

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vliv technologických parametrů na součásti vyrobené technologií DMLS

Influence of technological parameters on the quality of DMLS produced parts

Bakalářská práce

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, PhD.

Jaroslav Jirutka

Praha 2015

Vysoká škola: ČVUT v Praze

Fakulta: strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro Jaroslava Jirutku

obor Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Název: Vliv technologických parametrů na součásti vyrobené technologií DMLS

Název anglicky: Influence of technological parameters on the quality of DMLS produced parts

Zásady pro vypracování:

1. Přehled používaných aditivních technologií výroby.
2. Vstupy a parametry procesu laserového spékání kovů.
3. Zkušenosti s 3D tiskem materiálů: AISI 316L, Ti6Al4V, Inconel 718.
4. Vliv vybraných parametrů tisku na integritu součástí a mechanické vlastnosti.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V dne

.....

podpis

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá v teoretické části vybranými metodami technologie 3D tisku, jejich popisem a ukázkami možných výrobků daných technologií. Dále podává přehled o vlivu technologických parametrů tisku na mechanické vlastnosti a anizotropii tisknutého materiálu. V další části osvětluje možnosti tisknutých materiálů, podrobněji se zabývá materiály Inconel 718, Ti6Al4V a AISI 316L. V praktické části se zabývá podrobně technologií DMLS a zkoumáním vlivu technologického parametru focus level, což znamená posun hladiny ostrosti svazku laseru vůči hladině spékání, a vlivu orientace součásti při tisku na výslednou integritu materiálu, jeho anizotropii a jeho mechanické vlastnosti. Tištěným materiálem je nerezová ocel AISI 316L.

ANNOTATION

This thesis deals with the theoretical part, some methods of 3D printing technology, their descriptions and examples of possible products in the technology. Furthermore an overview of the impact of technological parameters of the printing on the mechanical properties and anisotropy of printed material. The next section explains the possibilities of printed materials, detailing the materials Inconel 718, AISI 316L and Ti6Al4V. The practical part deals with the DMLS technology in detail and examining the influence of technological parameter focus level, which represents a shift in the level of sharpness of the laser beam to the surface of sintering and influence of the orientation of components for printing on the integrity of the resulting material's anisotropy and its mechanical properties. Printed material is stainless steel AISI 316L.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce panu Ing. Liborovi Beránkovi, PhD. , dále panu Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi za veškeré poskytnuté odborné konzultace během práce, panu Ing. Davidovi Čvešperovi za odbornou konzultaci při zkoušce tahem a panu Ing. Františkovi Tatíčkovvi, PhD. za odbornou konzultaci při zkoušce rázem. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům za jejich psychickou a finanční podporu při studiu.

Obsah práce

1.	Úvod do aditivních technologií.....	1
2.	Používané technologie v průmyslu	2
2.1.	ink-jet printing	2
2.2.	stl-stereolitografie	2
2.3.	fdm-fused deposition modeling	3
2.4.	sls-selective laser sintering + dmls-direct metal laser sintering.....	4
2.5.	shs – selective heat sintering.....	5
2.6.	ebm-electron-beam melting	6
2.7.	lom – laminated object manufacturing	6
3.	Materiály.....	7
3.1.	Materiál Inconel 718.....	7
3.1.1.	Chemické složení:.....	8
3.1.2.	Mechanické vlastnosti:	8
3.1.3.	Porovnání mikrostruktury kovaného a tisknutého vzorku	9
3.2.	Materiál Ti6Al4V	9
3.2.1.	Chemické složení:.....	10
3.2.2.	Mechanické vlastnosti.....	10
3.2.3.	Porovnání mikrostruktury lisovaného, taženého a odlitého a tisknutého vzorku	11
3.3.	Materiál 1.4404, AISI 316L.....	13
3.3.1.	Chemické složení.....	13
3.3.2.	Mechanické vlastnosti.....	13
3.3.3.	Mikrostruktura	14
4.	Závislost procesních parametrů na konečných vlastnostech součástí.....	15
4.1.	Závislosti pevnosti v tahu na procesních parametrech.....	16
4.2.	Závislosti geometrické přesnosti na procesních parametrech.....	17
4.3.	Závislosti drsnosti povrchu na procesních parametrech.....	17
5.	Posouzení vlivu parametrů focus level a orientace při tisku na mechanické vlastnosti a anizotropii materiálu.....	19
5.1.	Měření přímosti a drsnosti	20
5.1.1.	Měření přímosti.....	20
5.1.2.	Měření drsnosti	22
5.2.	Zkouška tahem.....	25

5.3.	Zkouška rázem.....	28
5.4.	Měření tvrdosti.....	31
5.5.	Měření mikrotvrdosti.....	33
5.6.	Metalografie.....	34
6.	Závěr.....	36
7.	Zdroje.....	37
8.	Přílohy.....	40

1. ÚVOD DO ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ

Pojem „3D tisk“ neboli také aditivní výroba zahrnuje veškeré výrobní technologie určené k tisku trojrozměrných výrobků přímo z 3D modelu. Jedná se o nejvíce progresivní a velice perspektivní technologii v oboru strojírenství, především technologie DMLS. Princip této technologie spočívá v postupném kladení vrstev materiálu v práškovém polotovaru a jeho následném vytvrzování pomocí laseru. U jiných obměn 3D tisku materiál však může být také v podobě drátu navinutého na cívce, nejčastěji plastu, který se postupně odvíjí a skrze trysku je natavován a kladen do vrstev nebo v podobě fólie na svitku, která je také odvíjena a následně tepelně vytvrzována. Jedná se o jedinou technologii, kde se materiál přidává, nikoliv ubírá. Odpadá tak třískové hospodářství a řešení odpadních produktů. Výrobky mohou nabývat jakýchkoliv tvarů, avšak při tisku stěn pod úhlem by měly být použity podpěry. Problémy mohou nastat také při tvorbě dutin. Uzavřené dutiny nelze vyrobit z práškového polotovaru, protože by došlo k jejich uzavření a nemožnosti odstranit přebytečný materiál. Největší uplatnění nachází 3D tisk při výrobě prototypů v lékařství (implantáty apod.), šperkařství, automoto sport a letectví. Velikost tiskárny může nabývat od stolních rozměrů pro tisk malých plastových součástek až po velké strojírenské zařízení.



Obrázek 1- Stolní tiskárna pro tisk maloformátových plastových výrobků + ukázka možných výrobků

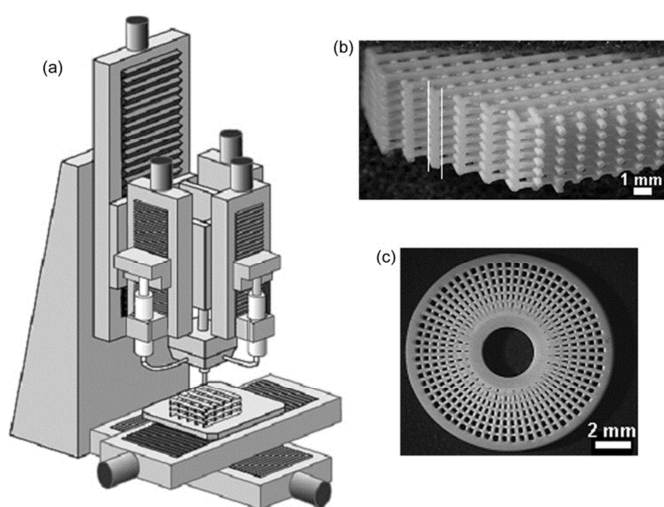


Obrázek 2 - Tiskárna pro použití v průmyslu

2. POUŽÍVANÉ TECHNOLOGIE V PRŮMYSLU

2.1. ink-jet printing

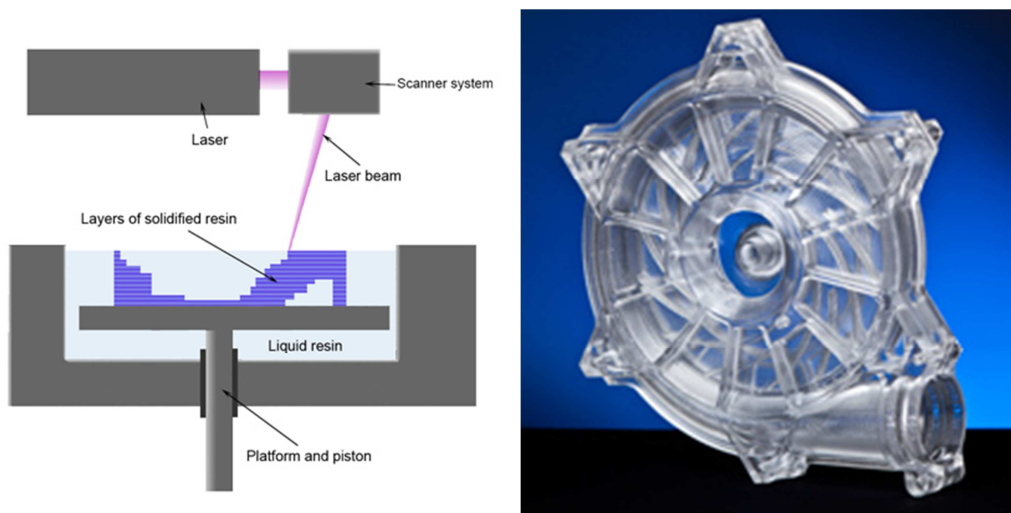
Ink-jet printing nebo také Direct Ink Writing je technologie, která spočívá ve vytlačování materiálu z trysky a postupném kladení vrstev. Umožňuje vyrábět velmi malé výrobky v řádech setin a tisícín milimetru. Materiálem bývají často polymery, polovodičové materiály, apod. Uplatnění této metody najdeme v elektronice, biochemii a podobných oborech. Vytlačování probíhá dvěma způsoby, a to buď stálým vytlačováním, nebo nanášením materiálu kapičku po kapičce. Objem kapky je okolo femtolitru. [1]



Obrázek 3 – schéma stroje + možné výrobky [1]

2.2. stl-stereolitografie

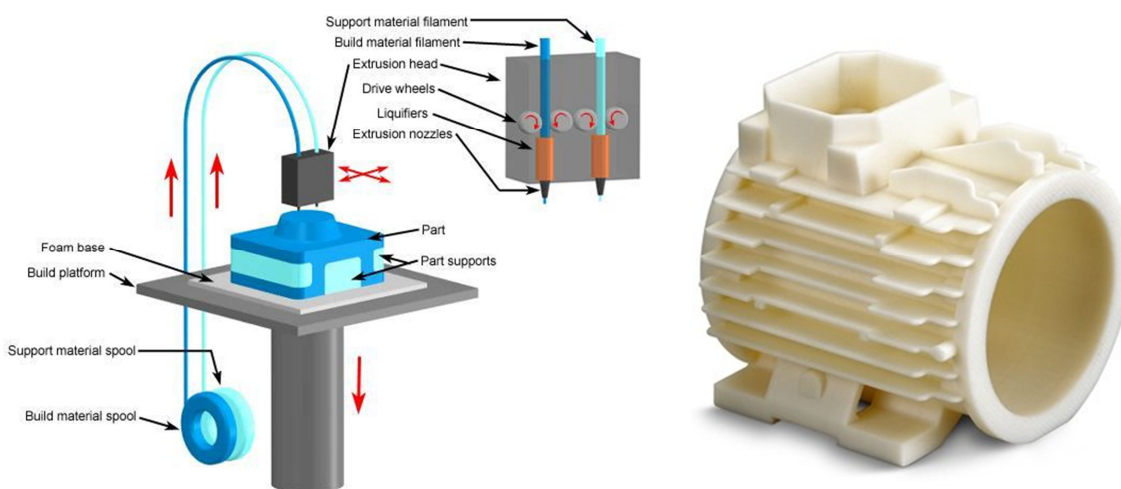
Stereolitografie je první a nejstarší technologie 3D tisku, od které se odvíjí celý rapid prototypingu. Jedná se o jednu z nejpřesnějších metod 3D tisku: teoretická přesnost odpovídá velikosti molekuly polymeru. Jako materiál se používá tekutý světlocitlivý fotopolymer, který po vystavení UV záření ztuhne (zpolymerizuje). Celá procedura se opakuje po vrstvách od 0,05 do 0,25 mm. Tisková hlava se pohybuje přes tiskovou plochu s nanesenou fotopolymerovou pryskyřicí a ozařuje ji na potřebných místech, kde tekutina ztuhne a postupně vyskládá celý 3D objekt. Po dokončení této fáze se přebytečná tekutina odstraní a z nádoby se vyjme finální výrobek. Výhody tohoto systému spočívají v přesnosti výroby. Nevýhodou stavby modelů je zejména nutnost vytvářet podpěry pod částmi objektu. Tím vzniká i potřeba dodatečného opracování modelu.[2]



Obrázek 4 – princip technologie STL + ukázka výrobku [3][20]

2.3.fdm-fused deposition modeling

Nejlevnější technologie 3D tisku na trhu. Princip této technologie je jeden z nejjednodušších, a proto i náklady jsou velmi nízké. Tento druh zásadním způsobem napomohl 3D tiskárnám, aby pronikly i k domácím uživatelům. Cena takového přístroje se pohybuje od 14000 do 70000 Kč, což je zlomek ceny ostatních přístrojů používaných v průmyslové výrobě. Přístroj funguje na principu plotru, který operuje ve třech osách. Materiál ve formě drátu se přivádí do tiskové hlavy. Tam se pomocí elektrické cívky taví do polotekutého stavu. Následně se pomocí trysky nanáší po vrstvách na podložku. Tloušťka vrstvy se pohybuje okolo 0,25mm. Tato technologie sice nenabízí kvalitu tisku jako jiné technologie, přesto si svou nízkou cenou získává stále více zájemců. Je dostupno nesčetně materiálů s odlišnými mechanickými vlastnostmi jako termoplasty (ABS), polykarbonát, polyamidy, polystyren, lignin, atd.[4]



Obrázek 5 – princip technologie FDM + ukázka výrobku [5][21]

2.4. SLS-selective laser sintering + DMLS-direct metal laser sintering

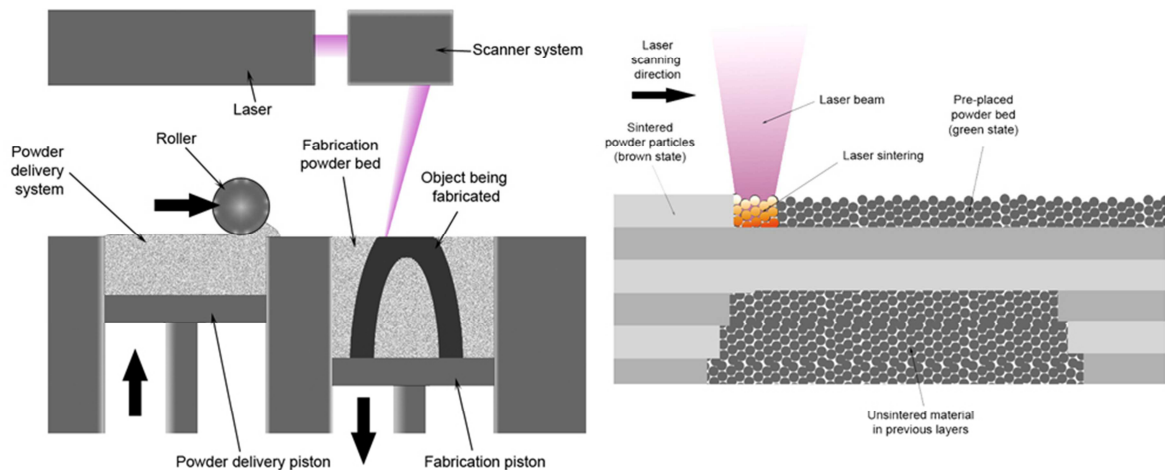
Základní princip se velmi podobá technologii STL, s hlavním rozdílem v použitém materiálu. Používají se různé druhy materiálu, u kterých je možnost skladovat jej v práškové podobě. Jako u STL, tak i zde se materiál umístí do nádoby a po tenkých vrstvách, tloušťky od 20 do 100 mikronů a působí na něj laserový paprsek. Rozdílem je, že laser nemusí být UV. Vysoká teplota prášek roztaví a vytvoří tak z něho pevnou hmotu výsledného výrobku. Přebytečný prášek se z přístroje odstraní a zůstane v něm jen hotový výrobek. U funkčních ploch však je nutná dokončovací operace z důvodů vysoké drsnosti a požadavků na přesnost. Tato technologie má několik výhod:

a/ možnost opětovného použití přebytečného materiálu a tím snížení nákladů na výrobu

b/ vysoká přesnost tisku

c/ možnost tisku nejenom kovu, ale i dalších materiálů jako plasty a keramika

d/ možnost barevných příměsí [6]



Obrázek 6 – princip technologie DMLS [6]

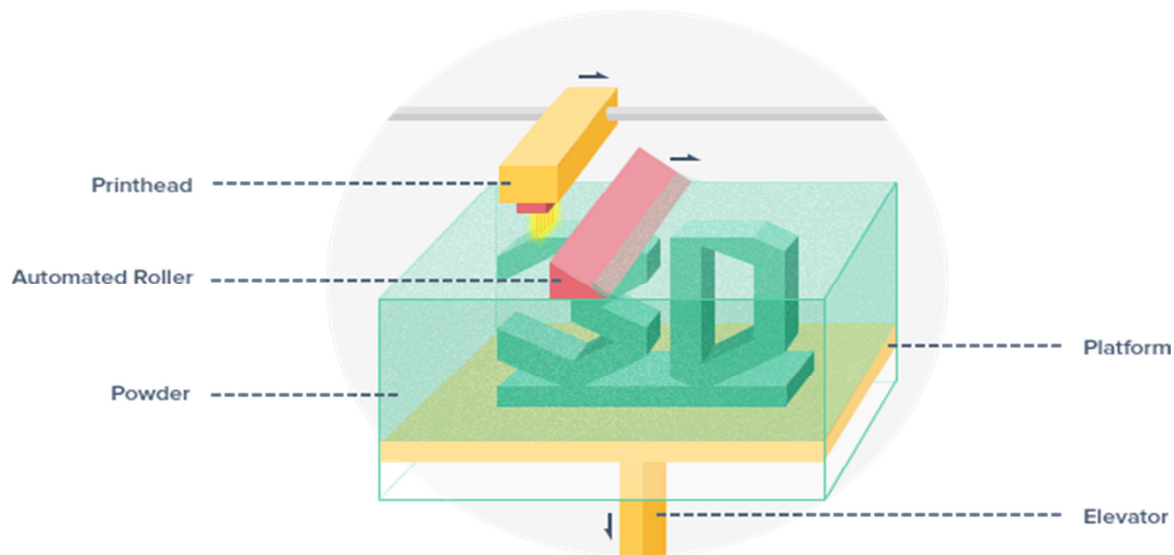
Na stavební paletě je nanese vrstva kovu rollerem ze zásobní palety (0,01-0,06 mm) v práškovém stavu. Poté proběhne vytvrzení paprskem laseru. Stavební paleta sjede o jednu vrstvu a roller opět nanese vrstvu kovu ze zásobovací palety na paletu stavební. Takto se cyklus opakuje do dokončení výrobku.



Obrázek 7 – ukázka možných výrobků technologií DMLS [7]

2.5. shs – selective heat sintering

SHS funguje na principu tepelné hlavy, která aplikuje teplo do vrstev práškového termoplastu. Když je vrstva dokončena, práškové lože se posune dolů a automatický zásobník přidá novou vrstvu materiálu, která je poté vytvrzena. SHS je nejlepší pro výrobu levných prototypů, fit&form a funkčnímu testování. Hlavní rozdíl je, že SHS využívá menší teplotu tisknoucí hlavy než laser, což z této technologie dělá levnější řešení a je schopné technologii zmenšit na desktopové velikosti. [8]



Obrázek 8 – princip technologie SHS [8]



Obrázek 9 - ukázka možných výrobků technologií SHS[22]

2.6. ebm-electron-beam melting

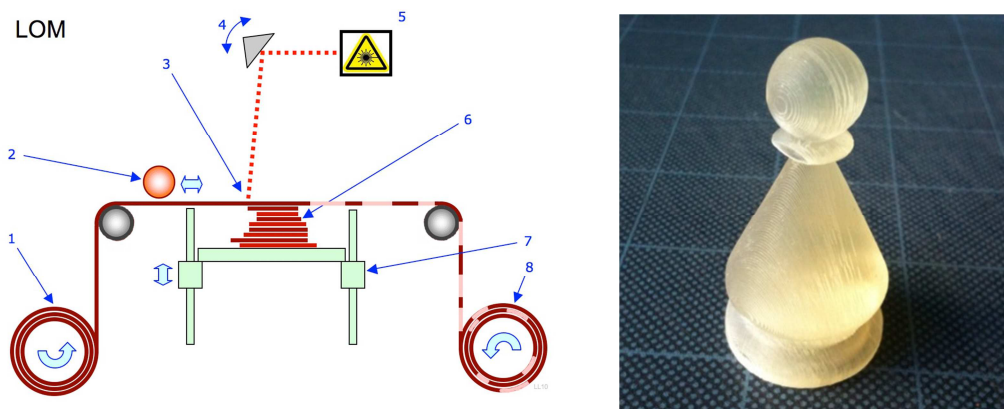
Výstavba modelů pomocí tavení kovového prášku (obvykle slitiny titanu) ve vrstvách pomocí paprsku elektronů ve vakuu. Velkou výhodou této technologie je výjimečná přesnost a vynikající technické vlastnosti vytištěných objektů. Technologie se využívá v automobilovém a strojírenském průmyslu, medicíně, její pořízení je však velmi nákladné. Zatímco výrobky vytisknuté pomocí SLS a DMLS potřebují další tepelná zpracování a dokončovací operace, EBM je vysoce přesná a zároveň rychlejší technologie, takže tyto nevýhody se u této technologie nevyskytují.[9]



Obrázek 10 – princip technologie EBM + ukázka lopatek vyrobených touto technologií [9][23]

2.7. lom – laminated object manufacturing

Celý princip spočívá ve vyřezávání a následném lepení vrstev objektu. Tvar každé vrstvy se vyřízne do tenké 0,2 mm fólie, na kterou se následně nanese vrstva lepidla. Na ni se postupně ukládají další vyřezané vrstvy lepené laminovacím lepidlem, až se z nich vytvoří celý objekt. Výhodou tohoto tisku jsou relativně nízké náklady na tvorbu a hlavně rychlost samotného stroje. Velkou nevýhodou je ale vznik přebytečného materiálu, který vzniká po vyříznutí každé z vrstev (zhruba 50 % odpadu).[10]



Obrázek 11 – princip technologie LOM + ukázka výrobku [10][24]

Laminated object manufacturing: 1 zásobník fólie. 2 zahřívací roller. 3 laserový paprsek. 4. zrcadlo. 5 laserová jednotka. 6 nanesené vrstvy. 7 pohybující se stůl. 8 odpad

3. MATERIÁLY

Polotovary pro technologie 3D tisku mohou nabývat různých podob. Pro tisk plastů jsou nejčastěji používány tzv. vytlačovací metody, kdy se polotovar ve formě plastového drátu, tzv. filamentu, postupně odvíjí z cívky. Pro tzv. sinterovací metody je nejčastěji polotovar ve formě kovového prášku. Může však být také ve formě fólie, která se postupně odvíjí a jednotlivé vrstvy jsou vytvrzovány laserem.

- **Polotovar ve formě drátu**

Termoplasty jako ABS nebo PLA, guma, modelovací hlína, silikon, porcelán, polymery

- **Polotovar ve formě prášku**

Téměř jakékoliv kovové slitiny včetně titanových, kobaltchromových slitin, nerez oceli, hliníku, keramiky, termoplastů.

- **Polotovar ve formě fólie**

Kovové a plastové fólie

3.1. MATERIÁL INCONEL 718

Inconel 718 je niklová slitina s vysokou teplotní odolností. Je ekvivalentní s UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664, W.Nr 2.4668, DIN NiCr19Fe19NbMo3. Po precipitačním vytvrzování je charakteristický výbornými vlastnostmi při namáhání na tah, má velmi dobrou mez únavy, mez pevnosti v tečení. Použitelnost se pohybuje do pracovní teploty až 700 °C. Také disponuje velmi dobrou korozní odolností v různorodých pracovních podmínkách. Tento materiál je vhodný pro mnoho vysokoteplotních aplikací jako součásti turbín, v elektrárnách, v letectví, v kosmonautice nebo jiné součásti zpracovatelského průmyslu. Inconel má rovněž dostatečnou vrubovou houževnatost za nízkých teplot a tak ho lze použít i na kryogenní aplikace. Standardní výrobní parametry používají úplné roztavení celé vrstvy, typicky 20 mikronů. Součásti vyrobené z Inconelu mohou být vytvrzovány až do 40-47 HRC (370-450 HB) pomocí precipitačního vytvrzování. V obou případech, pro vytvrzené i nevytvrzené, součásti mohou být obráběny, svařovány, povrchově upraveny apod.[7]

3.1.1. Chemické složení:

Tabulka 1: Chemické složení Inconelu 718

Prvek	Množství [%]
Ni	50-55
Cr	17-21
Fe	11,13-24,6
Ni	4,75-5,5
Mo	2,8-3,3
Ti	0,65-1,15
Al	0,2-0,8
Co	<1
Cu	<0,3
C	<0,08
Si, Mn	<0,35
P,S	<0,015

Hustota 8,2 g/cm³

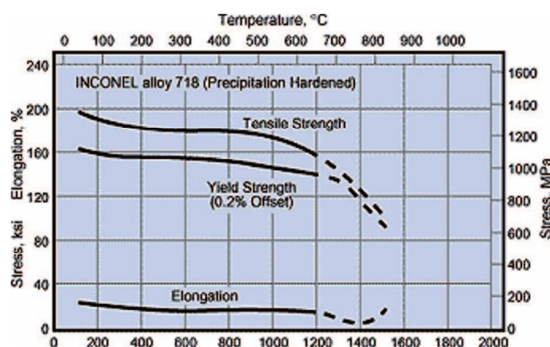
3.1.2. Mechanické vlastnosti:

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti Inconelu 718

	Bez tepelného zpracování	Tepelné zpracování 1*	Tepelné zpracování 2**
Mez pevnosti	980 ± 50 MPa	1400 ± 100 MPa	1384 ± 100 MPa
Mez kluzu(Rp 0,2%)	634 ± 50 MPa	1150 ± 50 MPa	1239 ± 100 MPa
Tažnost	31 % ± 3 %	15 % ± 3 %	15 % ± 3 %
Tvrдость	cca 30 HRC	cca 47 HRC	cca 43 HRC
Modul pružnosti	170 ± 20 GPa		

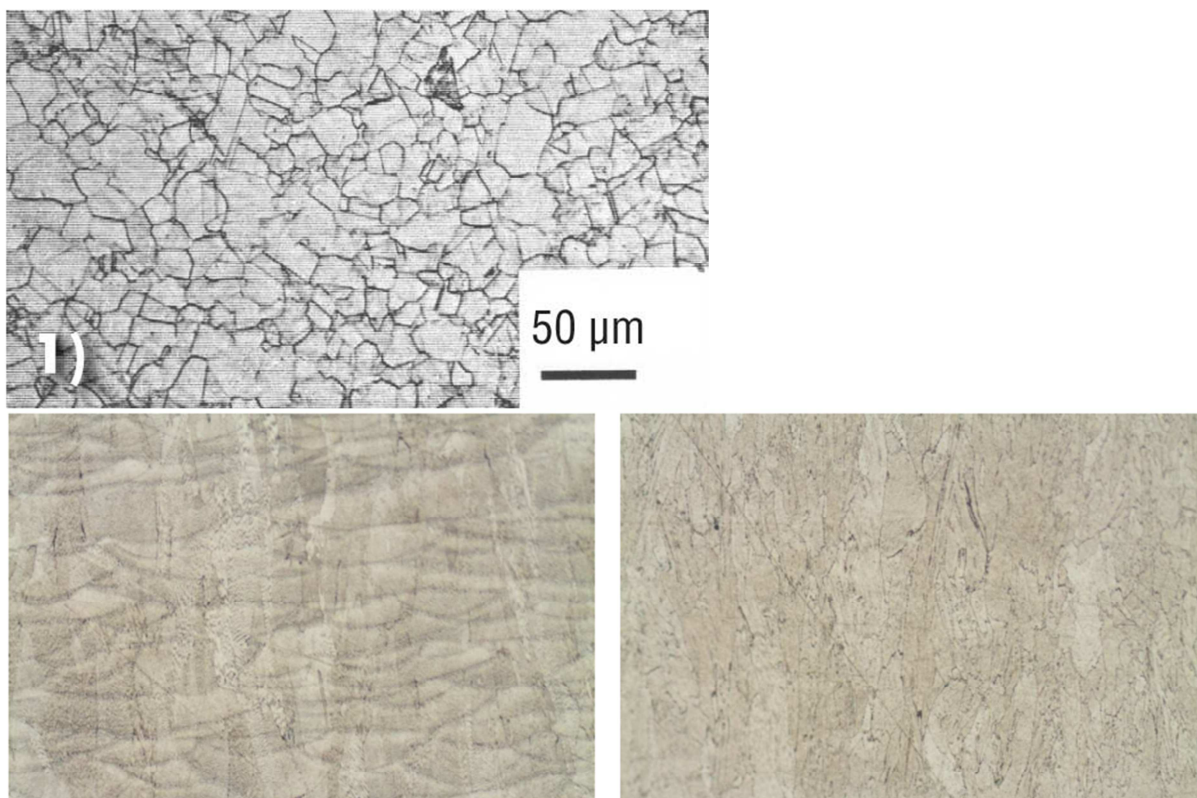
*Tepelné zpracování 1 – 1/ žíhání při 980 °C, výdrž 1 hodinu, chlazeno vzduchem/argonem
2/stárnutí, výdrž na 720 °C 8 hodin, zchlazení na 620 °C během dvou hodin, poté 8 hodinová výdrž při 620 °C, chlazeno vzduchem/argonem

**Tepelné zpracování 2 - 1/ žíhání při 1065 °C, výdrž 1 hodinu, chlazeno vzduchem/argonem
2/ stárnutí, výdrž na 760 °C 10 hodin, zchlazení na 650 °C během 2 hodin, výdrž na 650 °C 8 hodin, chlazeno vzduchem/argonem[7]



Obrázek 12 - závislost meze kluzu, napětí v tahu a prodloužení na pracovní teplotě [11]

3.1.3. Porovnání mikrostruktury kovaného a tisknutého vzorku



Obrázek 13 – nahoře mikrostruktura kovaného Inconelu, vlevo mikrostruktura bezprostředně po tisku, vlevo po vyžhání [12] [13]

Na levém obrázku jsou zřejmé linie laseru po tisku. Vlevo po tepelném zpracování. Můžeme vidět, že materiál má nulovou porezitu, je zcela homogenní, zmizely také linie po spékání.

3.2. MATERIÁL Ti6Al4V

Nejpoužívanější a nejdostupnější titanová slitina. Je velmi známá svou nízkou hustotou a zároveň výbornými mechanickými vlastnostmi a korozní odolností, kombinovanou s biokompatibilitou. Tento materiál je ideální pro mnoho aplikací s nároky na vysokou kvalitu, např. letecký průmysl, sportovní auta, ale také např. lékařské implantáty. Součásti mohou být také obráběny, svařovány popř. povrchově upravovány nebo povlakovány. Maximální pracovní teplota by neměla přesáhnout 350 °C z důvodů creepové odolnosti slitiny. Přebytný prášek z tiskárny lze znovu použít. Velikost částic v prášku je od 45 do 100 mikronů. [7]

3.2.1. Chemické složení:

Tabulka 3: Chemické složení Ti6Al4V

Prvek	Množství [%]
Ti	88,4-91
Al	5,5-6,5
V	3,5-4,5
C	<0,08
Fe	<0,25
O	<0,2
N	<0,05
H	<0,012

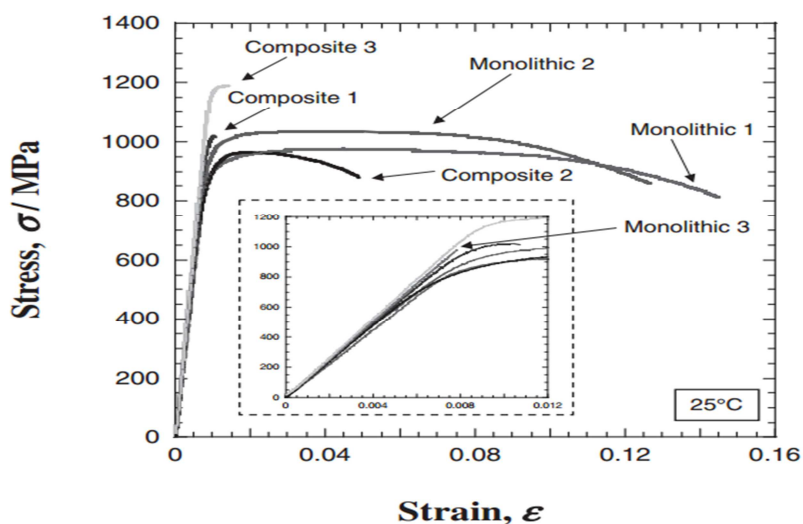
Hustota 4,43 g/cm³

3.2.2. Mechanické vlastnosti

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti Ti6Al4V

Mez pevnosti	1150 ± 60 MPa
Mez kluzu (Rp 0,2%)	1030 ± 70 MPa
Tažnost	11 ± 2%
Youngův modul pružnosti	110 ± 7 GPa
Tvrdość	36 HRC

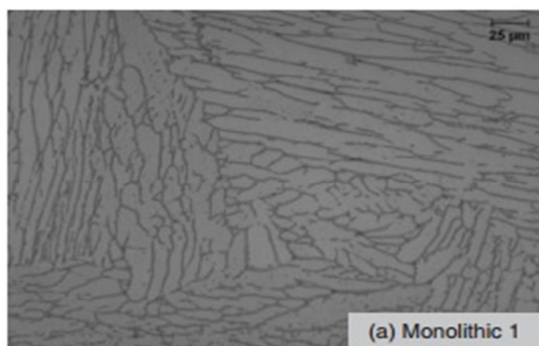
Tyto vlastnosti jsou dosaženy po tepelném zpracování, žhání, pro snížení vnitřního pnutí, při které se součást zahřeje na 650 °C během 1 hodiny, výdrž se pohybuje mezi 1 až 4 hodinami (v závislosti na velikosti součásti), pak se dále nezahřívá, od 300 °C se chladí samovolně vzduchem. [7]



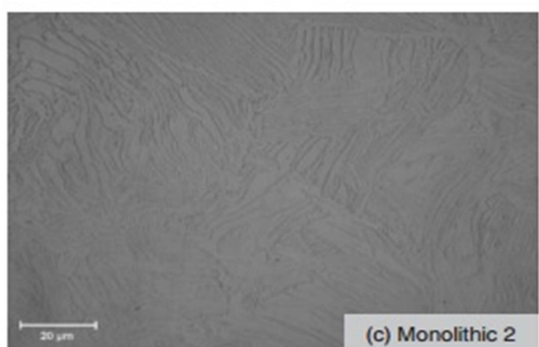
Obrázek 14 – smluvní tahový diagram pro Ti6Al4V [14]

Křivky Monolithic 1,2,3 odkazují na níže uvedené technologie zpracování podle obrázku 15. Křivky Composite 1,2,3 se týkají materiálu Ti6Al4V obohaceného o 7,5 % TiC a W. [14]

3.2.3. Porovnání mikrostruktury lisovaného, taženého a odlitého a tisknutého vzorku



a/ zpracování HIP – hot isostatic pressing



b/ zpracováno technologií tažení



c/ technologie lití

Obrázek 15 – ukázka rozdílných struktur při použití různých technologií zpracování[14]

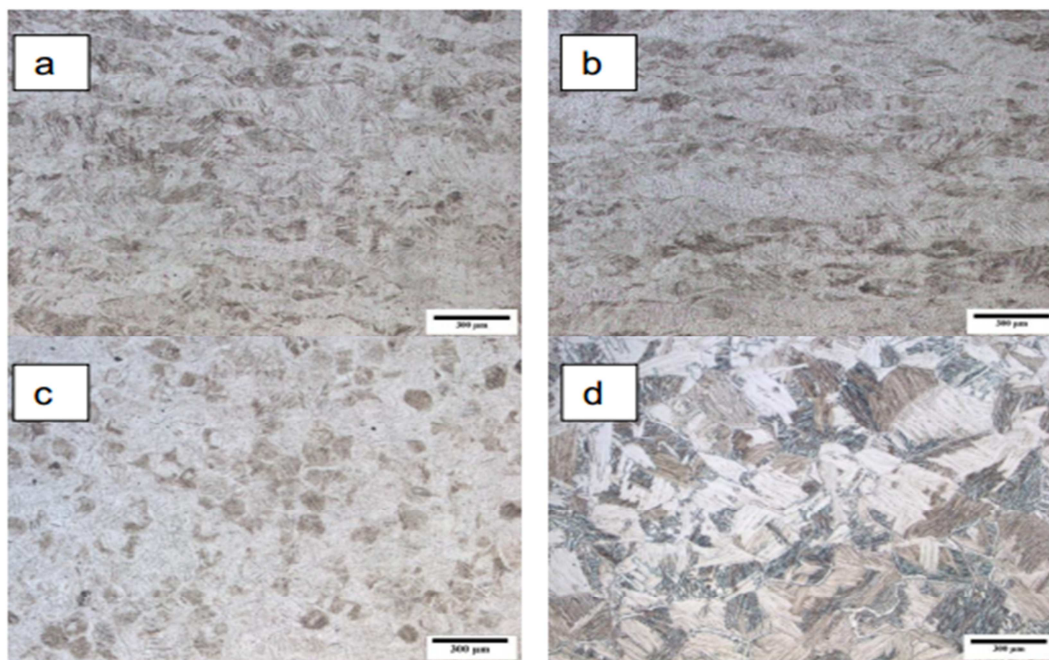
Tento obrázek demonstruje ukázkou vlivu technologie zpracování materiálu na výslednou mikrostrukturu.

Nahoře mikrostruktura po technologii hot isostatic pressing, což je technologie lisování při zvýšené teplotě v tekutině (často argon nebo helium), přičemž podle Pascalova zákona pracovní médium přenáší tlak na součást rovnoměrně ze všech stran.

Vprostřed mikrostruktura dosáhnutá po tažení za studena.

Dole mikrostruktura odlitku.

V konečném důsledku má mikrostruktura významný vliv na konečné mechanické vlastnosti a anizotropii součásti.



Obrázek 16 – ukázka mikrostruktury Ti6Al4V vyrobeného technologií DMLS v různých rovinách řezu v závislosti na rovině tisku [15]

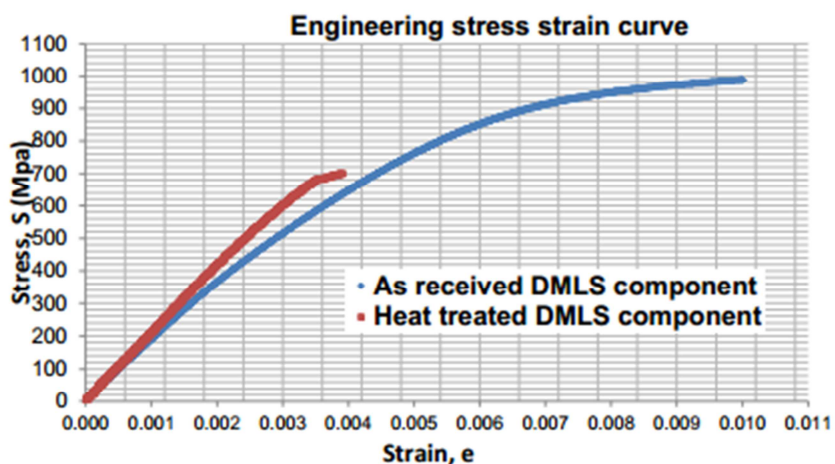
a/ řez v rovině vrstvy tisku

b/ řez v podélné rovině

c/ řez v příčné rovině

d/ ukázka změny struktury po tepelném zpracování, výdrž 20 hodin při teplotě 1200 °C

Z výše uvedených mikrostruktur je patrné, že na mechanické vlastnosti as-built součásti bude mít vliv orientace stavby. Tomu můžeme předejít dalším tepelným zpracováním po tisku. [15]



Obrázek 17 – smluvní tahový diagram Ti6Al4V vyrobeného technologií DMLS [15]

Tento smluvní tahový diagram demonstruje ukázkou vlivu tepelného zpracování na konečné mechanické vlastnosti. Modrá křivka je ihned po tisku a červená je po dalším zpracování (výdrž 20 hodin při 1200 °C). [15]

3.3. MATERIÁL 1.4404, AISI 316L

Tato ocel vychází ze základní nerez oceli 1.4301, AISI 304. Jedná se o nerezovou nízkouhlíkovou ocel, která má všeobecné využití v průmyslu strojním, stavebním i potravinářském. Je dobře svařitelná i obrobitelná právě díky nižšímu obsahu uhlíku. Nižší obsah uhlíku má také příznivý dopad na odolnost proti mezikrystalové korozi v oblasti kritických teplot 400 až 800 °C. V důsledku toho nedojde v tomto rozsahu teplot ke sloučení chromu s uhlíkem a vytvoření karbidu chromu na hranicích zrn, a tak nevznikají oblasti, které by byly ochuzeny právě o korozivzdorný chrom (zůstává v tuhém roztoku). Vyznačuje se dobrými mechanickými vlastnostmi při lisování, ohýbání a tažení. [16]

3.3.1. Chemické složení

Tabulka 5: Chemické složení 1.4404 [16]

Prvek	Množství [%]
C	< 0,03
Cr	16,50 – 18,50
Ni	10 - 12
Mo	2 – 2,5
Si	< 1
Mn	< 2
P	< 0,045
S	< 0,03
N	< 0,11

Hustota 7,98 g/cm³

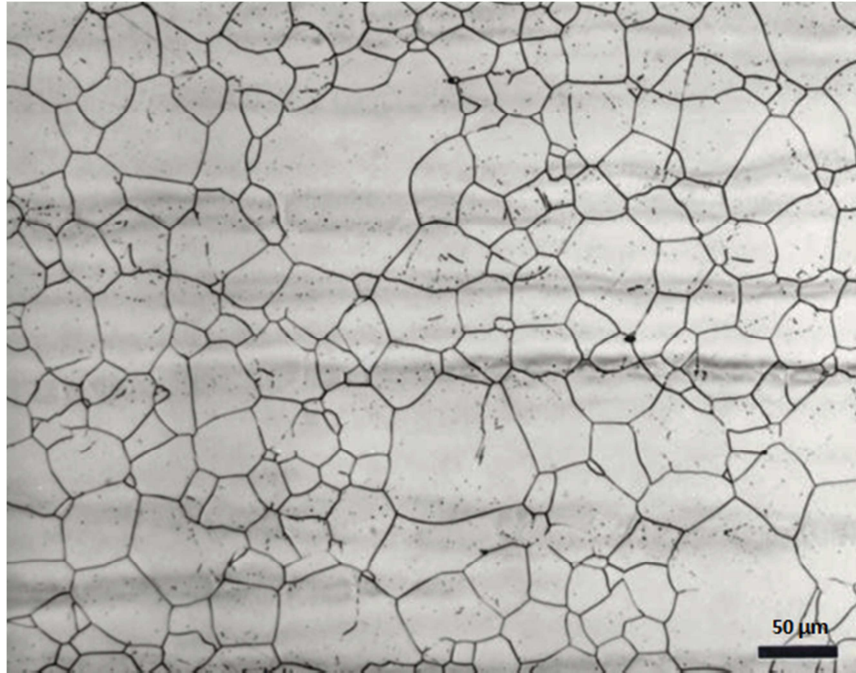
3.3.2. Mechanické vlastnosti

Tabulka 6: Mechanické vlastnosti 1.4404 po tepelném zpracování (polotovar tyčovina tažená za studena)* [17]

Mez kluzu	470 MPa
Mez pevnosti v tahu	570 MPa
Tažnost	> 40 %
Tvrдость	150 – 200 HV
Modul pružnosti	200 GPa

* Tepelné zpracování – žihání při 1020 – 1080 °C, výdrž 15 – 60 minut, chlazeno vodou [17]

3.3.3. Mikrostruktura



Obrázek 18 – mikrostruktura taženého AISI 316L za studena [18]

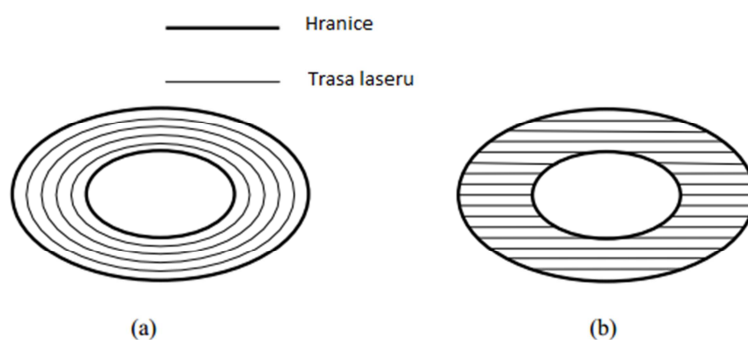
V této mikrostruktuře můžeme vidět typické ostré tvary zrn. Materiál je zcela homogenní, s nulovou porezitou.

4. ZÁVISLOST PROCESNÍCH PARAMETRŮ NA KONEČNÝCH VLASTNOSTECH SOUČÁSTI

U technologie 3D tisku je několik procesních parametrů, které ovlivňují několik konečných vlastností, stejně jako u ostatních technologií. Zde mluvíme zde o závislosti

Způsob řádkování laseru
Orientace součásti při tisku
Hustota řádkování
Tloušťka vrstvy
Rychlost tisku
Výkon laseru

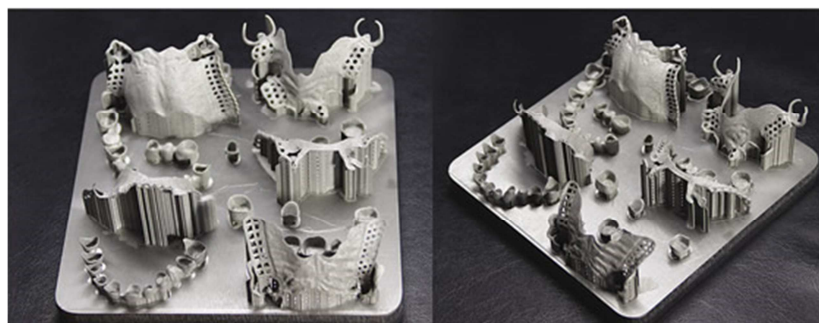
Moje práce se zaměřuje především na posouzení vlivu technologického parametru „Focus level“, což je parametr, který udává posun hladiny ostrosti svazku laseru vůči hladině spékání a orientace součásti při tisku. Nutno podotknout, že se o parametru focus level moc nemluví, nicméně firma, která dala za vznik mých zkušebních těles, tento parametr považuje za důležitý.



Obrázek 19 – možné způsoby řádkování laseru [20]

a) spirálová, b) paralelní [19]

Co se týče možností způsobů řádkování, existují ještě další, např. tzv. stavba do šachovnice. Způsob řádkování ovlivňuje především rozložení tepla v součásti během tisku. Běžně laser přeskakuje z jedné oblasti do druhé, aby nedocházelo k nadměrnému tepelnému zatěžování pouze v jedné oblasti součásti.

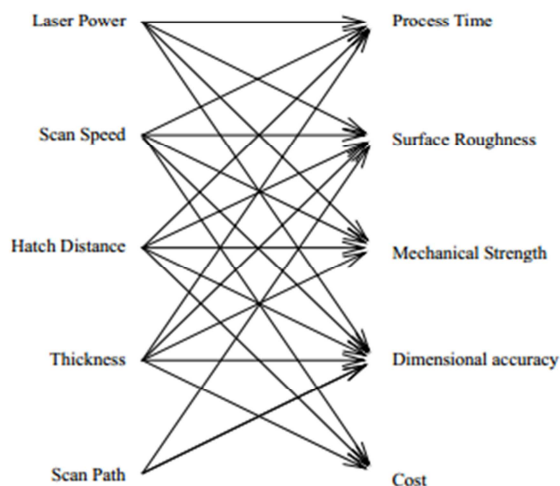


Obrázek 20 – ukázka zubních implantátů na stavební paletě [25]

Orientace má také vliv na množství tisknutých výrobků a s tím spojenou produktivitu práce.

Process Parameters

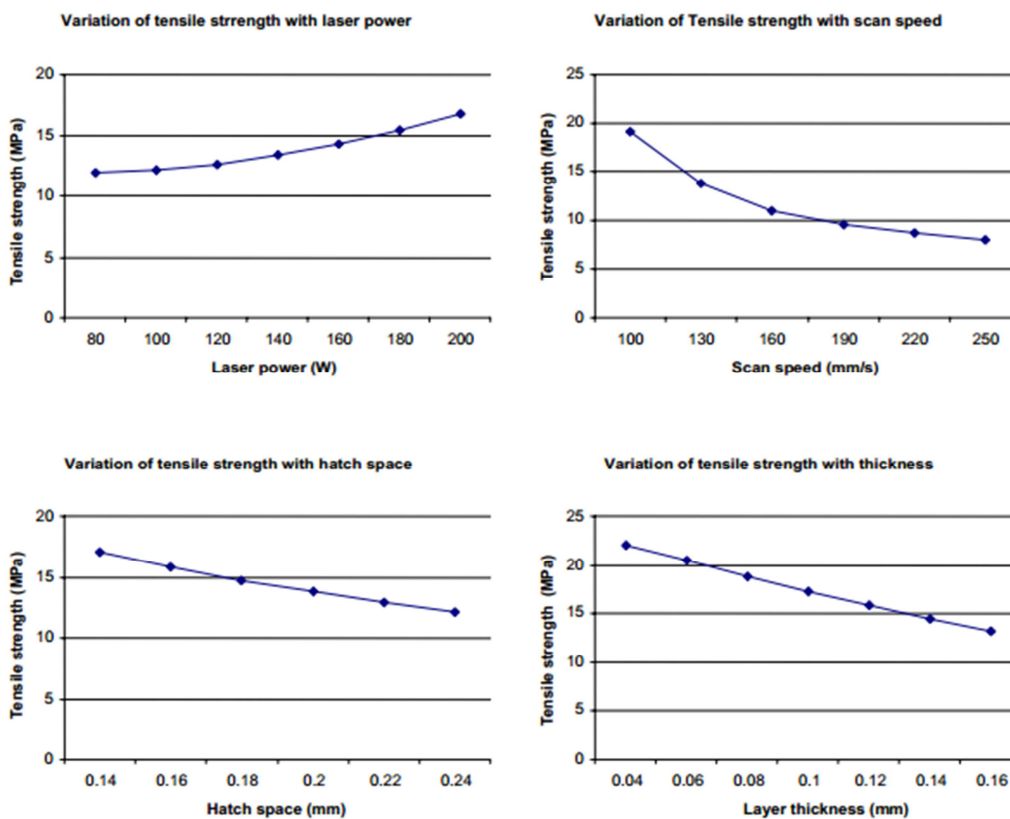
Resulting Properties



Obrázek 21 – provázanost procesních parametrů s konečnými vlastnostmi [19]

Z tohoto obrázku je zřejmé, že nelze jednoznačně říct, že by některý parametr převažoval nad druhým. Provázanost je natolik komplexní, a tak se snažíme vždy nalézt optimální technologické nastavení pro dosažení co nejlepších výsledků s přihlédnutím na oblast aplikace součásti. Můžeme však říct, že technologické parametry mají ve výsledků vliv na produktivitu práce, geometrii součásti, mechanické vlastnosti a také cenu.

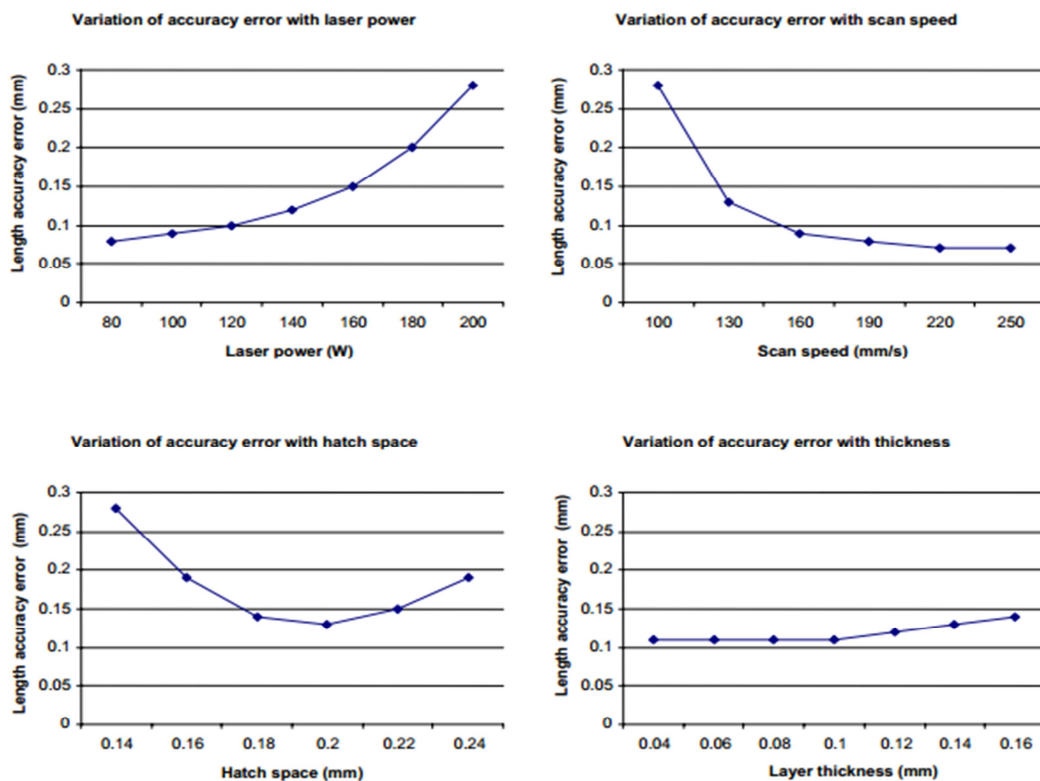
4.1. závislosti pevnosti v tahu na procesních parametrech



Obrázek 22 – vliv vybraných parametrů na pevnost v tahu [19]

Z této kombinace grafů je zřejmé, že největší pevnosti v tahu dosáhneme největším výkonem laseru, nejnižší rychlostí laseru, nejhustším řádkováním a nejmenší tloušťkou vrstvy.

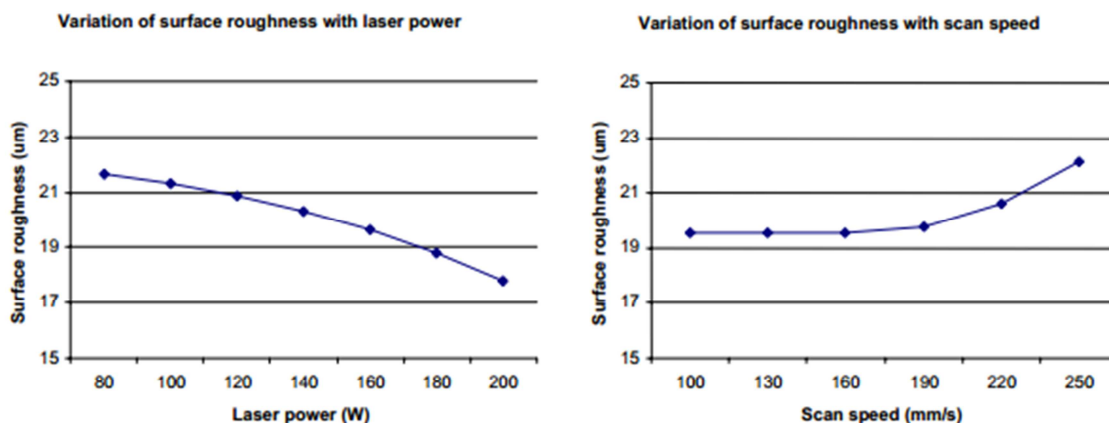
4.2. závislosti geometrické přesnosti na procesních parametrech

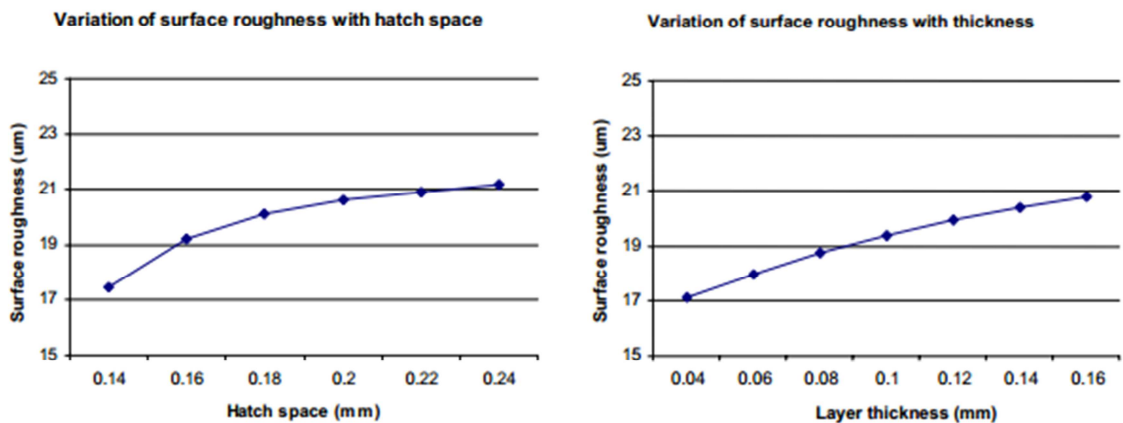


Obrázek 23 – vliv vybraných parametrů na geometrickou přesnost [19]

Největší geometrické přesnosti součásti bychom dosáhli nejmenším výkonem laseru, největší rychlostí laseru, určitým kompromisem v řádkování a nejmenší tloušťkou vrstvy, která však geometrickou přesnost ovlivňuje pouze zanedbatelně. Nutno však podotknout, že funkční plochy je stejně nutné doobrobit z důvodu drsnosti a také přesnosti.

4.3. závislosti drsnosti povrchu na procesních parametrech





Obrázek 24 – vliv vybraných parametrů na drsnost povrchu [19]

Drsnost povrchu je sporným tématem, jelikož technologií 3D tisku nikdy nedosáhneme natolik uspokojivých výsledků. Funkční plochy je vždy nutno doobrobit z důvodů požadavků na přesnost a právě drsnost. Průměrně se dosažitelná Ra pohybuje v rozmezí od 10 do 14 µm.

Tabulka 7: Rozsah pracovních parametrů DMLS stroje

EOSINT M270 (3 off) - Metal Sintering Machine	
Typ laseru:	Yb-fibre laser, 200 W
Tloušťka vrstvy v závislosti na materiálu:	20 - 60 µm
Efektivní prostor stavby (včetně výstavbové platformy):	250mm x 250mm x 215mm
Rychlost stavby v závislosti na materiálu:	2 - 20 mm/s
Rychlost řádkování:	až do 7.0 m/s
Průměr ostření laseru:	100 - 500 µm

Uvedeno podle výrobce 3T RPD

Doporučené hodnoty pro tisk Inconelu 718 jsou: tloušťka vrstvy 20 µm
 rychlost stavby 2 mm³/s
 doporučená minimální tloušťka stěny je 0,4 mm

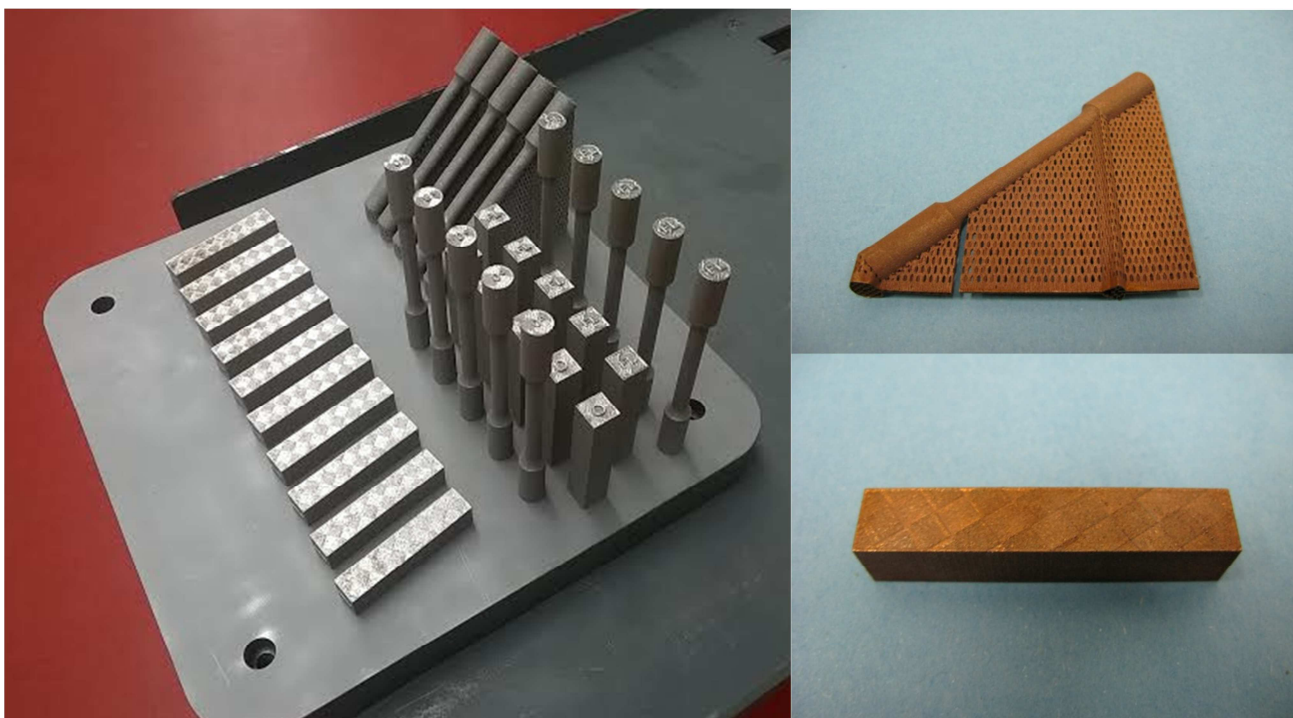
Doporučené hodnoty pro tisk Ti6Al4V jsou : tloušťka vrstvy 30 µm
 rychlost stavby okolo 3 mm³/s
 doporučená minimální tloušťka stěny 0,8 mm

[7]

Tato tabulka demonstruje ukázkou technologických možností DMLS tiskárny EOSINT M270. EOSINT je v dnešní době nejvíce produktivní výrobce v oblasti 3D tisku, a sice technologie DMLS.

5. POSOUZENÍ VLIVU PARAMETRŮ FOCUS LEVEL A ORIENTACE PŘI TISKU NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI A ANIZOTROPII MATERIÁLU

Cílem mé práce bylo zhodnotit vliv technologických parametrů tisku, a sice parametr focus level a orientace součásti při tisku na výsledné mechanické vlastnosti a anizotropii tisknutého materiálu. Tisknutým materiálem byla v mém případě nerezová ocel označována 1.4404, nebo také AISI 316L. Vzorčky byly vytištěny ve spolupráci s firmou Misan na stroji M2 cusing od firmy ConceptLaser. Jedná se o stroj pro stavbu z titanových, hliníkových, ocelových a dalších kovových slitin, případně čistých kovů.



Obrázek 25

Vlevo vzorky přímo po tisku na stavební paletě. Vpravo po odřezání od stavební palety a vyžhání.

Tato pro nerezky typická náběhová barva je způsobena žháním.

Technologické parametry stavby

Tloušťka vrstvy	30 um
Expozice plochy	200 W, 800 mm/s
Expozice kontury	180 W, 1600 mm/s
Focus level (FL)	-3 mm, 0 mm - zkoumání vlivu tohoto technologického parametru tisku
Tloušťka svazku	0,15 mm
Překryv svarů	$0,15 * \text{Tloušťka svazku} = 0,15 * 0,15 = 0,225 \text{ mm}^2$

Tabulka 8: Sady vytisknutých zkušebních těles

Orientace tisku	Zkušební tělesa	Focus level	Počet kusů
Horizontální	Rázová tělesa	-3 mm	10
Vertikální	Rázová tělesa	-3 mm; 0 mm	5; 5
	Tahová tělesa	-3 mm; 0 mm	5; 5
Pod úhlem 45°	Tahová tělesa	-3 mm	5

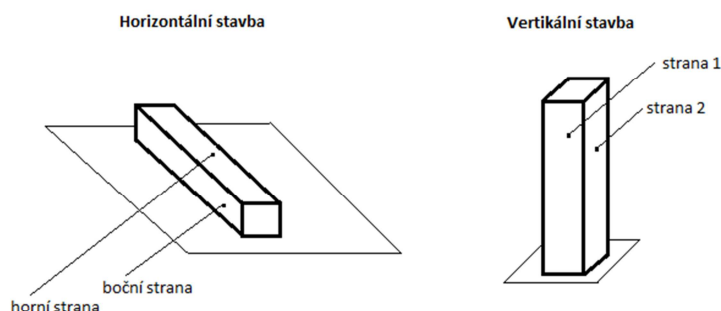
Dohromady bylo vyrobeno 20 kusů těles pro zkoušku rázem a 15 kusů těles pro zkoušku tahem. Vzorky se lišily od sebe orientací tisku a také parametrem focus level, což udává posun hladiny ostrosti svazku laseru vůči hladině spékání. Parametr focus level nabýval dvou hodnot, a sice $FL = 0$ mm a $FL = -3$ mm. Co se týče orientace stavby, tělesa pro zkoušku rázem byla zhotovena jednak ve vertikálním směru a jednak ve směru horizontálním. Tělesa pro zkoušku tahem byla zhotovena ve vertikálním směru a pod úhlem 45°.

5.1. MĚŘENÍ PŘÍMOSTI A DRSNOSTI

Měření probíhalo na profiloměru MahrXCR20, což je kombinovaný přístroj pro měření profilu povrchu a kontury. Měření probíhalo za pokojové teploty $t = 20$ °C.

5.1.1. Měření přímosti

Přímost byla měřena na všech typech zkušebních těles, tzn. vzorky pro zkoušku rázem horizontální, vertikální ($FL = 0$, $FL = -3$ mm), vzorky pro zkoušku tahem pod úhlem, vertikální ($FL = 0$, $FL = -3$ mm). U horizontálních vzorků pro zkoušku rázem se též měřila přímost vzhledem k orientaci rovinám tisku (shora – rovina tisku, zboku – kolmo k rovinám tisku). Vyhodnocovaná délka je 50 mm.

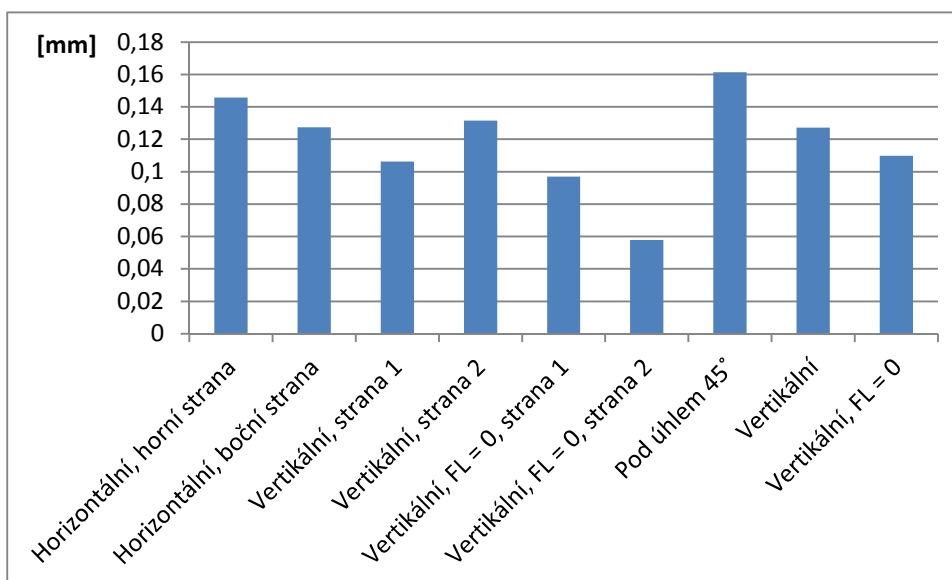


Obrázek 26 – orientace těles při měření drsnosti a přímosti

Tabulka 9: Naměřená data přímosti

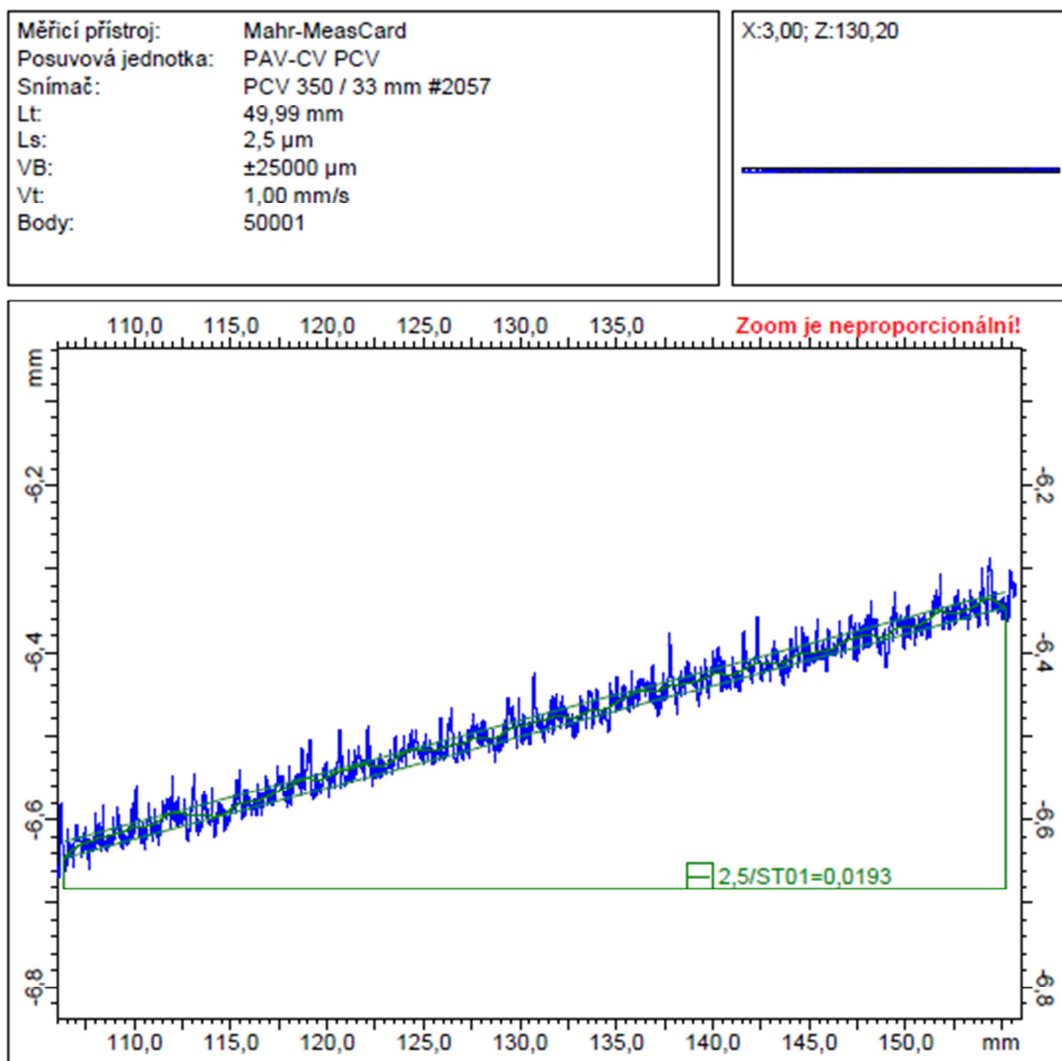
Zkušební těleso	Orientace tisku	Přímost [mm]
Zkouška rázem v ohybu	Horizontální, horní strana	0,1457
	Horizontální, boční strana	0,1274
	Vertikální, strana 1	0,1062
	Vertikální, strana 2	0,1316
	Vertikální, FL = 0, strana 1	0,0969
	Vertikální, FL = 0, strana 2	0,0578
Zkouška tahem	Pod úhlem 45°	0,1614
	Vertikální	0,1271
	Vertikální, FL = 0	0,1097
	Průměrná hodnota přímosti	0,1182

Veškeré protokoly z měření přímosti v příloze.



Obrázek 27 – sloupcový graf z naměřených dat přímosti

Podle grafu na obrázku 27 můžeme vidět, že nejlepších výsledků přímosti dosahuje vzorek vertikální vzorek s parametrem focusl level = 0 mm. Naopak nejhorších výsledků přímosti dosahuje těleso pro tahovou zkoušku, tištěný pod úhlem 45°.



Obrázek 28 – ukázka protokolu z měření přímosti s filtrovanou drsností

5.1.2. Měření drsnosti

Drsnost byla měřena na každém typu ze zkušebních těles, a sice vždy 3x na jednom tělese, z čehož vychází průměrné hodnoty v tabulce níže. Drsnost byla měřena dle ČSN ISO 4287, $\lambda_c = 2,5$ mm, měřeno na 5ti základních délkách, ± 1 základní délka před a po.

Byly měřeny parametry Ra – průměrná drsnost

Rz – celková výška profilu

Rt – největší výška profilu

Rp – největší výška výstupku

Rv – největší hloubka prohlubně

Rsm – průměrná šířka prvku profilu

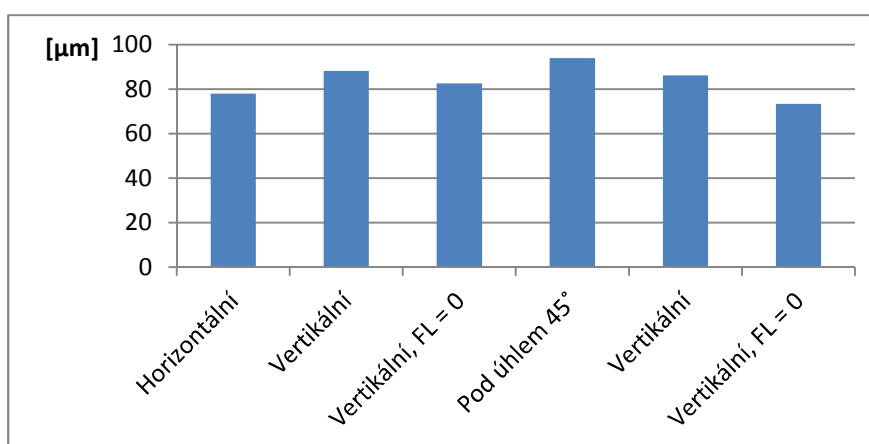
Rsk – šikmost profilu

Rku – špičatost profilu

Tabulka 10: Průměrná naměřená data drsnosti

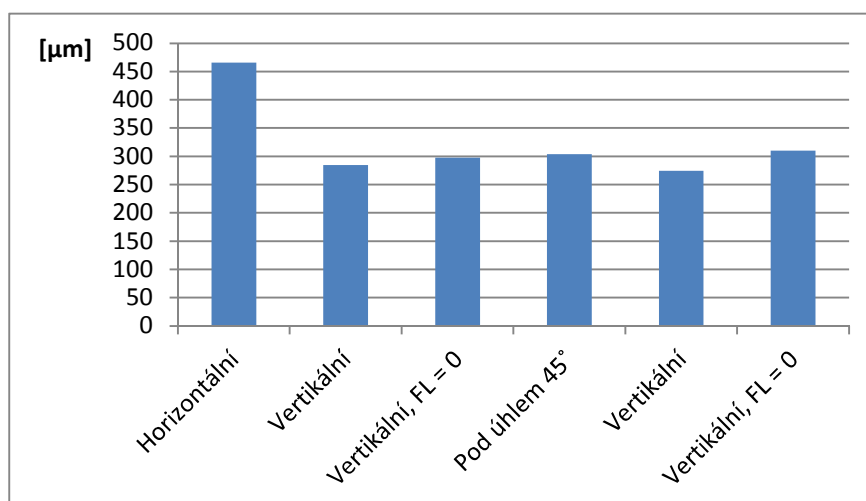
		Drsnost [μm]							
Zkušební těleso	Orientace	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
Rázové	Horizontální	12,135	77,988	106,26	40,67	37,32	466,01	0,32	3,89
	Vertikální	13,755	88,201	115,14	46,20	42,0	284,79	0,28	3,41
	Vertikální, FL = 0	12,748	82,518	95,32	44,28	38,23	297,45	0,32	3,28
Tahové	Pod úhlem 45°	16,09	93,957	126,01	53,68	40,28	303,75	0,64	3,67
	Vertikální	13,649	86,168	101,41	46,60	39,57	274,66	0,42	3,20
	Vertikální, FL = 0	12,280	73,396	91,17	35,93	37,47	310,1	0,11	2,85
Průměrné hodnoty drsností		13,442	83,70	105,885	44,56	39,145	322,79	0,348	3,38

Veškeré protokoly z měření drsnosti v příloze



Obrázek 29 – sloupcový graf z naměřených hodnot Rz

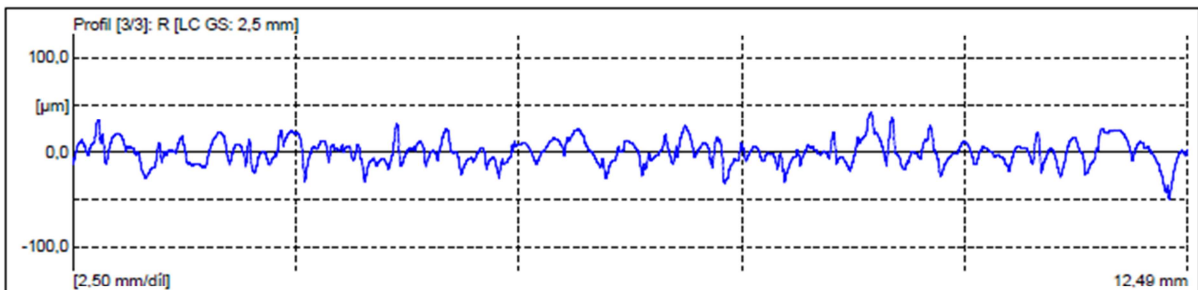
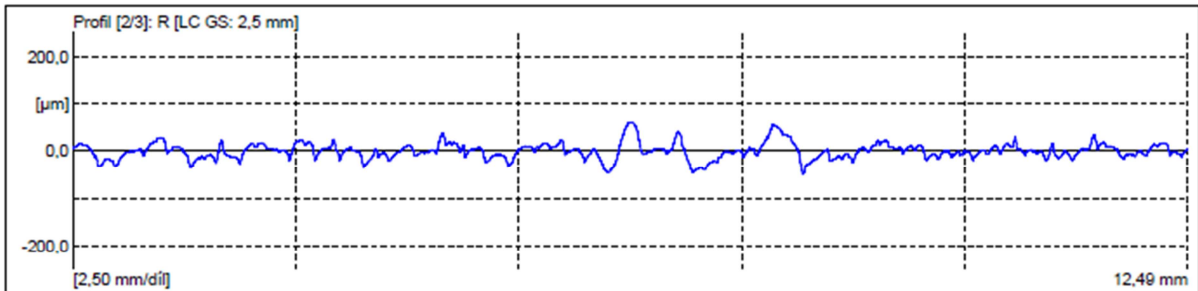
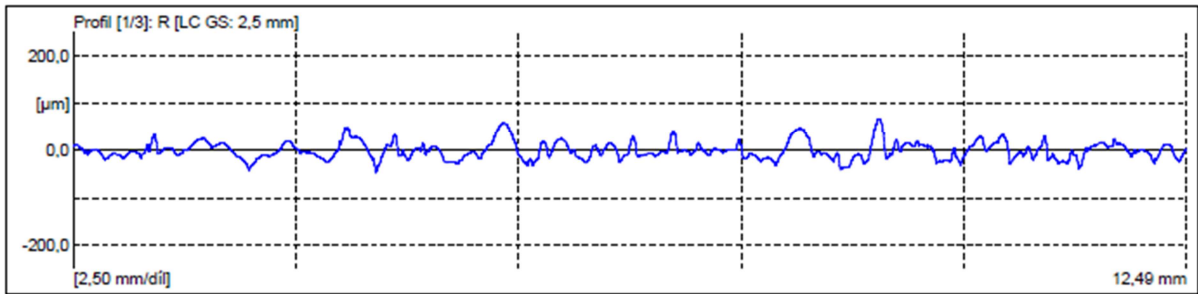
Z grafu je patrné, že nejlepší hodnoty Rz dosahuje opět vertikální těleso pro zkoušku rázem, focus level = 0 mm. Nicméně naměřené hodnoty se však pohybují v poměrně úzkém rozptylu hodnot.



Obrázek 30 – sloupcový graf z naměřených hodnot Rsm

Velkou odchylku vidíme u horizontálního tělesa pro zkoušku rázem. Ostatní naměřená data se opět pohybují v poměrně malém rozptylu hodnot.

Měřicí přístroj:	Měřicí karta Mahr	Lt:	17,50 mm [N=5]
Posuvová jednotka:	PGK	Ls:	8,0 μm
Snímač:	MFW-250 #1805 [???	VB:	±250 μm
		Vt:	0,50 mm/s
		Body:	35001 [3]



	Ra μm	Rz μm	Rt μm	Rp μm	Rv μm	R Sm μm	R Sk	R Ku
1:	14,209	87,272	115,68	47,23	40,05	498,16	0,66	3,78
2:	12,303	81,030	111,27	43,31	37,72	562,48	0,33	4,51
3:	9,891	65,661	91,85	31,47	34,19	339,38	-0,02	3,38
Xq:	12,135	77,988	106,26	40,67	37,32	466,01	0,32	3,89
S:	2,164	11,122	12,68	8,20	2,95	114,57	0,34	0,57
Max:	14,209	87,272	115,68	47,23	40,05	562,48	0,66	4,51
Min:	9,891	65,661	91,85	31,47	34,19	339,38	-0,02	3,38
R:	4,318	21,611	23,83	15,75	5,86	223,11	0,67	1,13
N1:	0	0	0	0	0	0	0	0
N2:	0	0	0	0	0	0	0	0

Střední hodnoty	
Ra	12,13 μm
Rz	77,99 μm
Rt	106,26 μm
Rp	40,67 μm
Rv	37,32 μm
R Sm	466,01 μm
R Sk	0,32
R Ku	3,89

Obrázek 31 – ukázka protokolu z měření drsnosti

5.2. ZKOUŠKA TAHEM

Zkouška proběhla dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Zkušební tělesa jsou dle normy americké normy ASTM E8. Důvodem tohoto hybridního řešení byly neúspěšné zkoušky z roku 2014, kdy tělesa podle ČSN praskala v přechodovém rádiu. Na zkušebních tělesech dle ČSN tak docházelo v přechodovém rádiu ke koncentraci napětí a vzorky praskaly v přechodovém rádiu. Proto byla tělesa zvolena dle ASTM E8, aby se tomuto jevu předešlo. ASTM již připravuje geometrii zkušebních těles pro testování DMLS vzorků, podobně jako v minulosti definovala geometrii zkušebních těles pro práškovou metalurgii. Gage length, neboli vyhodnocovaná délka byla 5násobek průměru tělesa. Zkouška byla prováděna na stroji LabTest 5.100SP1. Měření probíhalo za pokojové teploty $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Označení těles:

- 0 vzorky tištěny vertikálně
- 45 vzorky s podporami pod úhlem 45°
- FL vzorky tištěny vertikálně, focus level 0 mm

Tabulka 11: Naměřená data z tahové zkoušky

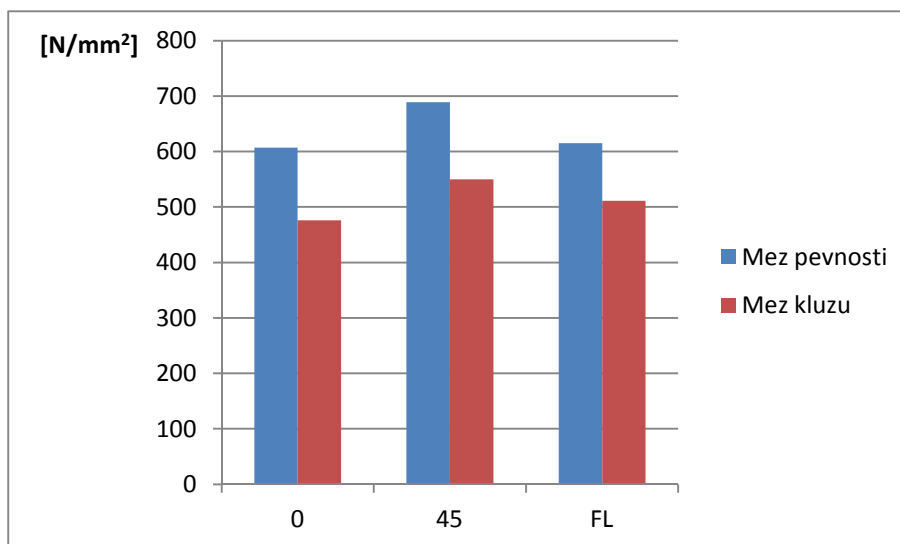
Sada vzorků	Modul pružnosti E [kN/mm ²]	Mez pevnosti Rm [N/mm ²]	Mez kluzu Rp0,2 [N/mm ²]	Tažnost A [%]
0_1	152	608	490	40
0_2	221	608	466	43
0_3	235	606	492	NEZDAŘENÁ ZKOUŠKA
0_4	225	606	446	46
0_5	164	607	487	46
PRŮMĚR	199	607	476	44
45_1	180	687	542	36
45_2	168	692	559	36
45_3	193	687	545	41
45_4	155	688	553	36
45_5	218	690	548	35
PRŮMĚR	183	689	550	37
FL_1	174	608	502	45
FL_2	NEZDAŘENÁ ZKOUŠKA			
FL_3	187	618	519	41
FL_4	209	617	510	45
FL_5	191	617	512	43
PRŮMĚR	190	615	511	43

Veškeré protokoly ze zkoušky tahem v příloze.

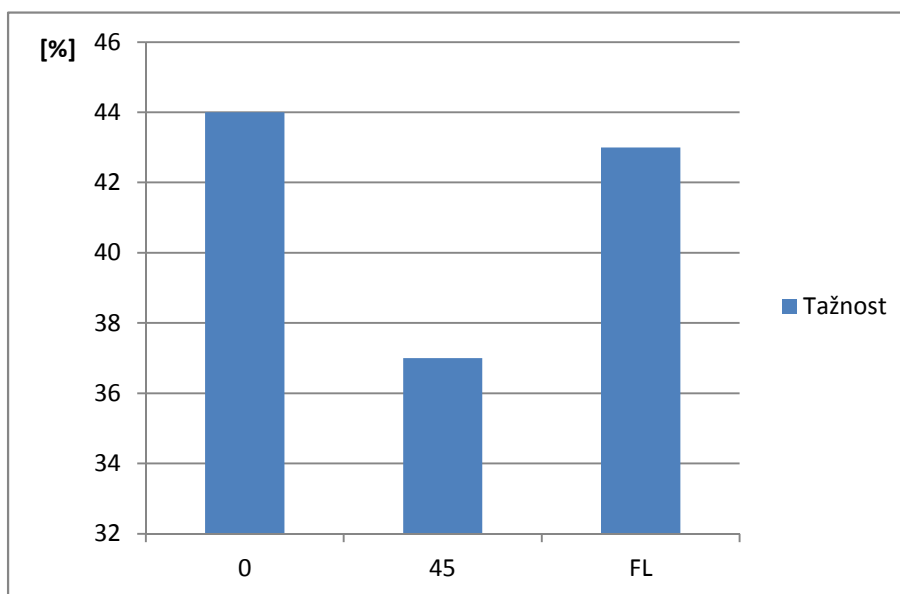
NEZDAŘENÁ ZKOUŠKA - Vzhledem k nestandardní drsnosti součásti došlo ve dvou případech k odlepení reflexní pásky extenzometru

U vzorku 0_3 došlo k odlepení při dosažení $A=30\%$. Při standardním pokračování by zřejmě nevybočila z průměru.

FL_2 Chybné uložení dat



Obrázek 32 – sloupcový graf z průměrných hodnot meze pevnosti a meze kluzu

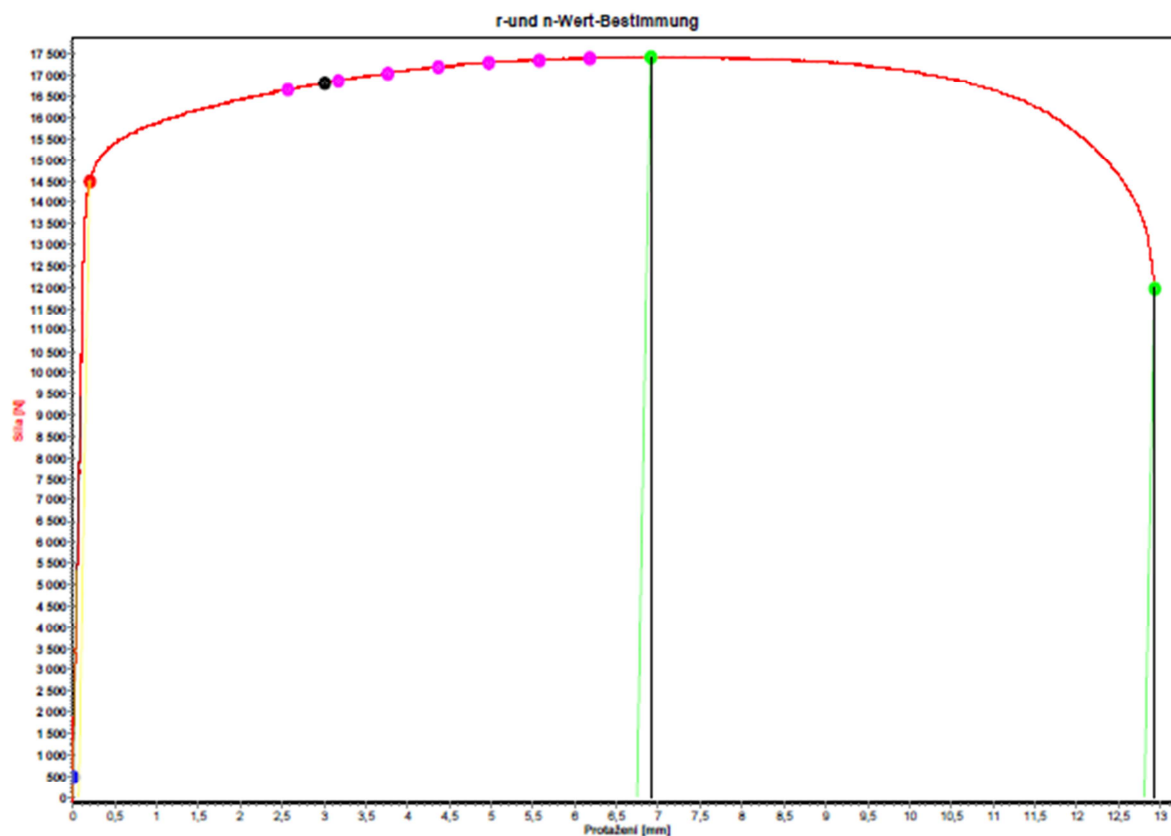


Obrázek 33 – sloupcový graf z průměrných hodnot tažnosti

Z výše uvedených grafů je možné vidět určitý rozptyl hodnot. Těleso tisknuté pod úhlem 45° vykazuje největší mez kluzu a mez pevnosti. Naopak vertikální těleso vykazuje největší tažnost. Z tabulky naměřených hodnot je také viditelná velice dobrá opakovatelnost měření.

Zkušební parametry

Zkušební norma:	r-und n-Wert-Bestimmung
Typ stroje:	LabTest 5.100SP1
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzometr
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	D = 6 mm; h = 1 mm; m = 1 g
Zadáni délek:	Le = 29,98 mm; Lc = 57 mm; L0 = 30 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 5 mm/min; V1 = 5 mm/min
Přepínací body:	F0 = 500 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 80000 N; dF = 70 %

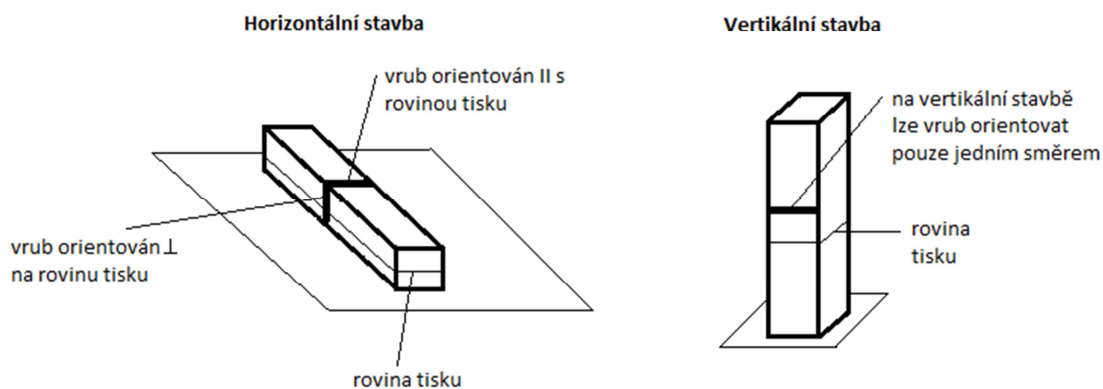


Obrázek 34 – ukázka tahového diagramu z protokolu o měření

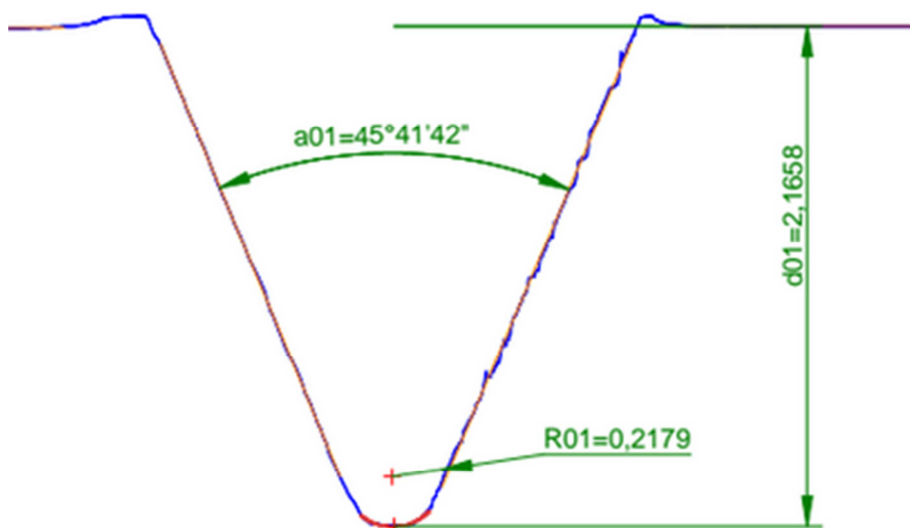
Z výše uvedeného obrázku můžeme vidět, že tento materiál nemá výraznou mez kluzu. U všech vzorků se vytvořil krček ve vyhodnocované délce, kde zkušební těleso také prasklo. Povedlo se mi tak vyvarovat koncentraci napětí v přechodovém rádiusu k upínací části a praskání v této oblasti.

5.3. ZKOUŠKA RÁZEM

Zkouška rázem dle Charpyho byla provedena dle normy ČSN ISO 148-1. Zkušební tělesa byla ofrézována, z důvodů požadavků na drsnost. Poté byl vyfrézován na vodorovné konzolové frézce tvarovým kotoučem v-vrub na tělesech s ohledem na orientaci k rovině tisku u horizontálních vzorků. Měření probíhalo za pokojové teploty $t = 20\text{ °C}$.



Obrázek 35 – orientace vrubu vzhledem k rovině tisku



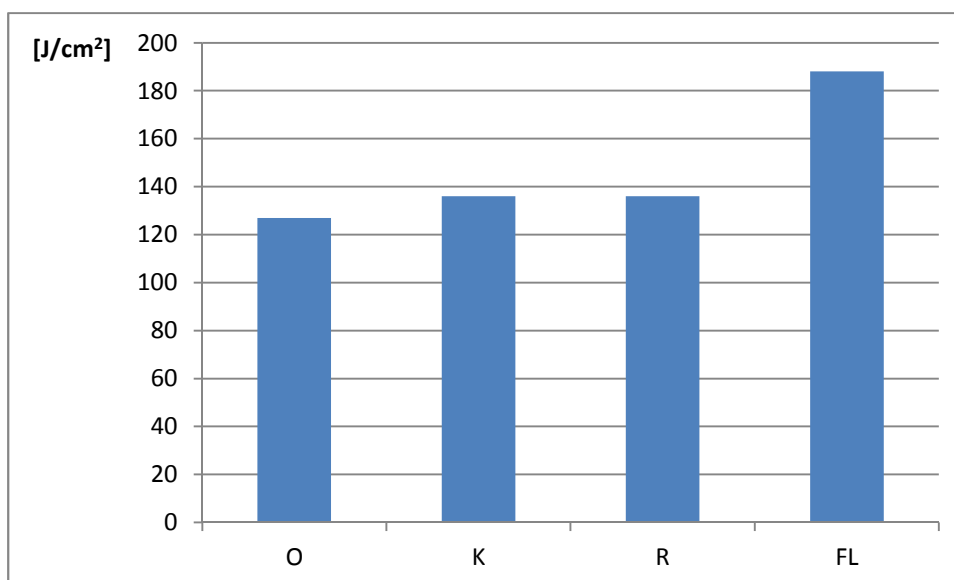
Obrázek 36 – geometrie vrubu

Označení těles:

- O vzorky tištěny vertikálně
- K vzorky tištěny horizontálně, vrub orientován kolmo na rovinu tisku
- R vzorky tištěny horizontálně, vrub orientován rovnoběžně s rovinou tisku
- FL vzorky tištěny vertikálně, focus level 0 mm, pro tyto vzorky použito 300 J kladivo

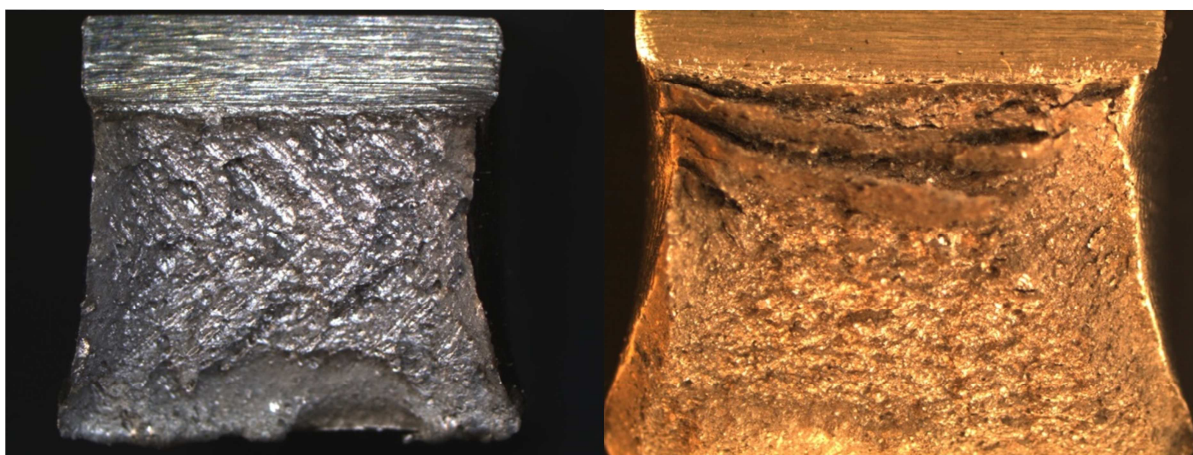
Tabulka 12: Naměřená data ze zkoušky rázem

Sada vzorků	Výška pod vrubem [cm]	Výška h [cm]	Plocha vrubu S [cm ²]	Absorbovaná energie KV [J]	Vrubová houževnatost KCV [J/cm ²]
O_1	0,8145	0,999	0,814	93,5	115
O_2	0,827	0,998	0,825	105	127
O_3	0,817	1,005	0,821	103	125
O_4	0,8225	0,996	0,819	121,5	148
O_5	0,8175	0,999	0,817	98	120
PRŮMĚR				104,2	127
K_1	0,8135	1	0,814	117	144
K_2	0,8225	1,001	0,823	113,5	138
K_3	0,822	0,982	0,807	97	120
K_4	0,824	1,002	0,826	116	140
K_5	0,8175	1,002	0,819	111	136
PRŮMĚR				110,9	136
R_1	0,8	0,998	0,798	111	139
R_2	0,7955	0,998	0,794	113	142
R_3	0,8095	0,996	0,806	115	143
R_4	0,7995	0,989	0,791	112	142
R_5	0,803	0,996	0,8	90	113
PRŮMĚR				108,2	136
FL_1	0,818	0,999	0,817	158	193
FL_2	0,7995	0,997	0,797	152	191
FL_3	0,798	1,003	0,8	148	185
FL_4	0,7965	0,998	0,795	146	184
FL_5	0,795	0,997	0,793	150	189
PRŮMĚR				150,8	188



Obrázek 37 – sloupcový graf z průměrných hodnot vrubové houževnatosti

Zde vidíme, že zkušební tělesa FL jednoznačně převyšují svou hodnotou vrubové houževnatosti nad ostatními zkušebními vzorky. Jestli za to může právě odlišná hodnota parametru focus level by asi mohlo být dalším předmětem zkoumání.



Obrázek 38 – lomové plochy, vlevo těleso O, vpravo těleso FL

Na obrázcích lomových ploch vidíme, že došlo pouze k plastickým deformacím. Nejsou zde žádné stopy po křehkém lomu. Ačkoliv se lomová plocha může zdát odlišná, pro hodnocení plochy jsou vzorky rovnocenné.

5.4. MĚŘENÍ TVRDOSTI

Měření tvrdosti podle Brinella dle normy ČSN EN ISO 6506-1. Tvrdost byla měřena na broušených površích zkušebních hranolků a metalografických výbrusech.

Měřené vzorky:

- FLR Vzorek ze zkoušky rázem v ohybu "focus level 0", vertikální stavba, broušený povrch pro přesnější odečtení, vektor působení síly při indentaci je rovnoběžný k rovinám spékání (3 vpichy)
- FLK Vzorek ze zkoušky rázem v ohybu "focus level 0", vertikální stavba, broušený povrch pro přesnější odečtení, vektor působení síly při indentaci je kolmý k rovinám spékání (3 vpichy)
- 0R Vzorek ze zkoušky rázem v ohybu, "focus level -3 mm", stavba vertikálně, vektor působení síly při indentaci je rovnoběžný s rovinami spékání (3 vpichy)
- OK Vzorek ze zkoušky rázem v ohybu, "focus level -3 mm", stavba vertikálně, vektor působení síly při indentaci je kolmý s rovinami spékání (3 vpichy)
- tah 1 Vzorek vyříznut z upínací části tělesa pro tahovou zkoušku, "focus level -3 mm", stavba vertikálně (0°), vzorek vyhotoven v kvalitě metalografického výbrusu, vektor působení síly při indentaci je kolmý k rovinám spékání (2 vpichy)
- tah 2 Vzorek vyříznut z upínací části tělesa pro tahovou zkoušku, "focus level -3 mm", stavba vertikálně (0°), vzorek vyhotoven v kvalitě metalografického výbrusu, vektor působení síly při indentaci je kolmý k rovinám spékání (3 vpichy)

Podmínky zkoušky: indentor= kalená kulička o průměru $D=2,5$ mm

zkušební síla = $187,5$ kg = 1839 N

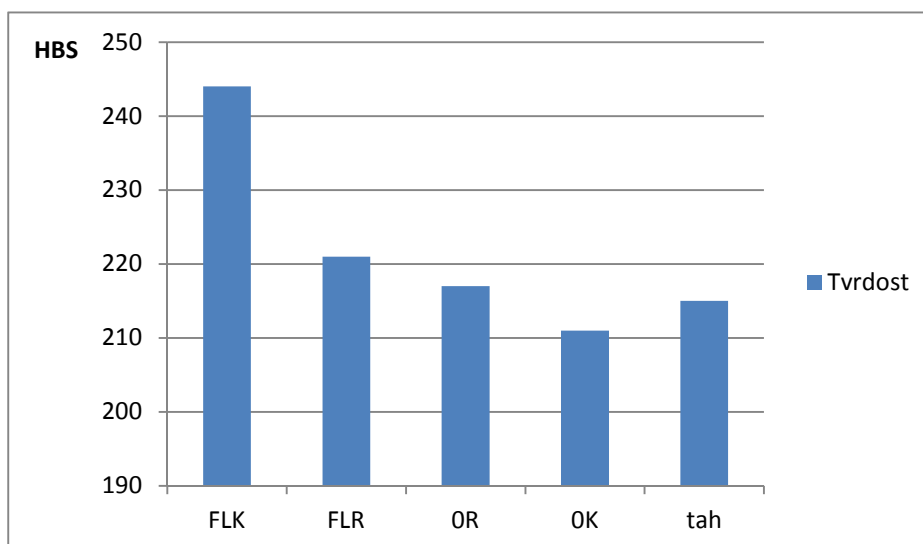
Tvrdost určena pomocí převodních tabulek (odečet průměru na matnici a následné odečtení tvrdosti v tabulkách pro konkrétní kombinaci D a F)

Vzhledem k broušeným povrchům výrazně snížena chyba odečtu na matnici

Úplné označení hodnot tvrdosti: "HBS 2,5/187,5", běžně se označuje pouze HB

Tabulka 13: Naměřená data ze zkoušky tvrdosti

Ozn.	Index	Hodnota HBS 2,5/187,5
FLK	i	244
	ii	244
	ii	244
	PRŮMĚR	244
FLR	i	219
	ii	219
	iii	224
	PRŮMĚR	221
OR	i	207
	ii	229
	ii	215
	PRŮMĚR	217
OK	i	207
	li	215
	iii	211
	PRŮMĚR	211
tah 1	i	215
	ii	219
tah 2	i	215
	ii	211
	iii	215
	PRŮMĚR	215



Obrázek 39 – sloupcový graf z průměrných hodnot naměřených tvrdostí

Z výše uvedeného grafu vidíme, že tvrdost vzorku FLK, kdy jsou vpichy orientovány kolmo na rovinu tisku značně převyšuje ostatní hodnoty. Z tabulky 13 vidíme, že opakovatelnost měření je velice dobrá.

5.5. MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI

Zkouška mikrotvrdoměru proběhla dle normy ČSN EN ISO 6507-1 na mikrotvrdoměru FUTURE-TECH FM-100 s automatickým zatěžováním. Měření bylo provedeno dvakrát, na broušených površích puků vyřiznutých ze vzorků pro zkoušku tahem. Nejdříve byla zatěžovací síla 100 g po dobu 10 s, druhé měření bylo provedeno se zatěžovací silou 500 g opět po dobu 10 s.

Tabulka 14a: Naměřená data ze zkoušky mikrotvrdoměru, zatěžovací síla 100g

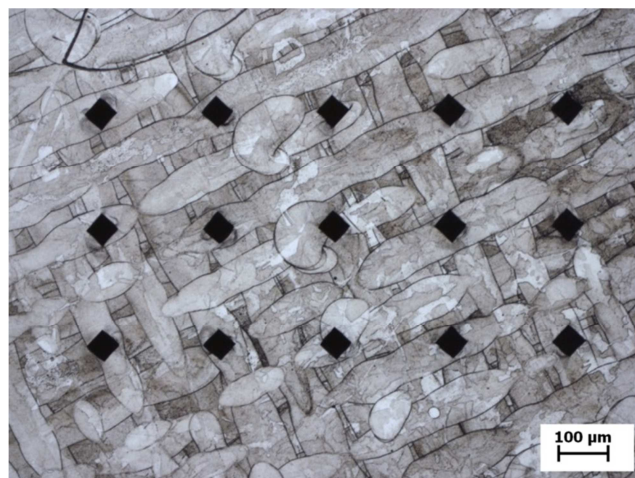
Vpich	Tvrdomost [HV]
1	218
2	225
3	231
4	226
5	245
6	240
7	232
8	228
9	228
10	214
11	220
12	217
13	211
14	204
15	218
PRŮMĚR	224



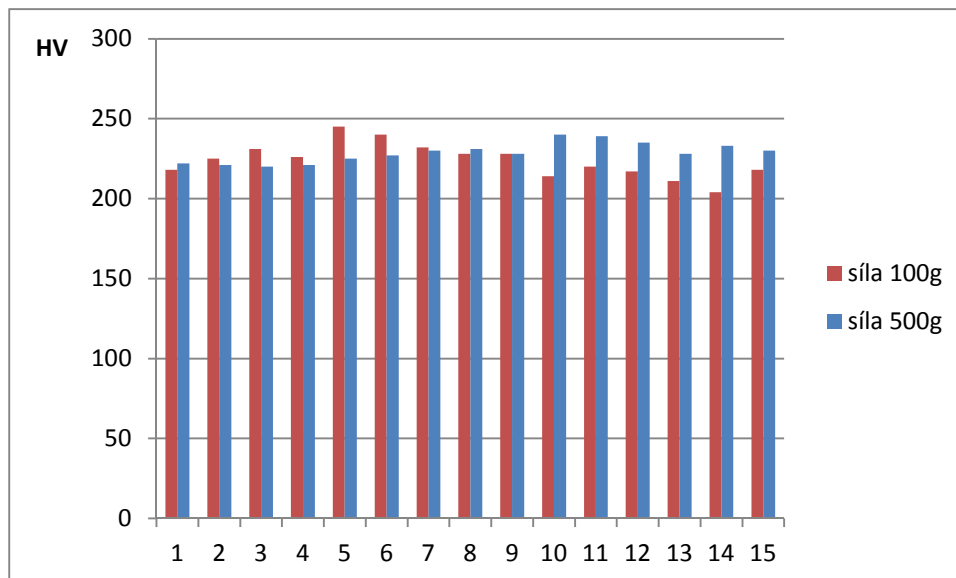
Obrázek 40 – detail vpichů, zatěž. síla 100g – zvětšení 100x

Tabulka 14b: Naměřená data ze zkoušky mikrotvrdoměru, zatěžovací síla 500 g

Vpich	Tvrdomost [HV]
1	222
2	221
3	220
4	221
5	225
6	227
7	230
8	231
9	228
10	240
11	239
12	235
13	228
14	233
15	230
PRŮMĚR	229



Obrázek 41 – detail vpichů, zatěž. síla 500g – zvětšení 50x



Obrázek 42 – sloupcový graf z naměřených hodnot mikrotvrdosti

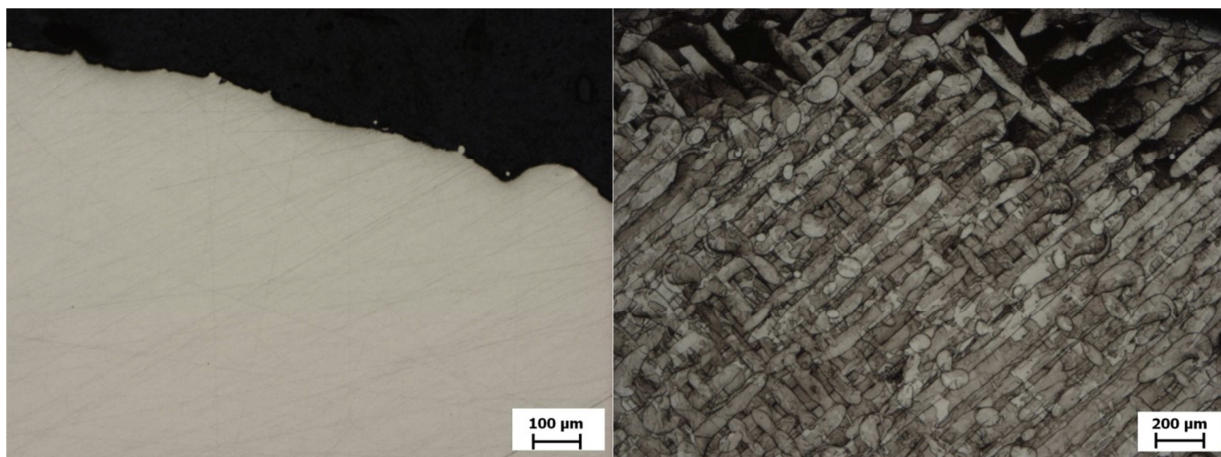
Z grafu vidíme, že rozptyl hodnot u zatěžovací síly 500g je menší, než u zatěžovací síly 100g. Je to dáno tím, že větší zatěžovací síla působí větší defekt a materiál tak má menší sklon k tomu odporovat vpichu. Zvyšuje se tak stabilita měření.

5.6. METALOGRAFIE

Příprava vzorků pro metalografické pozorování probíhala následovně:

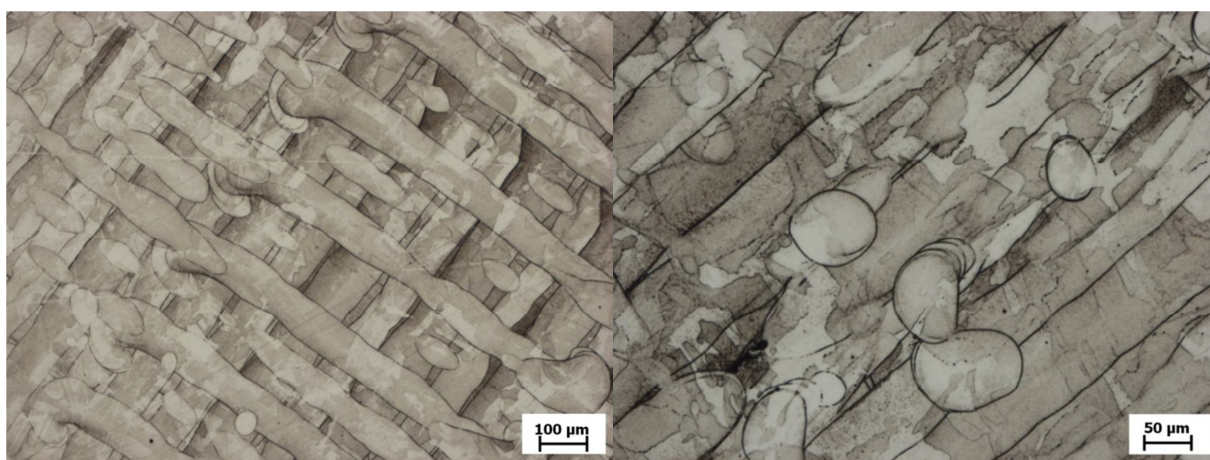
- 1) Nařezání vzorků z již přeražených a zpřetrhaných vzorků na brusce Struers Labotom-3
- 2) Zalití do pryskyřice na lisu Struers CitoPress-10 => umístit prvek, zasypat prvek sypkou přiskyřicí a následně stlačeno 3 minuty při 180 °C
- 3) Postupné broušení do zrcadlového lesku, stroj Struers Tegramin-25
 - a) SIC papír 120, chlazené vodou, přítlak 35 N, 3 minuty, otáčky sousledné 300/150 rpm
 - b) SIC papír 320, chlazené vodou, přítlak 35 N, 3 minuty, otáčky sousledné 300/150 rpm
 - c) SIC papír 500, chlazené vodou, přítlak 30 N, 2 minuty, otáčky sousledné 300/150 rpm
 - d) 9 µm diamantový roztok DiaPro, přítlak 30 N, 3 minuty, otáčky sousledné 150/150 rpm
 - e) 3 µm diamantový roztok DiaPro, přítlak 30 N, 3 minuty, otáčky sousledné 150/150 rpm

Takto upravené vzorky jsou připraveny například pro pozorování pórovitosti, trhlin, staženin, apod. Pokud chceme pozorovat mikrostrukturu, musíme vzorky ještě naleptat. Vzorky byly naleptány kyselinou šťavelovou.



Obrázek 43 – vlevo vzorek v leštěném stavu – zvětšení 50x, vpravo makrostruktura leptaného vzorku – zvětšení 25x

Na leštěném vzorku vidíme, že je zde nulová porozita, materiál je zcela homogenní. Nejsou zde žádná prázdná místa, která by měla negativní vliv na konečné mechanické vlastnosti a integritu materiálu.



Obrázek 44 – mikrostruktura leptaných vzorku, vlevo zvětšení 50x; vpravo zvětšení 100x

Makrostruktura a mikrostruktura vzorků potvrzuje způsob zvolené strategie řádkování, a sice do tzv. šachovnice.

6. ZÁVĚR

Tato diplomová práce podává ve své teoretické části ucelený přehled současných metod pro 3D tisk kovových i nekovových materiálů. Zároveň podává všeobecný přehled o možnostech tisknutých materiálů, podrobněji rozpracovává niklovou slitinu Inconel 718, titanovou slitinu Ti6Al4V a nerezovou ocel 1.4404. Více do hloubky je zde rozebrána technologie DMLS, kterou byly zhotoveny i vzorky pro analýzy materiálu AISI 316L. Praktická část se zabývá zkouškami mechanických vlastností a vlivu technologického parametru „focus level“ (posun hladiny ostrosti svazku vůči hladině spékání) a způsob orientace tělesa při tisku 3D tisknutého materiálu.

Přímost zkušebních těles se pohybovala v řádu 0,1 mm, běžně dosahovaná drsnost Ra se pohybovala od 10 do 14 μm . Funkční plochy je však vždy nutno doobrobit právě z důvodů požadavků na geometrickou přesnost a drsnost.

U zkoušky tahem vzorky vykazovaly určitý rozptyl hodnot, z čehož je patrné, že právě orientace tisku a parametr focus level mají vliv na konečné mechanické vlastnosti. Tělesa tištěná pod úhlem 45° vykazovaly největší mez kluzu a mez pevnosti. Tělesa FL pak vykazovaly spolu s vertikálními tělesy největší tažnost. Kombinací tisku pod úhlem a parametrem focus level = 0 mm bychom pravděpodobně dosáhly nejlepších výsledků v tahové zkoušce.

Při zkoušce rázem pak tělesa s parametrem focus level = 0 mm vykazovaly největší vrubovou houževnatost, na rozdíl od ostatních zkoušených těles. Lze konstatovat, že parametr focus level má pozitivní vliv na konečnou vrubovou houževnatost.

Při měření tvrdosti a mikrotvrdosti vykazovaly vzorky FL, kdy vektor vpichu působil kolmo na rovinu tisku, očividně vyšší hodnoty, než ostatní vzorky. Na základě měření mapy mikrotvrdosti nebyl detekován výrazný rozdíl v jednotlivých zrnech materiálu, ani na jejich rozhraní.

Očekávaná porezita materiálu je nulová i bez následného postprocessingu technologií hot isostatic pressing. Vzorky byly pouze vyžihány pro snížení vnitřního pnutí způsobené tiskem. Materiál nevykazuje typickou strukturu pro konvenčně vyráběný materiál (dvojčatění, austenitická struktura).

Hodnotu parametru focus level a orientaci tisknutého výrobku (pokud je to možné) bychom volili především na základě oblasti použití součástí. Zkoumané vzorky vykazovaly u všech zkoušek určitý rozptyl hodnot, rozptyl hodnot v jednotlivých měřených sadách u provedených zkoušek byl však minimální, což vede k velice dobré opakovatelnosti měření.

7. ZDROJE

- [1] Jennifer A Lewis, Gregory M Gratson, *Direct writing in three dimensions*, Materials Today, Volume 7, Issues 7–8, July–August 2004, Pages 32-39, ISSN 1369-7021, [http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021\(04\)00344-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021(04)00344-X).
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136970210400344X>)
- [2] BRAIN, Marshall. *How Stereolithography 3-D Layering Works* [online]. publikováno 5.10.2000. [cit. 2014-09-25]. Dostupné z: computer.howstuffworks.com/stereolith.htm/printable1369-7021
- [3] Stereolithography. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-09-25]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>
- [4] EVEKTOR. *Rapid prototyping: 3D tisk technologií FDM* [online]. [cit. 2014-09-29]. Dostupné z: <http://www.evektor.cz/3d-tisk-fdm.aspx>
- [5] Fused Deposition Modeling [online]. [cit. 2014-09-29]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [6] 4ISP SPOL. S.R.O. *Informace o technologiích 3D tisku* [online]. [cit. 2014-10-02]. Dostupné z: <http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- [7] 3T RPD. *DMLS Brochure* [online]. [cit. 2014-10-02]. Dostupné z: http://www.machexhibition.com/ExhibitorLibrary/415/3T_RPD_Ltd_-_DMLS_Brochure_2.pdf
- [8] Selective heat sintering. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_heat_sintering
- [9] 3D Printing Technologies - Electron Beam Melting (EBM) [online]. [cit. 2014-10-11]. Dostupné z: <http://www.popular3dprinters.com/electron-beam-melting-ebm/>
- [10] Laminated object manufacturing. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-10-15]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing

- [11] BUNSCH, A., J. KOWALSKA a M. WITKOWSKA. *INFLUENCE OF DIE FORGING PARAMETERS ON THE MICROSTRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF INCONEL 718ALLOY* [online]. 2012, 57(7) [cit. 2014-10-19]. DOI: 0.2478/v10172-012-0102-8. Dostupné z: http://www.imim.pl/files/archiwum/Vol4_2012/04.pdf
- [12] WALTERS, J. a C.J. VAN TYNE. *Forging Materials: Superalloys* [online]. 2012 [cit. 2014-10-19]. Dostupné z: <http://www.forgemag.com/articles/84073-forging-materials-superalloys>
- [13] EOS M Materials for DMLS [online]. 2009 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: http://www.3dimpuls.com/sites/default/files/dok_book/m_materials_en.pdf
- [14] CHOE, Heeman, Susan ABKOWITZ a Stanley M. ABKOWITZ. *Influence of Processing on the Mechanical Properties of Ti-6Al-4V-Based Composites Reinforced with 7.5mass% TiC and 7.5mass% W* [online]. *The Japan Institute of Metals*, 2008 [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/49/09/2153.pdf>. Express regular article. The Japan Institute of Metals.
- [15] CHAUKE, L., K. MUTOMBO a C. KGOMO. *Characterization of the Direct Metal Laser Sintered Ti6Al4V Components* [online]. [cit. 2014-11-13]. Dostupné z: http://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/10204/7244/1/Chauke_2013.pdf
- [16] ITALINOX - partner, který nerezaví. *CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ A ZÁKLADNÍ INFORMACE O POUŽITÍ, ZPRACOVÁNÍ, SVAŘOVÁNÍ A MOŽNÉ KOROZI* [online]. [cit. 2015-06-05]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/?p1=plechy&p2=p6&p3=p2>
- [17] Swiss Profile :: Shaped Wire, Stainless Tube and Precision Tube, Switzerland. *Material datasheet* [online]. [cit. 2015-06-05]. Dostupné z: <http://www.swissprofile.com/data/documents/fiches-techniques/EN/316L1.4404.pdf>
- [18] VOORT, George Vander. Vacuum Furnace Engineering, *Manufacturers of Quality Vacuum Furnaces. Measurement of Grain Size in Twinned FCC Alloys* [online]. [cit. 2015-06-05]. Dostupné z: <http://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/1263-measurement-of-grain-size-in-twinned-fcc-alloys.html>

- [19] NING, Yu. *Process parameter optimization for direct metal laser sintering (DMLS)* [online]. Singapur, 2005 [cit. 2015-01-10]. Dostupné z: http://scholarbank.nus.edu.sg/bitstream/handle/10635/14768/Thesis_NingYu.pdf?sequence=1. Dizertační práce. NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE.
- [20] PADT. *3D Printing, Rapid Prototyping, Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), Fused Deposition Modeling (FDM), PolyJet, CNC Machining Services :: Phoenix Analysis* [online]. [cit. 2015-06-15]. Dostupné z: <http://www.padtinc.com/services/rapid-prototyping/index.html>
- [21] GLOBATEK.3D. *3D-принтер Stratasys Mojo, цена, наличие, технические характеристики, описание, отзывы, области применения.* GLOBATEK.3D [online]. [cit. 2015-06-15]. Dostupné z: <http://3d.globatek.ru/3d-printers/mojo/>
- [22] SARTAIN, JD. NETWORK WORLD. *3D printing: How does it really work?* [online]. [cit. 2015-06-15]. Dostupné z: <http://www.networkworld.com/article/2289031/software/145488-3D-printing-How-does-it-really-work.html>
- [23] FIT PROTOTYPING. *Electron Beam Melting (EBM) - Metal 3D Printing* [online]. [cit. 2015-06-15]. Dostupné z: http://www.fit-prototyping.de/electron_beam_melting.php?language=2
- [24] FLAHERTY, Joseph. *\$5000 Printer Available Now! (For a limited time)* [online]. 2009 [cit. 2015-06-15]. Dostupné z: <http://replicatorinc.com/blog/2009/11/5000-printer-available-now-for-a-limited-time/>
- [25] HANSON, Kip. MICROMANUFACTURING. *Sintering 3D parts from powdered metal is on the rise* / *MICROmanufacturing* [online]. 2014 [cit. 2015-06-15]. Dostupné z: <http://www.micromanufacturing.com/content/sintering-3d-parts-powdered-metal-rise>

8. PŘÍLOHY

Příloha 1

Protokoly z měření přímosti a drsnosti

Příloha 2

Protokoly ze zkoušky tahem