

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
**ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vliv parametrů tepelného zpracování na odolnost  
proti opotřebení 3D tiskem připravené slitiny AISi10Mg**

**Influence of heat treatment parameters on wear resistance  
of AISi10Mg alloy prepared by 3D printing**

**AUTOR:**

**Tomáš Růžička**

**STUDIJNÍ PROGRAM:**

**Výroba a ekonomika ve strojírenství**

**VEDOUCÍ PRÁCE:**

**Doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.**

**PRAHA 2020**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Růžička** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **473514**  
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 parametrů tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení 3D tiskem připravené slitiny AISi10Mg**

Název bakalářské práce anglicky:

**Influence of heat treatment parameters on wear resistance of AISi10Mg alloy prepared by 3D printing**

Pokyny pro vypracování:

- Literární rešerše
- Experimentální část
  - Metalografická analýza
  - Hodnocení tribologických charakteristik
- Zpracování výsledků, závěry, sepsání BP

Seznam doporučené literatury:

- [1] PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.  
[2] ČIŽMÁROVÁ, E. a J. SOBOTOVÁ. Nauka o materiálu I. a II.: cvičení. Dotisk 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.  
[3] KEMPEN, K., L. THIJIS, J. VAN HUMBEECK a J.-P. KRUTH. Mechanical Properties of AISi10Mg Produced by Selective Laser Melting. Physics Procedia. 2012, 39, 439-446. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.059. ISSN 18753892. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389212025862>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

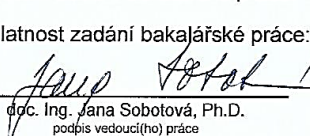
**doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**

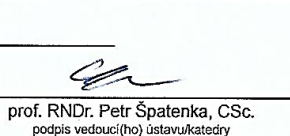
Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

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.

11.6. 2020  
Datum převzetí zadání

RWT  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vliv parametrů tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení 3D tiskem připravené slitiny AlSi10Mg vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne

.....

Tomáš Růžička

## **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá hodnocením vlivu parametrů tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení 3D tiskem připravené slitiny AlSi10Mg. V teoretické části jsou uvedeny základní informace o technologiích 3D tisku kovu. Jsou zde také popsány základní vlastnosti hliníku a jeho slitin. Experimentální část se zabývá testováním vzorků z AlSi10Mg. Materiál je sledován ve stavu bez tepelného zpracování a po třech různých režimech žíhání. K hodnocení je použita zkouška Pin-on Disk, měření tvrdosti a metalografická analýza.

## **Klíčová slova**

Additivní výroba, 3D tisk, hliník, AlSi10Mg, struktura, Pin-on-Disk, odolnost proti opotřebení

## **Annotation**

The bachelor thesis deals with the evaluation of the influence of heat treatment parameters on wear resistance of AlSi10Mg alloy prepared by 3D printing. The theoretical part provides basic information about 3D metal printing technologies. The basic properties of aluminum and its alloys are also described here. The experimental part deals with testing samples from AlSi10Mg. The material is monitored in a state without heat treatment and after three different annealing modes. Pin-on Disk test, hardness measurement and metallographic analysis are used for evaluation.

## **Keywords**

Additive Manufacturing, 3D printing, aluminium, AlSi10Mg, structure, Pin-on-Disk, wear resistance

## **Poděkování**

Nejprve bych chtěl poděkovat paní Doc. Ing. Janě Sobotové, Ph. D. za odborné rady a věnovaný čas během vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Adamovi Polochovi za pomoc s realizací experimentů a poskytnutí rad při zpracovávání získaných dat.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	8
Úvod .....	10
1 Teoretická část .....	11
1.1 3D tisk kovových materiálů .....	11
1.1.1 Powder Bed Fusion.....	12
1.1.2 Directed Energy Deposition .....	15
1.2 Hliník a jeho slitiny.....	17
1.2.1 Vlastnosti hliníku .....	17
1.2.2 Slitiny hliníku.....	18
1.2.3 Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin .....	20
1.3 Slitina AlSi10Mg.....	21
1.3.1 Chemické složení .....	22
1.3.2 Vlastnosti slitiny AlSi10Mg vyrobené 3D tiskem .....	23
1.3.3 Struktura AlSi10Mg .....	26
2 Experimentální část .....	28
2.1 Příprava vzorků .....	29
2.2 Tvrdost dle Vickerse .....	30
2.3 Pin-on-Disk.....	31
2.4 Metalografická analýza .....	33
3 Výsledky a jejich diskuze.....	34
3.1 Vyhodnocení tvrdosti dle Vickerse.....	34
3.2 Vyhodnocení Pin-on-Disk.....	37
3.2.1 Vyhodnocení koeficientu tření.....	37
3.2.2 Vyhodnocení opotřebení .....	42
3.3 Vyhodnocení metalografické analýzy.....	48

3.3.1	Vyhodnocení pórovitosti .....	48
3.3.2	Vyhodnocení mikrostruktury .....	49
	Závěry .....	52
	Bibliografie .....	53
	Seznam použitých obrázků.....	58
	Seznam použitých tabulek.....	60

# Seznam použitých zkratek a symbolů

<b>zkratka symbol</b>	<b>význam</b>	<b>jednotky</b>
Al	Hliník	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý	
Cu	Měď	
Mg	Hořčík	
Ti	Titan	
Fe	Železo	
Si	Křemík	
Mn	Mangan	
Zn	Zinek	
Sn	Cín	
Pb	Olovo	
Li	Lithium	
Ni	Nikl	
WC	Karbid wolframu	
Co	Kobalt	
Cr	Chrom	
Tm	Teplota tání	°C
AM	Additive Manufacturing	



PBF	Powder Bed Fusion	
DED	Directed Energy Deposition	
SLM	Selective Laser Melting	
EBM	Electron Beam Melting	
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	MPa
$R_m$	Mez pevnosti	MPa
$A_5$	Tažnost krátké zkušební tyče	%
Z	Kontrakce	%
E	Modul pružnosti v tahu	MPa
HB	Tvrdomost dle Brinella	
HV	Tvrdomost dle Vickerse	
TZ	Tepelné zpracování	
BP	Bakalářská práce	

# Úvod

3D tisk kovových materiálů je poměrně mladá součást aditivních technologií. První patent na 3D tisk kovových materiálů metodou DMLS (Direct Metal Laser Sintering) byl podán v 90. letech 20. století německou společností EOS. [1] Od té doby vznikla řada nových technologií a metod 3D tisku kovových materiálů, kdy každá metoda má své výhody a nevýhody. V dnešní době lze pomocí 3D tisku poměrně snadno a rychle vytvořit geometricky složitě výrobky. [2]

Mezi řadu materiálů vhodných pro tisk se řadí mimo jiné i hliníková slitina AlSi10Mg. Tato slitina se obecně vyznačuje dobrými slévárenskými a mechanickými vlastnostmi. Ačkoliv se běžně využívá pro slévání, stále častěji se využívá právě pro 3D tisk. V obou případech je možné dosáhnout chemického stejného složení. Slitina našla využití především v automobilovém či leteckém průmyslu. [3] Je známo, že po 3D tisku by pro dosažení optimálních vlastností mělo následovat žíhání ke snížení pnutí. Například výrobce Concept Laser doporučuje přímo pro slitinu AlSi10Mg žíhání na 240 °C po dobu 6 hodin. [4]

Teoretická část bakalářské práce se zabývá úvodem do 3D tisku kovových materiálů, vlastnostmi hliníku a jeho slitin a popisem konkrétní slitiny AlSi10Mg. Cílem experimentální části je zjistit a porovnat odolnost proti opotřebení různě tepelně zpracovaných vzorků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg. Dále změřit tvrdost vzorků a provést metalografickou analýzu. V odborné literatuře, například [5] [6], lze najít určité vlastnosti 3D tištěné slitiny AlSi10Mg jak ve stavu bez TZ, tak s různými druhy TZ. Každopádně se zdá, že vliv různých parametrů žíhání na odolnost proti opotřebení dosud nebyl sledován.

# 1 Teoretická část

## 1.1 3D tisk kovových materiálů

3D tisk kovových materiálů neboli aditivní výroba (anglicky AM – Additive Manufacturing) kovových materiálů je proces výroby objektů pomocí 3D digitálního modelu. Od ostatních tradičních metod výroby objektů (např. obrábění, odlévání) se liší v tom, že 3D tiskárna vytváří objekt přidáváním a následným tavením nebo spékáním materiálu ve formě kovového prášku vrstvu po vrstvě. [7]

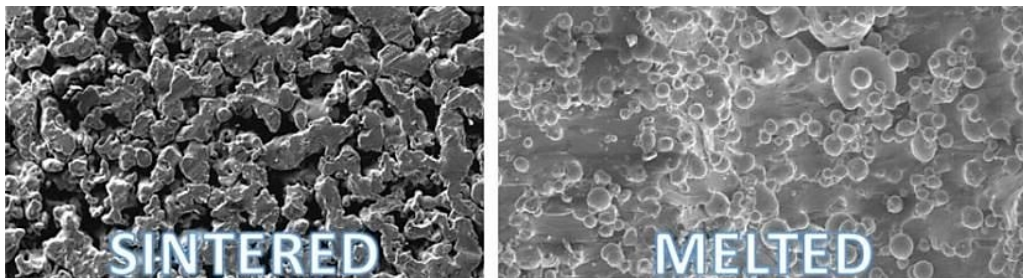
Celý proces tisku začíná vytvořením 3D modelu, který se získá vymodelováním v CAD softwaru, nebo lze objekt naskenovat pomocí 3D skeneru. Tento model je následně rozdělen softwarem na tenké dvourozměrné vrstvy a převeden na strojní jazyk (G-kód). [8] Průběh samotného tisku záleží na konkrétní technologii tisku. 3D tisk kovových materiálů lze rozdělit na dvě hlavní skupiny. První skupinu tvoří technologie Powder Bed Fusion (PBF), druhou skupinu tvoří technologie Directed Energy Deposition (DED). [7] Obě tyto technologie tisku jsou detailněji popsány níže.

Mezi hlavní výhody 3D tisku patří jednoduchost výroby geometricky složitých tvarů, které nemohou být vyrobeny jinou metodou. Některé součásti vyráběné tradičními metodami musí být vyráběny na několik dílů, které se následně spojí dohromady. V případě 3D tisku je možné tyto součásti vyrábět jako jeden kus, z čehož vyplývá časová a finanční úspora. Na rozdíl od tradičních metod výroby také není třeba žádné řezání polotovarů nebo příprava modelu pro odlévání. [2] Přesnost 3D tisku závisí na kalibraci tiskárny. 3D Hubs [9] uvádí toleranci  $\pm 0.1$  mm. Často se využívá tepelného zpracování, dokončování na CNC strojích nebo jiných procesů pro zlepšení mechanických vlastností, tolerancí a kvality povrchu. [8]

3D tisk umožňuje použít širokou škálu kovových materiálů. Nejčastěji používané kovy jsou korozivzdorné oceli, titan, slitiny niklu, superslitiny kobalt-chrom nebo slitiny hliníku [8], mezi které patří i slitina AlSi10Mg, jejíž odolnost proti opotřebení bude testována v experimentální části bakalářské práce.

### 1.1.1 Powder Bed Fusion

Mezi hlavní představitele této skupiny patří metody Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) a metoda Electron Beam Melting (EBM). [7] Hlavní rozdíl mezi nimi spočívá v principu spojování materiálu. DMLS používá kombinaci tepla a tlaku pro spojení materiálu – spékání (sintering). Metody EBM a SLM využívají dostatečně vysokých teplot pro natavení materiálu (melting) a jeho následné spojení. [1]



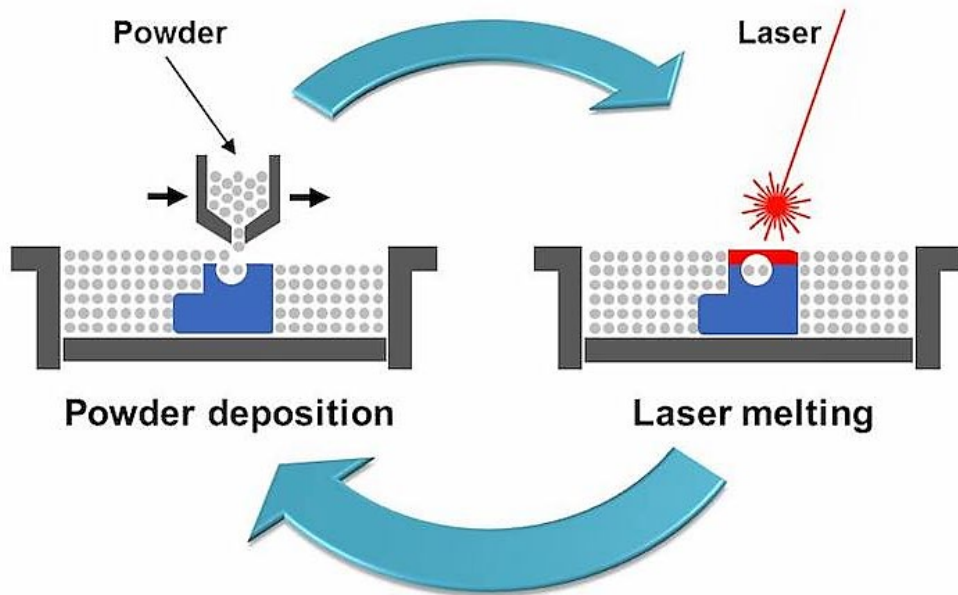
Obrázek 1 Srovnání struktury 3D tištěného kovu při použití různých technologií [1]

Na Obrázku 1 je zobrazeno srovnání struktury vytištěného kovu. V levé části obrázku se nachází struktura materiálu, který vzniknul pomocí spékání kovového prášku. V pravé části obrázku je zobrazena struktura nataveného kovového prášku. Z obrázku je patrné, že spečený materiál má ve výsledku výrazně pórovitější strukturu než natavený materiál.

- **Selective Laser Melting**

Jak již bylo uvedeno, metoda SLM využívá laserový paprsek, který nataví kovový prášek. Celý proces tisku, který je zobrazen na Obrázku 2, začíná nanesením vrstvy kovového prášku do pracovní komory (levá strana obrázku – Powder deposition). Aby se zabránilo nežádoucím vlivům prostředí, proces tisku probíhá v ochranné atmosféře. [10]

Po nanesení vrstvy prášku přichází na řadu laserový paprsek, který selektivně nataví kovový prášek, čímž dojde ke spojení s předchozí vrstvou (pravá strana obrázku – Laser melting). Tím skončí jeden cyklus. Následuje nanesení další vrstvy prášku na celou plochu pracovní komory, jeho natavení a spojení k předchozí vrstvě. Tyto cykly se opakují, dokud není celý objekt hotový. [11]



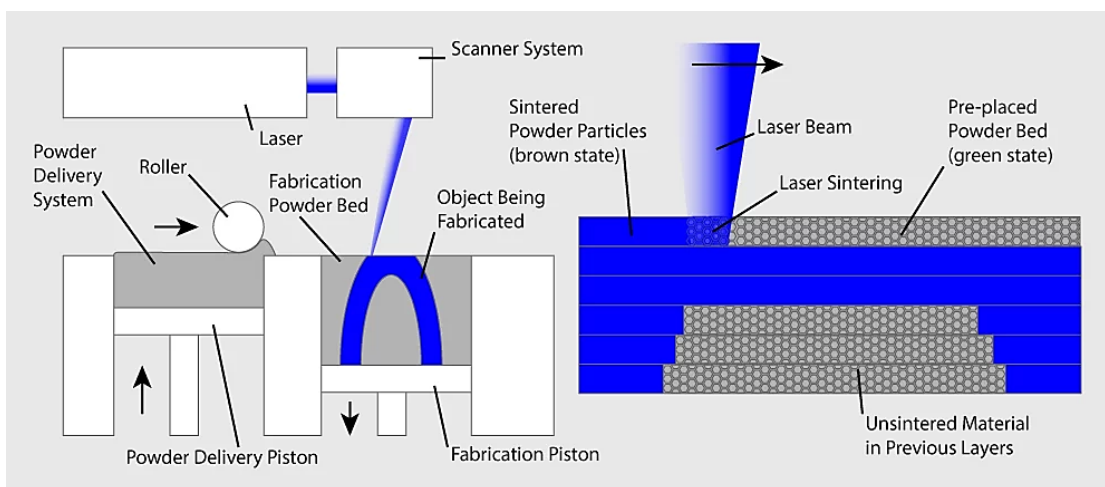
Obrázek 2 Princip metody SLM [11]

Metoda SLM nabízí možnost využít širokou škálu kovových materiálů. Vzhledem k tomu, že dochází k úplnému natavení kovového prášku, mívají objekty vytištěné touto metodou vyšší pevnost než objekty vytištěné metodou DMLS. Metoda SLM je vhodná pro výrobu tenkostěnných nebo tvarově složitých objektů, díky čemuž našla uplatnění například v leteckém průmyslu nebo v medicíně. [11]

- **Direct Metal Laser Sintering**

Stejně jako metoda SLM i DMLS využívá laserového paprsku ke spojení kovového prášku. Hlavní rozdíl mezi těmito metodami je v tom, že metoda SLM využívá vysokých pracovních teplot, zatímco metoda DMLS zahřívá materiál pod teplotu tání, což nezpůsobuje natavení kovového prášku, ale pouze jeho spečení. [12]

Proces tisku zobrazený na Obrázku 3 se od SLM neliší. Do pracovní komory se nanese kovový prášek, který je laserovým paprskem spečen dohromady. Následně se nanese další vrstva prášku a celý proces se opakuje. Pro ochranu materiálu probíhá tisk v ochranné atmosféře. Díky tomu, že materiál laser nenatavuje, využívá se pro různé kovové slitiny, zatímco SLM pracuje nejlépe s čistými kovy. [10] Vlivem spékání kovového prášku vzniká oproti metodě SLM výrazně pórovitější struktura (viz Obrázek 1). Z tohoto důvodu může být objekt vytvořený metodou DMLS pro některé oblasti použití nevhodný. [12]



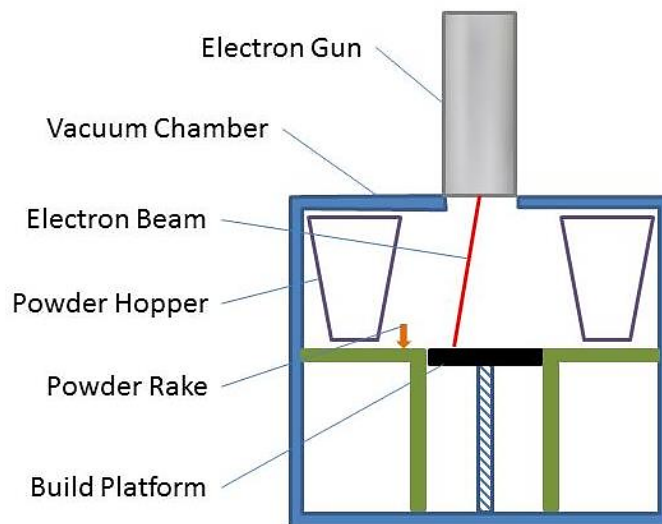
Obrázek 3 Princip metody DMLS [16]

Metoda DMLS našla využití v medicíně, kde se využívá pro výrobu protéz, zejména ze slitin titanu, díky jeho vysoké biokompatibilitě. Využívá se také v zubním lékařství nebo v letectví. Pro zubní lékařství se pomocí DMLS vyrábí zubní protézy, korunky nebo můstky z materiálu jako slitina kobalt-chrom. [10]

- **Electron Beam Melting**

Metoda EBM využívá k natavení materiálu elektronový paprsek ve vakuové komoře. Oproti SLM vytváří v tištěné součásti méně tepelného pnutí, díky čemuž součást nepotřebuje tolik podpor. [13] Tisk probíhá stejně jako v případě SLM a DLMS. Prášek je vrstvu po vrstvě taven a spojován, dokud neznikne finální objekt. [14] Princip je zjednodušeně znázorněn na Obrázku 4.

Výhodou této metody je vyšší rychlost oproti ostatním, které využívají laser. Hlavními nevýhodami této metody jsou horší přesnost, omezený výběr materiálů a jejich vysoká cena (slitiny titanu, slitiny chrom-kobalt). Přesto metoda našla své uplatnění. Používá se především v letectví a lékařství. Slitiny titanu disponují vysokou biokompatibilitou a dobrými mechanickými vlastnostmi, proto se využívají pro výrobu implantátů. V letectví se tato metoda využívá pro malosériovou výrobu geometricky složitých tvarů. [14]



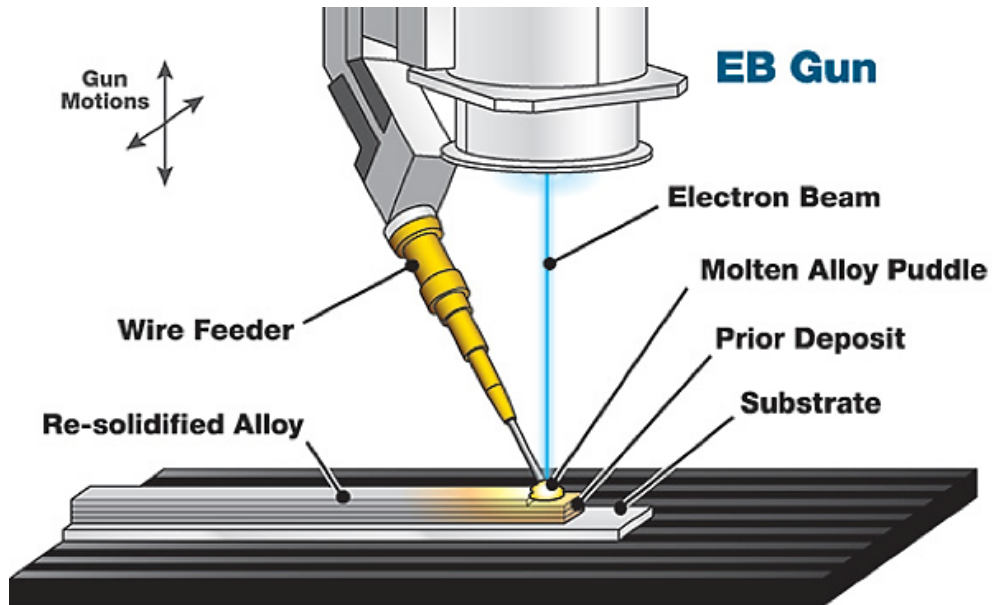
Obrázek 4 Princip metody EBM [11]

Výrobní parametry závisí na výrobci tiskárny. Výška jednotlivých vrstev bývá pro metody SLM a DMLS mezi 20-50  $\mu\text{m}$  [15], pro EBM více než 50  $\mu\text{m}$ . [14] Kovový prášek je vysoce recyklovatelný. Jediný odpad vzniká z podpor objektu, což tvoří podle 3D Hubs [15] méně než 5 % materiálu. Nevyužitý prášek se po dokončení tisku odstraní z tiskového prostoru a může se použít pro další tisk. [16]

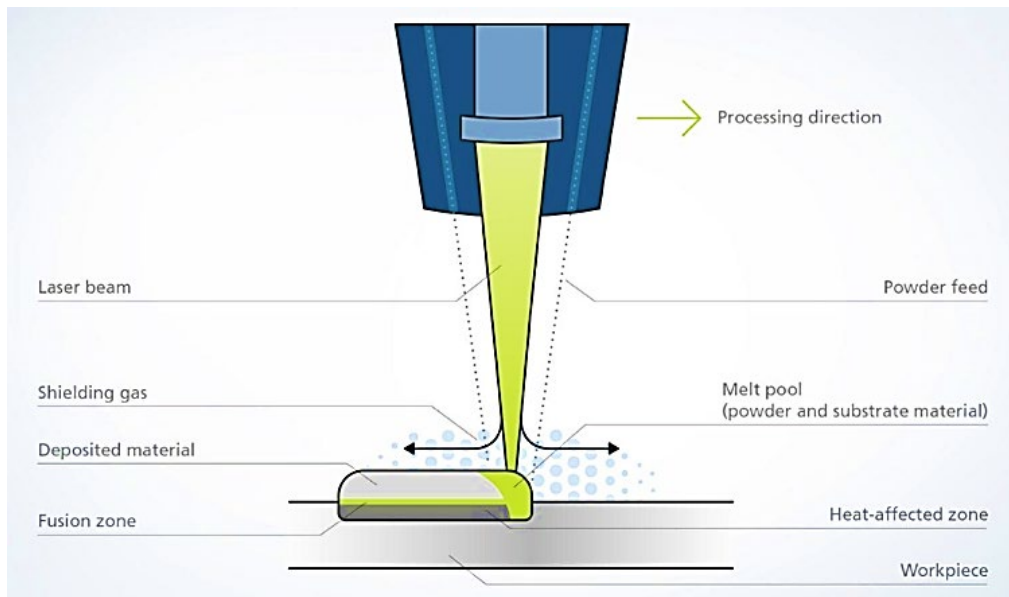
### 1.1.2 Directed Energy Deposition

Podobně jako technologie PBF i DED využívá laser nebo elektronový paprsek pro tavení materiálu. V případě použití elektronového paprsku musí probíhat tisk ve vakuové komoře, aby nedocházelo k interakci elektronů se vzduchem. Použití laseru vyžaduje v tiskovém prostoru ochrannou atmosféru. [17] Hlavní rozdíl mezi technologiemi PBF a DED je ve způsobu přidávání materiálu. Materiál je buď přidáván v podobě kovového drátu (podobně

jako u svařování) nebo v podobě kovového prášku. Na Obrázku 5 je zobrazen princip tisku za použití kovového drátu. Obrázek 6 pak zobrazuje princip tisku za použití kovového prášku. Kovový prášek zde není nanášen plošně, jako v případě PBF, ale je přidáván lokálně pomocí trysky, která je běžně připevněna k pětiosému robotickému rameni. [18]



Obrázek 5 Metoda DED s kovovým drátem [19]



Obrázek 6 Metoda DED s kovovým práškem [19]



Mezi hlavní výhody DED patří nižší cena než u PBF, vysoká rychlost tisku a možnost využít širokou škálu materiálů [19], jako třeba titan a jeho slitiny, inconel (austenitická superslitina nikel-chrom), tantal, niob, wolfram, korozivzdornou ocel nebo hliník a jeho slitiny. Kovový drát má většinou v průměru 1-3 mm. [17] Výška vrstvy kovového prášku bývá mezi 250-500  $\mu\text{m}$ . [20]

DED se využívá v různých průmyslových odvětvích, jako třeba ve vojenském nebo leteckém průmyslu. Například [21] uvádí, že pomocí DED metody vyrobila americká společnost Lockheed Martin Space titanovou palivovou nádrž ve tvaru kopule určenou pro satelit. Tato metoda je navíc vhodná pro opravu nebo úpravu již existujících součástí. [17]

## 1.2 Hliník a jeho slitiny

Hliník se používá poměrně krátce. Výraznější nárůst výroby zaznamenal až po 2. světové válce, především kvůli rozvoji automobilového a leteckého průmyslu. V současnosti se hliník a jeho slitiny používají téměř ve všech odvětvích průmyslu, přes již zmíněný stále se rozvíjející automobilový průmysl až po potravinářský průmysl. [22]

V následujících kapitolách jsou uvedeny vlastnosti hliníku a jeho slitin i možnosti tepelného zpracování těchto materiálů.

### 1.2.1 Vlastnosti hliníku

Hliník je lehký nealotropický kov s poměrně nízkou teplotou tání- 660 °C. Jeho kubická plošně středěná mřížka má za důsledek dobré plastické vlastnosti jak za tepla, tak i za studena. Hliník má velmi dobrou odolnost proti korozi ve většině atmosférických a chemických prostředích. Tato odolnost je způsobena vznikem ochranné vrstvy  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o tloušťce 5-20 nm, která následně chrání materiál proti okolnímu prostředí. [22] Dále se hliník vyznačuje vynikající tepelnou [210 až 230  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] a měrnou elektrickou vodivostí [34 až 38  $\text{MS}\cdot\text{m}^{-1}$ ]. Mechanické vlastnosti hliníku závisí na jeho čistotě. [23] V Tabulce 1 jsou porovnány mechanické vlastnosti hliníků dvou úrovní čistoty.

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti hliníku při 20 °C [24]

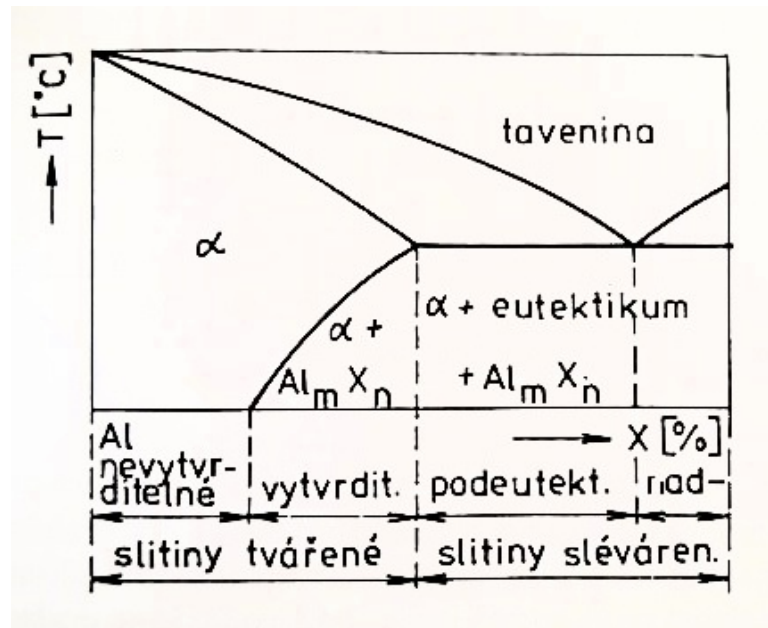
<b>Druh (čistota) Al</b>	<b>Al 99,99</b>	<b>Al 99,5</b>
Mez kluzu – $R_{p0,2}$ [MPa]	15	50
Mez pevnosti – $R_m$ [MPa]	50	90
Tažnost – $A_5$ [%]	45	30
Kontrakce – $Z$ [%]	90	70
Modul pružnosti v tahu – $E$ [MPa]	71 000	71 000
Tvrдост – HB	15	20

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že s klesající čistotou hliníku roste mez kluzu, mez pevnosti a dochází ke zvýšení tvrdosti. Tažnost a kontrakce s klesající čistotou hliníku naopak klesá.

Vzhledem k dobrým plastickým vlastnostem se technicky čistý hliník využívá především na folie a tenké plechy. Pro většinu průmyslových oblastí, jako třeba automobilový průmysl, jsou mechanické vlastnosti technicky čistého hliníku nevyhovující. Pro zlepšení těchto vlastností se hliník leguje. Mezi hlavní legující prvky patří Cu, Mg, Si, Mn, Zn a Li. [24] Strojírenské materiály [23] uvádí, že až 65 % vyrobeného technicky čistého hliníku připadá právě na slitiny.

### 1.2.2 Slitiny hliníku

Na základě binárního rovnovážného diagramu, který je zobrazen na Obrázku 7, lze slitiny hliníku dělit na slitiny určené pro tvářením a slitiny slévárenské. Obě skupiny se dále dělí na vytvrditelné a nevytvrditelné. [23] Mezi tvářitelné slitiny hliníku se řadí ty s menším obsahem legujících prvků, zatímco slitiny obsahující ve struktuře eutektikum se řadí mezi slitiny slévárenské, což je patrné z Obrázku 7. [23] Vytvrzování je druh tepelného zpracování hliníku a jeho slitin, které se provádí za účelem zvýšení pevnostních vlastností. [24] Tepelné zpracování bude popsáno v další kapitole.



Obrázek 7 Schéma binárního rovnovážného diagramu Al-X [23]

- **Tvářené nevytvrditelné slitiny hliníku**

Mezi nevytvrditelné slitiny hliníku určené pro tváření se řadí Al-Mn a Al-Mg. První zmíněná slitina se nevytvrdzuje především kvůli malé rozpustnosti manganu ve fázi  $\alpha$ , což má za následek nízkou účinnost vytvrzování. [23] Používají se slitiny do 1,5 % Mn. Slitina Al-Mg se nevytvrdzuje z důvodu, že malé zvýšení tvrdosti by znamenalo velký pokles tažnosti. Používají se slitiny s obsahem hořčíku do 5 %. Tyto nevytvrditelné slitiny se vyznačují dobrou svařitelností a vysokou odolností proti korozi. [24]

- **Tvářené vytvrditelné slitiny hliníku**

Vytvrditelné slitiny hliníku určené pro tváření tvoří tři hlavní skupiny. První skupinou jsou slitiny Al-Cu-Mg-(Ni) nazývané duraly. Vyznačují se dobrou tvárností za tepla i za studena. [23] Druhou skupinu tvoří slitiny Al-Mg-Si. V porovnání s ostatními vytvrditelnými slitinami mají menší pevnost, ale vyšší odolnost proti korozi a vyšší houževnatost. [24] Poslední skupinou vytvrditelných slitin pro tváření je slitina Al-Zn-Mg-(Cu). Při zvýšeném poměru Zn/Mg je slitina dobře tvářitelná, ovšem hůře svařitelná. Přidáním Cu do slitiny lze dosáhnout po vytvrzení za tepla vysoké meze kluzu ( $R_{p0,2} > 480$  MPa). [23]

- **Slévárenské slitiny hliníku**

Slévárenské slitiny hliníku disponují oproti tvářeným slitinám horšími mechanickými vlastnostmi. [23] Mezi nejdůležitější slévárenské slitiny hliníku se řadí slitiny typu Al-Si (siluminy). Nevytvrditelné siluminy obsahují 5-20 % Si a další přísady, mezi které patří nejčastěji Mn. Vytvrditelné siluminy musí navíc obsahovat prvky Mg nebo Cu. Během vytvrzování zde dochází k vylučování fáze  $Mg_2Si$ , popřípadě  $Al_2Cu$ . [24] Mezi vytvrditelné siluminy patří například slitina AlSi10Mg [23], která bude popsána později. Siluminy se obecně vyznačují nízkou měrnou hmotností ( $2650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), dobrou odolností proti korozi a příznivými slévárenskými vlastnostmi, jako třeba malou zabíhavostí nebo malou smrštivostí. [23] Další významné slitiny hliníku jsou slitiny Al-Mg s obsahem Mg 3-11 % a slitiny Al-Cu, které obsahují 3-8,5 % Cu. Oproti siluminům mají tyto slitiny výrazně horší slévárenské vlastnosti. [24]

### 1.2.3 Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin

Pro zlepšení nebo změnu vlastností hliníku a jeho slitin se využívá tepelné zpracování (TZ). Dělí se na dvě základní skupiny. První skupinu tvoří žíhání, druhou precipitační vytvrzování. [22]

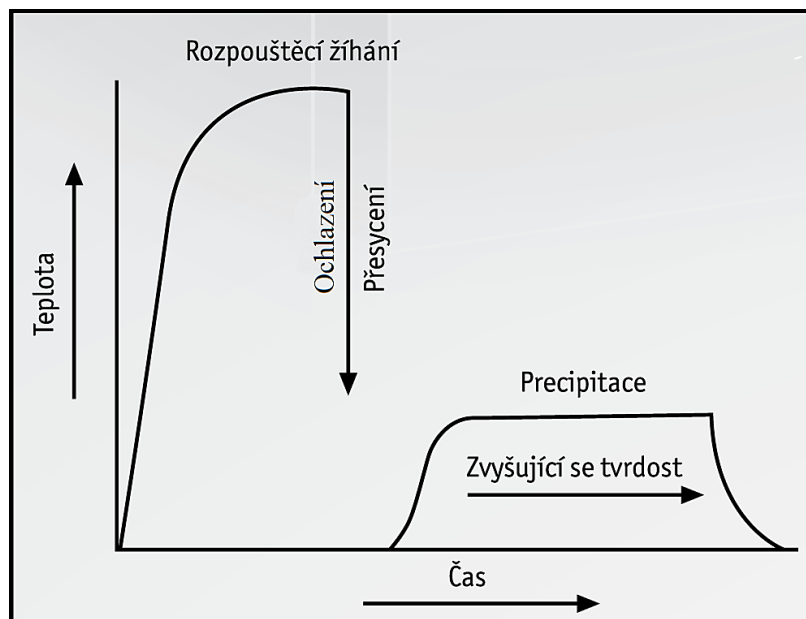
- **Žíhání**

Pro nevytvrditelné slitiny hliníku je nejběžnější rekrytalizační žíhání. [25], které probíhá za teplot 250-500 °C. [22] Tato teplota závisí především na chemickém složení a na velikosti předcházející deformace za studena. Během tohoto procesu dochází k zániku deformované struktury a následnému vzniku nové rekrytalizované struktury, čímž se docílí snížení pevnosti a zvýšení plastických vlastností materiálu. [22] [25]

- **Vytvrzování**

Vytvrzování je proces, při kterém dochází ke změně vlastností slitin, zejména ke zvýšení tvrdosti. Podmínkou vytvrzování je změna rozpustnosti legujících prvků v tuhém roztoku  $\alpha$  v závislosti na teplotě. Proces se skládá z rozpouštěcího žíhání a následného stárnutí. [22] Průběh vytvrzování je zobrazen na Obrázku 8.

Jak vyplývá z Obrázku 8, slitina se nejprve ohřeje do existence tuhého roztoku. Na této teplotě je nutné vydržet, dokud nedojde k rozpuštění legujících prvků (rozpuštěcí žíhání) [22]. Následuje prudké ochlazení na teplotu okolí k získání přesyceného tuhého roztoku  $\alpha$ . Slitina má tendenci dosáhnout rovnovážného stavu, což má za následek rozpad přesyceného tuhého roztoku a vznik velkého počtu jemných částic. [26] Tento proces se nazývá stárnutí a může probíhat za pokojové teploty (přirozené stárnutí) nebo za zvýšené teploty (umělé stárnutí). [24]



Obrázek 8 Průběh vytvrzování [25], upraveno pro BP

### 1.3 Slitina AlSi10Mg

V experimentální části se bakalářská práce věnuje testování a porovnání odolnosti proti opotřebení slitiny AlSi10Mg bez TZ i po TZ, proto je tato kapitola věnována vlastnostem a složení této slitiny i samotné metodě testování, tzv. Pin-on-Disk. Vzorky použité v experimentální části byly tištěny z kovového prášku metodou SLM. Tato metoda funguje, jak již bylo řečeno, na principu natavení a spojení materiálu pomocí laserového paprsku v komoře s ochrannou atmosférou.

Slitina AlSi10Mg se řadí do skupiny vytvrditelných siluminů. [23] Vyznačuje se dobrými slévárenskými (např. dobrou zabíhavostí) i mechanickými (např. nízkou hustotou nebo korozivzdorností) vlastnostmi. Díky těmto vlastnostem se využívá v automobilovém, leteckém a vojenském průmyslu. Slitina AlSi10Mg se běžně zpracovává na odlitky. Stále častěji se však využívá i v 3D tisku, který umožňuje tvorbu složitých, sléváním nedosažitelných geometrických tvarů. [3]

### 1.3.1 Chemické složení

Aby bylo možné zvolit vhodné parametry tisku a potřebnou metodu, je třeba znát chemické složení kovového prášku. Chemické složení také ovlivňuje mechanické a tepelné vlastnosti vytištěného objektu. V Tabulce 2 je porovnáno chemické složení AlSi10Mg ve formě prášku s chemickým složením AlSi10Mg určené pro slévání.

Tabulka 2 Srovnání chemického složení AlSi10Mg [3]

<b>Prvek</b>	<b>Složení kovového prášku [%]</b>	<b>Složení slévárenské slitiny [%]</b>
Si	9-11	9,51
Mg	0,2-0,45	0,349
Cu	≤0,05	0,008
Mn	≤0,045	0,126
Fe	≤0,55	0,294
Ni	≤0,05	0,0043
Zn	≤0,1	0,0095
Pb	≤0,05	0,0019
Sn	≤0,05	-
Ti	≤0,15	0,13

Chemické složení prášku AlSi10Mg použité v Tabulce 2 je založeno na datech poskytnutých společností EOS GmbH. Složení slévárenské slitiny bylo zjištěno spektrometrickou analýzou. [3] Z tabulky je patrné, že sléváním i metodou 3D tisku je možné dosáhnout u slitiny AlSi10Mg stejného složení.

### 1.3.2 Vlastnosti slitiny AlSi10Mg vyrobené 3D tiskem

Vlastnosti slitiny AlSi10Mg závisí, kromě již zmíněného chemického složení, na použité technologii tisku a na směru tisku. V této kapitole jsou uvedeny mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg vytištěné metodou DMLS a SLM známé z dostupné literatury. Také je zde uveden princip testování odolnosti proti opotřebení a dosud z literatury známé výsledky pro sledovaný materiál.

- **Mechanické vlastnosti**

Tabulka 3 a 4 porovnává mechanické vlastnosti slitiny tištěné různými metodami v závislosti na směru tisku. Jako tepelné zpracování je zde v obou případech použito žíhání ke snížení pnutí, při kterém se materiál zahřeje na 300 °C. Následuje výdrž na této teplotě po dobu 2 hodin. Způsob ochlazení z žíhací teploty autoři neuvádí.

Tabulka 3 uvádí mechanické vlastnosti slitiny vytištěné metodou DMLS. Během zkoušky tahem byly použity vzorky o průměru 5 mm a délce 25 mm. [5] Z tabulky je patrné, že pevnost v tahu se u vzorků vytištěných v horizontálním i vertikálním směru bez tepelného zpracování neliší. Mez kluzu je v případě vzorků vytištěných v horizontálním směru vyšší. Dle předpokladu dochází po žíhání ke snížení pnutí k poklesu pevnosti v tahu, což má za následek nárůst tažnosti. Tvrdost vzorků byla testována pomocí Brinella HBW 2.5/62.5 se zatěžovací silou 612,9 N. [5]

V Tabulce 4 jsou uvedeny mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg vytištěné metodou SLM. Tahové zkoušky byly prováděny na vzorcích o délce 14 mm a tloušťce 2 mm. Na první pohled je patrná podobnost hodnot pevnosti v tahu, meze kluzu a tažnosti ve stavu bez TZ s hodnotami uvedenými v Tabulce 3. Větší rozdílnost hodnot nastává po tepelném zpracování. Ačkoliv práce [5] [6] uvádějí stejný režim TZ, pevnost v tahu a mez kluzu je po tepelném zpracování v případě materiálu vytištěného metodou SLM výrazně nižší. Oproti tomu disponuje větší tažností. Kromě rozdílné metody tisku může mít na výsledné vlastnosti vliv také rychlost ohřevu či způsob ochlazování při TZ.

Tyto informace však nejsou ve většině publikací uvedeny. Tvrdost uvedená v Tabulce 4 byla hodnocena pomocí Vickerse s konstantním zatížením 9,8 N. [6]

Tabulka 3 Mechanické vlastnosti AlSi10Mg vytištěné metodou DLMS [5]

	<b>Bez TZ (As built)</b>	<b>S TZ (300 °C 2 hodiny)</b>
<b>Pevnost v tahu</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ve směru XY</li> <li>• ve směru Z</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 460 ± 20 MPa</li> <li>• 460 ± 20 MPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 345 ± 10 MPa</li> <li>• 350 ± 10 MPa</li> </ul>
<b>Mez kluzu (<math>R_{p0,2}</math>)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ve směru XY</li> <li>• ve směru Z</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 270 ± 10 MPa</li> <li>• 240 ± 10 MPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 230 ± 15 MPa</li> <li>• 230 ± 15 MPa</li> </ul>
<b>Tažnost</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ve směru XY</li> <li>• ve směru Z</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 9 ± 2 %</li> <li>• 6 ± 2 %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12 ± 2 %</li> <li>• 11 ± 2 %</li> </ul>
<b>Tvrdost</b>	• 119 ± 5 HBW	-

Tabulka 4 Mechanické vlastnosti AlSi10Mg vytištěné metodou SLM [6]

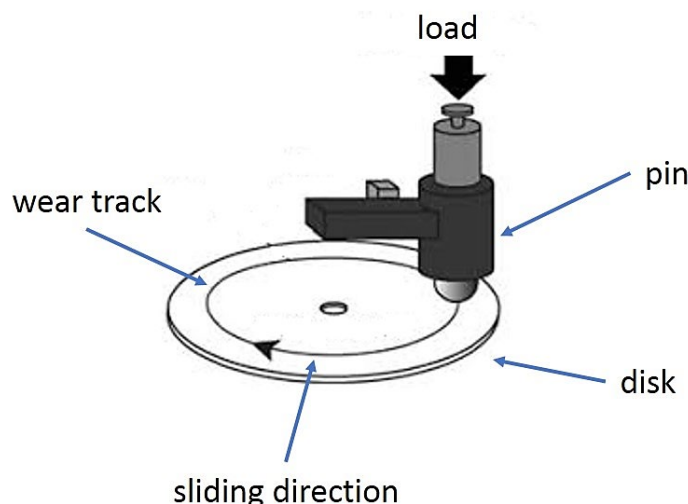
	<b>Bez TZ (As built)</b>	<b>S TZ (300 °C 2 hodiny)</b>
<b>Pevnost v tahu</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ve směru XY</li> <li>• ve směru Z</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 475 MPa</li> <li>• 476 MPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 285 MPa</li> <li>• 290 MPa</li> </ul>
<b>Mez kluzu (<math>R_{p0,2}</math>)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ve směru XY</li> <li>• ve směru Z</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 279 MPa</li> <li>• 220 MPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 180 MPa</li> <li>• 175 MPa</li> </ul>
<b>Tažnost</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ve směru XY</li> <li>• ve směru Z</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 7,5 %</li> <li>• 5,5 %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 18,6 %</li> <li>• 14,2 %</li> </ul>
<b>Tvrdost</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ve směru XY</li> <li>• ve směru Z</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 132 HV</li> <li>• 134 HV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 88 HV</li> <li>• 87 HV</li> </ul>



- **Odolnost proti opotřebení**

Opotřebení je jednou z hlavních příčin poruch mechanických systémů. Jedná se o přenos a ztrátu materiálu mezi dvěma materiály při vzájemném pohybu. Asi 50 % opotřebení je způsobeno odíráním. K odírání materiálu dochází mezi dvěma materiály s rozdílnou tvrdostí. [27]

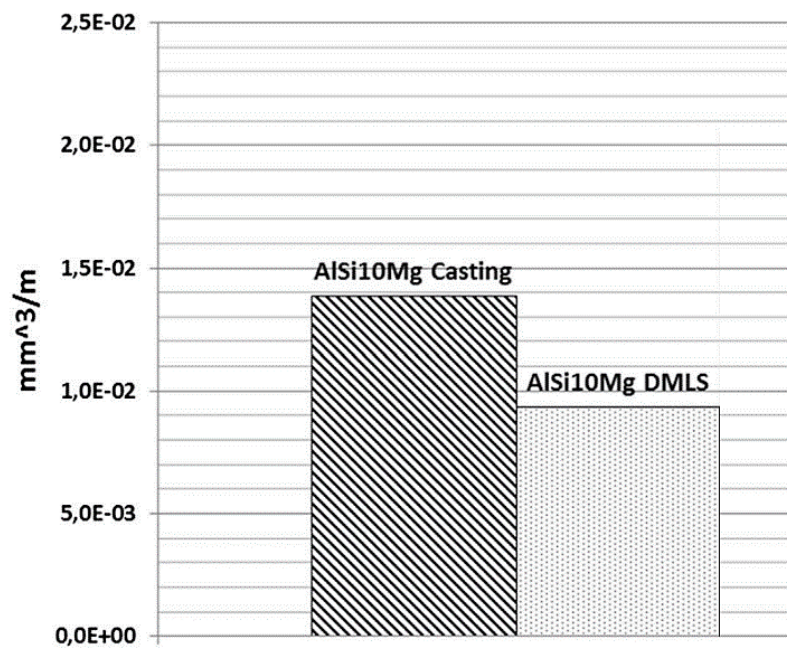
Pro měření odolnosti proti opotřebení se používají různé typy triboometrů. Mezi nejčastěji používané se řadí metoda Pin-on-Disk. Schéma metody je zobrazeno na Obrázku 9. Princip spočívá v tlačení kuličky proti rotujícímu disku pod danou zatěžovací silou. Následně se vyhodnocuje třecí koeficient, opotřebení disku a opotřebení kuličky. [28] Pro každý test je potřeba nastavit následující testovací parametry: zatěžovací sílu, rychlost otáčení, posuvnou vzdálenost, teplotu a atmosféru obklopující pracovní prostor. [29]



Obrázek 9 Schéma metody Pin-on-Disk [28]

V současné době existuje pouze několik málo studií zaměřených na tření a odolnost proti opotřebení hliníkových slitin. Jedna ze studií [27] porovnává odolnost opotřebení odlitku z AlSi10Mg a materiálu AlSi10Mg vytištěného pomocí metody DMLS (viz Obrázek 10). Pro tento experiment byly použity disky o průměru 40 mm a výšce 10 mm. Vzorky byly vyleštěny na drsnost 0,03  $\mu\text{m}$ . Pro metodu Pin-on-Disk při pokojové teplotě bylo pro každý vzorek použito zatížení 5 N, rychlost otáčení byla nastavena na 0,2 m/s a posuvná vzdálenost na 500 m. [27]

Na Obrázku 10 je zobrazeno srovnání rychlosti ztráty materiálu slévárenské slitiny a vytištěné slitiny AlSi10Mg v  $\text{mm}^3/\text{m}$ . Rychlost ztráty materiálu se v případě slévárenské slitiny blíží  $0,014 \text{ mm}^3/\text{m}$  (tj.  $1,4\text{E}-02$ ), oproti tomu rychlost ztráty tištěné slitiny je necelých  $0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$  (tj.  $1,0\text{E}-02$ ). Jak bylo předpokládáno, materiál vytištěný metodou DLMS má vyšší odolnost proti opotřebení než odlitý materiál, jelikož má vyšší tvrdost. Autor článku uvádí tvrdost slévárenské slitiny  $78 \text{ HV}$ , tvrdost vytištěné slitiny metodou DLMS je  $97,6 \text{ HV}$ . [27]

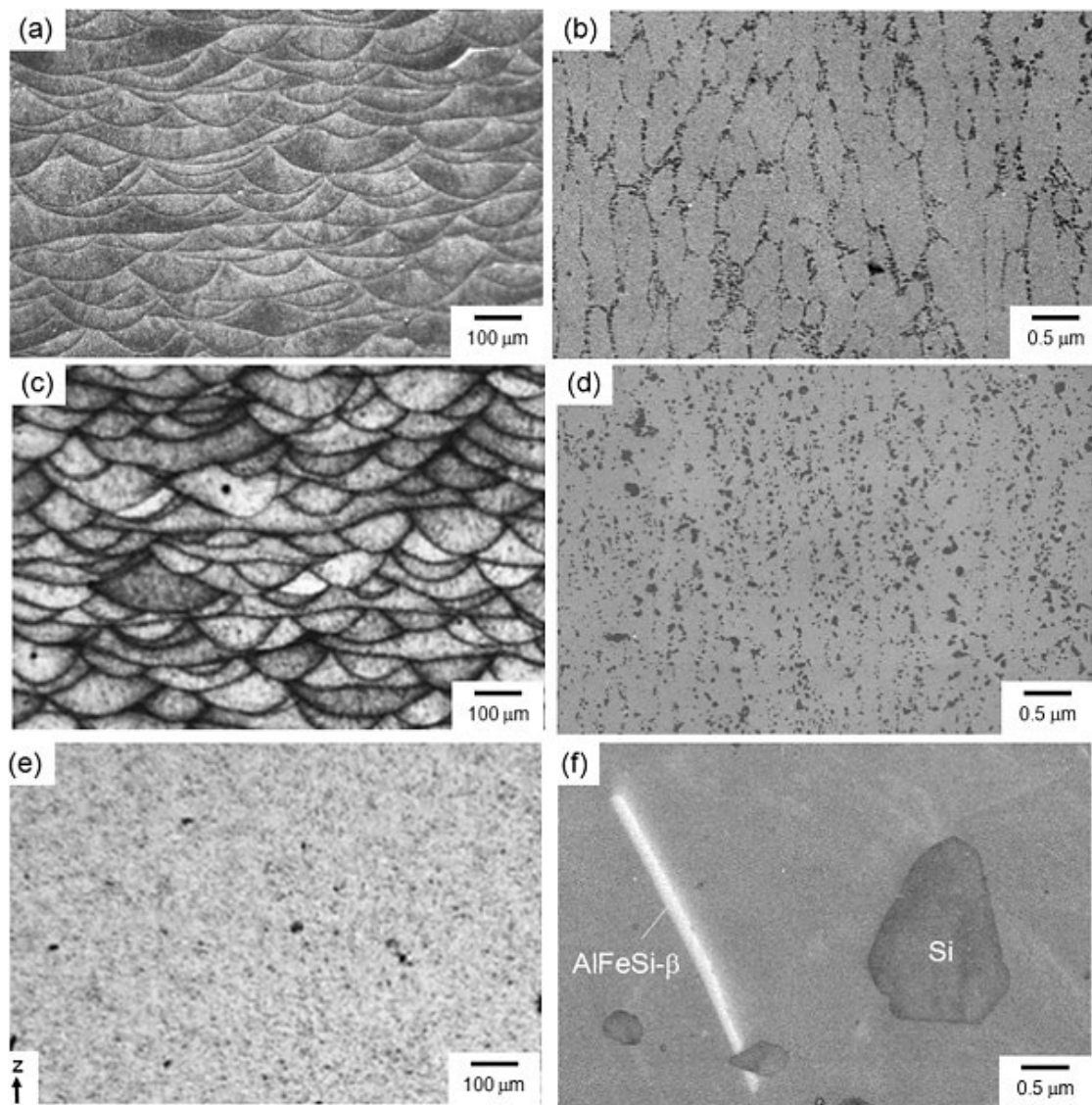


Obrázek 10 Srovnání rychlosti ztráty materiálu slévárenské a tištěné slitiny AlSi10Mg [27], upraveno pro BP

### 1.3.3 Struktura AlSi10Mg

Mezi hlavní nevýhody 3D tisku kovových materiálů patří vysoká porozita vytištěného materiálu. Porozita materiálu závisí především na metodě 3D tisku. Vzhledem k tomu, že tisk probíhá vrstvu po vrstvě, mikrostruktura každé vrstvy je odlišná od té předchozí. To má za následek rozdílné mechanické a fyzikální vlastnosti v horizontálním a vertikálním směru (anizotropní chování). [30] Na Obrázku 11 je zobrazena struktura slitiny AlSi10Mg vytištěné metodou SLM. Snímky (a) (b) zobrazují strukturu bez TZ, snímky (c) (d) po žíhání na  $300 \text{ °C}$  po dobu 2 hodin a snímky (e) (f) po žíhání na  $530 \text{ °C}$  po dobu 6 hodin. Na snímku (a) jsou jasně vidět místa (bazénky) původně

roztaveného kovu, které mají podobu rybích šupin. Tyto bazénky se skládají z  $\alpha$ -Al zrn o šířce zhruba 500 nm (snímek (b)), které jsou obklopeny velkým počtem jemných částic Si o velikosti méně než 100 nm. Ze snímků (c) (d) je patrné, že po žíhání na 300 °C došlo v některých částech ke zhrubnutí částic Si. Také lze pozorovat některé částice Si uvnitř zrn  $\alpha$ -Al. Snímky (e) (f) ukazují, že po žíhání na 530 °C došlo k zániku struktury podobné rybím šupinám. Částice Si výrazně zhrubly a došlo zde k formaci intermetalické fáze  $\text{AlFeSi-}\beta$  s výrazně protáhnutým tvarem. [6]



Obrázek 11 Vliv tepelného zpracování na strukturu 3D tištěné slitiny  $\text{AlSi10Mg}$  [6]

## 2 Experimentální část

Předložená práce je součástí projektu, v rámci kterého je hodnocen vliv parametrů žíhání na strukturu a užité vlastnosti slitiny AlSi10Mg připravené 3D tiskem metodou SLM. V paralelně probíhající diplomové práci byly hodnoceny pevnostní a tvárné charakteristiky slitiny. Výsledky jsou podobné s výsledky jiných prací, např. [6] [31]. Tato bakalářská práce se zabývá především hodnocením vlivu tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení.

V rámci bakalářské práce byly testovány čtyři skupiny vzorků, jedna skupina vzorků bez TZ (As built), zbývající tři s tepelným zpracováním. Jedním z použitých tepelných zpracování je žíhání ke snížení pnutí na 240 °C po dobu 6 hodin s následným ochlazením v peci. Jedná se o tepelné zpracování doporučené výrobcem tiskárny přímo pro slitinu AlSi10Mg. [4] Dalším z tepelných zpracování je žíhání ke snížení pnutí na 240 °C po dobu 2 hodin, také s ochlazením v peci. Toto žíhání bylo vybráno z důvodu zjištění vlivu snížené doby výdrže na žíhací teplotě 240 °C (z 6 hodin na 2 hodiny) na sledované vlastnosti slitiny AlSi10Mg. Posledním tepelným zpracováním je žíhání ke snížení pnutí na 300 °C po dobu 2 hodin s následným ochlazením do vody. Žíhání na 300 °C bylo vybráno na základě ostatních prací, např. [6]. U všech sledovaných stavů byly provedeny zkoušky Pin-on-Disk, zkoušky tvrdosti a metalografické analýzy. Vzorky byly vytištěny v ose Z na 3D tiskárně Concept Laser M2 (viz Obrázek 12). O vytištění vzorků se postaral Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie. Během tisku byl použit laser o výkonu 200 W na povrchu (po okraji) a 370 W v jádře (ve středu). Velikost částic kovového prášku byla 1-42 μm.



Obrázek 12 Concept Laser M2 [33]

## 2.1 Příprava vzorků

Vytištěné a tepelně upravené válečky ze slitiny AlSi10Mg byly nařezány na malé disky o rozměrech 22x4 mm. Tyto vzorky byly pro větší přehlednost během experimentu označeny. Označení je uvedeno v Tabulce 5.

Tabulka 5 Označení vzorků

Typ TZ	Označení vzorků
bez TZ	1
TZ– 240 °C 6 hodin	2
TZ– 240 °C 2 hodiny	3
TZ– 300 °C 2 hodiny	4

Aby bylo možné testovat odolnost proti opotřebení, bylo nejprve potřeba zajistit rovinné a hladké plochy na jednotlivých vzorcích. Vzorky byly nejprve přilepeny ke kovovým válečkům. Kovové válečky spolu se vzorky se následně upevnily do držáku, který se připojil do leštičky (viz Obrázek 13). V levé části Obrázku 13 jsou zobrazeny vzorky upevněné v držáku. V pravé části obrázku je zobrazena leštička s připojeným držákem na vzorky. Pro dosažení co nejlepší rovinnosti a drsnosti ploch bylo provedeno několik broušení, přičemž před zahájením každého broušení byly vzorky opláchnuty vodou a brousící papír byl vyměněn za jemnější. Posledním brusným papírem

byl papír s velikostí brusiva 5  $\mu\text{m}$ . Po dokončení broušení byly vzorky následně leštěny na stejném přístroji speciálním leštícím papírem s leštící kapalinou.



Obrázek 13 Leštička a držák na vzorky

## 2.2 Tvrdość dle Vickerse

Zkouška tvrdosti podle Vickerse proběhla na přístroji Zwick 3202 (viz Obrázek 14) dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Princip metody spočívá ve vtlačování zkušebního tělesa (diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136°) do zkoumaného materiálu. Následně se změří úhlopříčky vtisku a určí se tvrdost. [32] V tomto případě bylo použito zatížení 49,05 N (HV 5) při okolní teplotě 26 °C. Na každém vzorku bylo provedeno 10 měření ve vzdálenosti 1 mm od sebe. Měření proběhlo od okraje vzorku směrem do středu. Zjištěné hodnoty tvrdostí byly zprůměrovány a byly vypočteny směrodatné odchylky.



Obrázek 14 Tvrdoměr Zwick 3202

## 2.3 Pin-on-Disk

Pro měření opotřebení metodou Pin-on-Disk byl použit tribometr od společnosti CSM Instruments. Tribometr (viz Obrázek 15) během testu také zaznamenává tření mezi diskem a kuličkou v závislosti na dráze.



Obrázek 15 Tribometr CSM Instruments

Před samotným testem byly vzorky vyčištěny acetonem. Během testování byla použita kulička z oceli 100Cr6 o průměru 6 mm. Pro porovnání výsledků byla použita ještě kulička z tvrdokovu (WC + Co) o stejném průměru.

Test probíhal na sucho za pokojové teploty při normální atmosféře. Pro obě kuličky bylo nastaveno zatížení 5 N. Místo posuvné vzdálenosti bylo nastaveno 5000 kol (pro poloměr 5 mm se jedná o vzdálenost 157 m, pro 7 mm vzdálenost 220 m), rychlost otáčení byla 100 mm/s. U všech vzorků nejprve proběhl test s kuličkou z 100Cr6 na poloměru dráhy kuličky 5 mm. Následně proběhl test s kuličkou z WC + Co na poloměru 7 mm. Pro analýzu opotřebení kuliček a pro velikost ploch průřezu drážek u vybraných stavů byl použit digitální mikroskop Olympus DSX1000 (viz Obrázek 16 vlevo). Pro přesné změření šířky drážky na discích byl použit stereomikroskop Olympus ZS61 (viz Obrázek 16 vpravo).



Obrázek 16 Olympus DSX1000 (vlevo), Olympus ZS61 [34] (vpravo)

Při vyhodnocování opotřebení se postupovalo dle normy ASTM G99 17. [29] V průběhu měření byla snímána závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol kuličky. V oblasti stacionárního průběhu této závislosti byl vyhodnocen koeficient tření. Opotřebení disků a kuliček bylo určeno dle normy [29] z následujících vzorců:

$$\text{ztráta materiálu disku [mm}^3] = \frac{\pi (\text{poloměr dráhy [mm]}) (\text{šířka drážky [mm]})^3}{6 (\text{poloměr kuličky [mm]})}$$

$$\text{ztráta materiálu kuličky [mm}^3] = \frac{\pi (\text{průměr opotřebené části kuličky [mm]})^4}{64 (\text{poloměr kuličky [mm]})}$$



Drážky na discích byly měřeny na čtyřech místech jak při použití kuličky z 100Cr6, tak z WC + Co. Hodnoty ztráty materiálu byly následně zprůměrovány a byla určena směrodatná odchylka. Průměr opotřebení kuličky byl určen jako průměrná hodnota vzájemně kolmých rozměrů opotřebení na kuličce. Pro získání rychlosti ztráty materiálu je potřeba celkovou ztrátu materiálu podělit posuvnou vzdáleností.

## 2.4 Metalografická analýza

Po dokončení testu Pin-on-Disk byla provedena analýza struktury a pórovitosti vzorků v příčném řezu (tj. kolmo na osu tisku). Analýza byla provedena na světelném mikroskopu Zeiss Observer Z1m (viz Obrázek 17). Pro sledování mikrostruktury byly vzorky ponořeny po dobu 20 s do leptadla Keller (1ml HF, 1,5ml HCl, 2,5ml HNO<sub>3</sub>, 95ml H<sub>2</sub>O).



Obrázek 17 Zeiss Observer Z1m [35]

### 3 Výsledky a jejich diskuze

V této kapitole jsou prezentovány výsledky a závěry z testování vlivu tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení vzorků ze slitiny AlSi10Mg. Jedná se o výsledky zkoušek Pin-on-Disk, zkoušek tvrdosti a metalografické analýzy.

#### 3.1 Vyhodnocení tvrdosti dle Vickerse

V Tabulkách 6–9 jsou prezentovány výsledky zkoušek tvrdosti podle Vickerse pro jednotlivé vzorky. Jsou zde uvedeny rozměry úhlopříček, hodnoty tvrdosti a jejich směrodatná odchylka. Na Obrázku 18 je zobrazeno porovnání průměrných hodnot tvrdostí vzorků. Z obrázku vyplývá, že na výslednou tvrdost má vliv spíše žíhací teplota než délka výdrže na této teplotě. Dle očekávání je nejměkčí vzorek po žíhání na 300 °C po dobu 2 hodiny, naopak nejtvrdší vzorek je bez tepelného zpracování.

Tabulka 6 Výsledky zkoušky tvrdosti pro vzorek 1 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

Bez TZ	Číslo vtisku	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	HV 5 [-]
	1	0,266	0,265	131,6
	2	0,265	0,267	131,1
	3	0,271	0,269	127,2
	4	0,270	0,268	128,2
	5	0,276	0,273	123,1
	6	0,268	0,272	127,2
	7	0,276	0,271	124,0
	8	0,273	0,272	124,9
	9	0,272	0,270	126,3
	10	0,271	0,273	125,4
Průměr HV 5			127 ± 3	

Tabulka 7 Výsledky zkoušky tvrdosti pro vzorek 2 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

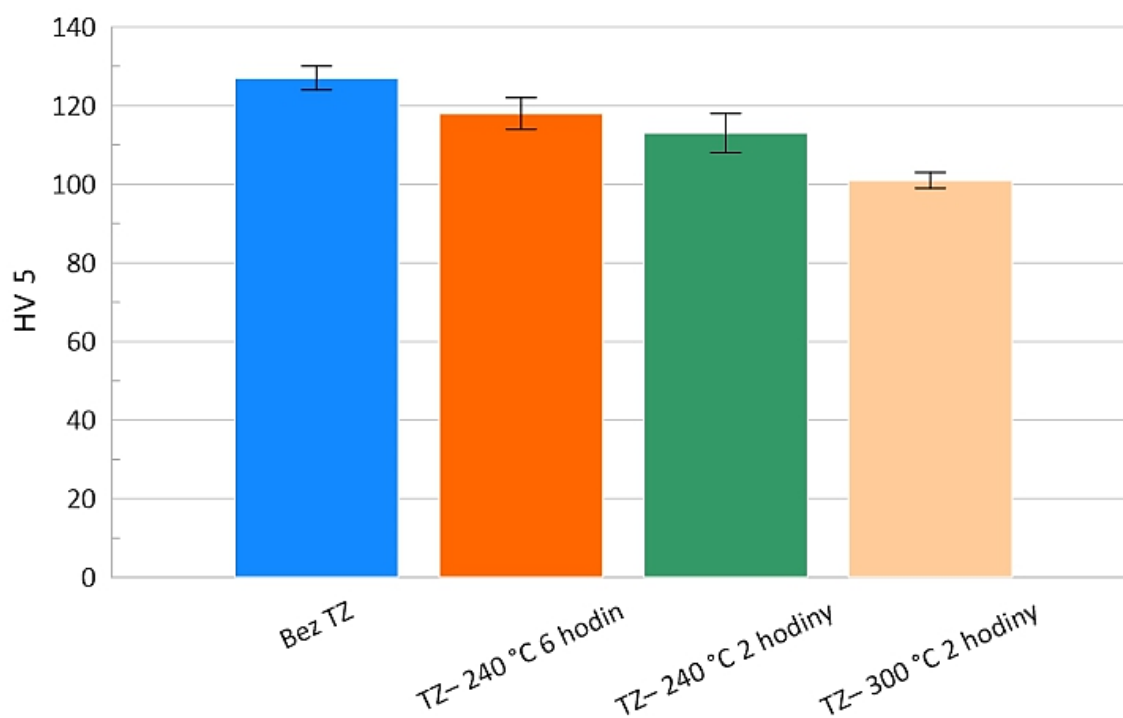
TZ – 240 °C 6 hodin	Číslo vtisku	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	HV 5 [-]
	1	0,273	0,267	127,2
	2	0,274	0,278	121,8
	3	0,288	0,289	111,4
	4	0,282	0,278	118,3
	5	0,284	0,285	114,6
	6	0,283	0,281	116,6
	7	0,280	0,280	118,3
	8	0,281	0,285	115,8
	9	0,278	0,279	119,6
	10	0,283	0,284	115,4
	<b>Průměr HV 5</b>			<b>118 ± 4</b>

Tabulka 8 Výsledky zkoušky tvrdosti pro vzorek 3 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

TZ – 240 °C 2 hodiny	Číslo vtisku	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	HV 5 [-]
	1	0,310	0,303	98,7
	2	0,286	0,283	114,6
	3	0,282	0,276	119,2
	4	0,290	0,284	112,6
	5	0,285	0,285	114,2
	6	0,287	0,289	111,8
	7	0,285	0,286	113,8
	8	0,285	0,286	113,8
	9	0,286	0,284	114,2
	10	0,285	0,285	114,2
	<b>Průměr HV 5</b>			<b>113 ± 5</b>

Tabulka 9 Výsledky zkoušky tvrdosti pro vzorek 4 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

TZ – 300 °C 2 hodiny	Číslo vtisku	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	HV 5 [-]
	1	0,310	0,312	95,9
	2	0,300	0,300	103,1
	3	0,301	0,302	102,0
	4	0,306	0,305	99,4
	5	0,303	0,307	99,7
	6	0,299	0,305	101,7
	7	0,304	0,301	101,4
	8	0,300	0,303	102,0
	9	0,302	0,301	102,0
	10	0,301	0,299	103,1
<b>Průměr HV 5</b>			<b>101 ± 2</b>	



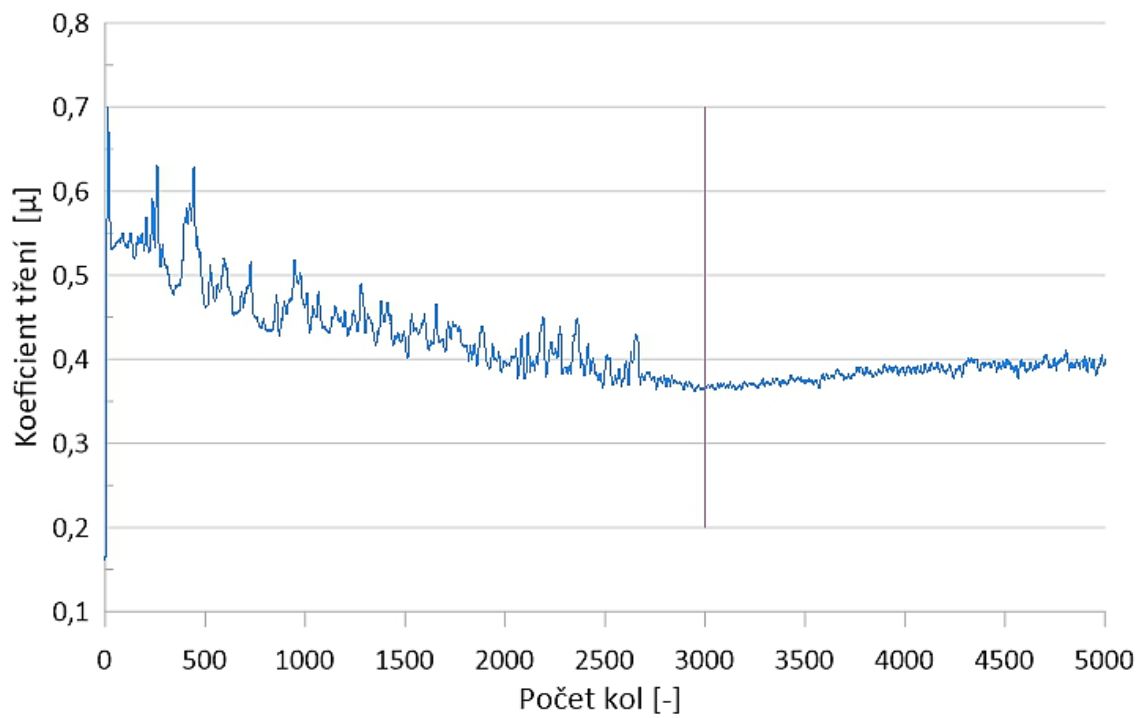
Obrázek 18 Porovnání tvrdostí vzorků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg v závislosti na TZ

## 3.2 Vyhodnocení Pin-on-Disk

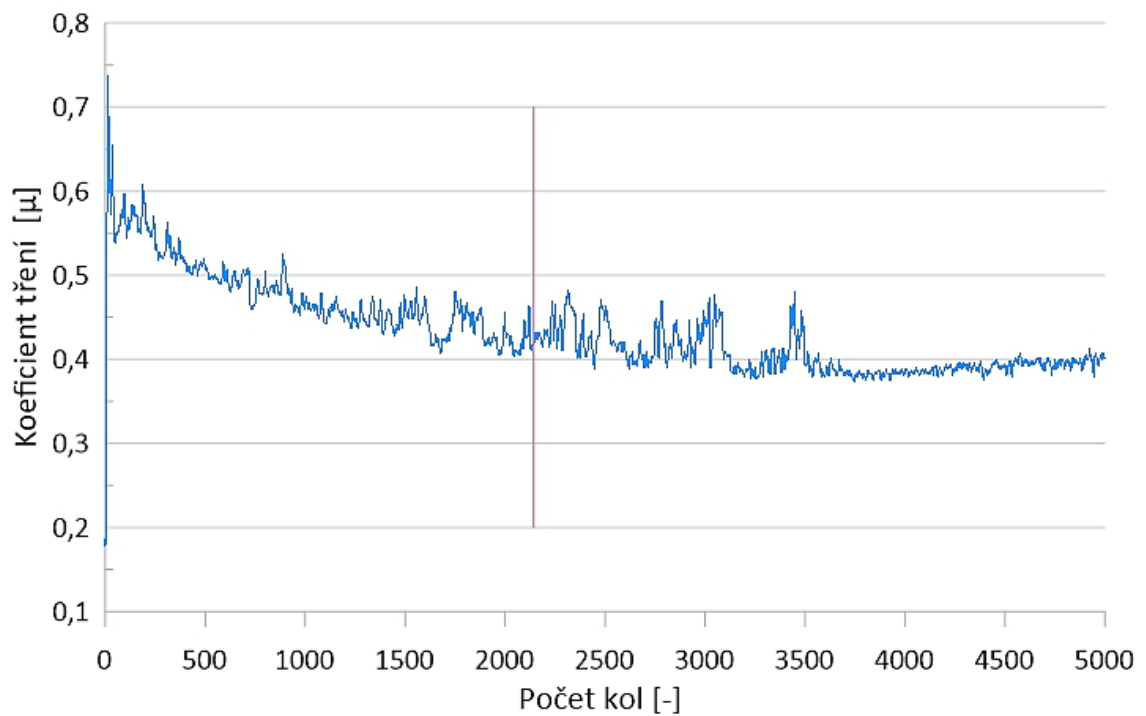
### 3.2.1 Vyhodnocení koeficientu tření

Na Obrázcích 19–26 jsou závislosti koeficientu tření na počtu oběžných kol kuličky při testu Pin-on-Disk. V případě Obrázků 19, 21, 23, 25 byla použita kulička z ložiskové oceli 100Cr6, ve zbylých případech z tvrdokovu WC + Co. Jak již bylo uvedeno, pro obě kuličky bylo nastaveno 5000 kol. Vzhledem k různému poloměru dráhy kuliček se však nejedná o stejnou vzdálenost. Pro představu je zde znázorněn počet kol, který odpovídá ujeté vzdálenosti 94,25 m (poloměr 5 mm – 3000 kol, poloměr 7 mm – 2143 kol).

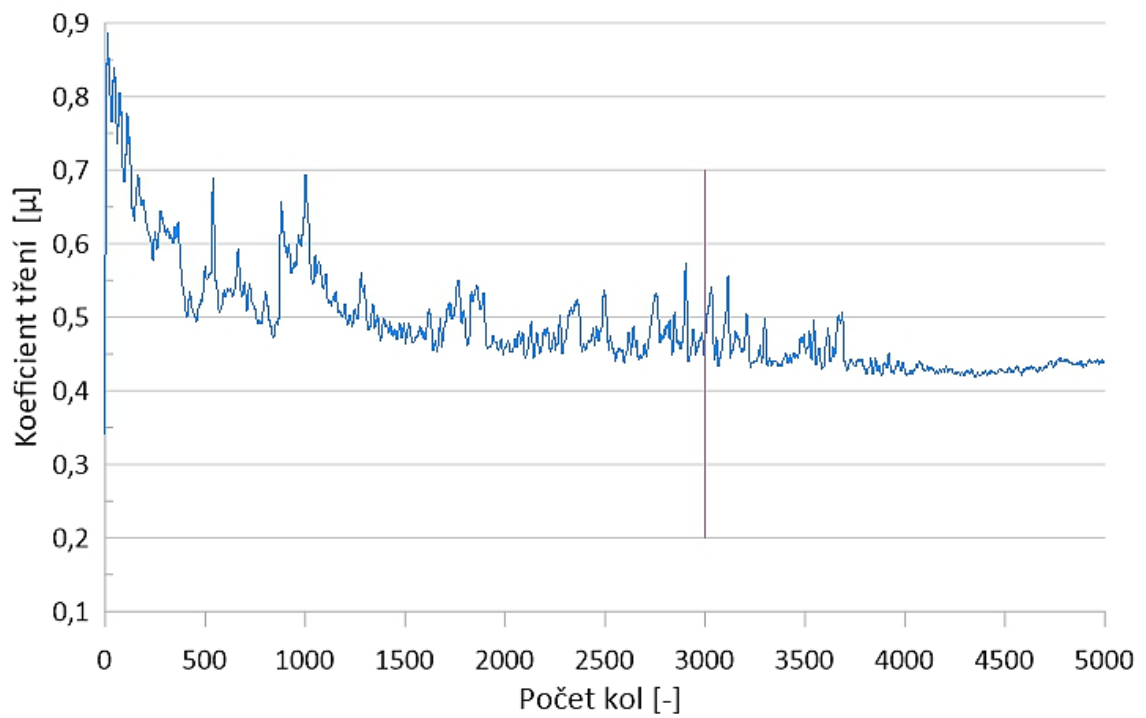
Hodnoty koeficientu tření ve všech případech dle předpokladu pozvolně klesají s narůstajícím počtem kol. Postupné ustálení hodnot nastává přibližně po 4000. kole. U vzorků s tepelným zpracováním nabývá koeficient tření vyšší hodnoty v počátku testu než v případě vzorku bez tepelného zpracování. Také jsou zde patrné vyšší výkyvy hodnot, které jsou pravděpodobně způsobeny cyklickým ulpíváním produktů vznikajících při tření (oxidů) a jejich následným odtržením. Tato skutečnost by v další práci měla být objasněna pomocí detailní analýzy povrchu drážky. Vyhodnocení koeficientu tření je v Tabulce 10. Ačkoliv se koeficient tření vzorků příliš neliší, je možno konstatovat, že pro stav bez TZ je koeficient nižší než po žíhání. Z výsledků je patrné, že koeficient tření závisí na tepelném zpracování či na použité kuličce jen mírně. Nejvyšších hodnot nabývá koeficient tření u vzorku s tepelným zpracováním na 300 °C po dobu 2 hodin (vzorek 4), nejnižších v případě vzorku bez tepelného zpracování (vzorek 1). Výsledky hodnocení koeficientu tření jsou v dobrém souladu s výsledky měření tvrdosti, kdy nejměkčí vzorek (vzorek 4) vykazuje nejvyšší koeficient tření, zatímco nejtvrďší vzorek nabývá nejnižších hodnot (vzorek 1).



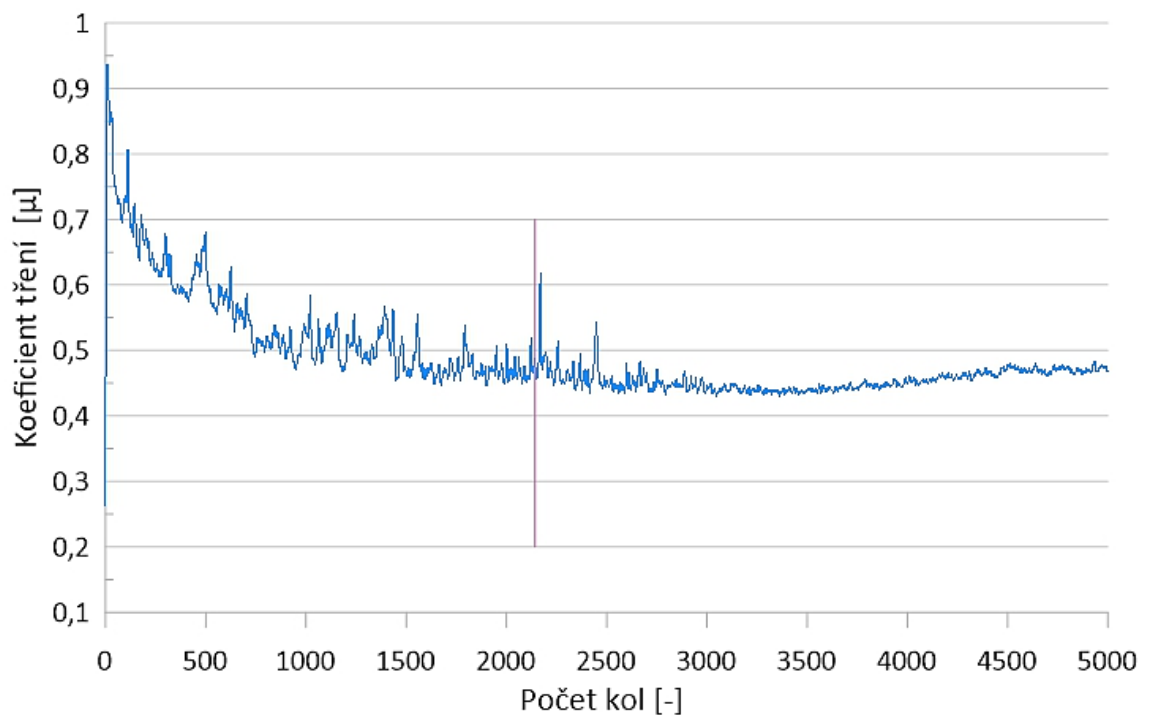
Obrázek 19 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 1 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička 100Cr6



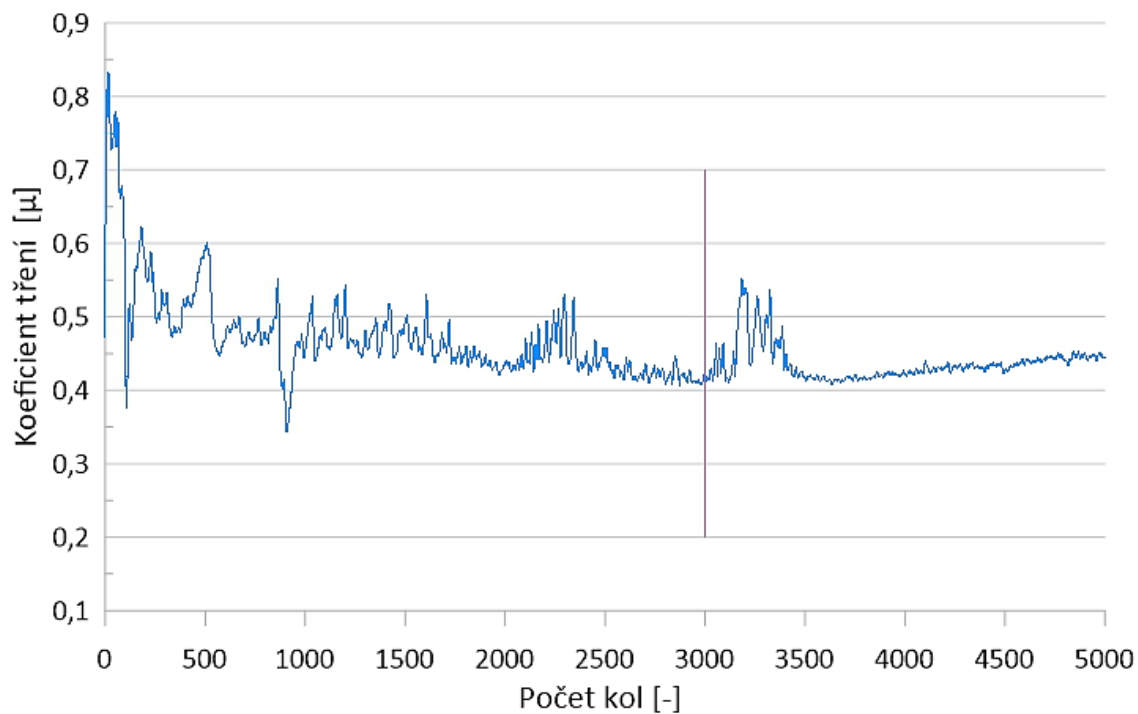
Obrázek 20 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 1 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička WC + Co



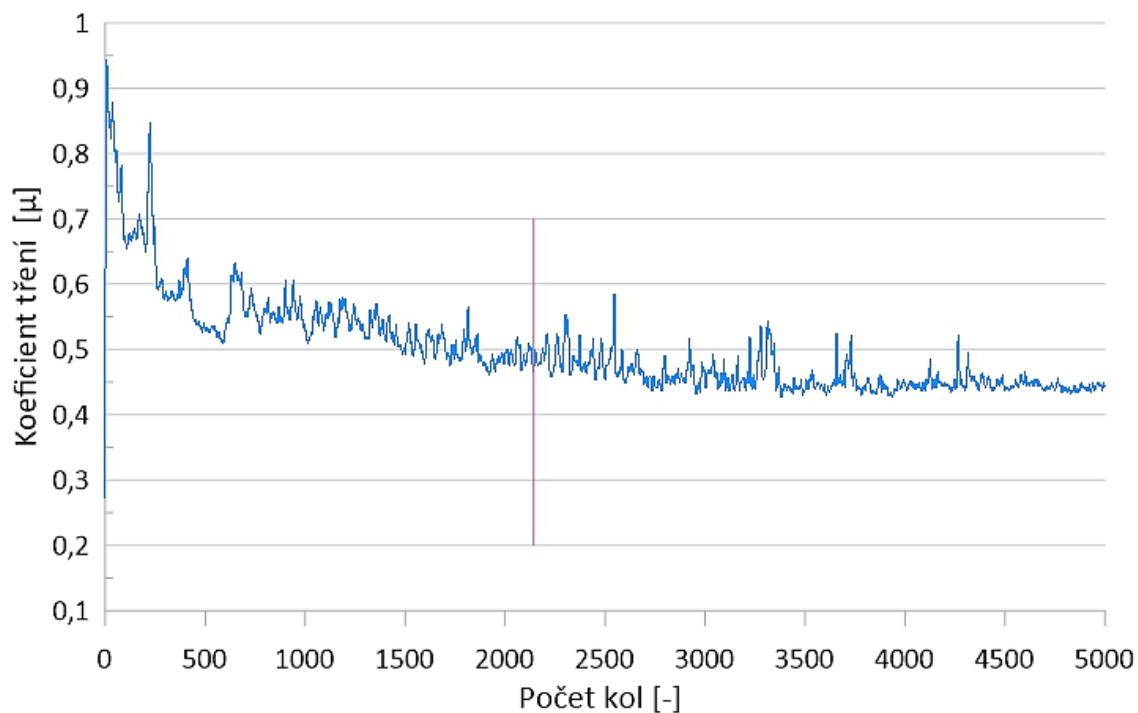
Obrázek 21 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 2 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička 100Cr6



Obrázek 22 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 2 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička WC + Co

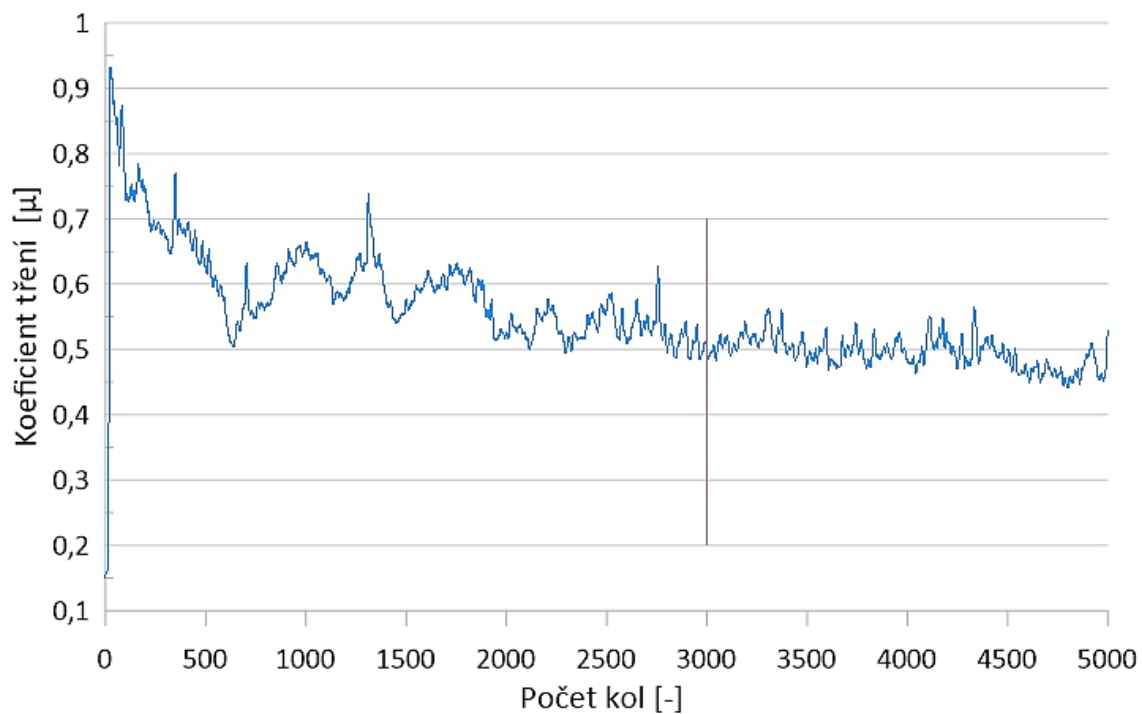


Obrázek 23 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 3 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička 100Cr6

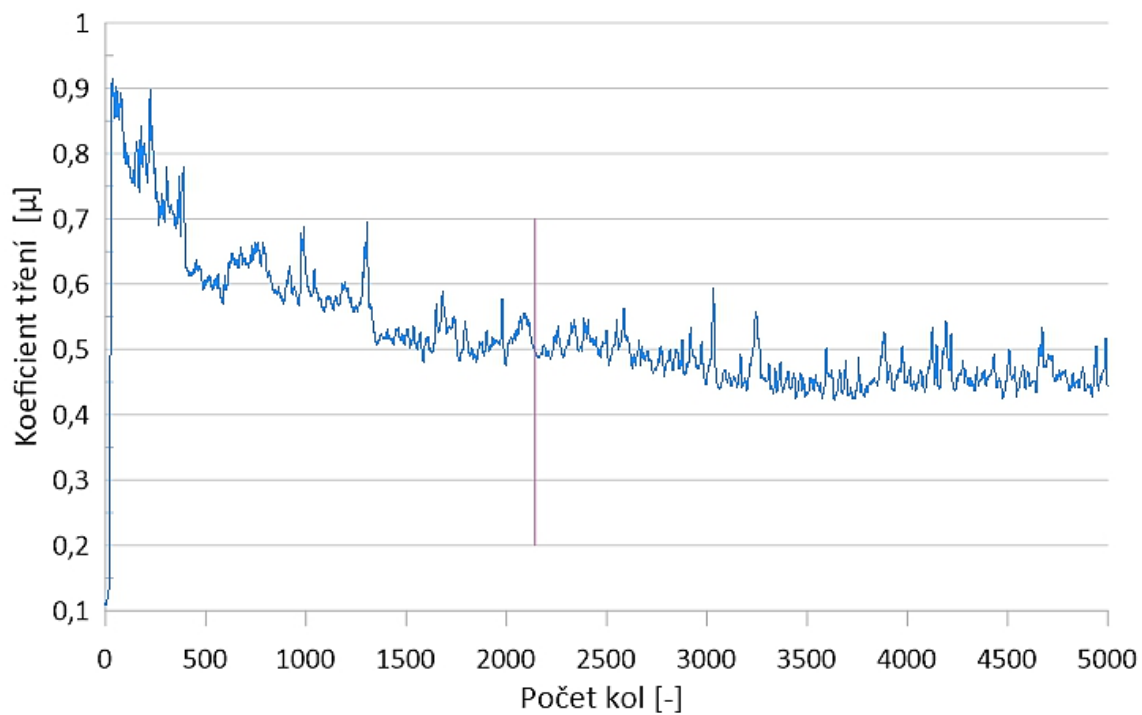


Obrázek 24 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 3 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička WC + Co





Obrázek 25 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 4 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička 100Cr6



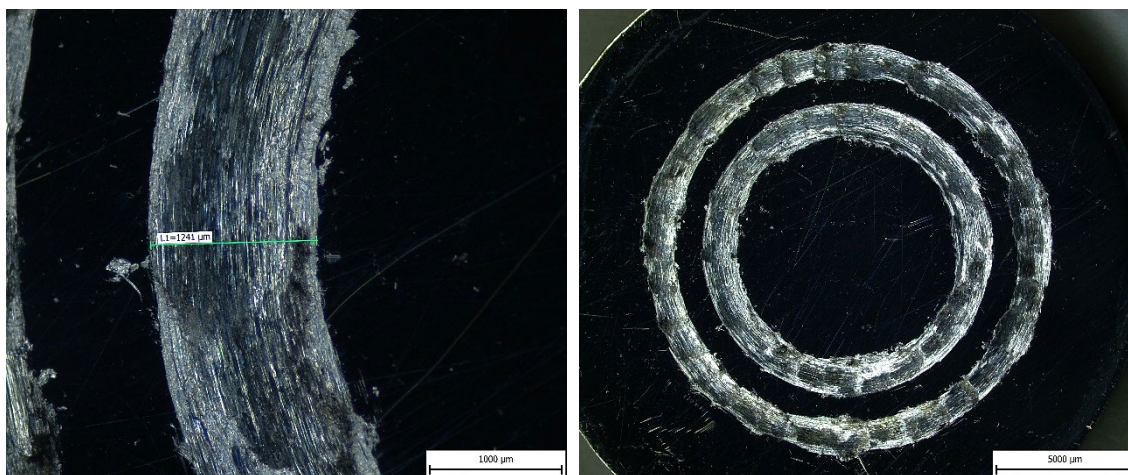
Obrázek 26 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 4 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička WC + Co

Tabulka 10 Vyhodnocení koeficientu tření

Vzorek	Kulička	Koeficient tření [ $\mu$ ]
1	100Cr6	0,39
1	WC + Co	0,39
2	100Cr6	0,43
2	WC + Co	0,47
3	100Cr6	0,44
3	WC + Co	0,45
4	100Cr6	0,48
4	WC + Co	0,46

### 3.2.2 Vyhodnocení opotřebení

Na Obrázku 27 je příklad, jak vypadají drážky na vzorku a měření šířky drážky. Vnitřní drážka je po testu s kuličkou 100Cr6, vnější s kuličkou WC + Co.



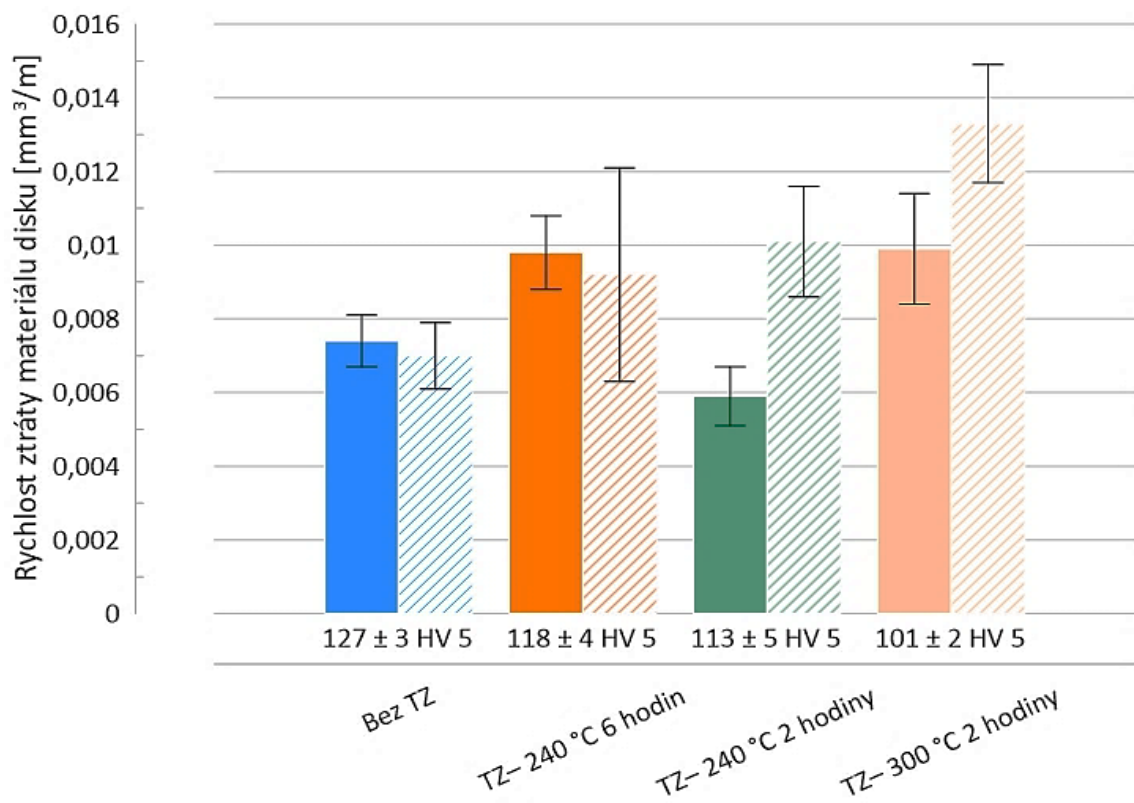
Obrázek 27 Příklad opotřebení disku z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

Výsledky opotřebení disku z testu Pin-on-Disk jsou uvedeny v Tabulce 11. Celkovou ztrátu materiálu disku při použití kuličky z 100Cr6 nelze přímo srovnávat s materiálovou ztrátou při použití kuličky z WC + Co z důvodu rozdílných délek drážek. Pro porovnání je uvedena rychlost ztráty materiálu (rychlost opotřebení) na jeden metr dráhy. Toto srovnání je graficky zobrazeno na Obrázku 28. V grafu jsou uvedeny rychlosti opotřebení disků v závislosti na tepelném zpracování. Jednotlivé typy tepelného zpracování

vzorků jsou barevně odlišeny. Také je zde rozlišeno, zda se o jedná test s použitím kuličky 100Cr6 (sloupce s plnou barvou), nebo o test s kuličkou WC + Co (čárkované sloupce). Pod každou dvojicí sloupců je uvedena tvrdost daného vzorku.

Tabulka 11 Vyhodnocení opotřebení disků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

Vzorek	Kulička	Celková ztráta materiálu [mm <sup>3</sup> ]	Rychlost ztráty materiálu [mm <sup>3</sup> /m]
1	100Cr6	1,17±0,11	$(7,4±0,7) \cdot 10^{-3}$
1	WC + Co	1,54±0,20	$(7,0±0,9) \cdot 10^{-3}$
2	100Cr6	1,54±0,15	$(9,8±1) \cdot 10^{-3}$
2	WC + Co	2,03±0,63	$(9,2±2,9) \cdot 10^{-3}$
3	100Cr6	0,93±0,12	$(5,9±0,8) \cdot 10^{-3}$
3	WC + Co	2,32±0,33	$(10,1±1,5) \cdot 10^{-3}$
4	100Cr6	1,56±0,24	$(9,9±1,5) \cdot 10^{-3}$
4	WC + Co	2,91±0,36	$(13,3±1,6) \cdot 10^{-3}$

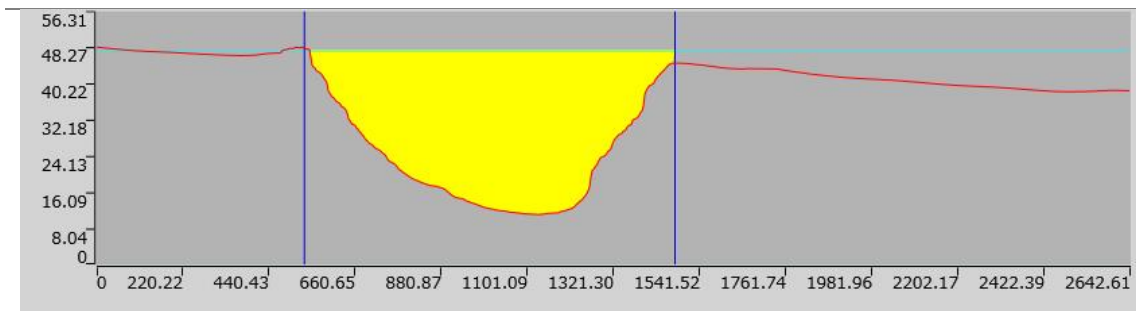


Obrázek 28 Rychlost ztráty materiálu disku z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg v závislosti na TZ a použité kuličce

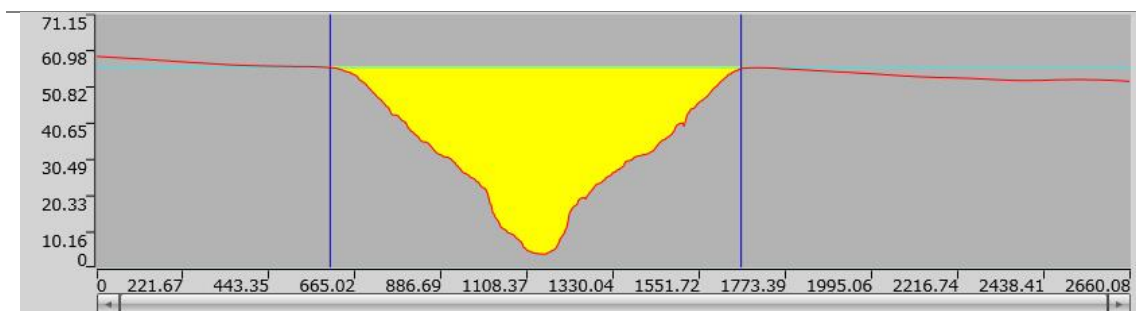
Z Obrázku 28 je patrné, že rychlost opotřebení při použití kuličky z 100Cr6 a tvrdokovu (WC + Co) je v rámci směrodatné odchylky přibližně stejná pro stav bez TZ. U všech sledovaných režimů žíhání na snížení pnutí je rychlost opotřebení při použití kuličky z tvrdokovu v rámci směrodatné odchylky mírně vyšší než při použití kuličky z 100Cr6.

Dle předpokladu má nejvyšší rychlost opotřebení vzorek s nejnižší tvrdostí, tedy vzorek s žíháním na 300 °C po dobu 2 hodin (vzorek 4). Překvapivé jsou vysoké rozdíly hodnot rychlosti opotřebení u vzorku 3 (TZ– 240 °C 2 hodiny) při použití různých kuliček. V další práci je nutné tento výsledek ověřit na více vzorcích. Jak již bylo uvedeno, v odborné literatuře není mnoho výsledků z testování odolnosti proti opotřebení 3D tištěné slitiny AlSi10Mg. Při porovnání výsledků dosažených v této práci s prací [27] je možno konstatovat, že v práci [27] byla u materiálu AlSi10Mg zjištěna menší tvrdost a s tím i vyšší rychlost opotřebení.

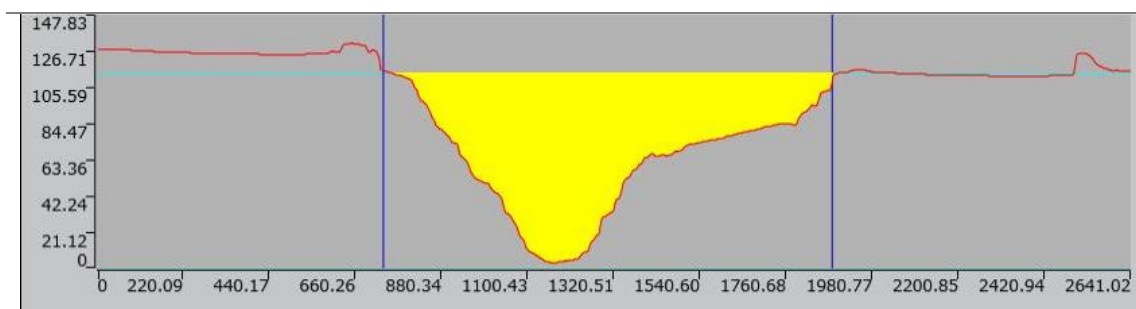
Autor této práce si je vědom skutečnosti, že metodika vyhodnocování šířky drážky má vliv na výsledky. [29] V rámci práce bylo provedeno pouze stanovení plochy průřezu drážky u vzorku bez TZ (vzorek 1) a po žíhání 300 °C po dobu 2 hodin (vzorek 4) (viz Obrázek 29). Obrázek dokumentuje předpoklad, že pro přesnější určení velikosti opotřebení bude v další práci nutné provést měření profilu drážek pro všechny sledované stavy a na základě těchto dat vyhodnotit opotřebení. Lze předpokládat, že takto stanovené hodnoty opotřebení povedou k větší diferenciaci.



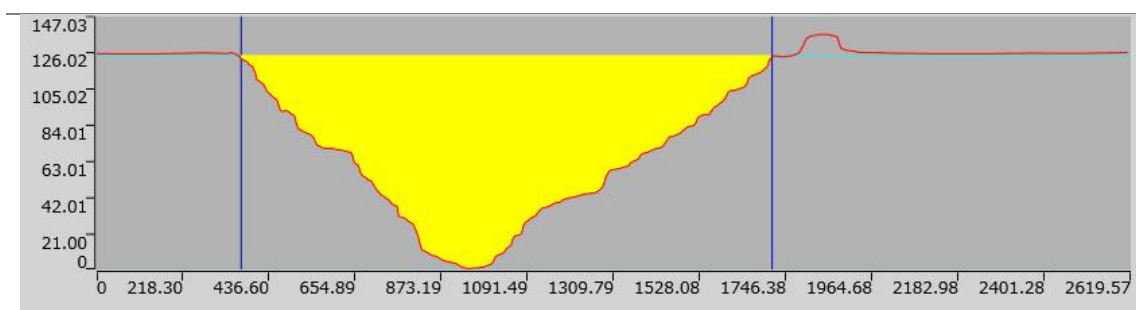
Vzorek	Kulička	Plocha průřezu drážky	Tvrдость vzorku
1	100Cr6	22862,348 $\mu\text{m}^2$	127 $\pm$ 3 HV 5



Vzorek	Kulička	Plocha průřezu drážky	Tvrдость vzorku
1	WC + Co	25630,063 $\mu\text{m}^2$	127 $\pm$ 3 HV 5



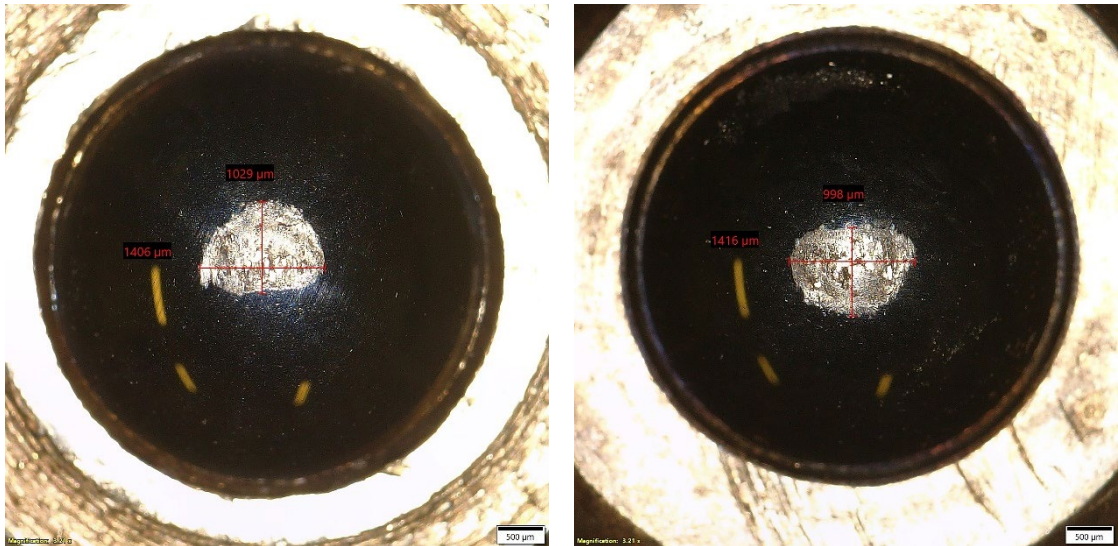
Vzorek	Kulička	Plocha průřezu drážky	Tvrдость vzorku
4	100Cr6	59578,427 $\mu\text{m}^2$	101 $\pm$ 2 HV 5



Vzorek	Kulička	Plocha průřezu drážky	Tvrдость vzorku
4	WC + Co	88494,755 $\mu\text{m}^2$	101 $\pm$ 2 HV 5

Obrázek 29 Plocha průřezu drážek pro dané vzorky z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

Vizuální příklad opotřebení kuliček je zobrazen na Obrázku 30. Je zde také zobrazeno měření plochy opotřebení kuliček. Z obrázku je patrné, že opotřebení nemá kulový charakter. Lze tedy předpokládat, že při tření dochází ke vzniku oxidů, které ulpívají na povrchu kuličky. V další práci by bylo potřeba doplnit detailní analýzu povrchu kuliček.



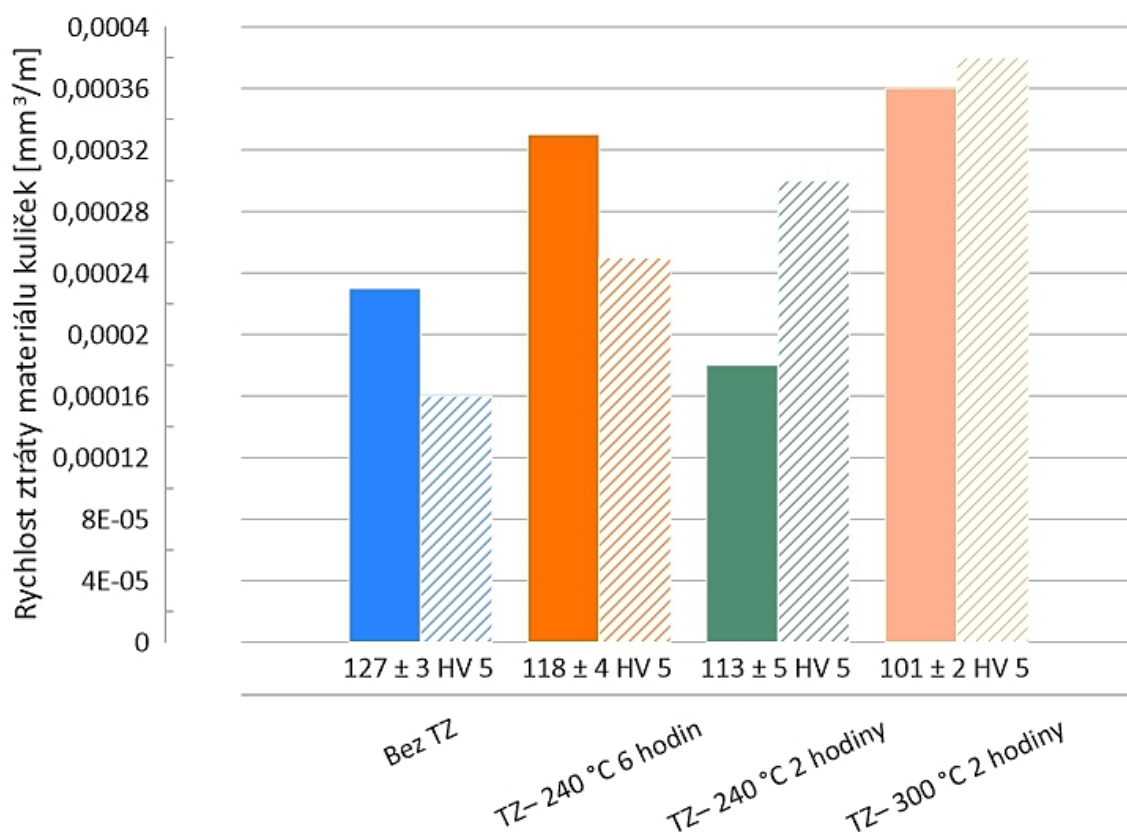
Obrázek 30 Příklad opotřebení kuliček 100Cr6 (vlevo) a WC + Co (vpravo)

Vyhodnocení opotřebení kuliček je uvedeno v Tabulce 12. Stejně jako v případě porovnávání hodnot opotřebení na discích i zde z důvodu rozdílné ujeté vzdálenosti kuliček nelze porovnávat opotřebení přímo. Obrázek 31 graficky porovnává rychlosti opotřebení kuliček. Každý typ tepelného zpracování je reprezentován jinou barvou. Plná barva značí kuličku 100Cr6, čárkovaná WC + Co. Hodnoty rychlostí opotřebení kuliček mají podobné poměry jako v případě disků. Z obrázku vyplývá, že nejrychleji docházelo k opotřebení kuliček na nejměkčím vzorku (vzorek 4). Stejně jako v případě opotřebení disku s tepelným zpracováním 240 °C 2 hodiny, i zde by bylo potřeba provést test s kuličkou 100Cr6 na více vzorcích.

Z hodnocení zkoušky Pin-on-Disk lze konstatovat, že nejvyšší rychlost opotřebení má 3D tištěná slitina AlSi10Mg s žíháním 300 °C 2 hodiny (vzorek 4). Byla tedy prokázána závislost mezi odolností proti opotřebení a tvrdostí vzorků.

Tabulka 12 Vyhodnocení opotřebení kuliček

Vzorek	Kulička	Celková ztráta materiálu [mm <sup>3</sup> ]	Rychlost ztráty materiálu [mm <sup>3</sup> /m]
1	100Cr6	0,036	0,23 · 10 <sup>-3</sup>
1	WC + Co	0,035	0,16 · 10 <sup>-3</sup>
2	100Cr6	0,050	0,33 · 10 <sup>-3</sup>
2	WC + Co	0,056	0,25 · 10 <sup>-3</sup>
3	100Cr6	0,028	0,18 · 10 <sup>-3</sup>
3	WC + Co	0,065	0,30 · 10 <sup>-3</sup>
4	100Cr6	0,057	0,36 · 10 <sup>-3</sup>
4	WC + Co	0,083	0,38 · 10 <sup>-3</sup>

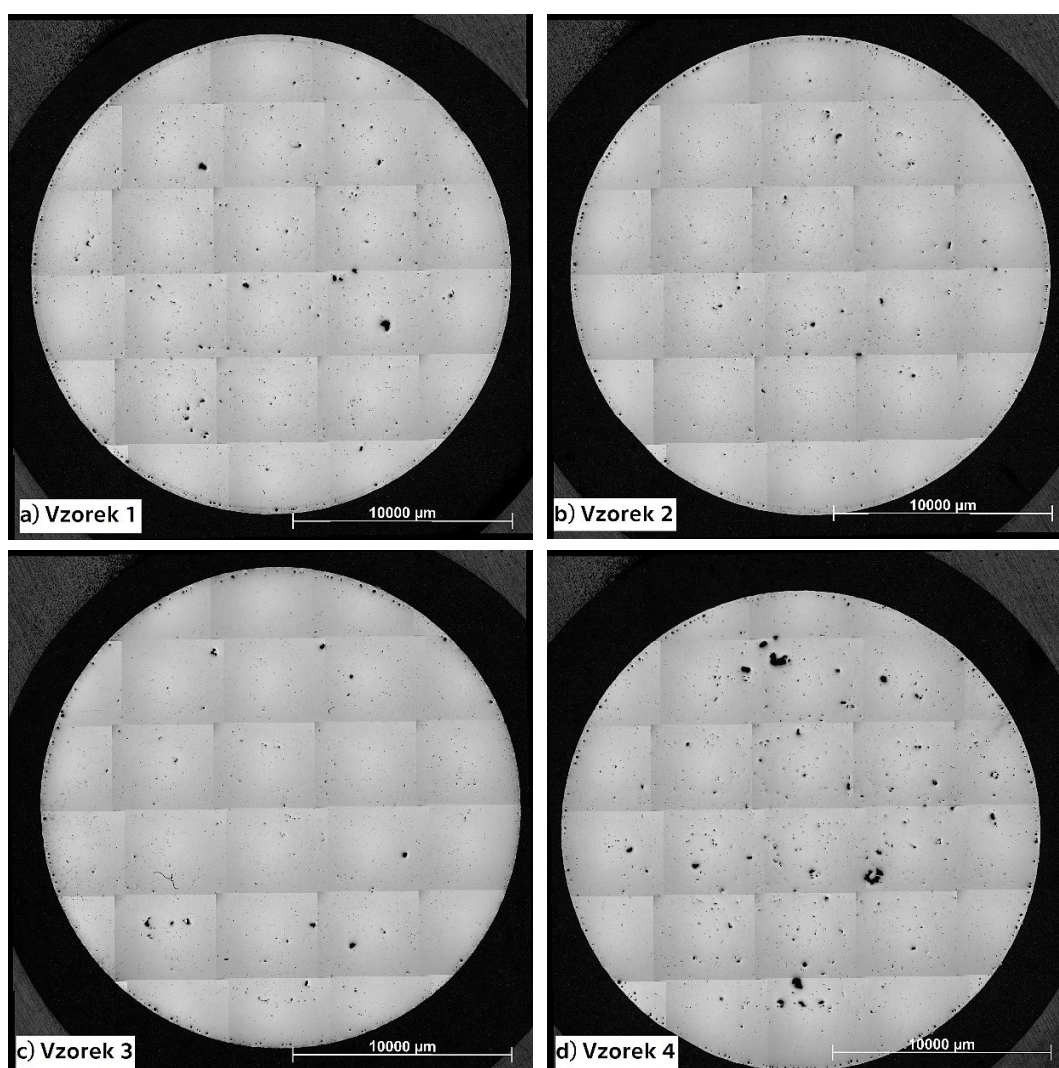


Obrázek 31 Rychlost ztráty materiálu kuliček v závislosti na typu kuličky a na tepelném zpracování vzorků z 3D tištěné slitiny AISi10Mg

### 3.3 Vyhodnocení metalografické analýzy

#### 3.3.1 Vyhodnocení pórovitosti

Na Obrázku 32 jsou přehledové snímky pórovitosti vzorků v nena-leptaném stavu. Z porovnání se zdá, že největší pórovitost má vzorek s žíháním na 300 °C po dobu 2 hodin (viz d) Vzorek 4). Pro vlastní vyhodnocení pórovitosti by bylo potřeba jiného zvětšení, ideálně na řádkovacím elektronovém mikroskopu. Tato analýza je však nad rámec bakalářské práce. V rámci paralelně probíhající diplomové práce byla slitina AlSi10Mg vytištěna při stejných parametrech tisku a zpracována při identických režimech tepelného zpracování. Následně byly vzorky podrobeny detailnější analýze. Překvapivým výsledkem je zjištění, že většina tmavých míst, které připomínají póry, jsou ve skutečnosti zbytky brusiva z přípravy vzorků.

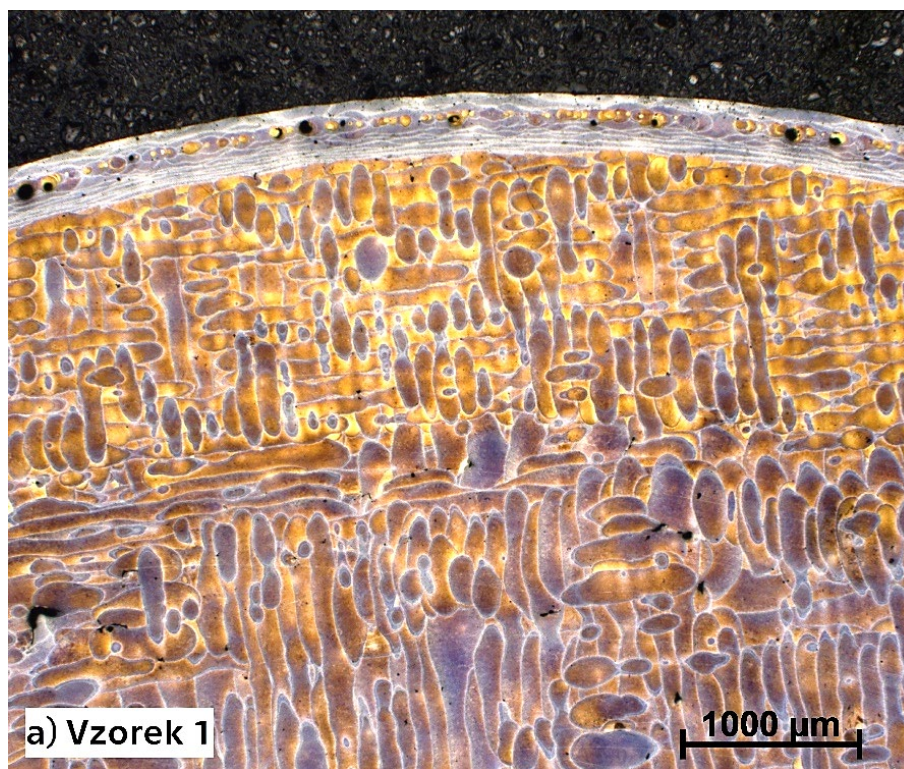


Obrázek 32 Srovnání pórovitosti vzorků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg v závislosti na TZ

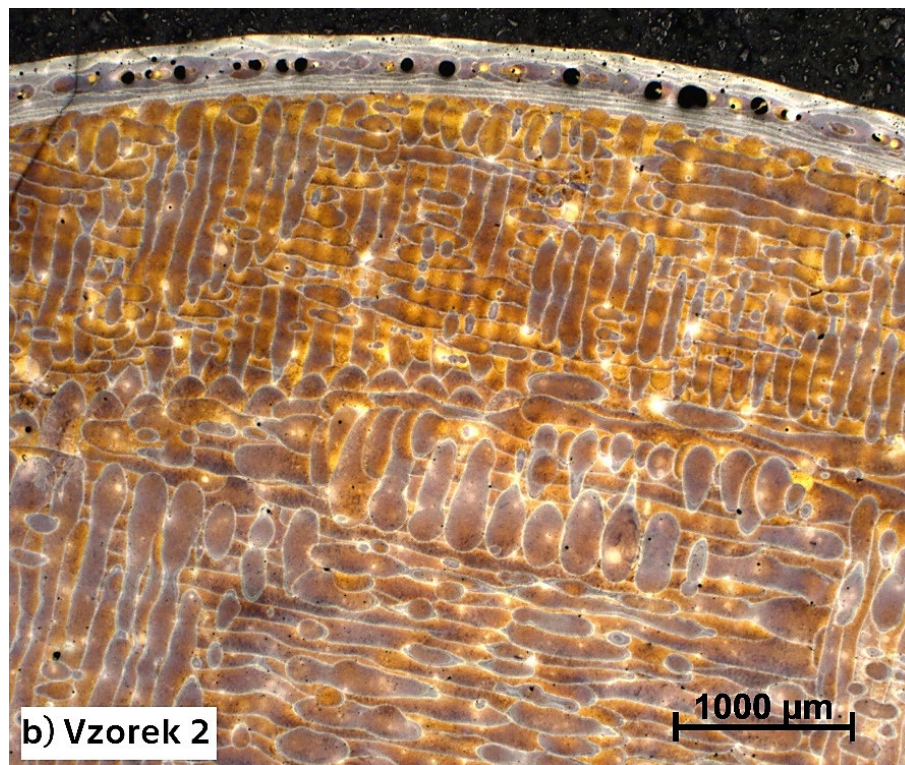


### 3.3.2 Vyhodnocení mikrostruktury

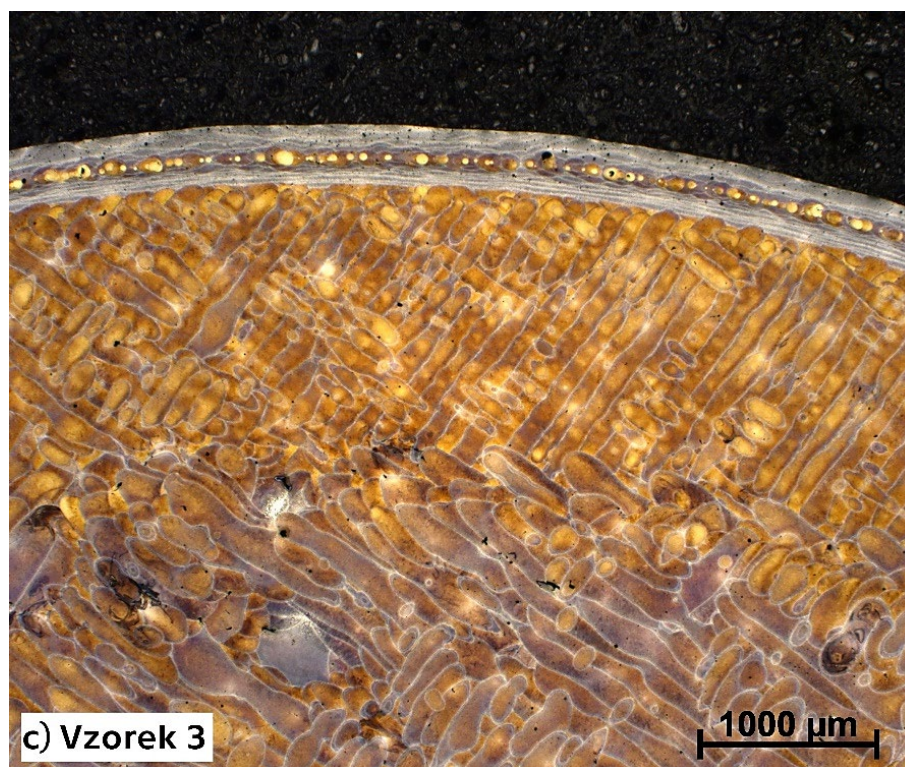
Na Obrázcích 33-36 je přehled struktury na povrchu analyzovaných vzorků. Jedná se o snímky kolmé na osu tisku. Je zde patrný rozdíl mezi strukturou na okraji vzorků a ve středu vzorků. Rozdílná struktura na okraji vzorků byla nejspíše způsobena procesem, kdy ještě před nanesením další vrstvy kovového prášku tiskárna objede hrany vzorků laserem o menším výkonu. Tomuto tvrzení by napovídala i orientace materiálu v okrajové vrstvě. Většina struktury je dle očekávání tvořena orientovanými bazénky dříve nataveného kovu. Pokud bychom se podívali na vzorek v podélném směru (tj. osa tisku), struktura by připomínala rybí šupiny (viz Obrázek 11). Při daném zvětšení není patrný žádný větší rozdíl mezi strukturami vzorků s tepelným zpracováním a bez něj. Pro detailnější rozbor by bylo potřeba jiného zvětšení, to je však nad rámec bakalářské práce. Na snímcích jsou patrná (podobně jako na Obrázku 32) tmavá místa, která by mohla být póry, nečistotami, nedokonalostmi tisku, případně zbytky brusiva, jak bylo uvedeno v předchozí kapitole.



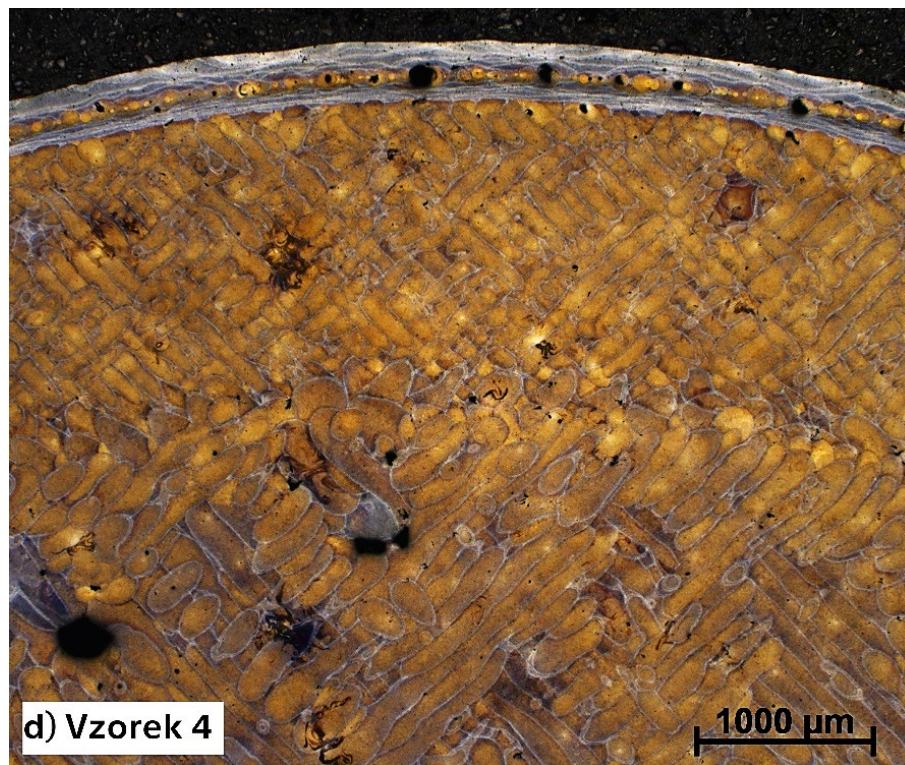
Obrázek 33 Struktura vzorku 1 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg



Obrázek 34 Struktura vzorku 2 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg



Obrázek 35 Struktura vzorku 3 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg



Obrázek 36 Struktura vzorku 4 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg

# Závěry

V rámci bakalářské práce byl testován vliv parametrů žíhání na odolnost proti opotřebení 3D tištěné slitiny AlSi10Mg. Při zkoušce Pin-on-Disk byly použity kuličky z oceli 100Cr6 a z tvrdokovu WC + Co.

Na základě výsledků lze konstatovat, že:

- Hodnoty koeficientu tření se při použití rozdílných kuliček a různých tepelných zpracování vzorků mění jen mírně.
- Vliv na výslednou tvrdost vzorků má spíše žíhací teplota a způsob ochlazení než délka výdrže na této teplotě.
- Nejvyšší koeficient tření i rychlost opotřebení má dle předpokladu nejměkčí vzorek 4 (TZ– 300 °C 2 hodiny).
- Byla prokázána závislost mezi odolností proti opotřebení a tvrdostí vzorků.
- Nebyla prokázána jednoznačná závislost materiálu kuličky na rychlosti opotřebení.
- Byl prokázán vliv metodiky hodnocení velikosti opotřebení na absolutní hodnoty této charakteristiky.
- Struktura vzorků se dle předpokladu skládá z orientovaných bazének nataveného kovu.
- Světelnou mikroskopií nebyly zjištěny žádné výraznější rozdíly ve struktuře vzorků v závislosti na tepelném zpracování.
- Cíle bakalářské práce byly splněny.

# Bibliografie

- [1] Metal 3D Printing: An Overview of the Most Common Types. *3D Printing* [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/metal/types-of-metal-3d-printing/>
- [2] REDWOOD, Ben. The Advantages of 3D Printing. *3D Hubs* [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing/#introduction>
- [3] ZYGUŁA, Krystian, Bartłomiej NOSEK, Hubert PASIOWIEC a Norbert SZYSIAK. Mechanical properties and microstructure of AlSi10Mg alloy obtained by casting and SLM technique. *World Scientific News*. 2018, 108, 462-472. ISSN 2392-2192.
- [4] Souhrnný katalog - Aditivní technologie. *Misan* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://www.misan.cz/pdf/-souhrnny-katalog---aditivni-technologie/>
- [5] EOS Aluminium AlSi10Mg. *EOS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: [https://cdn0.scrvt.com/eos/public/8837de942d78d3b3/4e099c3a857fdddca4be9d59fbb1cd74/EOS\\_Aluminium\\_AlSi10Mg\\_en.pdf](https://cdn0.scrvt.com/eos/public/8837de942d78d3b3/4e099c3a857fdddca4be9d59fbb1cd74/EOS_Aluminium_AlSi10Mg_en.pdf)
- [6] TAKATA, Naoki, Hirohisa KODAIRA, Keito SEKIZAWA, Asuka SUZUKI a Makoto KOBASHI. Change in microstructure of selectively laser melted AlSi10Mg alloy with heat treatments. *Materials Science and Engineering: A*. 2017, 704, 218-228. DOI: 10.1016/j.msea.2017.08.029. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509317310353>
- [7] DUDA, Thomas a L. RAGHAVAN. 3D Metal Printing Technology. *IFAC-PapersOnLine*. 2016, 49(29), 103-110. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.11.111.

ISSN 24058963. Dostupné z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896316325496>

- [8] What is 3D printing? The definitive guide. *3D Hubs* [online]. [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>
- [9] REDWOOD, Ben. Dimensional accuracy of 3D printed parts. *3D Hubs* [online]. [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/dimensional-accuracy-3d-printed-parts/#metal>
- [10] JONES, Gordon. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained. *ALL3DP* [online]. 2019 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>
- [11] The 9 Different Types of 3D Printers. *3D Insider* [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printer-types/>
- [12] Direct Metal Laser Sintering & Selective Laser Melting. *SPI Lasers* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.spilasers.com/application-additive-manufacturing/selective-laser-sintering-and-melting/>
- [13] Electron Beam Melting (EBM). *Additively* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/electron-beam-melting#read-chain>
- [14] GREGURIĆ, Leo. Electron Beam Melting (EBM) – 3D Printing Simply Explained. *ALL3DP* [online]. 2019 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/electron-beam-melting-ebm-3d-printing-simply-explained/>
- [15] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Introduction to Metal 3D printing. *3D Hubs* [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z:

<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing/>

- [16] What is 3D Printing?. *3D Printing* [online]. [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [17] The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing. *3Dnatives* [online]. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>
- [18] PEELS, Joris. Comparison of Metal 3D Printing — Part Two: Directed Energy Deposition. *3D Print* [online]. 2017 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://3dprint.com/182367/directed-energy-deposition/>
- [19] Directed Energy Deposition (DED). *Digital Alloys* [online]. 2019 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://www.digitalalloys.com/blog/directed-energy-deposition/>
- [20] Directed Energy Deposition. *Loughborough University* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>
- [21] Metal 3D Printing: What is Direct Energy Deposition?. *AMFG* [online]. 2018 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/09/27/metal-3d-printing-what-is-direct-energy-deposition/#>
- [22] MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. Děčín: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014. ISBN 978-80-260-7132-7.
- [23] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8.

- [24] SKOČOVSKÝ, Petr, Peter PALČEK, Radomila KONEČNÁ a Ladislav VÁRKOLY. *Konštrukčné materiály*. Žilina: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2000. ISBN 80-7100-608-4.
- [25] Tepelné zpracování. *ALUNET* [online]. [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/tepelne-zpracovani>
- [26] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [27] LORUSSO, Massimo, Alberta AVERSA, Diego MANFREDI, Flavia CALIGNANO, Elisa AMBROSIO, Daniele UGUES a Matteo PAVESE. Tribological Behavior of Aluminum Alloy AlSi10Mg-TiB<sub>2</sub> Composites Produced by Direct Metal Laser Sintering (DMLS). *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016, 25(8), 3152-3160. DOI: 10.1007/s11665-016-2190-5. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-016-2190-5>
- [28] Pin on Disk Test. *Tribonet* [online]. 2019 [cit. 2019-12-17]. Dostupné z: <https://www.tribonet.org/wiki/pin-on-disk-test/>
- [29] ASTM INTERNATIONAL. *ASTM G99 -17: Standard Teste Method for Wear testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. West Conshohocken, 2010.
- [30] NGO, Tuan, Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018, 143, 172-196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836817342944>
- [31] ZHAO, Lv, Juan SANTOS MACÍAS, Lipeng DING, Hosni IDRISI a Aude SIMAR. Damage mechanisms in selective laser melted AlSi10Mg under as built and different post-treatment conditions. *Materials Science and Engineering: A*. 2019, 764. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138210. ISSN



09215093.

Dostupné

z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509319309967>

- [32] *ČSN EN ISO 6507-1: Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Brusel, 2018.
- [33] Concept Laser M2. *Misan* [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <http://www.misan.cz/concept-laser/katalog-detail/m2-concept-laser-m2/?viewpart=1>
- [34] Olympus Stereo zoom microscope SZ61, for transmitted light stage, trinocular. *Optics - Pro* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.optics-pro.com/stereo-zoom-sets/olympus-stereo-zoom-microscope-sz61-for-transmitted-light-stage-trinocular/p,19322>
- [35] POLOCH, Adam. *Hodnocení mechanických vlastností při statickém a proměnlivém zatěžování niklové superslitiny Inconel 718 připravené pokročilou technologií DMLS*. Praha, 2019.. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.

# Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 Srovnání struktury 3D tištěného kovu při použití různých technologií [1].....	12
Obrázek 2 Princip metody SLM [11].....	13
Obrázek 3 Princip metody DMLS [16].....	14
Obrázek 4 Princip metody EBM [11].....	15
Obrázek 5 Metoda DED s kovovým drátem [19].....	16
Obrázek 6 Metoda DED s kovovým práškem [19].....	16
Obrázek 7 Schéma binárního rovnovážného diagramu Al-X [23].....	19
Obrázek 8 Průběh vytvrzování [25], upraveno pro BP.....	21
Obrázek 9 Schéma metody Pin-on-Disk [28].....	25
Obrázek 10 Srovnání rychlosti ztráty materiálu slévárenské a tištěné slitiny AlSi10Mg [27], upraveno pro BP.....	26
Obrázek 11 Vliv tepelného zpracování na strukturu 3D tištěné slitiny AlSi10Mg [6].....	27
Obrázek 12 Concept Laser M2 [33].....	29
Obrázek 13 Leštička a držák na vzorky.....	30
Obrázek 14 Tvrdoměr Zwick 3202.....	31
Obrázek 15 Tribometr CSM Instruments.....	31
Obrázek 16 Olympus DSX1000 (vlevo), Olympus ZS61 [34] (vpravo).....	32
Obrázek 17 Zeiss Observer Z1m [35].....	33
Obrázek 18 Porovnání tvrdostí vzorků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg v závislosti na TZ.....	36
Obrázek 19 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 1 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička 100Cr6.....	38
Obrázek 20 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 1 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička WC + Co.....	38
Obrázek 21 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 2 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička 100Cr6.....	39

Obrázek 22 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 2 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička WC + Co .....	39
Obrázek 23 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 3 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička 100Cr6.....	40
Obrázek 24 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 3 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička WC + Co .....	40
Obrázek 25 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 4 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička 100Cr6.....	41
Obrázek 26 Závislost koeficientu tření na počtu oběžných kol pro vzorek 4 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg, kulička WC + Co .....	41
Obrázek 27 Příklad opotřebení disku z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg.....	42
Obrázek 28 Rychlost ztráty materiálu disku z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg v závislosti na TZ a použité kuličce .....	43
Obrázek 29 Plocha průřezu drážek pro dané vzorky z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg .....	45
Obrázek 30 Příklad opotřebení kuliček 100Cr6 (vlevo) a WC + Co (vpravo)..	46
Obrázek 31 Rychlost ztráty materiálu kuliček v závislosti na typu kuličky a na tepelném zpracování vzorků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg .....	47
Obrázek 32 Srovnání pórovitosti vzorků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg v závislosti na TZ.....	48
Obrázek 33 Struktura vzorku 1 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg .....	49
Obrázek 34 Struktura vzorku 2 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg .....	50
Obrázek 35 Struktura vzorku 3 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg .....	50
Obrázek 36 Struktura vzorku 4 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg .....	51

# Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti hliníku při 20 °C [24].....	18
Tabulka 2 Srovnání chemického složení AlSi10Mg [3].....	22
Tabulka 3 Mechanické vlastnosti AlSi10Mg vytištěné metodou DLMS [5].....	24
Tabulka 4 Mechanické vlastnosti AlSi10Mg vytištěné metodou SLM [6].....	24
Tabulka 5 Označení vzorků.....	29
Tabulka 6 Výsledky zkoušky tvrdosti pro vzorek 1 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg .....	34
Tabulka 7 Výsledky zkoušky tvrdosti pro vzorek 2 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg .....	35
Tabulka 8 Výsledky zkoušky tvrdosti pro vzorek 3 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg .....	35
Tabulka 9 Výsledky zkoušky tvrdosti pro vzorek 4 z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg .....	36
Tabulka 10 Vyhodnocení koeficientu tření.....	42
Tabulka 11 Vyhodnocení opotřebení disků z 3D tištěné slitiny AlSi10Mg.....	43
Tabulka 12 Vyhodnocení opotřebení kuliček.....	47