutí pro teploty 160 °C a 200 °C. V tabulce 7 je porovnání některých mechanických vlastností z výsledků studie [39].

Tabulka 7: Porovnání mechanických vlastností 3D tištěné slitiny AISi10Mg po TZ ze studie [39]

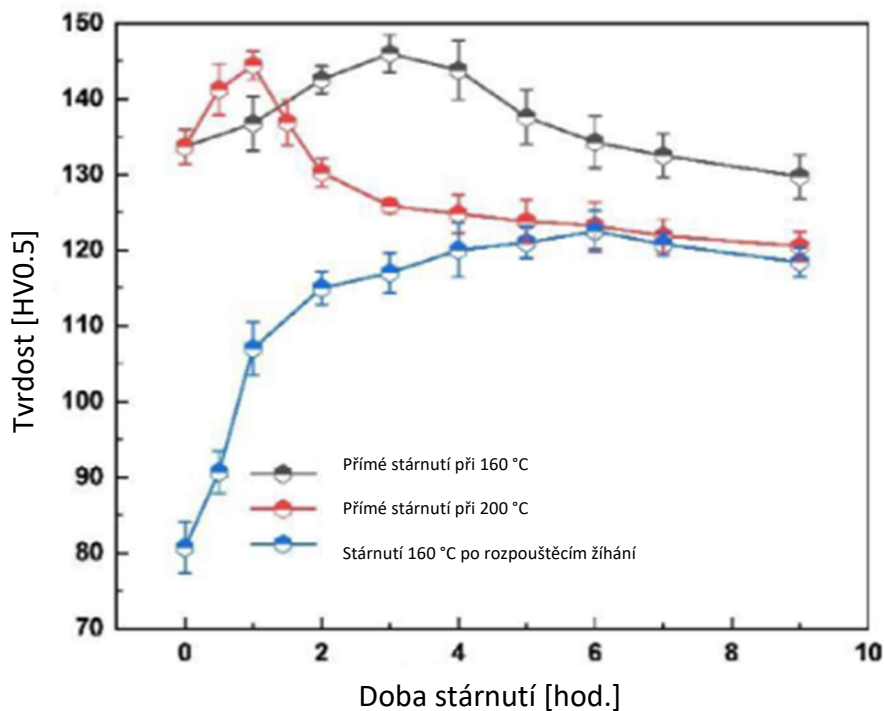
Stav materiálu	R <sub>P0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A* [%]
As-built	248,7 ± 4,7	456,3 ± 5,9	10,2 ± 0,3
T5 160 °C / 3 hod	313,3 ± 5,9	461,2 ± 3,7	8,0 ± 0,3
T5 160 °C / 4 hod	309,5 ± 3,5	464,4 ± 5,7	8,3 ± 0,2
T5 200 °C / 1 hod	306,3 ± 5,7	461,4 ± 3,6	7,6 ± 0,2
T5 200 °C / 1,5 hod	262,5 ± 4,1	386,2 ± 5,2	8,9 ± 0,2

\*autor [39] uvádí tažnost A bez indexu, viz strana 11

Z Tabulky 7 je vidět, že přímé stárnutí při teplotě 160 °C způsobuje mírný nárůst pevnosti a větší nárůst u meze kluzu. Výdrž na této teplotě (3 nebo 4 hodiny) nemá zásadní vliv. Přímé stárnutí 200 °C/1 hod. mírně zvýšilo mez kluzu, pevnost je v rámci směrodatné odchylky srovnatelná se stavem As-built. Po TZ 200 C/1,5 hod. již dochází ke snížení meze pevnosti.



Studie [39] také hodnotila tvrdost slitiny v závislosti na parametrech TZ. Výsledky jsou porovnány na Obrázku 9 jsou graficky zpracovány průběhy tvrdosti.



Obrázek 9 Závislost tvrdosti na době přímého stárnutí 3D tištěné slitiny AlSi10Mg ve porovnání s průběhem tvrdosti pro tuto slitin po T6 [39], přeloženo

Z Obrázku 9 je patrné že v souladu s teoretickými předpoklady platnými pro konvenčně vyrobené hliníkové slitiny [8], dochází při vyšší sledované teplotě přímého stárnutí k dosažení maximálního vytvrzovacího efektu dříve než u teploty nižší. Dá se také očekávat, že maximální vytvrzovací efekt při teplotě 200 °C bude nižší než u teploty 160 °C. Nicméně autoři [39] uvádějí, že maximální hodnoty tvrdosti při teplotách 160 °C a 200 °C se příliš neliší a jsou okolo 145 HV. Opět v souladu s teoretickými předpoklady po dosažení peaku závislostí také v těchto případech se projevuje přestárnutí poklesem tvrdosti. [39]

Pro srovnání je v grafu také 3D tištěná slitina AlSi10Mg po T6. Je vidět, že rozpouštěcí žihání 540 °C/1 hod způsobilo rozpad křemíkového síťoví a v důsledku toho tvrdost klesla přibližně o 35 HV. Při následném stárnutí 160 °C dochází postupně k precipitaci a v důsledku toho k nárůstu tvrdosti. V konečném důsledku však tvrdost po tomto TZ z hlediska použití nevyhovující tento výsledek je v souladu například s výsledkem práce [35]. [39]

Je známo, že TZ 3D tištěných dílů lze více či méně modifikovat strukturu a následně i vlastnosti. [3] [38] [39] Na základě literární rešerše, ze které vychází tato práce, se dá konstatovat, že TZ do 200 °C zlepšuje mechanické vlastnosti 3D tištěné slitiny AlSi10Mg oproti jejímu stavu As-built, a zdá se, že k nejvyššímu nárůstu těchto vlastností dochází při TZ o teplotách 130 – 160 °C s výdrží 2 – 4 hod. [38] [39]. Studie také ukazují, že při zvolení vyšší teploty (např. teploty 200 °C) TZ dochází k nárůstu mechanických vlastností dříve, než při zvolení teploty nižší (např. teploty 160 °C) [39]. Nicméně, jak již bylo dříve zmíněno, autorovi se nepodařilo pro vzájemné porovnání najít více prací, kde by byly použity naprosto totožné režimy TZ. Lze říct, že peak nárůstu hodnot mechanických vlastností bude záviset nejen na teplotě a době TZ, ale také na přesném složení použitého prášku a na parametrech tisku.

V experimentální části budou analyzovány vzorky z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, jejichž režim TZ se přesně neshoduje s žádným režimem, který by použit ve studiích z literární rešerše této práce. Je tedy otázkou, zda analyzované vzorky budou srovnatelné.

Pro 3D tištěnou slitinu AlSi10Mg se používá TZ při různých teplotách v rozsahu 130 – 300 °C [3]. Tato práce se však věnuje pouze TZ při teplotách do 200 °C.

## 4 Experimentální část

### 4.1 Experimentální materiál

Tato práce je součástí většího projektu, který se zabývá zkoumáním vlastností 3D tištěné slitiny AlSi10Mg po různých režimech TZ.

V experimentální části jsou zkoušeny vzorky z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, z prášku, který dodala firma Concept Laser GmbH, chemické složení prášku je uvedeno v Tabulce 8. Uvedené chemické složení se od složení normovaného [29], uvedeného v Kapitole 3.3 v Tabulce 5, liší pouze nepatrně v obsahu mědi.

Tabulka 8: Chemické složení prášku ze slitiny AlSi10Mg od firmy Concept Laser GmbH (převzato [3])

Obsah prvků [hm. %]											
Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Cu	Zn	C	Ni	Pb	Sn	Al
9	0,2	max	max	max	max	max	max	max	max	max	
-	-	0,55	0,45	0,15	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	Zbytek
11	0,45										

Pro výrobu vzorků byla použita metoda DMLM (Direct metal laser melting), která je shodná s metodou SLM [3]. Tisk probíhal na tiskárně Concept Laser M2 na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie na fakultě strojní ČVUT v Praze, všechny vzorky byly tištěny ve vertikálním směru (směr Z) v ochranné dusíkové atmosféře. V tabulce 9 jsou uvedeny parametry tisku.

Po vytištění byly vzorky vystaveny různým módům TZ, přehled režimů je shrnut v Tabulce 10.

Tabulka 9: Parametry použité při tisku vzorků slitiny AlSi10Mg (převzato [3])

	<b>Výkon laseru</b> [W]	<b>Skenovací rychlost</b> [mm/s]	<b>Tloušťka vrstvy</b> [μm]	<b>Velikost bodu</b> [μm ]
<b>Povrch</b>	200	800	25	140
<b>Objem</b>	370	1400	50	190
<b>Podpory</b>	200	1600	50	50

Tabulka 10: Přehled režimů TZ experimentálních vzorků ze 3D tištěné slitiny AlSi10Mg [40]

<b>Číslo vzorku</b>	<b>Režim tepelného zpracování</b>
23	Bez tepelného zpracování
25	Ohřev na 170 °C po dobu 2 hodin, chladnutí při pokojové teplotě
17	Ohřev na 180 °C po dobu 2 hodin, chladnutí při pokojové teplotě
14	Ohřev na 200 °C po dobu 2 hodin, chladnutí při pokojové teplotě

Ve všech případech bylo TZ aplikováno na 5 vzorků ( $\varnothing$  8 – 40 mm), na kterých byla následně provedena tahová zkouška dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Vzorky, které jsou analyzovány v předložené BP mají pevnost nejvíce blížíci se průměrné hodnotě pro dané TZ. Výsledky zkoušky tahem pro vybrané vzorky uvádí Tabulka 11.

Tabulka 11: Výsledky zkoušky tahem pro sledované vzorky z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg [40]

Režim TZ	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{5,65}$ [%]
As-built	240	393	3,2
170 °C/2 hod	281	429	3
180 °C/2 hod	286	389	2,1
200 °C/2 hod	266	411	2,8

Dle předpokladu, který se shoduje například se závěry prací [37] [38] by mělo docházet u 3D tištěné slitiny AlSi10Mg k nárůstu pevnosti oproti stavu **As-built** při TZ do teplot kolem 200 °C, ve studii [38] dochází sice k poklesu  $R_m$  už při TZ při 190 °C, ale tento pokles autor připisuje delší době TZ a to 4 hod.

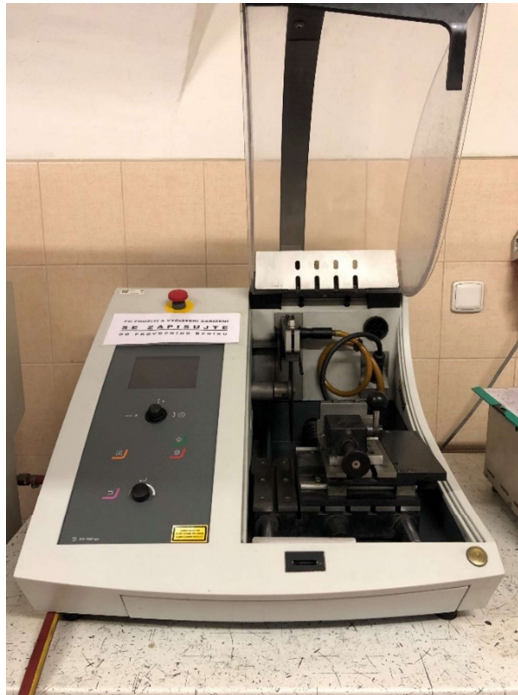
Z tabulky je patrné, že vzorek číslo 17 (TZ 180 °C/2 hod.) nevykazuje očekávaný nárůst pevnosti, jeho hodnota meze pevnosti je se stavem **As-built** srovnatelná. Důvodem pro rozpor těchto hodnot, by mohl být větší počet náhodně se vyskytujících vnitřních vad. Nicméně, mez kluzu v tomto případě vykazuje očekávaný nárůst. Hlubší analýza tohoto problému je nad rámec předložené bakalářské práce.

U vzorku číslo 25 (TZ 170 °C/2 hod.) a číslo 14 (TZ 200 °C/2 hod.) pevnost, dle předpokladu, oproti stavu **As-built** narostla, důvody byly popsány v teoretické části (kapitola 3.3.2).

Vzorky po zkoušce tahem jsou určeny pro následnou metalografickou analýzu, fraktografickou analýzu, dále pro měření tvrdosti a stanovení míry zpevnění od lomové plochy směrem k upínací části vzorku pro zkoušku tahem.

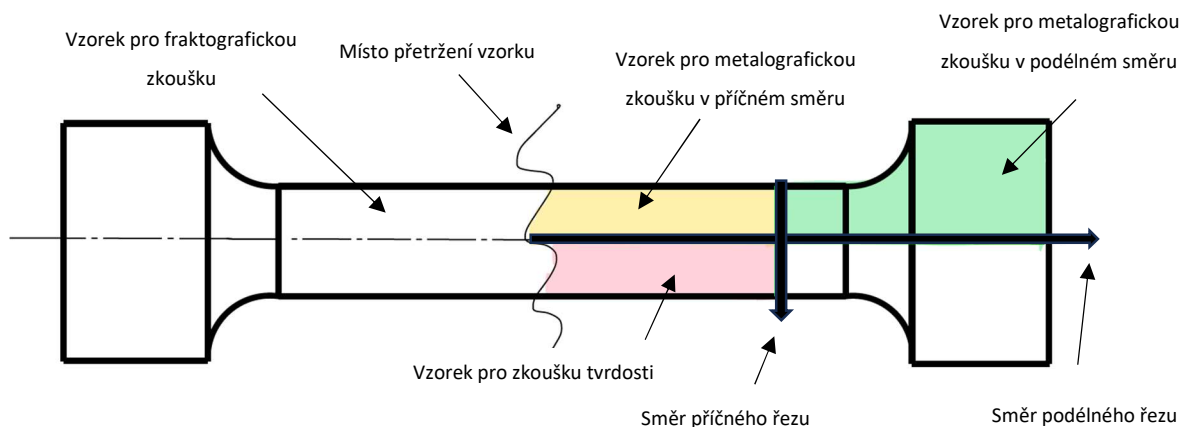
## 4.2 Příprava vzorků

Jak již bylo zmíněno, analyzované vzorky, byly po tisku podrobeny tahové zkoušce. Následně byly nařezány na menší kusy tak, aby se na nich daly provést výše zmíněné zkoušky. Řezy na všech vzorcích byly provedeny jak v příčném, tak v podélném směru. K řezání byla použita pila Struers Secotom – 60 (Obrázek 10).



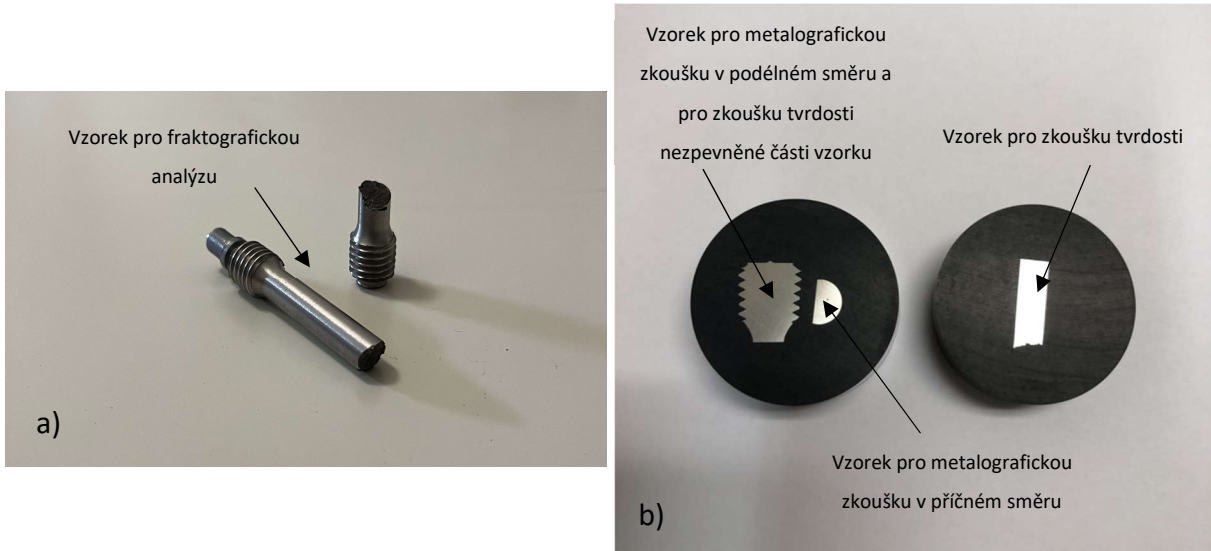
Obrázek 10 Pila Struers Secotom - 60

Na Obrázku 11 je schematicky naznačeno, jak byly vzorky rozřezány pro jednotlivé zkoušky.



Obrázek 11 Schéma vzorku z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg po tahové zkoušce a nařezání

Po nařezání vzorků byly vzorky pro metalografii a pro zkoušku tvrdosti fixovány do bakelitu. Na Obrátku 12a) jsou vidět vzorky pro fraktografickou analýzu. Na Obrázku 12b) jsou etalony připravené na broušení a na následnou metalografickou analýzu a měření tvrdosti.



Obrázek 12 Vzorky z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg připravené pro analýzu

a) Ukázka vzorku pro fraktografickou analýzu

b) Ukázka vzorku po zafixování

Vzorky pro metalografickou analýzu byly následně postupně broušeny a leštěny koloidním SiO<sub>2</sub> na brusce Struers Teramin – 30, která je vidět na Obrázku 13, brusnými papíry s velikostmi zrn v rozpětí 25 až 600 μm.



Obrázek 13 Bruska Struers Teramin - 30

### 4.3 Experimentální metody použité pro BP

#### 4.3.1 Metalografická analýza

Jednotlivé vzorky byly pozorovány v nenaleptaném stavu pomocí světelné mikroskopie na mikroskopu Neophot 32 (na Obrázku 14) v laboratoři na Ústavu materiálového inženýrství ČVUT v Praze. Bylo provedeno pozorování výskytu nečistot a pórů. V některých případech by se mohlo jednat o nedokonale natavený prášek, který by se však dal analyzovat pouze za použití elektronové mikroskopie.





Obrázek 14 Světelný mikroskop Neophot 32

K hodnocení pórovitosti byl použit digitální mikroskop Olympus DSX 1000, který je na Obrázku 15. Mikroskop je vybaven softwarem QuickPHOTO, díky kterému dokáže stanovit procentuální zastoupení pórů, případně nečistot na vybraném snímku.



Obrázek 15 Digitální mikroskop Olympus DSX 1000

Dále byly vzorky leptány směsí Keller (1 % kyselina fluorovodíková, 1,5 % kyselina chlorovodíková, 2,5 % kyselina dusičná, 95 % destilovaná voda), aby došlo k zvýraznění struktury. Naleptané vzorky byly opět analyzovány na mikroskopu Neophot 32 (Obrázek 14), při zvětšení 12,5x8.

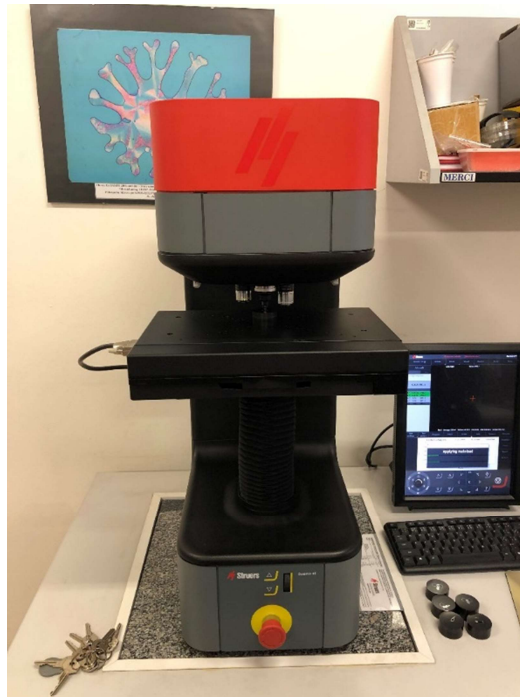
#### 4.3.2 Měření tvrdosti

##### **Měření tvrdosti směrem od lomové plochy (část zpevněná)**

Měření bylo provedeno metodou dle Vickerse (HV1), dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Vzorek byl zatížen zkušebním tělesem na kraji lomové plochy ve vzdálenosti přibližně 2 mm od lomu samotného a poté bylo provedeno dalších 20 měření směrem od lomové plochy do vzorku, doba zátěže byla 10 s při zátěžné síle 1 kp (10 N). Měření tvrdosti probíhalo na tvrdoměru Struers Duramin – 40 (na Obrázku 16). Z naměřených hodnot se následně stanovila závislost tvrdosti HV1 na vzdálenosti od lomové plochy k upínací části vzorku pro zkoušku tahem.

##### **Měření tvrdosti v upínací části vzorku pro zkoušku tahem (část nezpevněná)**

Měření tvrdosti nezpevněné části bylo provedeno se stejnými parametry a na stejném zařízení jako měření pro část zpevněnou, bylo však provedeno pouze 5 vtisků přibližně uprostřed plochy upínací části vzorku.



Obrázek 16 Tvrdoměr Struers Duramin – 40

#### 4.3.3 Fraktografická analýza

Jako poslední bylo přistoupeno k fraktografické analýze, která byla provedena stejně jako u hodnocení porozity na digitálním mikroskopu Olympus DSX 1000. Vzorky byly ukotveny do vertikální polohy a kamerou byly nasnímány lomové plochy v několika vrstvách, ze kterých byl následně vytvořen celistvý snímek. Snímky byly následně porovnány z hlediska podílu houževnatého a křehkého lomu.

## 5 Výsledky a jejich diskuse

V následující kapitole jsou popsány výsledky zkoušek, provedených na 3D tištěných vzorcích slitiny AlSi10Mg. Výsledky jsou uvedeny v pořadí, ve kterých zkoušky probíhaly.

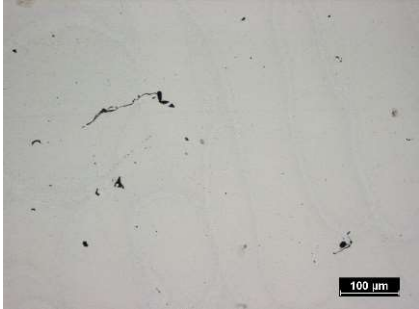
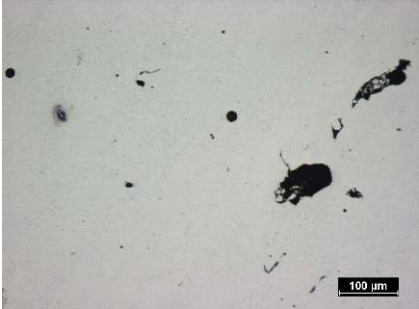
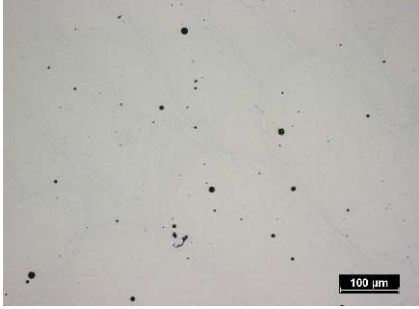
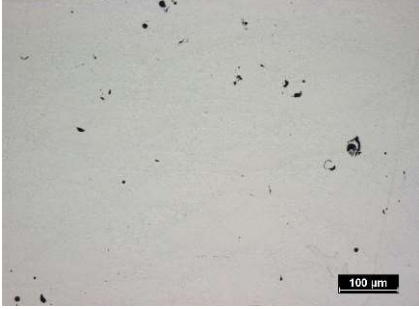


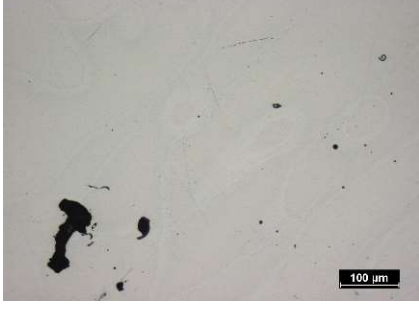

### 5.1 Metalografická analýza pomocí světelné mikroskopie

Jak již bylo zmíněno, pozorování mikročistoty vzorků probíhalo pomocí světelné mikroskopie (SM). U každého hodnoceného stavu byl zhotoven snímek v příčném a podélném řezu, v nenaleptaném stavu. Přehledové snímky jsou uvedeny v Tabulce 12.

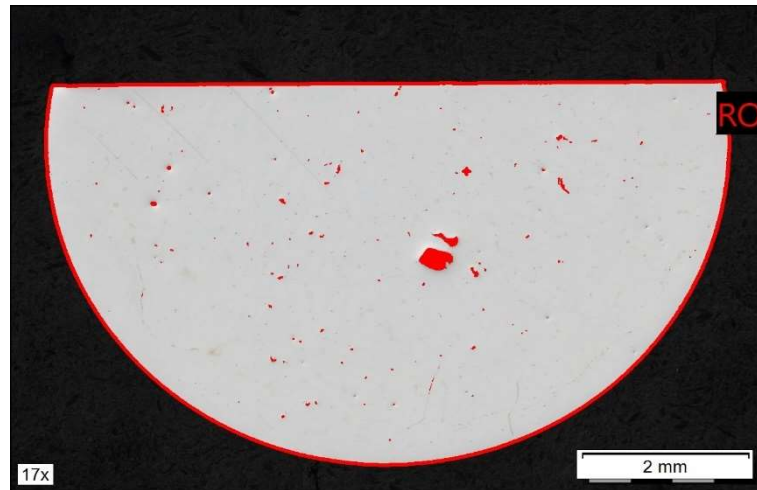
Na každém v tabulce uvedeném snímku je patrný výskyt tmavých oblastí, které byly identifikovány jako póry. Na základě tohoto zjištění bylo přistoupeno k vyhodnocení pórovitosti. Pro hodnocení byly vybrány snímky v příčném řezu, protože vzorky tištěné z prášku od stejného výrobce, při stejných parametrech tisku, byly v podélném směru na pórovitost hodnoceny v práci [3]. Nutno podotknout, že snímky zahrnují pouze velmi malou část vzorku. Pórovitost tedy byla hodnocena na celé ploše příčného řezu pomocí software viz kapitola 4.3.1

Je vidět, že uvedené póry se vyskytují nezávisle na orientaci vzorku, stejně jako na parametrech TZ příslušného vzorku.

Tabulka 12: Snímky materiálu 3D tištěné AlSi10Mg v nenaleptaném stavu v příčném a podélném řezu, SM

Režim TZ	Příčný řez	Podélný řez
<b>As-built</b>		
<b>170 °C/2 hod.</b>		
<b>180 °C/2 hod.</b>		
<b>200 °C/2 hod.</b>		

Na Obrázku 17 je pro ukázkou snímek, ze kterého byla vyhodnocena pórovitost pro vzorek po TZ 200 °C/2 hod.



Obrázek 17 Snímek z hodnocení pórovitosti v příčném řezu vzorku po TZ 200 °C/2 hod. z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

Pro všechny vzorky bylo ze snímků zjištěno procentuální zastoupení tmavých oblastí na červeně ohraničené ploše (ROI – Region of interest, viz Obrázek 17). Výsledné procentuální zastoupení uvedených oblastí zaznamenává Tabulka 13. V tabulce jsou také uvedeny hodnoty pevnosti pro sledované vzorky. Je možno konstatovat, že zjištěná pórovitost je ve všech případech malá a pro jednotlivé sledované stavy se zásadně neliší. Jak již bylo uvedeno parametry TZ neovlivňují pórovitost.

Autorka [3] dochází ve své práci ke stejnému závěru ohledně vlivu parametrů TZ na pórovitost 3D tištěné slitiny AlSi10Mg. Zdá se, že až do teplot kolem 300 °C nemá TZ na pórovitost vliv.

Tabulka 13: Hodnoty z hodnocení pórovitosti vzorků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

Stav materiálu	Pórovitost [%]	R <sub>m</sub> [MPa]
As-built	0,12	393
170 °C/2 hod.	0,75	429
180 °C/2 hod.	0,16	389
200 °C/2 hod.	0,45	411

Dále byly metalografické vzorky pozorovány v naleptaném stavu, v Tabulce 14 jsou snímky z podélných a příčných řezů, obdobně jako pro stav nenaleptaný (Tabulka 12).

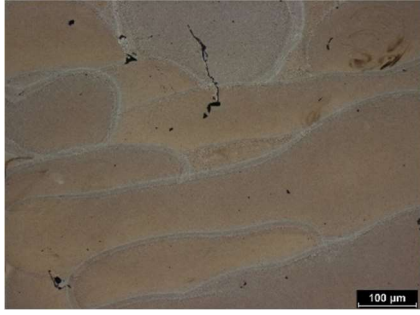

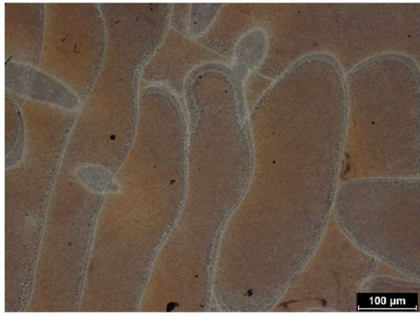

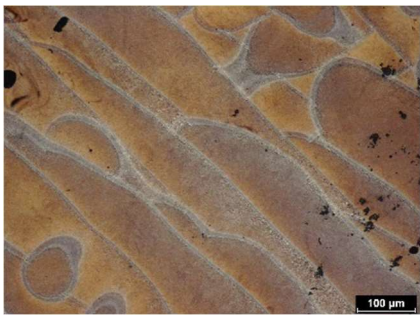

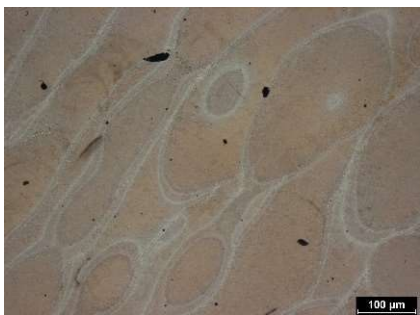

Na snímcích v příčném řezu jsou u všech vzorků patrné podlouhlé stopy, které leží v různých směrech v důsledku postupného skenování vrstvy po vrstvě. [3] U všech režimů TZ se dá konstatovat, že se struktura nijak zásadně neliší tvarem ani velikostí zmíněných stop. Při pozorování pomocí SM nebyly u vzorků po TZ v oblasti teplot od 170 – 200 °C pozorovány rozdíly ve struktuře.

V podélném směru jsou na první pohled u všech režimů TZ vidět tavné lázně, tzv. fish scales, ze kterých je patrné postupné nanášení a tavení jednotlivých vrstev prášku při tisku. Opět se zdá, že při pozorování pomocí SM nebyl pozorován vliv režimů TZ v oblasti sledovaných teplot na mikrostrukturu vzorků.

V souladu s pracemi [3] [36] [37], při pozorování SM nevykazují vzorky závislost na parametrech TZ, je totiž známo, že změny ve struktuře 3D tištěné slitiny AlSi10Mg v závislosti na TZ lze pozorovat jenom při výrazně větším zvětšení pomocí SEM. [3] [19]

Pozorování struktury sledovaných vzorků pomocí SEM je nad rámec této práce.

Tabulka 14: Snímky materiálu 3D tištěné AlSi10Mg v naleptaném stavu v příčném a podélném řezu, SM.

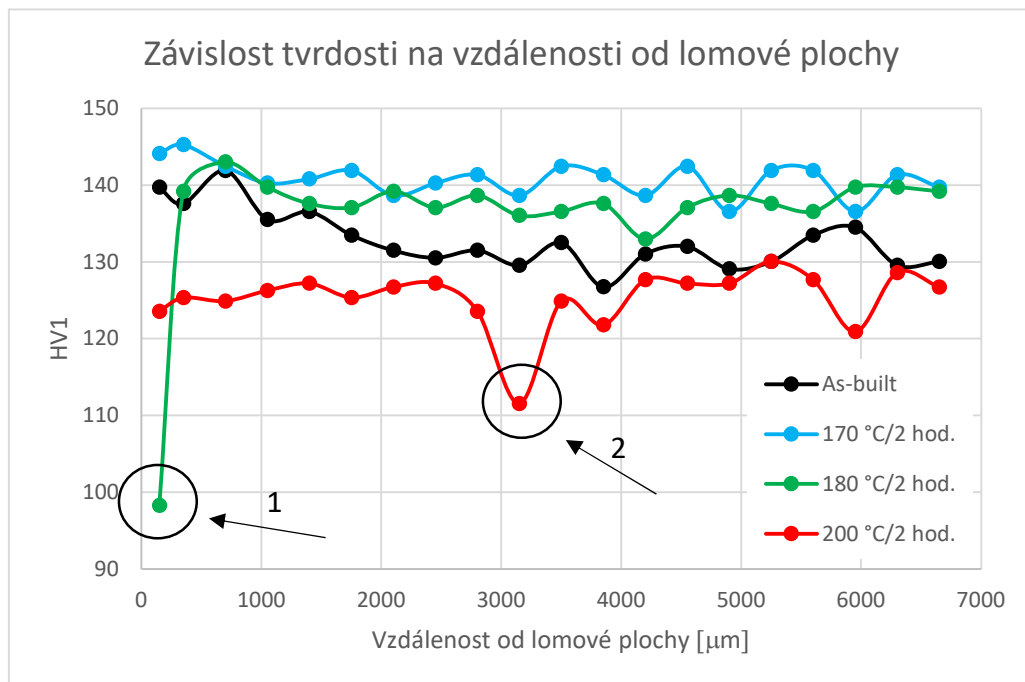
Režim TZ	Příčný řez	Podélný řez
As-built		
170 °C/2 hod.		
180 °C/2 hod.		
200 °C/2 hod.		



## 5.2 Zkouška tvrdosti

### 5.2.1 Deformační zpevnění při zkoušce tahem

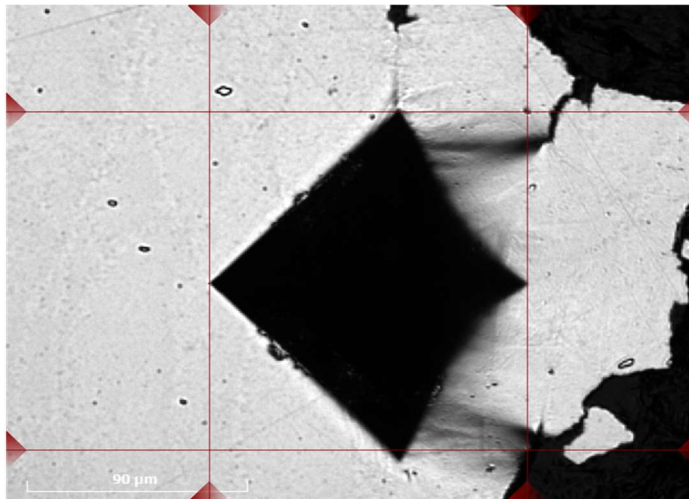
Po provedení 20 vtisků do každého vzorku směrem od lomové plochy byla vykreslena závislost tvrdosti na vzdálenosti od místa lomu, Obrázek 18. První vtisk byl proveden ve vzdálenosti přibližně 150  $\mu\text{m}$  od místa lomu, další vtisky pak po 350  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 18 Závislost tvrdosti na vzdálenosti od lomové plochy ze zkoušky tvrdosti, 3D tisk AISi10Mg, vliv 170 – 200 °C/2 hod.

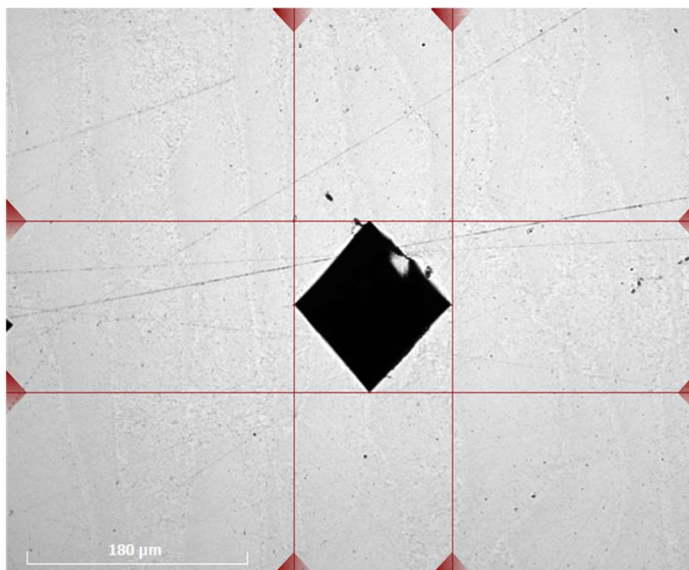
Na grafu jsou vyznačeny dvě anomálie v hodnotě tvrdosti, v prvním případě lze předpokládat, že bylo nevhodně zvoleno místo prvního vtisku a v druhém by se mohlo jednat o místo, kde se nacházel například pór nebo jiná nedokonalost, která mohla ovlivnit výslednou hodnotu tvrdosti. Na Obrázku 19 a 20 jsou zachyceny detaily obou vyznačených vtisků.

Obrázek 19 potvrzuje předpoklad o nevhodně zvolené vzdálenosti vtisku od lomové plochy. Vtisk je příliš blízko okraji lomové plochy a je tudíž nežádoucím způsobem deformován.



Obrázek 19 Anomálie, na Obrázku 18 označena číslem 1 (1. vtisk vzorku po TZ 180 °C/2 hod.)

Na Obrázku 20 je patrná anomálie v pravé horní části vtisku, pravděpodobně by se mohlo jednat o malý úlomek materiálu.



Obrázek 20 Anomálie, na Obrázku 18 označena číslem 2 (10. vtisk vzorku po TZ 200 °C/2 hod.)

Hodnoty tvrdostí zjištěných z výše uvedených vtisků nebyly dále použity při hodnocení minimálních hodnot tvrdosti.

Obecně lze z Obrázku 18 konstatovat, že pro všechny sledované stavy nedochází k výraznější změně tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od lomové plochy. Pro stav **As-built** tvrdost směrem od lomové plochy nepatrně klesá (cca o 10 HV1). Pro stavy po TZ **170 °C/2 hod.** a **180 °C/2 hod.** vykazuje tvrdost HV1 téměř konstantní průběh a pro TZ **200 °C/2 hod.** lze z grafu vypočítat drobný nárůst tvrdosti směrem od lomové plochy.

V Tabulce 15 je porovnání maximálních a minimálních hodnot tvrdosti ve zpevněné části vzorků, doplněná o jejich pevnost.

Tabulka 15: Vliv parametrů TZ (170 – 200 °C/2 hod.) na míru zpevnění 3D tištěné slitiny AlSi10Mg při zkoušce tahem

Stav materiálu	Maximální hodnota tvrdosti zpevněné části HV(1)	Minimální hodnota tvrdosti zpevněné části HV(1)	R <sub>m</sub> [MPa]
<b>As-built</b>	142	127	393
<b>170 °C/2 hod.</b>	145	137	429
<b>180 °C/2 hod.</b>	143	133	389
<b>200 °C/2 hod.</b>	130	121	411

Tabulka 15 ukazuje, že největší rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou tvrdosti vykazuje stav **As-built**, což je v souladu s teorií, že TZ snižuje vnitřní pnutí materiálu. [8] Maximální a minimální hodnoty tvrdosti vzorků po TZ se liší maximálně o 10 HV1.

### 5.2.2 Tvrdost nezpevněné části vzorků

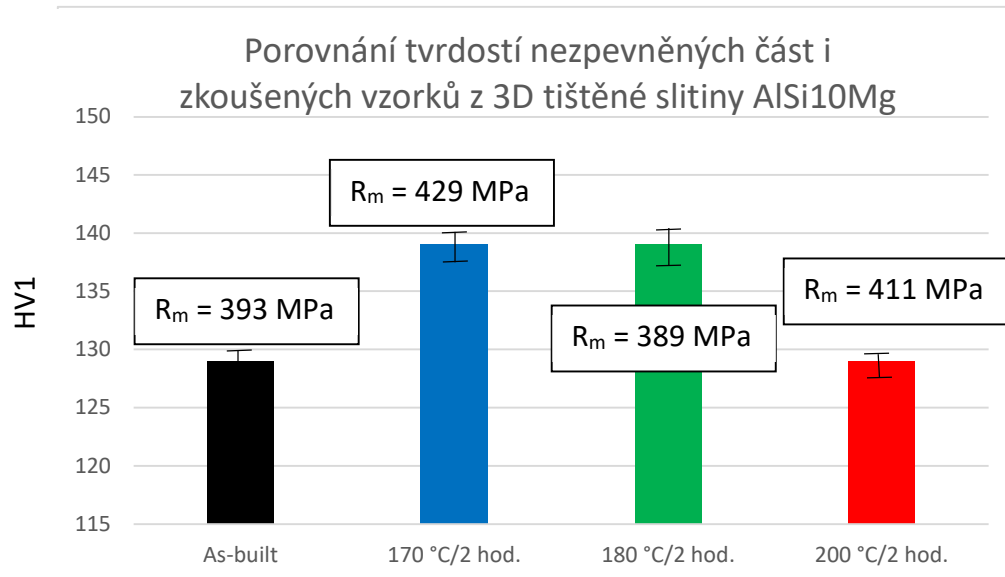
Do nezpevněné části každého vzorku (upínací hlavička vzorku pro zkoušku tahem) bylo provedeno 5 vtisků, z nichž se následně určila průměrná hodnota tvrdosti nezpevněné části vzorku. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v Tabulce 16, kde jsou porovnány s hodnotami pevnosti jednotlivých analyzovaných vzorků.

Tabulka 16: Vliv parametrů TZ (170 – 200 °C/2 hod.) na tvrdost nezpevněné části 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

Stav materiálu	Tvrdost nezpevněné části vzorku (HV1)	R <sub>m</sub> [MPa]
As-built	129 ± 2	393
170 °C/2 hod.	139 ± 2	429
180 °C/2 hod.	139 ± 3	389
200 °C/2 hod.	129 ± 1	411

Z hodnot v Tabulce 16 lze konstatovat, že nezpevněná část má srovnatelné hodnoty tvrdosti s částí zpevněnou. V rámci směrodatné odchylky se například u vzorku po TZ **200 °C/2 hod.** neliší s hodnotou maximální tvrdosti z Tabulky 15. Lze také vypočítat trend, kdy tvrdost u vzorků po TZ **170 °C/2 hod.** a **180 °C/2 hod.** narostla mírně hodnota tvrdosti oproti stavu **As-built**. Hodnota pevnosti u vzorku po TZ **200 °C/2 hod.** se zdá být srovnatelná s hodnotou stavu **As-built**, důvodem může být zvolená teplota TZ, při ní už by totiž mohlo docházet k částečnému rozpadu křemíkového síťoví a tvrdost by tak mohla začít klesat. [37]

Na Obrázku 21 jsou pro přehlednost ve sloupcovém grafu porovnány průměrné hodnoty tvrdosti nezpevněné části vzorků. U každého vzorku je doplněna jeho pevnost v tahu.



Obrázek 21 Porovnání hodnot tvrdosti nezpevněných částí zkoušených vzorků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

Na základě literární rešerše (kapitola 3.3.2) lze předpokládat, že pevnost a tvrdost vzorku po TZ 170 – 200 °C bude ve srovnání s hodnotami ve stavu **As-built** vyšší. Tomuto předpokladu odpovídají tvrdosti po TZ **170 °C/2 hod.** a **180 °C/2 hod.** Zdá se, že v případě TZ **200 °C/2 hod.** došlo již k částečným změnám struktury, které jsou důvodem nižší tvrdosti než u vzorků po **170 °C/2 hod.** a **180 °C/2 hod.** Uvedené výsledky měření tvrdosti jsou v dobrém souladu s teoretickými předpoklady. [39]

Tyto strukturální změny by se měly potvrdit analýzou pomocí SEM. Ačkoliv je známo, že s rostoucí tvrdostí roste i pevnost [39] tomuto faktu neodpovídá pevnost vzorku po TZ **180 °C/2 hod.** Lze předpokládat, že nízká pevnost sledovaného vzorku byla zaviněna vadou tisku.

### 5.3 Fraktografická analýza SM

Byla provedena fraktografická analýza vzorků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg u vybraných vzorků po zkoušce tahem. Snímky pořízené pomocí SM jsou v Tabulce 17.

Tabulka 17: Snímky lomových ploch 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, SM



**As-built**



**170 °C/2 hod.**



**180 °C/2 hod.**



**200 °C/2 hod.**

Z Tabulky 17 je patrné, že mezi jednotlivými stavy nejsou výrazné rozdíly. Zdá se, že se jedná o houževnatý lom, vzhledem k matnému a hrubému povrchu. Jsou zde také vidět skenovací stopy, které jsou patrné pro všechny 3D tištěné díly a malé bílé oblasti, vyznačené šipkami, mělo by se jednat o póry [41]. Kolem těchto světlých oblastí, by se mohlo jednat o křehký lom. [3]

Při porovnání snímků z Tabulky 17 a fraktografické analýzy v práci [3] je možné konstatovat, že vzhled lomů v případě TZ 170 – 200 °C má obdobný charakter jako pro TZ 240 – 300 °C [3]. Nicméně je otázka, jak by porovnání uvedených lomových ploch dopadlo při podrobnější analýze pomocí SEM. Tato analýza je však nad rámec předložené BP.

## 6 Závěr

V rámci předložené bakalářské práce byl studován vliv tepelného zpracování v rozsahu 170 – 200 °C na vlastnosti 3D slitiny AlSi10Mg tištěné metodou SLM.

### 1) Mikročistota

Tepelné zpracování v rozmezí 170 – 200 °C nemá zásadní vliv na množství nečistot ve vzorcích z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg.

Orientace vzorků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg nemá vliv na množství nečistot.

Pórovitost jednotlivých zkoušených vzorků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg se nijak výrazně nelišila.

### 2) Struktura

Bylo zjištěno, že metalografickou analýzou pomocí světelné mikroskopie nejsou po tepelném zpracování 170 – 200 °C/2 hod. patrné rozdíly ve struktuře, a to nezávisle na orientaci vzorku.

### 3) Deformační zpevnění při zkoušce tahem

Vzorky z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg vykazují pouze nepatrný nárůst pevnosti ve stavu **As-built**. U tepelně zpracovaných vzorků ke zpevnění nedochází.

### 4) Tvrdost

Bylo potvrzeno, že při TZ **170 °C/2 hod.** a **180 °C/2 hod.** dochází k nárůstu tvrdosti ve srovnání se stavem **As-built**. U vzorku po TZ **200 °C/2 hod.** k očekávanému zpevnění nedochází, lze předpokládat, že v důsledku strukturních změn, které by se daly pozorovat pomocí SEM.

### 5) Fraktografie

Lomové plochy jednotlivých zkoušených vzorků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg při pozorování pomocí světelné mikroskopie nevykazují výrazné rozdíly.

Cíle práce byly splněny.



## 7 Bibliografie

- [1] BADIRU, A.; VALENCIA, V. a LIU, D. (ed.). *Additive manufacturing handbook: product development for the defense industry. System innovation series*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. ISBN 9781482264081.
- [2] SHAKIL, S.I.; HADADZADEH, A.; SHALCHI AMIRKHIZ, B.; PIRGAZI, H.; MOHAMMADI, M. et al. Additive manufactured versus cast AlSi10Mg alloy: Microstructure and micromechanics. online. *Results in Materials*. 2021, roč. 10. ISSN 2590048X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100178>. [cit. 2023-01-06].
- [3] GALČÍKOVÁ, E. *Hodnocení struktury a mechanických vlastností 3D tištěné slitiny AlSi10Mg v závislosti na parametrech tepelného zpracování*. Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D. Praha: ČVUT v Praze, 2022.
- [4] MACEK, K. *Kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN isbn80-010-3513-1.
- [5] ŠVEC, P. *Konstruktivní materiály*. 1. vyd. *Edícia vysokoškolských učebnic*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. ISBN isbn978-80-227-3386-1.
- [6] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN isbn80-7080-600-1.
- [7] SKOČOVSKÝ, P; PALČEK, P; KONEČNÁ, R a VÁRKOLY, L. *Konstruktivní materiály*. Prvé vydanie. Žilina: Žilinská univerzita, 2000. ISBN .isbn80-7100-608-4.

- [8] MACEK, K. a ZUNA, P. *Strojírenské materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN isbn80-010-2798-8.
- [9] FROES, F. a BOYER, R. *Additive manufacturing for the aerospace industry*. Cambridge, MA, United States: Elsevier, 2019. ISBN isbn978-0-1281-4062-8.
- [10] YANG, L.; BAUGHMAN, B.; GODFREY, D.; HSU, K.; MEDINA, F. et al. *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. 1st ed. 2017. *Springer Series in Advanced Manufacturing*. Imprint: Springer, 2017. ISBN 9783319551289.
- [11] ABOULKHAIR, N.; SIMONELLI, M.; PARRY, L.; ASHCROFT, I.; TUCK, Ch. et al. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting. online. *Progress in Materials Science*. 2019, roč. 106. ISSN 00796425. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578>. [cit. 2022-11-28].
- [12] RAO, H.; GIET, S.; YANG, K.; WU, X. a DAVIES, Ch. The influence of processing parameters on aluminium alloy A357 manufactured by Selective Laser Melting. online. *Materials & Design*. 2016, roč. 109, s. 334-346. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.009>. [cit. 2022-11-28].
- [13] WANG, L.-Z.; WANG, S. a HONG, X. Pulsed SLM-manufactured AlSi10Mg alloy: Mechanical properties and microstructural effects of designed laser energy densities. online. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018, roč. 35, s. 492-499. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.09.007>. [cit. 2022-11-28].
- [14] Material properties: Aluminum alloy. online. *MakeItFrom*. 2017. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties>. [cit. 2022-11-28].

- [15] SIMONELLI, M.; TSE, Y.Y. a TUCK, C. Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti–6Al–4V. online. *Materials Science and Engineering: A*. 2014, roč. 616, s. 1-11. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.07.086>. [cit. 2022-11-28].
- [16] Kovové materiály - Zkoušení tahem: Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty. In: . Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [17] KIMURA, T. a NAKAMOTO, T. Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting. online. *Materials & Design*. 2016, roč. 89, s. 1294-1301. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.065>. [cit. 2022-12-15].
- [18] DUDA, T. a RAGHAVAN, V. 3D Metal Printing Technology. online. *IFAC - Papers Online*. 2016, č. 49-29, s. 103-110. ISSN 2405-8963. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/>. [cit. 2022-11-15].
- [19] RŮŽIČKOVÁ, L. *Vliv parametrů tepelného zpracování na užité vlastnosti slitiny AlSi10Mg vyrobené 3D tiskem*. Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D. Praha: ČVUT v Praze, 2020.
- [20] DAS, S.; BOURELL, D. a BABU, S. Metallic materials for 3D printing. online. *MRS Bulletin*. 2016, roč. 41, č. 10. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1557/mrs.2016.217>. [cit. 2022-12-08].
- [21] PINTO, M.; CHEUNG, N.; IERARDI, M. a GARCIA, A. Microstructural and hardness investigation of an aluminum–copper alloy processed by laser surface melting. online. *Materials Characterization*. 2003, roč. 50, č. 2-3, s. 249-253. ISSN 10445803. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(03\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(03)00091-3). [cit. 2022-12-08].

- [22] SLM (Selective Laser Melting). online. *Cotu*. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/118/metoda-slm>. [cit. 2022-12-08].
- [23] APPUHAMILLAGE, G. A. *New 3D printable polymeric materials for fused filament fabrication (FFF)*. Disertační práce. Dallas: University of Texas at Dallas, 2018.
- [24] KRATOCHVÍLOVÁ, J. *3D tisk*. Vydání první. Přeložil Petra MILLAROVÁ. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.
- [25] MFUSI, B.; TSHABALALA, L.; POPOOLA, A. a MATHE, N. The effect of selective laser melting build orientation on the mechanical properties of AlSi10Mg parts. online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, roč. 430. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/430/1/012028>. [cit. 2022-12-15].
- [26] MAAMOUN, A.; XUE, Y.; ELBESTAWI, M. a VELDHUIS, S. The Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Al6061 and AlSi10Mg Alloys. online. *Materials*. 2019, roč. 12, č. 1. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma12010012>. [cit. 2022-12-15].
- [27] PAL, S.; GUBELJAK, N.; BONČINA, T.; HUDÁK, R.; TOTH, T. et al. The effects of locations on the build tray on the quality of specimens in powder bed additive manufacturing. online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, roč. 112, č. 3-4, s. 1159-1170. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06563-5>. [cit. 2022-12-15].
- [28] Možnost předežhřátí 500 °C: First time right. online. *TRUMPF*. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/reseni/vyhody-stroju-trumpf/vyhody-systemu-aditivni-vyroby/webovy-special-predehrev-500-c/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/vyhody-stroju-trumpf/vyhody-systemu-aditivni-vyroby/webovy-special-predehrev-500-c/). [cit. 2022-12-15].

- [29] ČSN EN 1706 +A1 (421433). *Hliník a slitiny hliníku - Odlitky - Chemické složení a mechanické vlastnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [30] KEMPEN, K.; THUIS, L.; VAN HUMBEECK, J. a KRUTH, J.-P. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. online. *Physics Procedia*. 2012, roč. 39, s. 439-446. ISSN 18753892. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.059>. [cit. 2022-12-21].
- [31] ITURRIOZ, A.; GIL, E.; PETITE, M.; GARCIANDIA, F.; MANCISIDOR, A. et al. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: influence of heat treatment condition on mechanical properties and microstructure. online. *Welding in the World*. 2018, roč. 62, č. 4, s. 885-892. ISSN 0043-2288. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0592-8>. [cit. 2023-01-06].
- [32] GIRELLI, L.; TOCCI, M.; GELFI, M. a POLA, A. Study of heat treatment parameters for additively manufactured AlSi10Mg in comparison with corresponding cast alloy. online. *Materials Science and Engineering: A*. 2019, roč. 739, s. 317-328. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.026>. [cit. 2023-01-06].
- [33] YAO, L.; HUANG, S.; RAMAMURTY, U. a XIAO, Z. On the formation of "Fish-scale" morphology with curved grain interfacial microstructures during selective laser melting of dissimilar alloys. online. *Acta Materialia*. 2021, roč. 220. ISSN 13596454. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117331>. [cit. 2023-01-11].
- [34] ROOYEN, M. a MITTEMEIJER, E. Precipitation of silicon in aluminum-silicon: A calorimetric analysis of liquid-quenched and solid- quenched alloys. online. *Metallurgical Transactions A*. 1989, roč. 20, č. 7, s. 1207-1214. ISSN 0360-2133. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF02647402>. [cit. 2022-11-21].

- [35] ABOULKHAIR, N.; MASKERY, I.; TUCK, Ch.; ASHCROFT, I. a EVERITT, N. The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment. online. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, roč. 667, s. 139-146. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.092>. [cit. 2023-01-05].
- [36] ROSENTHAL, I.; SHNECK, R. a STERN, A. Heat treatment effect on the mechanical properties and fracture mechanism in AlSi10Mg fabricated by additive manufacturing selective laser melting process. online. *Materials Science and Engineering: A*. 2018, roč. 729, s. 310-322. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.074>. [cit. 2022-11-20].
- [37] FIOCCHI, J.; TUISSI, A. a BIFFI, C.A. Heat treatment of aluminium alloys produced by laser powder bed fusion: A review. online. *Materials & Design*. 2021, roč. 204. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109651>. [cit. 2022-11-20].
- [38] ZHANG, H.; WANG, Y.; WANG, J.J.; NI, D.R.; WANG, D. et al. Achieving superior mechanical properties of selective laser melted AlSi10Mg via direct aging treatment. online. *Journal of Materials Science & Technology*. 2022, roč. 108, s. 226-235. ISSN 10050302. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.07.059>. [cit. 2022-11-21].
- [39] TANG, H.; GAO, Ch.; ZHANG, Y.; ZHANG, N.; LEI, Ch. et al. Effects of direct aging treatment on microstructure, mechanical properties and residual stress of selective laser melted AlSi10Mg alloy. online. *Journal of Materials Science & Technology*. 2022, roč. 139, s. 198-209. ISSN 10050302. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.08.032>. [cit. 2022-11-21].
- [40] RŮŽIČKOVÁ, L. *Ústní sdělení*. Praha, 2023.

- [41] XIAO, Y.; YANG, Y.; WU, S.; WANG, S. a SONG, Ch. Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Laser Powder Bed Fusion Under Nitrogen and Argon Atmosphere. online. Dostupné z: <https://www.amse.org.cn/EN/10.1007/s40195-021-01354-7>. [cit. 2024-04-24].
- [42] SEDLÁK, J. Metal 3D: V raketové základně u Dobříše se za dotace rozjel 3D tisk z kovu. online. *Lupa.cz*. 2016. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/metal-3d-v-raketove-zakladne-u-dobrise-se-za-dotace-rozjel-3d-tisk-z-kovu/>. [cit. 2022-12-15].