



**Mechanické vlastnosti 3D tištěných vzorků z oceli 316L**

**Mechanical properties of 3D printed specimens of steel 316L**

Diplomová práce

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Aleš Herman, Ph.D.

**Martin Drašnar**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Drašnar** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **408877**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Mechanické vlastnosti 3D tištěných vzorků z oceli 316L**

Název diplomové práce anglicky:

**Mechanical properties of 3D printed specimens of steel 316L**

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod
2. Technologie laserového spékání kovů
3. Technologičnost konstrukce 3D kovových výtisků
4. Návrh metodiky zkoušení a zkušebních těles
5. Vyhodnocení experimentů
6. Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Web of Science

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Aleš Herman Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.08.2017**

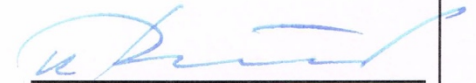
Platnost zadání diplomové práce: **10.08.2017**



Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



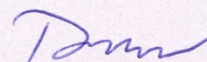
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

**3.5.2017**

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 20. 7. 2017

.....

podpis

## **Poděkování**

Děkuji panu Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky, dobré rady a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce. Dále děkuji společnosti METAL 3D, s. r. o. za poskytnutí vzorků, spolupráci a přínosné konzultace.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce řeší problematiku výroby a následného zkoušení vzorků z korozivzdorné oceli 316L, zhotovených aditivní technologií laserového spékání kovového prášku DMLS. Vzorky mají tvar zkušebních těles dle příslušných norem. Vyhodnocovány jsou pevnostní vlastnosti oceli v různých směrech, tvrdost povrchu, vliv tepelného zpracování, pórozita materiálu, přesnost a mezní parametry technologie DMLS v závislosti na poloze vzorků, parametrech skenování a konfiguraci výrobního zařízení. Cílem je porovnat naměřené hodnoty zkoušek s hodnotami, které uvádí výrobce v katalogu pro daný typ materiálu. Výsledky zkoušek ukazují, že je nutné použít ochranu před tepelným zpracováním za vysokých teplot, která zamezí zokujení povrchu. Z výsledků metalografických a mechanických zkoušek lze usoudit, že klíčovými parametry jsou vzdálenost šrafování a jednotlivých bodů laseru, jejichž nastavení musí zajistit dostatečný překryv k dosažení minimální pórozity. Velkou roli hraje také verze konfiguračního programu poskytovaného výrobcem zařízení.

## **Abstract**

This thesis deals with problematic of production and testing of 316L corrosion resistant steel specimens made by additive technology called direct metal laser sintering. The specimens are etalon shaped according to the relevant standards. The evaluation includes strength properties measured in different directions, surface hardness, effect of heat treatment, material porosity, accuracy and limit parameters of DMLS technology depending on the position of the specimens, scanning parameters and configuration of the production machine. The goal is to compare the measured values of the individual parts with the values stated in the data sheet. The test results show the importance of protection use before applying heat treatment to avoid forging surface scales. Hatch distance and laser point distance are the key parameters obtained from metallographic and mechanical tests. The adjustment of spacing between the laser points must ensure sufficient overlap to achieve minimal porosity. The version of Build Processor provided by the manufacturer is also very important.

## Obsah

1	Úvod .....	8
2	Technologie laserového spékání kovů.....	9
2.1	Historie a vývoj technologie DMLS.....	9
2.2	Úvod do technologie DMLS .....	10
2.3	Zařízení Renishaw AM250 .....	11
2.4	Výrobní proces technologie DMLS .....	12
2.5	Software Magics a QuatAM.....	15
2.6	Výroba kovových prášků .....	16
2.6.1	Atomizace taveniny vodou .....	17
2.6.2	Atomizace taveniny plynem .....	18
2.6.3	Atomizace taveniny odstředivou silou .....	19
2.7	Prášek z korozivzdorné oceli SS 316L-0407 (ČSN EN 10088-1 1.4404).....	20
3	Technologičnost konstrukce 3D kovových výtisků .....	21
3.1	Základní pravidla konstrukce, umístění a stavby modelu.....	21
3.2	Strategie tisku.....	26
3.3	Hlavní parametry tiskové strategie .....	28
3.3.1	Výška vrstvy (Slice Thickness).....	28
3.3.2	Vzdálenost bodů (Point Distance) .....	28
3.3.3	Čas osvitu (Exposure Time).....	29
3.3.4	Energie laseru (Laser Power) .....	29
3.3.5	Ohnisko (Focus) .....	29
3.3.6	Vzdálenost šrafování výplně (Hatch Distance) .....	30
3.4	Parametry výrobních etap pro experimentální část.....	31
3.4.1	Etapa 1.....	33
3.4.2	Etapa 2.....	33

4	Návrh metodiky zkoušení a zkušebních těles.....	34
4.1	Zkušební tělesa pro analýzu průchozích otvorů .....	34
4.2	Zkušební tělesa pro zkoušku tahem .....	35
4.3	Zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu .....	36
4.4	Zkušební tělesa pro vyhodnocení vlivu tepelného zpracování.....	37
4.5	Zhotovení a příprava zkušebních těles .....	37
4.6	Zkouška tahem .....	40
4.7	Zkouška rázem v ohybu .....	42
4.8	Zkoušky tvrdosti .....	44
4.8.1	Zkouška tvrdosti podle Vickerse .....	44
4.9	Metalografie vzorků pro analýzu průchozích otvorů.....	46
4.9.1	Příprava metalografických výbrusů .....	46
5	Vyhodnocení experimentů .....	51
5.1	Vliv tepelného zpracování oceli 316L .....	51
5.1.1	Tepelné zpracování bez ochrany .....	51
5.1.2	Tepelné zpracování s ochrannou nátěrovým systémem CONDURSAL...52	
5.1.3	Tepelné zpracování v ochranné atmosféře .....	52
5.2	Metalografické výsledky vzorků pro analýzu průchozích otvorů .....	53
5.2.1	Konfigurace – etapa 1.....	53
5.2.2	Konfigurace – etapa 2.....	56
5.3	Vyhodnocení zkoušky tahem.....	61
5.3.1	Konfigurace – etapa 1.....	61
5.4	Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu .....	68
5.4.1	Konfigurace – etapa 1.....	68
5.5	Vyhodnocení zkoušky tvrdosti podle Vickerse .....	72
5.5.1	Konfigurace – etapa 1.....	72
6	Závěrečné zhodnocení .....	73

Seznam použité literatury .....	78
Seznam obrázků .....	81
Seznam tabulek .....	85



# 1 Úvod

Laserové spékání kovových materiálů je jedním z odvětví aditivní výroby (additive manufacturing). V současné době se tato technologie rozvíjí a proniká především do oblastí strojíního, automobilového, leteckého nebo kosmického průmyslu, ale značné zastoupení má i v oblasti lékařství. Hlavní výhodou této technologie zpracování kovů je úspora materiálu vzhledem k přesnému vrstvení požadovaného tvaru z CAD dat a také možnost znovuvyužití nezpracovaného média (prášku). Díky přesnému působení laserového zdroje lze vytvářet velmi složité profily, kterých nelze dosáhnout jinou dostupnou technologií zpracování kovů (slévání, tváření, obrábění aj.). Technologie kovového 3D tisku s sebou nese i řadu nevýhod. Jednou z nich je omezené pracovní prostředí, ve kterém probíhá tiskový proces, což znamená omezené velikosti tištěných součástí. Další nevýhodou je přesnost zhotovených dílů. Díly, které jsou realizovány touto technologií, mají přesnost řádově v jednotkách milimetru. Ve strojírenské výrobě se dnes běžně dosahuje přesností v setinách milimetru. Proto je, pro případ potřeby dosáhnout této přesnosti, doobrobení prozatím nutností. Povrch laserově spěkaných dílů vykazuje větší drsnost než u jinak zhotovených součástí.

Kvalita výsledných produktů závisí především na správně nastavených parametrech tiskového procesu. Kombinace nastavení tisku, volby materiálu, ochranné atmosféry a následného postprocessingu dávají k dispozici nespočet možností, jak dosáhnout optimální konfigurace pro danou součást. Správným nastavením se dá ovlivnit například výsledná povrchová struktura, tvarová přesnost, množství použitého materiálu, mechanické vlastnosti, soudržnost jednotlivých vrstev, hmotnost či vnitřní výplň tištěné součásti.

Hlavní cíle této práce jsou:

- *zmapování technologie DMLS, používaných materiálů a technologických zásad*
- *hledání optimálních parametrů a nastavení tiskového procesu*
- *návrh metodiky zkoušení*
- *zkoumání vlivu tepelného zpracování a porovnání způsobů ochrany*
- *vyhodnocení metalografických výbrusů vzorků s průchozími otvory*
- *mechanické zkoušky zhotovených zkušebních těles*
- *porovnání výsledků s hodnotami deklarovaných výrobcem*

## 2 Technologie laserového spékání kovů

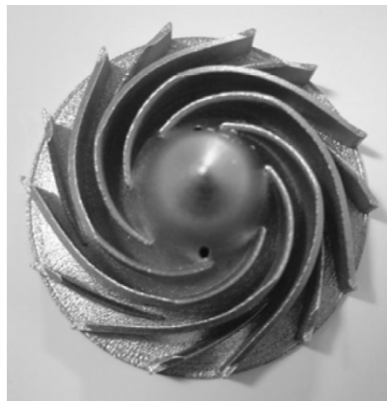
### 2.1 Historie a vývoj technologie DMLS

Vývoj technologie laserového spékání kovových prášků (DMLS – Direct Metal Laser Sintering) úzce souvisí s objevem technologie stereolitografie Charlesem Hullem v roce 1984. Principem této revoluční metody je spékání fotopolymérů UV zářením. Dnes označovaná technologie SLA (stereolithography) se hojně využívá v oblastech s menším měřítkem, ale s většími nároky na přesnost (např. zubní implantáty, šperkařství). Charles Hull si následně nechal technologii SLA patentovat, založil společnost 3D Systems a vyvinul první komerčně dostupnou tiskárnu s názvem SLA 1. Pojem stereolitografie byl původně chápán obecně jako vytváření trojrozměrných objektů, protože Charles Hull nechtěl svůj objev omezit pouze na fotopolymerické tekutiny. V dnešní době, vznikem dalších metod 3D tisku, je pojem stereolitografie spojován právě s technologií vytvrzování fotopolymérů (SLA). Původní záměr je ovšem zachován v podobě přenosového formátu STL, do kterého je exportován výstupní CAD model pro komunikaci s většinou dnes dostupných 3D tiskáren [1].

Prvopočátky laserového spékání materiálů (nejdříve v podobě plastů) jsou datovány okolo roku 1986, kdy student Carl Deckard z Texaské univerzity pomocí stowattového YAG laseru postupně spojil několik vrstev tvořených původně práškovým materiálem ABS (Akrylonitril Butadien Styren). Tato metoda je označována jako SLS (Selective Laser Sintering) a obecně spočívá ve spékání práškového materiálu, který ve vrstvách vytváří výslednou podobu součásti. Původně byl tento princip zaměřen pouze do oblasti plastových materiálů [1].

V roce 1988 Frank Arcella ze společnosti Westinghouse Electric vynalezl způsob, jak laserovou technologii přenést i do oblasti kovových materiálů. Celý tiskový proces uzavřel do speciální komory, kterou vyplnil ochranným plynem pro zachování stability procesu. YAG laser byl nahrazen CO2 laserem. Používanými materiály byly korozivzdorné oceli, titan nebo hliník. Prvním komerčně dostupným zařízením pro laserové spékání kovových prášků bylo zařízení s názvem Sinterstation 2000 od společnosti DTM z Texasu. Tento 3D stroj byl výsledkem výzkumu Carla Deckarda

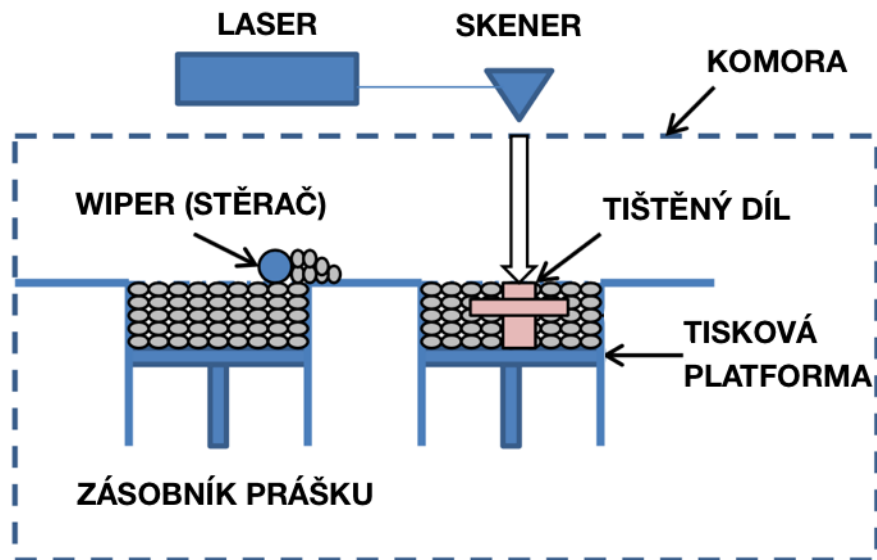
a jeho kolegů. Poprvé se na trhu objevil v roce 1992. O dva roky později přišla na trh společnost EOS GmbH z Německa, která předvedla své DMLS zařízení EOSINT (P) 350. Obě zařízení disponují padesátiwattovým CO<sub>2</sub> laserem. Rozdílem byly jiné parametry, jako například velikost pracovního prostoru, způsob skenování nebo princip položení vrstvy. Výška jednotlivých vrstev byla v případě prvních zařízení 100 μm. Postupně se s úspěšnými výsledky začaly přidávat i další společnosti. Výkon laserů vzrostl až k dnes běžně používaným 400 W, výška jednotlivých vrstev se s použitím kvalitnějších prášků snížila na 20 μm, a tím se současně zlepšila výsledná kvalita produktů [1].



Obrázek 2.1 Oběžné kolo vytištěno na zařízení EOS EOSINT z oceli 17-4 PH [1]

## 2.2 Úvod do technologie DMLS

Technologie DMLS (Direct Metal Laser Sintering) je v dnešní době stále se rozvíjejícím odvětvím aditivní výroby (AM – Additive Manufacturing), konkrétně v oblasti tzv. Rapid Prototyping (rychlé výroby prototypů). Proces spočívá v realizaci 3D digitálního návrhu do hmotné kovové komponenty, která se postupně vytváří z vrstev ukládajících se na sebe. Samotný tisk začne nanesením tenké vrstvy práškového materiálu v přesně nadefinované výšce (obvykle bývá v rozmezí 20–40 μm) na pracovní platformu. Po nanesení každé z vrstev laserový paprsek spojuje kovový prášek v přesně definovaných místech z dat generovaných počítačem. Po dokončení jedné vrstvy se platforma sníží o velikost další vrstvy a opět se zaplní vrstvou prášku. Ta je stejně jako předchozí vrstva spékána v přesně definovaných místech laserem a zároveň dochází ke spojení obou vrstev. Tyto úkony se neustále opakují až do té doby, kdy je součást dokončena [2].



Obrázek 2.2 Princip technologie DMLS [3]

### 2.3 Zařízení Renishaw AM250

Tiskové zařízení Renishaw AM250, pracující s technologií laserového spékání kovů DMLS, disponuje vysoce výkonným vláknovým laserem, který dokáže spékat vrstvy o výšce 0,02–0,1 mm. Materiál je do tiskárny dodáván v podobě jemného kovového prášku, který je v přesně definované výšce vrstvy rozprostřen na tiskové platformě. AM250 je novou generací DMLS zařízení obsahující filtrační systém pro zamezení nežádoucího kontaktu materiálu se vzdušnou atmosférou. V první řadě napomáhá udržet velmi nízkou hladinu kyslíku při tiskovém procesu, jehož přítomnost by při kontaktu s reaktivními kovy (např. hliníkem) znamenala vážné poškození zařízení a ohrožení zdraví pracovníků. V tiskové komoře tedy dochází k odčerpání vzduchu a následnému zaplnění komory ochranným plynem (např. argonem). Systém výměny plynů v zařízení Renishaw je konstruován tak, aby minimalizoval spotřebu těchto nákladných ochranných médií. Součástí systému ochranné atmosféry jsou filtrační vložky, které je nutno v požadovaných intervalech měnit. Jednou z nejsilnějších vlastností zařízení AM250 je schopnost rychle přepínat mezi rozmanitým spektrem materiálů, které společnost Renishaw nabízí. Mezi podporované materiály patří např. korozi-vzdorná ocel 316L, slitina hliníku AlSi10Mg, kobalt-chromová slitina CoCr nebo slitina titanu Ti6Al4V. Zásobník materiálu je opatřen uzavíracími ventily,

které umožňují doplnit prášek v průběhu tisku. Před navrácením zpět do procesu je zapotřebí prášek prosít [4].

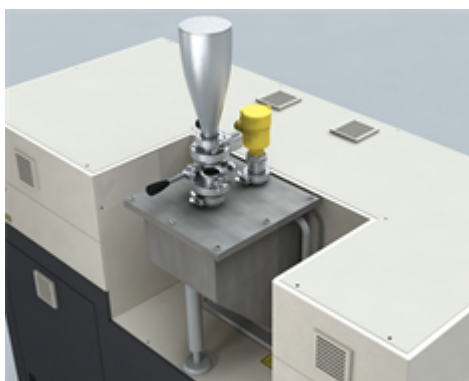
3D tiskárna Renishaw AM250 disponuje tiskovým prostorem o rozměrech 250 mm v ose X, 250 mm v ose Y a 300–360 mm v ose Z (360 mm v případě nadstavbové verze). Lze volit mezi 200 W a 400 W laserem, který pracuje ve vakuové komoře. Komora udržuje koncentraci kyslíku pod 50 ppm, což i přes nízkou spotřebu ochranného plynu umožňuje bezpečné použití reaktivních materiálů a zároveň je zajištěna lepší mechanická odolnost a integrita materiálu [4].



Obrázek 2.3 Zařízení Renishaw AM250 [4]

## 2.4 Výrobní proces technologie DMLS

Prvním krokem je příprava kovového prášku. Před naplněním zásobníku je nutné kovový prášek prosít, aby byl použit pouze prášek v definovaném rozsahu zrnitosti. Některé materiály mají hodnotu zrnitosti příliš vysokou, proto jsou nebezpečné pro zdraví člověka. Bez ochranného oděvu a kyslíkové masky by prášek mohl proniknout do lidského těla a způsobit například vážná respirační onemocnění. Zásobník slouží ke spolehlivé dopravě média do tiskového procesu [5].



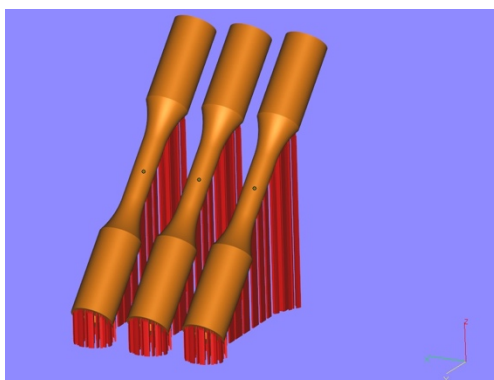
Obrázek 2.4 Zásobník stroje Renishaw AM250 [5]

V následujícím kroku se do pracovní komory stroje vloží tisková platforma, která musí být důkladně vybroušena, použije-li se po odstranění součástí z předchozího tisku.



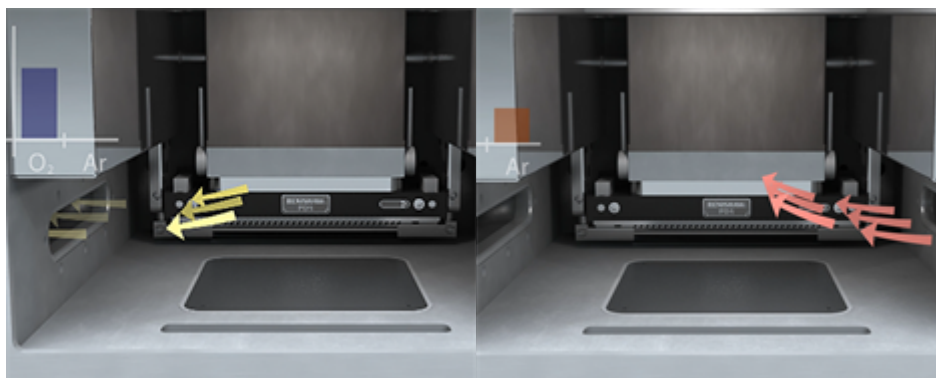
Obrázek 2.5 Vložení tiskové platformy [5]

Následně se provede export vstupních dat digitálního modelu z externího počítače do řídicího systému zařízení. Soubor již obsahuje také vytvořený podpůrný systém a nastavené parametry tiskového procesu [5].



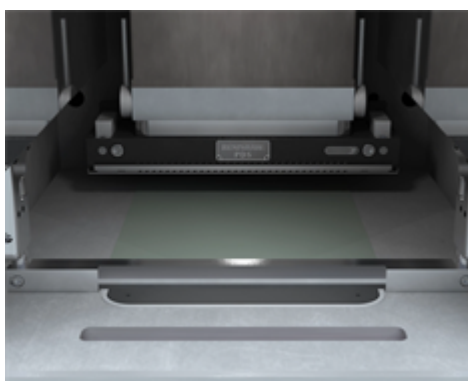
Obrázek 2.6 Model připravený k exportu

Před započítím stavby modelu je z komory stroje odčerpán vzduch a následně je naplněna ochranným inertním plynem (argonem) [5].



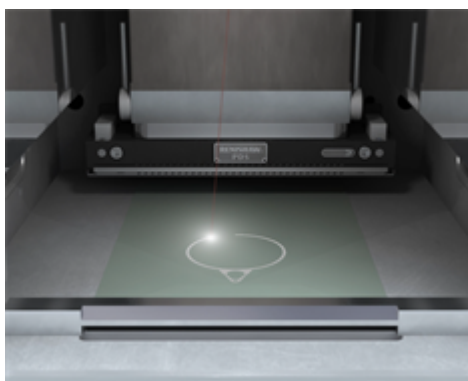
Obrázek 2.7 Výměna plynů (vlevo – odčerpání vzduchu, vpravo – plnění argonem) [5]

Nyní už je pracovní komora připravena k nanesení první vrstvy kovového prášku na tiskovou platformu. Samotný proces nanášení je velmi komplikovaný. Každý výrobce DMLS zařízení má svoje know-how v řešení této problematiky.



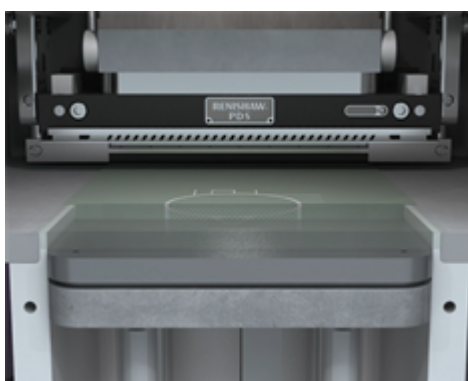
Obrázek 2.8 Nanesení první vrstvy prášku [5]

Po nanesení vrstvy kovového prášku vláknový laser s příkonem 200 W nebo 400 W začne spékat prášek v místech určených z dat v řídicím systému.



*Obrázek 2.9 Spékání kovového prášku laserem [5]*

Po dokončení laserování v jedné vrstvě tisková platforma vždy sestoupí o rozměr definovaný výškou vrstvy. Tyto kroky se opakují až do té doby, dokud není součást kompletně dokončena.



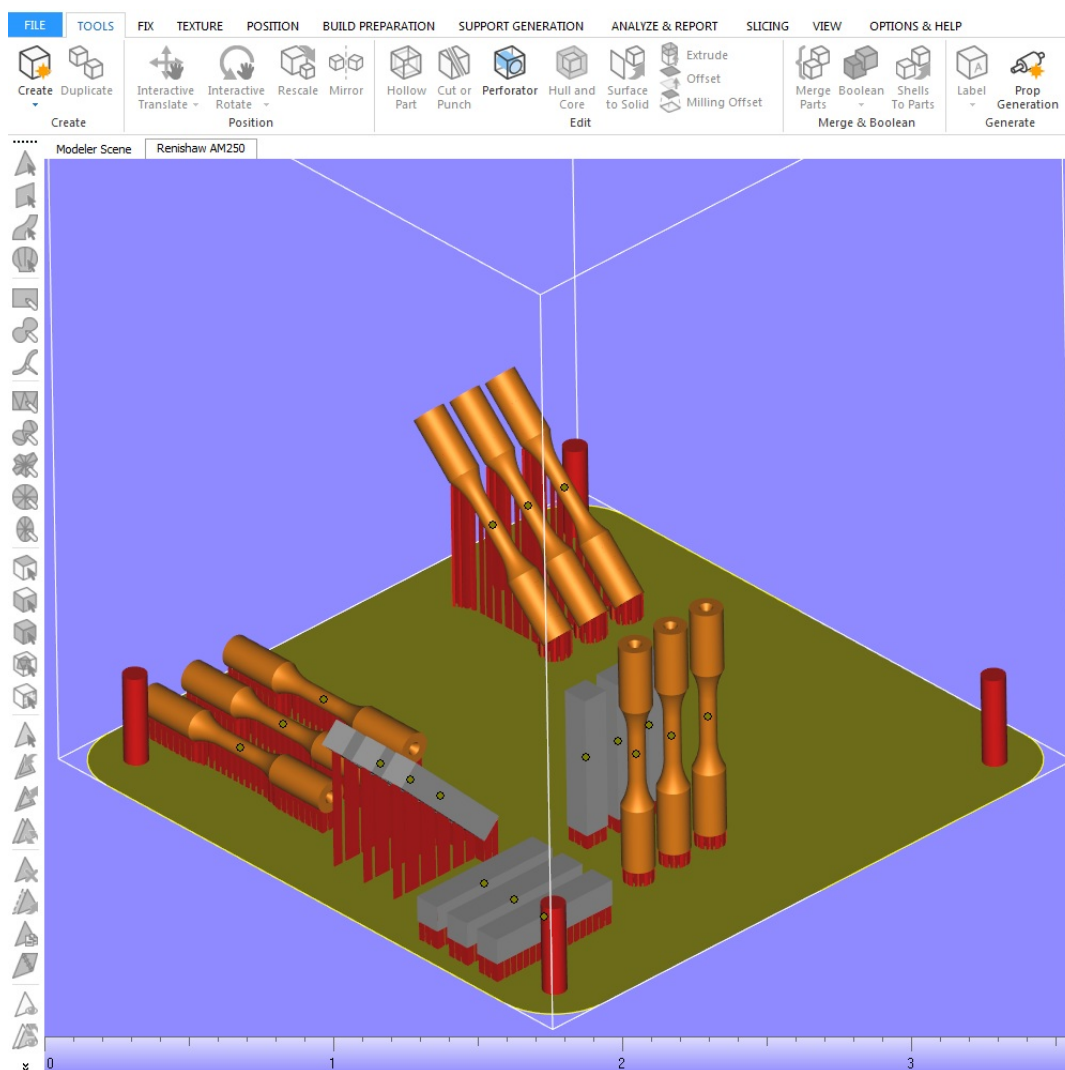
*Obrázek 2.10 Nanesení dalších vrstev [5]*

## **2.5 Software Magics a QuatAM**

Vstupní soubory pro tisk se připravují v prostředí programů Magics nebo QuatAM, do kterého se importují CAD soubory v datovém formátu STL. Tyto systémy umožňují přípravu modelů pro aditivní výrobu. Navrženy jsou specificky pro platformy aditivní výroby Renishaw, čímž zabezpečují těsnější integraci do řídicího softwaru stroje a nabízejí rychlou a přesnou kontrolu souborů. Mezi hlavní přednosti patří přesný import a orientace geometrie STL, možnost generování podpurných konstrukcí, modul vývoje materiálů s importem CSV dat, editace a kopírování materiálových souborů, duplikování, orientování a polohování více dílů, analýza dráhy laserového



nástroje po jednotlivých řezech a možnost pohledu laserových expozic v každém řezu [6].



Obrázek 2.11 Prostředí programu Magics

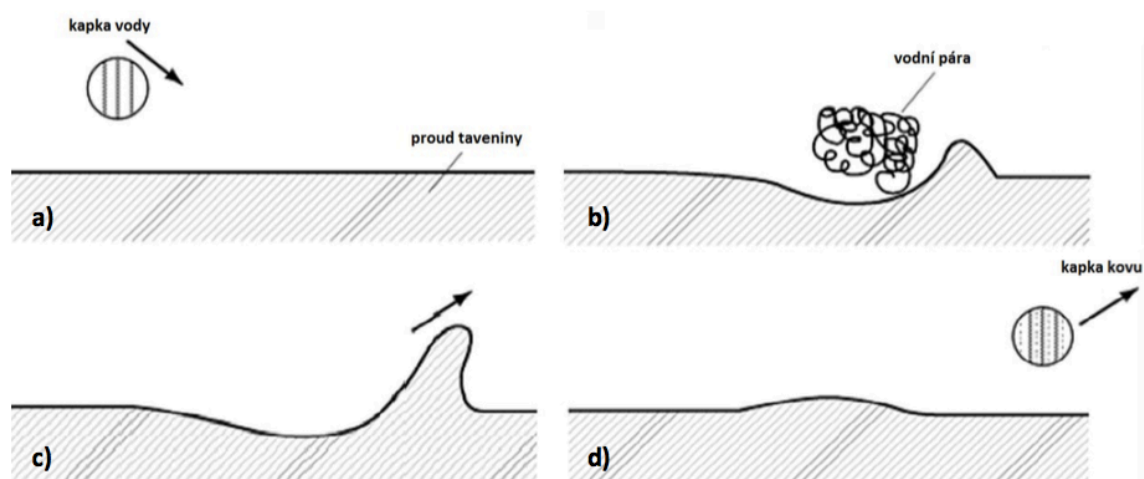
## 2.6 Výroba kovových prášků

Nejpoužívanějším způsobem výroby kovových prášku je atomizace neboli rozstřikování taveniny, patří mezi fyzikálně-mechanické způsoby výroby. Principem je působení proudu tekutiny, tlakového plynu nebo odstředivých sil na kov v tekuté formě. Rozdělením tekuté formy se vytvoří kapky, které tuhnou vlivem ochlazení v rozstřikovacím médiu. Tvar, velikost nebo struktura takto získaných částic lze ovlivnit kombinací různých faktorů. Mezi tyto faktory patří obecné podmínky atomizace,

viskozita a povrchové napětí taveniny, podmínky ochlazování a teplota taveniny. Obecně platí, že čím větší je přehřátí taveniny a mechanická energie působící na taveninu, tím více bude vznikat jemnějšího prášku. Opačně tedy platí, že při klesající teplotě taveniny se bude zvyšovat podíl hrubších částic (při rostoucí viskozitě). Tvar vzniklých částic lze ovlivnit přísadami jako bór nebo fosfor. Ve větším množství však tyto přísady mění i viskozitu taveniny [7].

### 2.6.1 Atomizace taveniny vodou

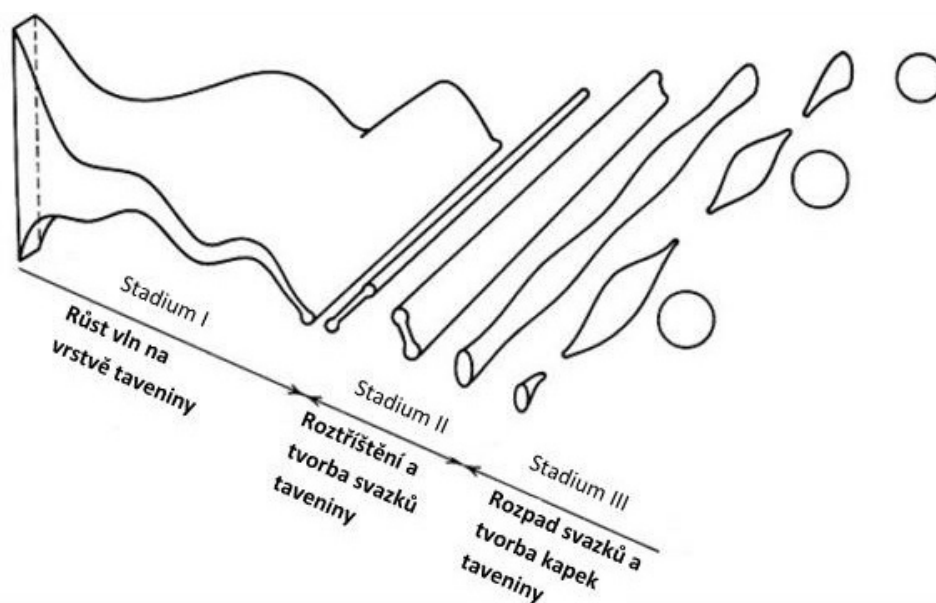
Princip spočívá v rozdělení taveniny proudem vody o vysoké hustotě, přičemž dochází k vysoké rychlosti ochlazování a k tvorbě páry v místě kontaktu vody a taveniny. Díky vysoké hustotě vody dochází k výraznému zvýšení kinetické energie a hybnosti. Tento způsob atomizace je oproti jiným způsobům ekonomičtější, a to hlavně díky nízké ceně média. Zároveň nabízí vysokou produktivitu, až 30 t/h. Vzniklé práškové elementy mají nepravidelný tvar s vysokým obsahem kyslíku. Při zpracování reaktivnějších kovů (např. hliníku) je vhodnější, vzhledem k možnosti samovznícení, použít jiný způsob atomizace taveniny, například atomizaci inertním plynem (argonem) [7].



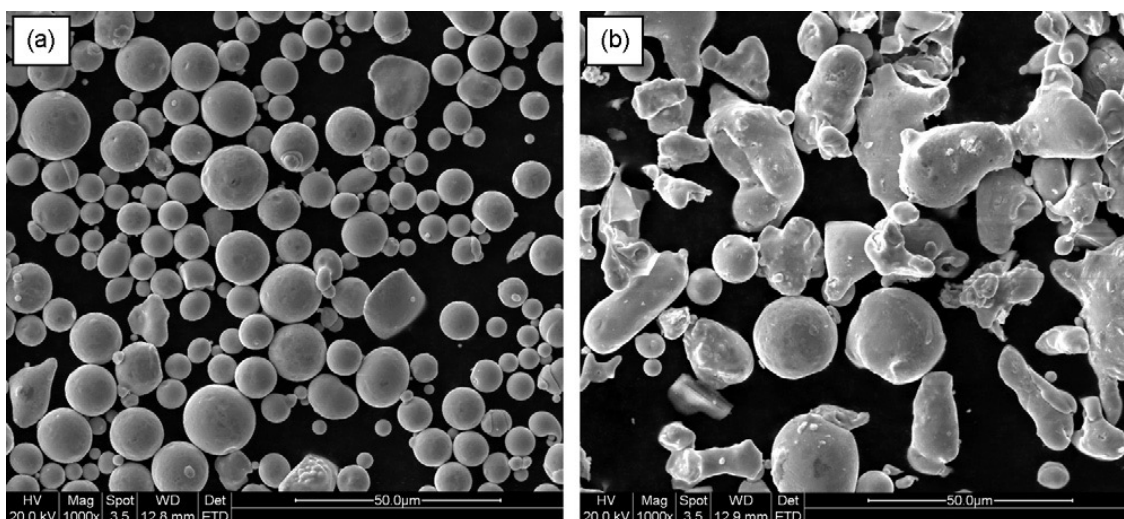
Obrázek 2.12 Princip výroby kovového prášku atomizací vody [7]

## 2.6.2 Atomizace taveniny plynem

Princip rozstřikování taveniny plynem spočívá v dezintegraci proudu taveniny vzduchem, heliem, argonem nebo dusíkem, který z trysek proudí pod vysokým tlakem. Metody se využívá hlavně při výrobě prášku vysoce legovaných materiálů. Vzniklé práškové elementy lze ovlivnit typem plynu, typem slitiny, teplotou tavení, viskozitou, rychlostí dávkování taveniny, tlakem plynu, geometrií trysek nebo teplotou plynu. Při atomizaci taveniny plynem vznikají homogenní částice sférického tvaru s velmi dobrými materiálovými vlastnostmi. Mechanismus tvorby kapky v tomto procesu má celkem tři fáze. V první fázi dochází na vrstvě taveniny ke vzniku sinusových vln s postupně se zvyšující amplitudou. Ty jsou v následující druhé fázi rozděleny na svazky taveniny, které se ve třetí fázi roztříští na jednotlivé, později sferoidizované kapky. Takto získané kapky mají střední velikost 20–300  $\mu\text{m}$ . Nepravidelné (nekulovité) tvary mohou vznikat tehdy, pokud reakce mezi roztaveným kovem a plynem vedou ke vzniku povrchových vrstev (např. rozstřikování taveniny hliníku vzduchem) [7].



Obrázek 2.13 Fáze tvorby kapek při atomizaci taveniny plynem [7]



Obrázek 2.14 Atomizace taveniny SS oceli 316L – (a) plynem, (b) vodou [8]

### 2.6.3 Atomizace taveniny odstředivou silou

Rozstříkávání taveniny odstředivou silou může probíhat buď jako jednostupňový, nebo dvoustupňový proces. Mezi jednostupňové metody patří metoda rotující elektrody PREP (Plazma Rotating Electrode Process) a REP (Rotation Electrode Process). Metoda REP je založena na principu působení dvou elektrod, anody a katody. Anoda je vyrobena ze slitiny vyráběného kovu a katoda je wolframová. Při vzniku elektrického oblouku dojde k natavení povrchu anody. Tato elektroda rotuje, přičemž se kapky nataveného kovu rozprašují na chlazený plášť objemové nádoby. Metoda PREP pracuje na obdobném principu. Elektrický oblouk je zde nahrazen heliovým plazmovým obloukem. Výhoda metody PREP spočívá v dosažení vysoké čistoty částic. Využívá se především k výrobě prášků z titanových slitin. U dvoustupňového procesu atomizace probíhá tavení kovu a dezintegrace taveniny za pomoci rotujícího chlazeného disku odděleně ve dvou fázích. Při této metodě může vzniknout problém, kterým je přenos vysokých rotačních rychlostí na povrch taveniny. Lze ji využít při výrobě prášků superslitin, slitin hliníku nebo titanu. Velikost částí u jednostupňových procesů je 150–250  $\mu\text{m}$ . V případě dvoustupňových procesů je díky vyšším rychlostem rotace (až 25000 ot./min.) střední velikost částic 80–90  $\mu\text{m}$  [7].

## 2.7 Prášek z korozivzdorné oceli SS 316L-0407 (ČSN EN 10088-1 1.4404)

Slitina 316L-0407 je austenitická korozivzdorná ocel, která je legována chromem (16–18 %), niklem (10–14 %), molybdenem (2–3 %). Dále obsahuje v menším množství mangan (<2 %), křemík (<1 %), dusík (<0,1 %), kyslík (<0,1 %), fosfor (<0,045 %), uhlík (<0,03 %) a síru (<0,03 %). Zbytek tvoří železo. Pro použití v DMLS zařízeních je nutnou podmínkou zaručená svařitelnost materiálu. Materiálovými vlastnostmi jsou vysoká tvrdost a houževnatost, vysoká odolnost proti korozi a vysoká leštitelnost. Vhodné využití nachází v oblasti vstřikování plastů (výroba forem), chirurgických nástrojů a tělních implantátů (je hypoalergenní a biokompatibilní), kuchyňského vybavení, šperků, vřeten a šroubů nebo lodních komponent. Optimální konfigurací zařízení AM250 (dle výrobce), pro zpracování v podobě prášku, je výkon laseru 200 W při výšce vrstvy 50 μm [9].

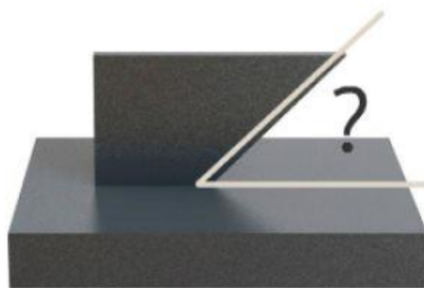
Tabulka 2.1 Všeobecné charakteristiky oceli 316L dle katalogového listu Renishaw (technologie DMLS) a katalogového listu Outokumpu (válcovaná za studena) [9], [10]

<b>Veličina</b>	<b>Technologie DMLS</b>	<b>Válcovaná za studena</b>
<i>Hustota</i>	<b>7,99 g/cm<sup>3</sup></b>	-
<i>Tepelná vodivost</i>	<b>16,2 W/mK</b>	-
<i>Rozsah tavicích teplot</i>	<b>1371–1399 °C</b>	-
<i>Mez pevnosti v tahu (vodorovný směr XY)</i>	<b>662 MPa ± 2 MPa</b>	<b>590 MPa ± 10 MPa</b>
<i>Mez pevnosti v tahu (svislý směr Z)</i>	<b>574 MPa ± 10 MPa</b>	
<i>Mez kluzu v tahu (vodorovný směr XY)</i>	<b>518 MPa ± 5 MPa</b>	<b>290 MPa ± 5 MPa</b>
<i>Mez kluzu v tahu (svislý směr Z)</i>	<b>440 MPa ± 10 MPa</b>	
<i>Tažnost (vodorovný směr XY)</i>	<b>38 % ± 1 %</b>	<b>55 % ± 10 %</b>
<i>Tažnost (svislý směr Z)</i>	<b>26 % ± 12 %</b>	
<i>Modul pružnosti (vodorovný směr XY)</i>	<b>167 GPa ± 8 GPa</b>	<b>200 GPa ± 5 GPa</b>
<i>Modul pružnosti (svislý směr Z)</i>	<b>134 GPa ± 17 GPa</b>	
<i>Tvrdost dle Vickerse (vodorovný směr XY)</i>	<b>212 HV<sub>0,5</sub> ± 2 HV<sub>0,5</sub></b>	<b>175 HV<sub>30</sub> ± 15 HV<sub>30</sub></b>
<i>Tvrdost dle Vickerse (svislý směr Z)</i>	<b>220 HV<sub>0,5</sub> ± 6 HV<sub>0,5</sub></b>	
<i>Drsnost povrchu dle parametru R<sub>a</sub> (XY)</i>	<b>10–16 μm</b>	-
<i>Drsnost povrchu dle parametru R<sub>a</sub> (Z)</i>	<b>6–8 μm</b>	-

# 3 Technologičnost konstrukce 3D kovových výtisků

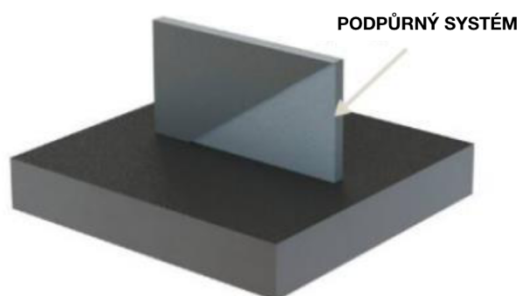
## 3.1 Základní pravidla konstrukce, umístění a stavby modelu

Pro dosažení požadované kvality povrchu a dodržení rozměrové přesnosti je zapotřebí zhotovit model tak, aby tvořil nosnou konstrukci. Kovový prášek nelze používat jako nosný prvek. Hrozilo by zborcení modelu v místě, kde nebyl dokonale podepřen, a tím k jeho znehodnocení nebo úplnému zničení. Pro zaručení podmínek tvarové přesnosti a přijatelné kvality povrchu je limitním úhlem  $45^\circ$  [11].



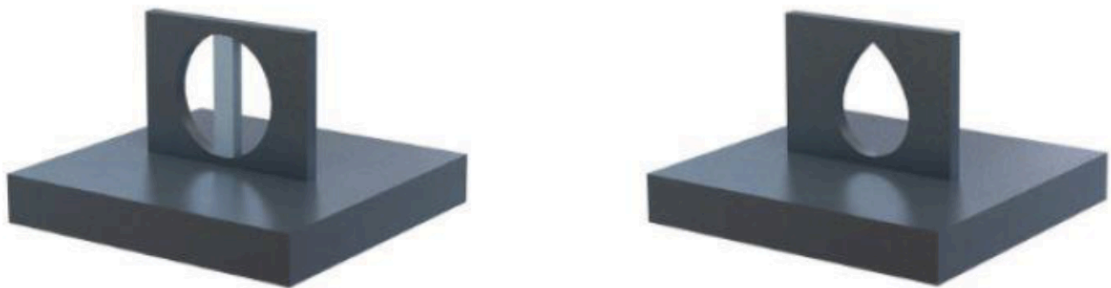
Obrázek 3.1 Znárodnění limitního úhlu [11]

Pokud je tento úhel vzhledem k tiskové platformě menší, je v tomto místě zapotřebí vymodelovat nebo vygenerovat podpěry. Ty se vytvářejí s velmi malou stykovou plochou, aby bylo možné je snáze odstranit. V případě jednoduchých podpěr je lze vylámat kleštěmi nebo jinými ručními nástroji. Mnohdy však podpůrný systém tvoří složité i těžko dostupné prvky, proto je třeba použít technologii drátového řezání nebo obrábění.



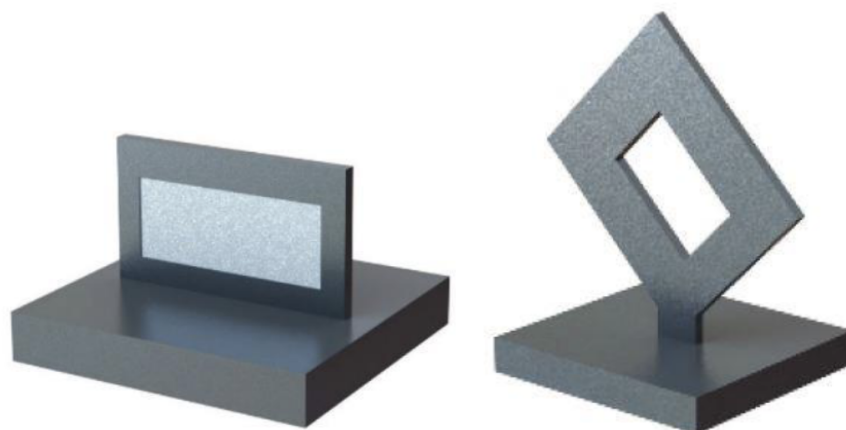
Obrázek 3.2 Podepření součásti [11]

V případě stavby modelu obsahující otvor lze bez větších problémů vytvořit otvor do průměru 6 mm. Tato hodnota se může lišit v závislosti na dalších parametrech, jako je výška vrstvy nebo typ materiálu. Pokud je průchozí otvor většího průměru, je nutné v dostatečné délce podepřít jeho horní část. Nabízí se také možnost (pokud otvor nemusí být předepsaného tvaru, ale slouží například k odlehčení součásti) vytvořit speciální tvar tak, aby byl technologií DMLS realizovatelný. Záměnou kruhového tvaru za kapkovitý tvar lze přetvořit prvek do tvaru, který není nutné podkládat. Vhodná optimalizace modelu, již během modelování, vede ke značným úsporám materiálu [11].



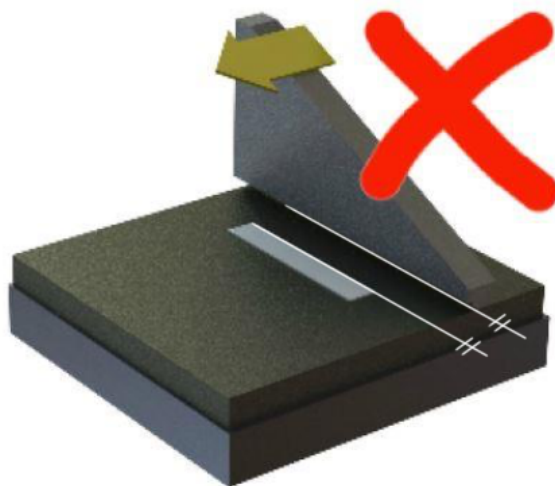
Obrázek 3.3 Realizace modelu s otvorem (vlevo – s podpěrou, vpravo – optimalizace tvaru) [11]

Významnou roli zde má také poloha modelu vzhledem k tiskové platformě. Na jednoduchém příkladu je demonstrován rozdílný způsob zhotovení modelu, kdy v jednom případě jsou „visící“ prvky podepřeny a ve druhém případě je celý model vhodně natočen tak, aby nebylo nutné tvořit podpěry [11].

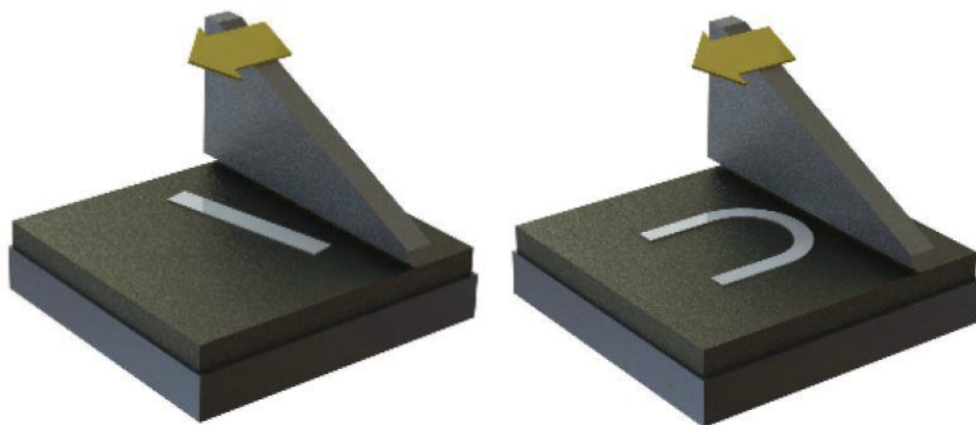


Obrázek 3.4 Realizace modelu při změně polohy [11]

Poloha modelu má vliv i na vrstvení jednotlivých vrstev. V případě součásti s přímostou hranou, která je rovnoběžná s hranou tiskové platformy, od které vychází nástroj k aplikaci kovového prášku, může docházet k nerovnoměrnému nanesení vrstev. Hrana součásti, po celé své délce, brání v pohybu nanášecího zařízení, kdy může dojít k jeho vychýlení. V takovém případě je vhodné model pootočit tak, aby hrana směřovala k nanášecímu zařízení pod úhlem nebo aby byl model k hraně platformy natočen kruhovou částí [11].



Obrázek 3.5 Nevhodná poloha modelu vzhledem k nanášení [11]

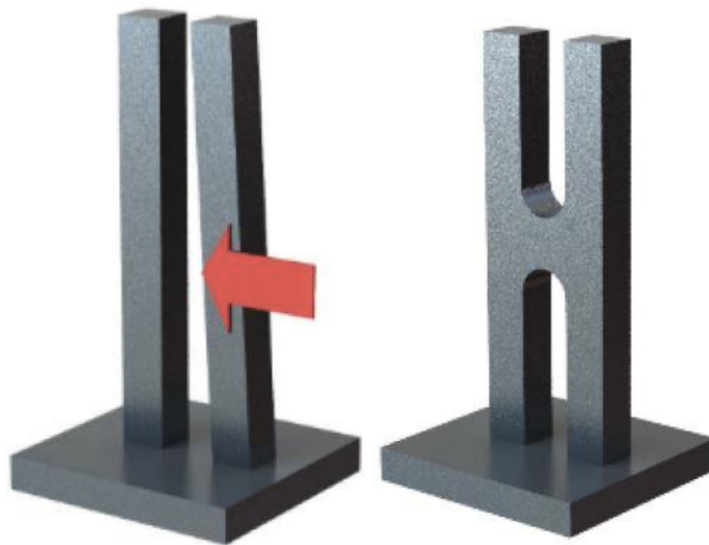


Obrázek 3.6 Vhodná poloha modelu vzhledem k nanášení [11]

Je-li poměr mezi výškou tělesa a délkou podstavy příliš vysoký, může docházet, vlivem působení síly od nanášení vrstev, k postupnému vychylování součásti vzhledem k tiskové platformě. Tento poměr by proto neměl být větší než 8:1. V případě vyšších

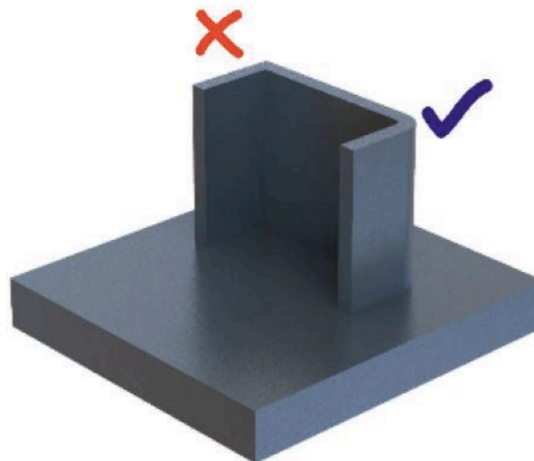


těles s malou podstavnou plochou lze užít pomocné vzpěry mezi jednotlivými součástmi, které se po dokončení tiskového procesu odstraní [11].



Obrázek 3.7 Tisk dlouhé součásti (vlevo – vychýlení, vpravo – vzepření součásti) [11]

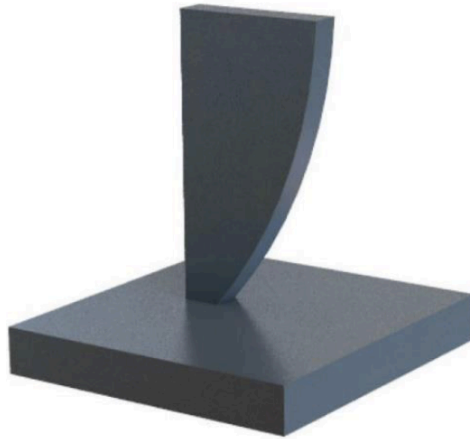
Technologie DMLS neumí dobře zpracovat ostré hrany. Při modelování součásti by měly být veškeré ostré hrany na modelu zaobleny s minimálním poloměrem zaoblení 0,5 mm [11].



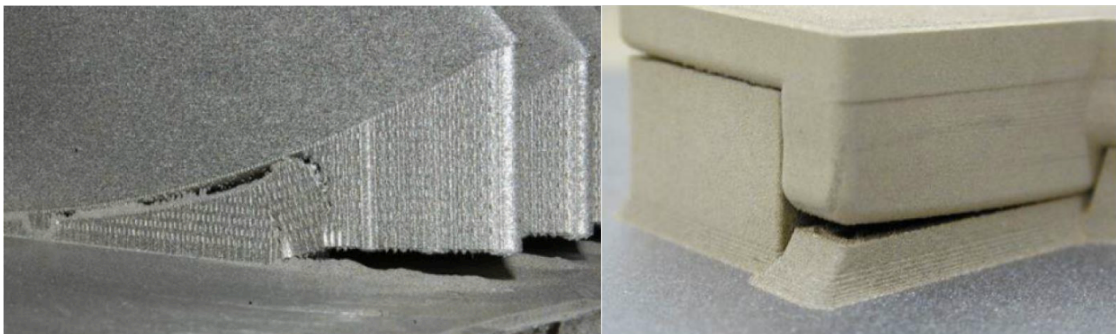
Obrázek 3.8 Zaoblení hran na modelu [11]

Vzhledem k velmi vysokým teplotám během tiskového procesu dochází k velkému pnutí uvnitř materiálu. To se u součástí může projevit prohnutím, deformací při postprocessingu, delaminací vrstev nebo dokonce vznikem trhlin. Pro ustálení a odstranění vnitřních pnutí je nutné součást tepelně zpracovat ještě před oddělením

od tiskové platformy. Při vysoké hodnotě pnutí může docházet k odtržení částí dílu nebo podpůrného systému od tiskové platformy ještě před oddělením. Odtržení lze předejít vhodnou polohou modelu, kdy stavba bude probíhat od užšího místa součásti s rozšiřováním ve směru vrstvení. Takto se omezí pnutí v oblasti tiskové platformy [11].



*Obrázek 3.9 Poloha modelu pro omezení pnutí v oblasti tiskové platformy [11]*



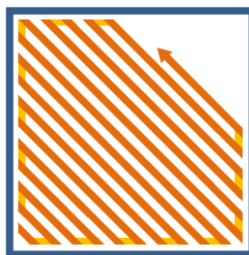
*Obrázek 3.10 Odtržení podpěr (vlevo – od platformy, vpravo – od modelu) [11]*

Cílem optimalizace při přípravě modelu je eliminovat množství podpěr a tím omezit spotřebu materiálu a energie. Dalším důvodem eliminace je složité odstraňování podpěr z těžko dostupných míst (např. dutin). Podpůrný systém má ovšem své výhody, jako jsou například zabránění deformací stavěné geometrie, odvod tepla od tvořené součásti nebo poskytnutí dočasné podpory pro tenkostěnné prvky. Ve většině případů jsou modely natolik složité, že úplná eliminace podpěr není možná. Snahou je úprava digitálního modelu tak, aby se přizpůsobil možnostem technologie laserového spékání kovů [11].

## 3.2 Strategie tisku

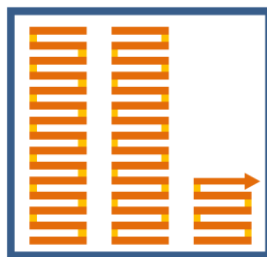
Strategie tisku, někdy též označované jako skenovací vzory, mají podstatný vliv na pórovitost, drsnost povrchu, mikrostrukturu a vnesené teplo. Dnes dostupné zařízení, pracující s technologií DMLS, mají různé strategie tisku, které výrobci popisují v manuálech. Během celého pracovního procesu jsou jednotlivé prvky nejen „krájeny“ do vrstev, ale každá vrstva je následně rozdělena do několika oblastí na základě algoritmů. Z těchto algoritmů zařízení vyhodnotí, jakým způsobem má daný prvek zhotovit. V rámci každého prvku jsou rozlišovány 3 základní oblasti. Jsou to „Volume“, „Up Skin“ a „Down Skin“. Oblast „Volume“ je definována jako vnitřní jádro, které nemá žádný viditelný okraj. Oblasti „Up Skin“ a „Down Skin“ představují naopak vrchní a spodní hraniční oblasti prvku. Takto lze jednotlivým oblastem přiřadit různé parametry, které jsou závislé na materiálu a jeho rozmístění. Ke skenování ploch zařízení Renishaw využívá čtyři hlavní strategie. Jsou to typy „Meander“, „Stripes“, „Chessboard“ a „Total Fill“ [12, 13].

Strategie typu „Meander“ pracuje na principu, kdy se směr skenování natočí vždy o úhel  $67^\circ$  po každé nanesené vrstvě. Tento úhel je ideální proto, že počátečního směru se dosáhne až po nanesení dalších 180 vrstev. Tato strategie je rychlá a efektivní. Ideální je pro díly malého průřezu [13].



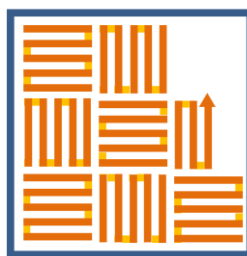
Obrázek 3.11 Princip strategie „Meander“ [13]

Strategie typu „Stripes“ rozdělí vrstvy na pruhy o definované šířce. Obvyklá šířka pruhu je 5 mm. Rozdělení umožňuje docílit konstantních časů mezi jednotlivými pruhy a konzistentní teploty v celém rozsahu. Definovaná je i vzdálenost čar, které vyplňují pruhy. Aby se zabránilo pórovitosti, lze nastavit překryv. Je ideální u dílů s velkým průřezem. Strategie „Stripes“ je však pomalejší než strategie „Meander“ kvůli většímu množství skoků laseru [13].



Obrázek 3.12 Princip strategie „Stripes“ [13]

Skenovací strategie „Chessboard“ pracuje na podobném principu jako „Stripes“. Výplň však není rozdělena do pruhů, ale do čtvercových polí o obvyklé ploše 5 mm<sup>2</sup>. Pole jsou mezi sebou vzájemně natočena o úhel 90°. Pro zlepšení pórovitosti lze aktivovat překryv polí. Tato strategie vykazuje drobné zlepšení oproti strategii „Stripes“. Časy skenování jsou však výrazně vyšší, proto se tato metoda běžně nepoužívá [13].



Obrázek 3.13 Princip strategie „Chessboard“ [13]

Strategie „Total Fill“ nachází uplatnění hlavně při vyplňování podpěr. Podpěry, které generuje systém Renishaw, jsou velmi malého průřezu, který je nejčastěji 0,5 mm x 2 mm. Jelikož je tato skenovací strategie velmi jednoduchá, dosahuje se tak kratšího času při budování podpěr [13].

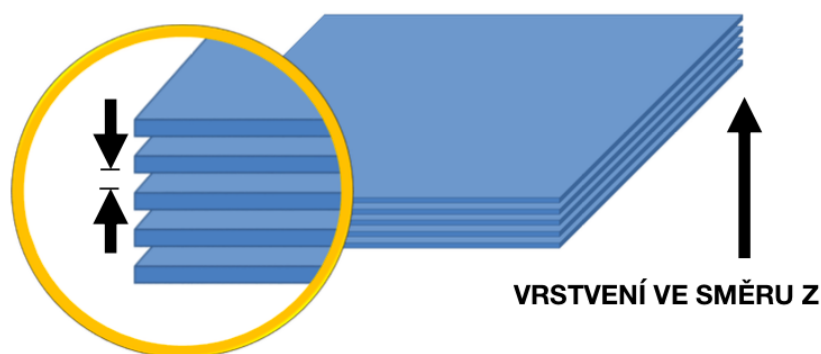


Obrázek 3.14 Princip strategie "Total Fill" [13]

### 3.3 Hlavní parametry tiskové strategie

#### 3.3.1 Výška vrstvy (Slice Thickness)

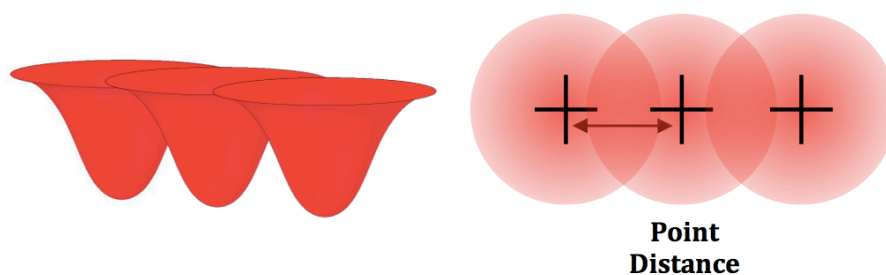
Výška vrstvy každého „plátku“ ve směru Z se udává nejčastěji v desetinných hodnotách milimetru. Například 0,02 mm nebo 0,05 mm. Často se též udává v mikronech, tedy v tisícinách milimetru. Hodnota výšky vrstvy je poté například 20  $\mu\text{m}$  nebo 50  $\mu\text{m}$ . Tento parametr má výrazný vliv především na výslednou drsnost povrchu, mechanickou pevnost nebo čas tiskového procesu.



Obrázek 3.15 Definovaná výška vrstvy [13]

#### 3.3.2 Vzdálenost bodů (Point Distance)

Působení laserového paprsku na vrstvu kovového prášku není kontinuální. Trajektorie paprsku je tvořena jednotlivými laserovými impulzy, které mají mezi sebou definovanou vzdálenost. Vzdálenost těchto bodů ovlivňuje pórozitu a soudržnost vrstev. Ideální vzdálenost, při které bude minimální pórozita, má hodnotu  $2/3$  průměru natavené oblasti (melt pool), která vznikne laserovým impulzem. Důsledkem této vzdálenosti dojde k překryvu sousedních oblastí o  $1/3$  jejich průměru. Energie laserového impulzu musí být tak velká, aby došlo k proniknutí paprsku do spodní vrstvy a tím ke spojení. Tato vzdálenost se udává v milimetrech [13].



Obrázek 3.16 Schéma „melt pool“ a vzdálenosti mezi jednotlivými body [13]

### 3.3.3 Čas osvitu (Exposure Time)

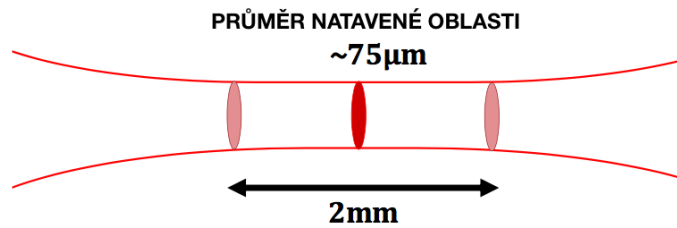
Čas osvitu je doba, po kterou laserový paprsek působí o definované energii v definovaném bodě. Standardně je tento čas udáván v  $\mu\text{s}$  [13].

### 3.3.4 Energie laseru (Laser Power)

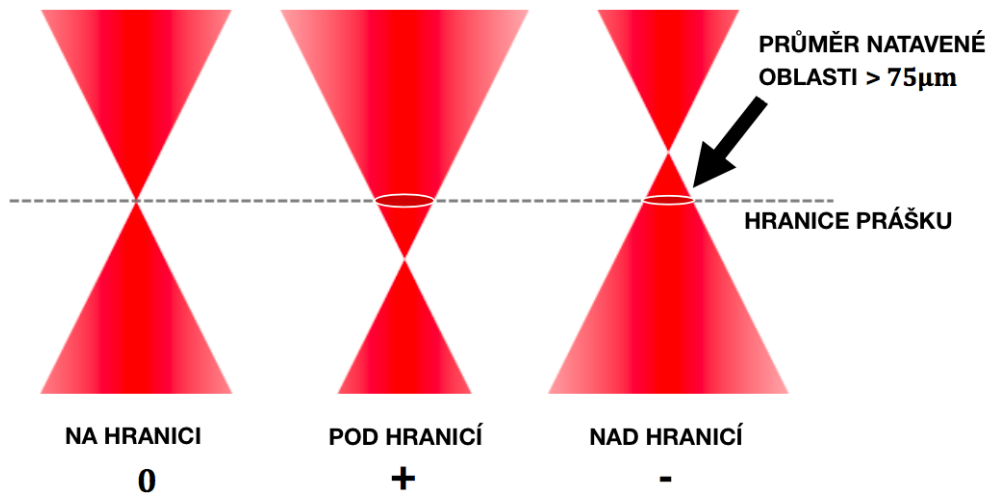
V každém bodě působí laser o určité energii, která způsobuje natavení kovového prášku. Nejvyšší hodnota energie je závislá na parametrech laseru. Nejčastěji se používají lasery s maximálním příkonem 200 W nebo 400 W. Energie laseru se tedy udává v jednotkách watt a její hodnotu lze nastavit zvlášť pro každou oblast tisku [13].

### 3.3.5 Ohnisko (Focus)

Nastavením ohniskové vzdálenosti lze ovlivňovat průměr natavené oblasti. Pokud ohnisko směřuje přesně na horní hranici roviny tiskového prášku ( $Z = 0$ ), je průměr natavené oblasti v rozmezí 66–75  $\mu\text{m}$ . Při hodnotě  $Z = 0$  se dosáhne nejmenšího průměru natavené oblasti. Ohnisko lze posunout do kladného i záporného směru. Kladné nastavení posune ohnisko pod úroveň horní hranice prášku. Při užití záporných hodnot se průměr natavené oblasti zvětší v závislosti na velikosti posunu ohniska nad úroveň horní hranice prášku [13].



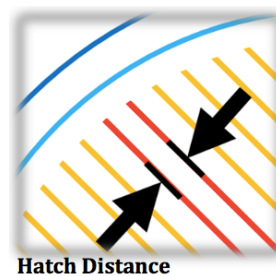
Obrázek 3.17 Oblast nastavení ohniska [13]



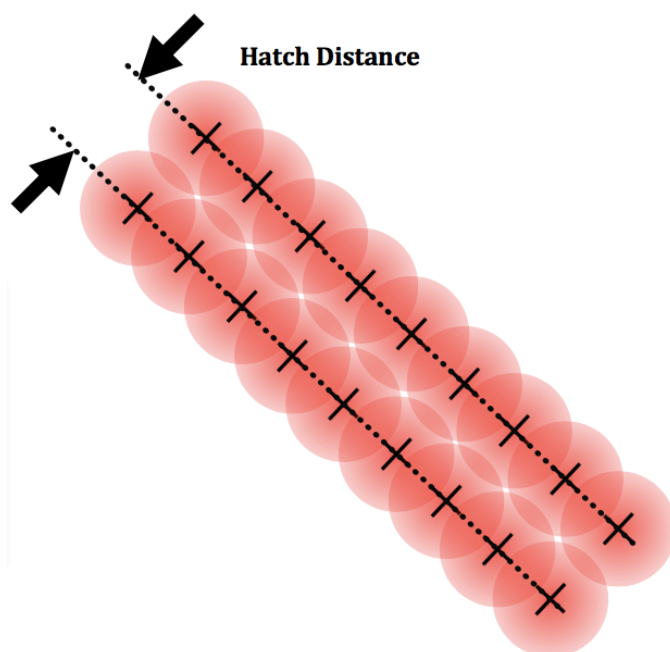
Obrázek 3.18 Vliv posunutí ohniska [13]

### 3.3.6 Vzdálenost šrafování výplně (Hatch Distance)

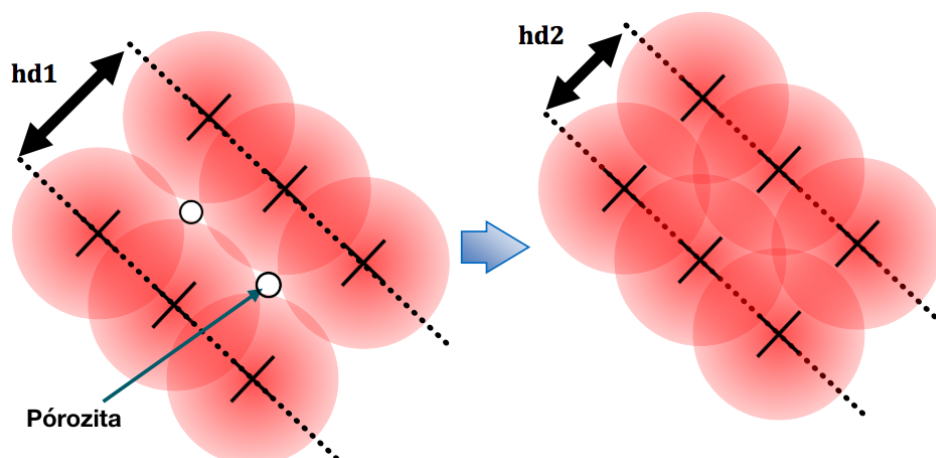
Jednotlivé body, které vytvářejí výplň obrazce, jsou umísťovány na vektorovou trajektorii, která je umístěna v definované vzdálenosti od sousední trajektorie. Tato vzdálenost, stejně jako v případě vzdálenosti bodů laserového impulzu, výrazně ovlivňuje pórovitost vrstvy a mechanické vlastnosti tištěné součásti. Vzdálenost šrafování výplně by měla být v ideálním případě (při minimální pórovitě)  $2/3$  průměru natavené oblasti (melt pool). Její hodnota se udává v milimetrech nebo mikrometrech [13].



Obrázek 3.19 Detail vzdálenosti šrafování uvnitř obrazce [13]



Obrázek 3.20 Schéma Hatch Distance [13]



Obrázek 3.21 Optimalizace vzdálenosti šrafování pro odstranění pórozity [13]

### 3.4 Parametry výrobních etap pro experimentální část

Mechanické vlastnosti bude nejvíce ovlivňovat vnitřní struktura zkušebních těles. Zvýšená pórozita a špatná soudržnost jednotlivých vrstev snižují hodnoty mechanických vlastností, jakými jsou například pevnost v tahu nebo tažnost materiálu. Tyto charakteristiky lze ovlivňovat vhodnou volbou strategie, jejichž volba bude odpovídat proporcím a složitosti modelu, a také nastavením parametrů tiskové strategie. Pro zjištění co možná nejvyšších hodnot mechanických vlastností by měla



vnitřní struktura materiálu vykazovat v ideálním případě nulovou pórozitu a maximální propojení s předchozí tištěnou vrstvou. Je tedy nutné nastavit vzdálenost šrafování a jednotlivých bodů tak, aby přesně korespondovaly s průměrem natavené oblasti. Energie laserového paprsku by měla natavit s vrstvou prášku i vrstvu ležící pod ní, čímž zajistí jejich optimální soudržnost. Ovlivňujícím činitelem je samotná kvalita a správná zrnitost kovového prášku, která by měla odpovídat výšce nadefinované vrstvy. Je-li model generován s výškou vrstvy 50  $\mu\text{m}$ , musí být maximální velikost kovové částice 50  $\mu\text{m}$ . V ideálním případě prášek obsahuje jednotlivé částice v širším intervalu zrnitosti (např. 5–50  $\mu\text{m}$ ). Důvodem je zvýšení celistvosti nanášené vrstvy. Pokud by byl prášek složen pouze ze stejně velkých částic, nebyly by vyplněny mezery, které vzniknou při jejich kontaktu. Menší částice tyto mezery vyplňují. Čím vyšší bude výška vrstvy, tím nižší budou hodnoty mechanických vlastností.

Na úkor takto zoptimalizovaných parametrů však dochází k ovlivnění jiných charakteristik součásti. Snížením výšky vrstvy dojde k výraznému navýšení času tisku, což s sebou nese také vyšší spotřebu ochranného plynu a elektrické energie. Zvýšením energie laseru se do součásti vnáší více tepla, které způsobí nárůst vnitřního napětí. Vnitřní napětí může způsobit deformaci modelu, která v horším případě vede k odtržení součásti od platformy během tisku, riziku znehodnocení výtisku a destrukci stroje. Vzdálenost šrafování výplně, vzdálenost jednotlivých bodů působení laseru a nadefinovaná výška vrstvy ovlivňují výslednou drsnost povrchu. Volba těchto parametrů tedy závisí především na požadavcích, které jsou kladeny na daný díl.

V rámci této diplomové práce je k dispozici kovový prášek, který odpovídá nastavení výšky vrstvy 50  $\mu\text{m}$ . Pro zkušební tělesa pro tahovou zkoušku a zkoušku rázem v ohybu je klíčová **vnitřní struktura materiálu v oblasti „Volume“**. Právě tato oblast nese **největší podíl na mechanické vlastnosti**. Tiskové parametry jsou obsahem souboru, který je importován do výrobního zařízení Renishaw AM250. Samotné nastavení a generování parametrů obstarává software „Build Processor“. Společnost Renishaw dodává svým zákazníkům starší verzi Build Processor 1.0 a novější verzi 1.2. V rozhraní programu lze navolit jak konfiguraci výše zmíněných hlavních parametrů tiskové strategie, tak i konfiguraci dalších parametrů týkajících se „Down Skin“, „Up skin“, nastavení platformy a dalších. Zkušební tělesa mají malý průřez, proto je nejvýhodnější volit strategii „Meander“, která zabezpečí minimální vznik studených spojů, napojení vrstev pod úhlem 67° a rychlejší tisk.

### 3.4.1 Etapa 1

Tabulka 3.1 Konfigurace parametrů tisku v oblasti „Volume“ – etapa 1

<i>Parametr tisku</i>	<i>Hodnota parametru</i>
<b><i>Tisková strategie</i></b>	Meander
<b><i>Verze Build Processor</i></b>	1.0
<b><i>Slice Thickness [μm]</i></b>	50
<b><i>Point Distance [μm]</i></b>	60
<b><i>Exposure Time [μs]</i></b>	80
<b><i>Laser Power [W]</i></b>	200
<b><i>Focus [mm]</i></b>	0
<b><i>Hatch Distance [mm]</i></b>	0,110

### 3.4.2 Etapa 2

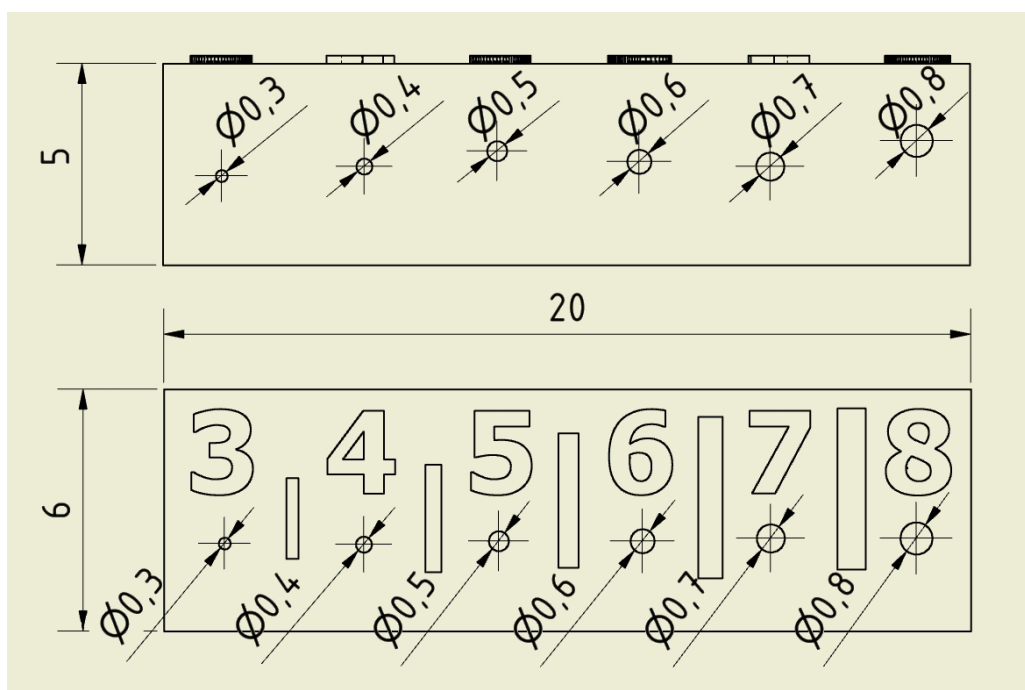
Tabulka 3.2 Konfigurace parametrů tisku v oblasti „Volume“ – etapa 2

<i>Parametr tisku</i>	<i>Hodnota parametru</i>
<b><i>Tisková strategie</i></b>	Meander
<b><i>Verze Build Processor</i></b>	1.2
<b><i>Slice Thickness [μm]</i></b>	50
<b><i>Point Distance [μm]</i></b>	60
<b><i>Exposure Time [μs]</i></b>	80
<b><i>Laser Power [W]</i></b>	200
<b><i>Focus [mm]</i></b>	0
<b><i>Hatch Distance [mm]</i></b>	0,06

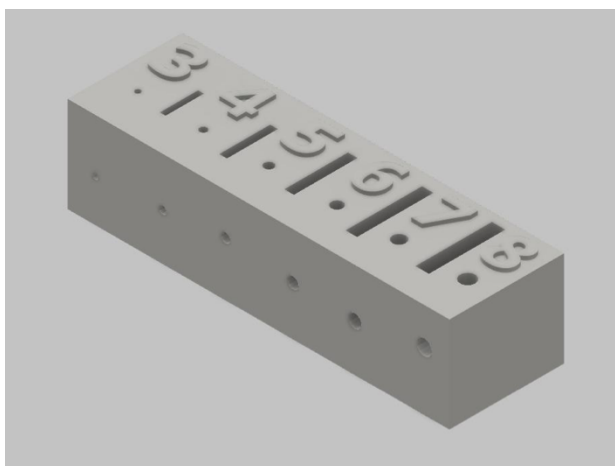
## 4 Návrh metodiky zkoušení a zkušebních těles

### 4.1 Zkušební tělesa pro analýzu průchozích otvorů

V experimentální části této práce budou vyhodnocena dvě tělesa z korozivzdorné oceli 316L realizované technologií DMLS, která obsahují definovanou řadu průchozích otvorů různých průměrů. Jedno těleso bude tepelně zpracováno a druhé bude bez tepelného zpracování. Hodnoty šesti průchozích otvorů jsou v rozmezí 0,3–0,8 mm (následující otvor je větší vždy o 0,1 mm). Otvory jsou zhotoveny jak na horní rovině zkušebního tělesa (rovnoběžně se směrem tisku), tak na boční rovině (kolmo na směr tisku). Jsou vyznačeny příslušným číslem 3–8, které koresponduje s průměry otvorů 0,3–0,8 mm. Výsledná analýza bude zaměřena na průchodnost jednotlivých otvorů v různých řezech, pórozitu a kvalitu povrchu u vzorku s tepelným zpracováním i bez něj.



Obrázek 4.1 Výkres zkušebního tělesa pro analýzu průchozích otvorů (hodnoty v mm)



Obrázek 4.2 Model zkušební tělesa pro analýzu průchozích otvorů



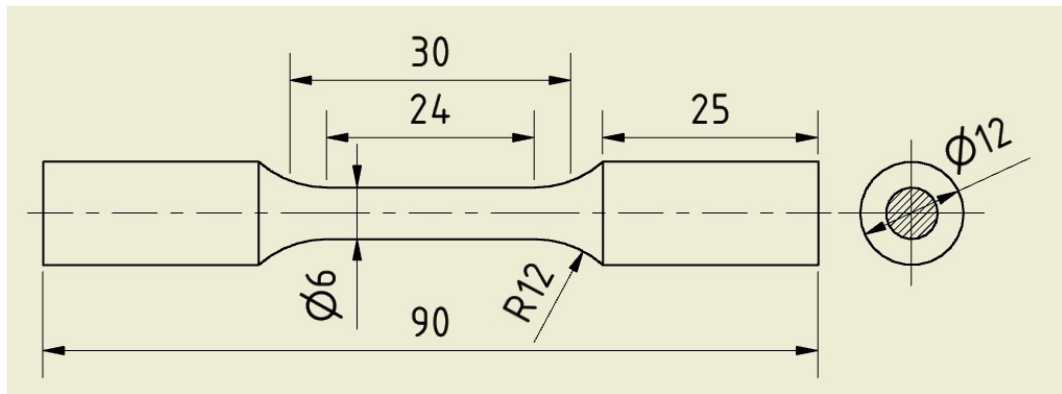
Obrázek 4.3 Zkušební těleso pro analýzu průchozích otvorů realizované technologií DMLS

## 4.2 Zkušební tělesa pro zkoušku tahem

V rámci testování laserově spěkané korozivzdorné oceli 316L bude provedena zkouška tahem u zkušebních těles navržených dle normy ASTM E8/E8M. Testovat se bude sada vzorků, které budou v různých polohách rozmístěny po tiskové platformě a zhotoveny pomocí různých (předem definovaných) tiskových parametrů. Návrh rozmístění, počet a poloha zkušebních vzorků budou v práci řešeny v experimentální části.

Tvar a velikost zkušební tělesa musejí být voleny vzhledem k omezenému tiskovému prostoru zařízení Renishaw AM250 a možnostem technologie DMLS. Limitním úhlem mezi tiskovou platformou a hranou součásti (v kolmém směru s platformou) je 45°. Dalším faktorem je také cena, která by v případě příliš velkých

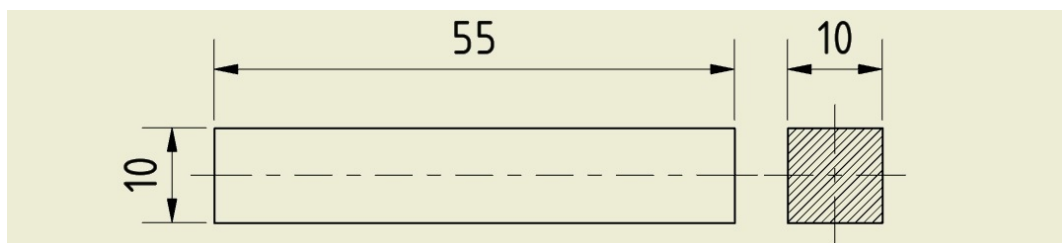
rozměrů byla velmi vysoká vzhledem k vysoké pořizovací ceně kovového prášku. Pro zkoušku tahem byl zvolen rotační tvar zkušební tělesa s kruhovým průřezem. Dle normy ASTM E8 byl zhotoven výkres tělesa s definovanými proporcemi o celkové délce 90 mm a průměrem 6 mm. Tato varianta zkušební tělesa byla volena pro maximální úsporu materiálu, co možná nejkratší dobu tisku a možnost rozmístit více zkušebních těles na jednu tiskovou platformu [14].



Obrázek 4.4 Výkres zkušební tělesa pro zkoušku tahem (hodnoty v mm)

Norma předpokládá, že vzorky jsou vyrobeny technologií obrábění. Nezakazuje však použít jinak zhotovené vzorky v případě, že povrch nevykazuje viditelné vady (okuje, póry, otřepy apod.), které by mohly zkreslit výsledky zkoušky. V případě výskytu vad na povrchu zkušební tělesa musejí být tyto vady odstraněny technologií obrábění, ale zároveň musí být zachovány správné proporce zkušební tělesa [14].

### 4.3 Zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu



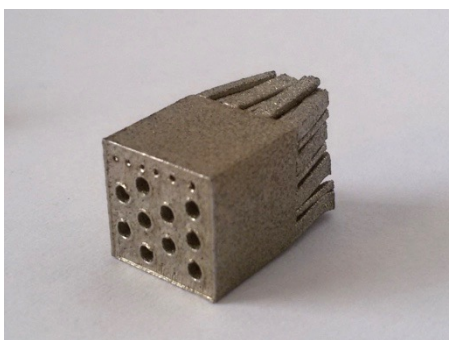
Obrázek 4.5 Výkres zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu (hodnoty v mm)

Zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu budou zhotovena podle normy ČSN ISO 148-1 o rozměrem dle výkresu na předchozí straně. Kvůli nejisté přesnosti a předepsaného způsobu zhotovení neobsahují vrub a budou přeražena bez dalších úprav. Pro stanovení vrubové houževnatosti se tedy bude uvažovat plocha 1 cm<sup>2</sup>.

#### **4.4 Zkušební tělesa pro vyhodnocení vlivu tepelného zpracování**

V případě korozivzdorné oceli 316L, ze které jsou zkušební vzorky vyrobeny, je dlouhodobý proces ohřevu při rozpouštěcím žíhání provázen nežádoucím vznikem okují na povrchu vzorku. Tento jev se prokázal při tepelném zpracování vzorků pro analýzu průchozích otvorů. Byly proto zhotoveny dva vzorky, které budou během dlouhodobého ohřevu chráněny před vlivy okolní atmosféry. Způsob ochrany bude odlišný. První vzorek bude chráněn speciálním nátěrovým systémem CONDURSAL Z1100 a druhý vzorek bude žíhán v prostředí ochranného plynu (argonu). Následně budou vzorky porovnány se vzorkem bez ochrany a vyhodnoceny z hlediska kvality povrchu a množství vzniklých okují.

Zkušební těleso pro vyhodnocení vlivu tepelného zpracování je ve tvaru krychle s délkou strany 10 mm. Obsahuje průchozí otvory různých průměrů, které nejsou předmětem vyhodnocení.

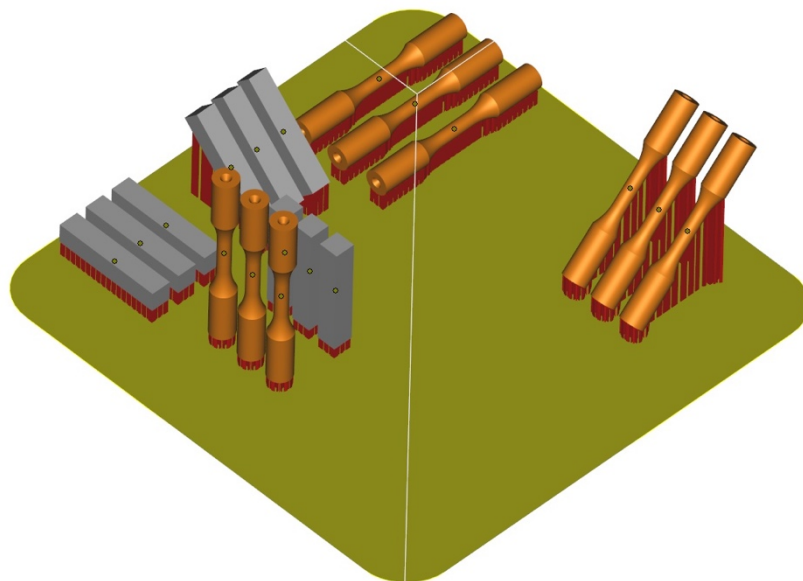


*Obrázek 4.6 Zkušební těleso pro vyhodnocení vlivu TZ*

#### **4.5 Zhotovení a příprava zkušebních těles**

Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku a zkoušku rázem v ohybu se realizovala pomocí technologie laserového spékání kovů DMLS na zařízení

Renishaw AM250. Byla vytištěna sada, která obsahuje vždy tři vzorky pro každou modifikaci polohy tělesa vzhledem k tiskové platformě (0°, 45° a 90°). Pro zkoušku rázem v ohybu i pro zkoušku tahem tak bylo vytvořeno celkem 18 vzorků. Po odejmutí z tiskové platformy bylo nutné odstranit veškeré podpěry z povrchu zkušebních těles. Tento úkon se prováděl ručně za pomoci kleští. Celkem bylo odstraněno 110 g podpěr. Důležitým krokem je označení zkušebních těles pro jejich snazší identifikaci. Tělesa pro tahovou zkoušku jsou označena písmenem T s příslušným úhlem (polohou) a číslem vzorku. Obdobně jsou označena i tělesa pro zkoušku rázem v ohybu, kdy značení začíná písmenem R.



*Obrázek 4.7 Rozložení zkušebních těles na tiskové platformě (prostředí Magics)*



*Obrázek 4.8 Zkušební tělesa před odstraněním podpěr*



Obrázek 4.9 Zkušební tělesa po odstranění podpěr



Obrázek 4.10 Sada zkušebních těles po odstranění podpěr a označení



## 4.6 Zkouška tahem

Tato zkouška patří mezi nejstarší a nejrozšířenější laboratorní zkoušky. Jako první ji provedl Leonardo da Vinci již v patnáctém století. Tahová zkouška podává přímou informaci o mechanických vlastnostech daného materiálu. Zkušební tělesem je zkušební tyč, která musí odpovídat přesným rozměrům uvedených v normě. Samotná zkouška musí též probíhat v normovaných podmínkách. Velikost a tvar zkušebních těles závisí na možnostech výrobní technologie a na součásti, ze které je zkušební tyč odebrána. Běžnými způsoby zhotovení zkušebních tyčí jsou technologie obrábění nebo odlévání. Lze užít i neobrobených tyčí (např. oddělených řezem z drátů nebo dlouhých tyčí). Musí však být zajištěna celistvost povrchu, jejíž narušení by mohlo ovlivnit výsledky zkoušky. Norma uvádí konstrukční provedení vzorku s kruhovým průřezem nebo nekruhovým průřezem (čtvercový, obdélníkový, šestihranný či jiný průřez) [15].

Tahová zkouška je realizována na univerzálních zkušebních strojích. Ty umožňují zatěžovat zkušební těleso také ohybem či tlakem, cyklicky nebo staticky. Vždy obsahují tuhý rám, zatěžovací, ovládací a registrační systémy. Mohou být hydraulické nebo mechanické. Hlavním parametrem je maximální síla, které může daný zkušební stroj dosáhnout. Pro zkušební tělesa malých průřezů stroje disponují řadou rozsahů sil odstupňovaných podle velikosti. Pokud je nutno měřit velmi malé deformace, používají se průtahoměry upevněné na zkušební tyč. Nové zkušební stroje jsou řízeny počítačem, u kterých je deformace měřena kontaktně nebo bezkontaktně laserem. V průběhu zkoušky tahem je zkušební tyč zatěžována silou, kterou vyvolá zkušební stroj. Zkouška nejčastěji končí přetržením zkušebního tělesa. Během zkoušky probíhá záznam vztahu působící síly a jí odpovídající deformace [15].

Z takto naměřených hodnot se převodem následně získá vztah pro mechanické vlastnosti. Mezi ty základní patří mez kluzu, která je definována jako horní nebo dolní napětí, při kterém dochází k další plastické deformaci bez dalšího trvalého zvyšování napětí. Některé materiály však mez kluzu nevykazují. V takových případech se určuje tzv. smluvní mez kluzu, která odpovídá napětí, při kterém se poměrné prodloužení rovná předepsané hodnotě. Tato hodnota je zpravidla 0,2 % trvalé (plastické) deformace. Další významnou mechanickou vlastností je mez pevnosti v tahu. Ta je definována jako napětí, které odpovídá největšímu zatížení předcházejícímu přetržení zkušební tyče. V pořadí další vlastností je tažnost materiálu. Tažnost charakterizuje

trvalé prodloužení měřené délky po přetržení a je vyjádřena v procentech původní měřené délky. Poslední ze získávaných základních vlastností je kontrakce, která popisuje největší změnu plochy příčného průřezu. Tato změna je vyjádřena v procentech počáteční plochy příčného průřezu. Měření se provádí po přetržení zkušební tyče [15].

Základní mechanické vlastnosti jsou popsány těmito vztahy [15]:

$$\text{mez kluzu:} \quad R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [MPa] \quad (1)$$

$$\text{smluvní mez kluzu:} \quad R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [MPa] \quad (2)$$

$$\text{mez pevnosti v tahu:} \quad R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [MPa] \quad (3)$$

$$\text{tažnost:} \quad A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

$$\text{kontrakce:} \quad Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

<b>Poznámky:</b>	$F_e$	síla na mezi kluzu [N]
	$F_{p0,2}$	síla při dosažení trvalé deformace 0,2 % poč. měřené délky [N]
	$F_m$	největší síla předcházející přetržení zkušební tyče [N]
	$S_0$	počáteční příčný průřez [mm <sup>2</sup> ]
	$S_u$	nejmenší příčný průřez po přetržení [mm <sup>2</sup> ]
	$L_0$	počáteční délka zkušební tyče [mm]
	$L_u$	konečné délka zkušební tyče po jejím přetržení [mm]

Výsledkem zkoušky tahem je kromě materiálových charakteristik tahový diagram, který může být dvojího typu, a to skutečný a smluvní. Skutečný tahový diagram popisuje vztah mezi skutečným napětím a logaritmickou deformací. Smluvní tahový diagram popisuje vztah mezi smluvním napětím (vztaženém k počátečnímu průřezu) a poměrném prodloužení (vztaženém k počáteční délce zkušební tyče).

## 4.7 Zkouška rázem v ohybu

Citlivost materiálu vůči koncentraci napětí při rázovém namáhání se zjišťuje pomocí zkoušky rázem v ohybu dle normy ČSN ISO 148-1. Principem zkoušky je přeražení zkušební tyče jedním úderem kyvadlového kladiva za předem definovaných podmínek. Zkušební těleso má uprostřed zhotoven vrub a při zkoušce je podepřeno na obou koncích. Během zkoušky dochází k rozevírání vrubu, kdy kladivo naráží na stranu protilehlou k vrubu. Výsledek zkoušky rázem v ohybu je v podobě práce spotřebované k přeražení zkušební vzorku. Tato veličina se nazývá rázová práce, jejíž jednotkou jsou jouly. Autor zkoušky Georges Charpy definoval pojem vrubová houževnatost, což je práce potřebná k přeražení zkušební tyče o průřezu  $1 \text{ cm}^2$  s vrubem předepsaných rozměrů. Jelikož takto definovaná jednotka nemá fyzikální charakter, je možné výsledky porovnávat pouze v případě zachování stejných rozměrů zkušební vzorku a za předem stanovených podmínek. Pokud není předepsáno jinak, zkouška se provádí při teplotě  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  s možnou odchylkou  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  [15].

Zkušební tyč má čtvercový průřez s délkou strany 10 mm. Její délka je 55 mm s možnou odchylkou 0,6 mm. Možné jsou dva typy vrubu ve tvarech U a V. V-vrub má definovaný úhel  $45^\circ$  s odchylkou  $2^\circ$  s poloměrem zaoblení dna vrubu o hodnotě 0,25 mm. V případě nemožnosti zhotovit zkušební těleso základních rozměrů, lze užít menších rozměrů s šířkou 7,5 mm nebo 5 mm. U-vrub má definovanou hloubku 5 mm. V místě vrubu má výška zkušební tyče 5 mm s možnou odchylkou 0,09 mm. Velikost poloměru dna zaoblení je 1 mm [15].

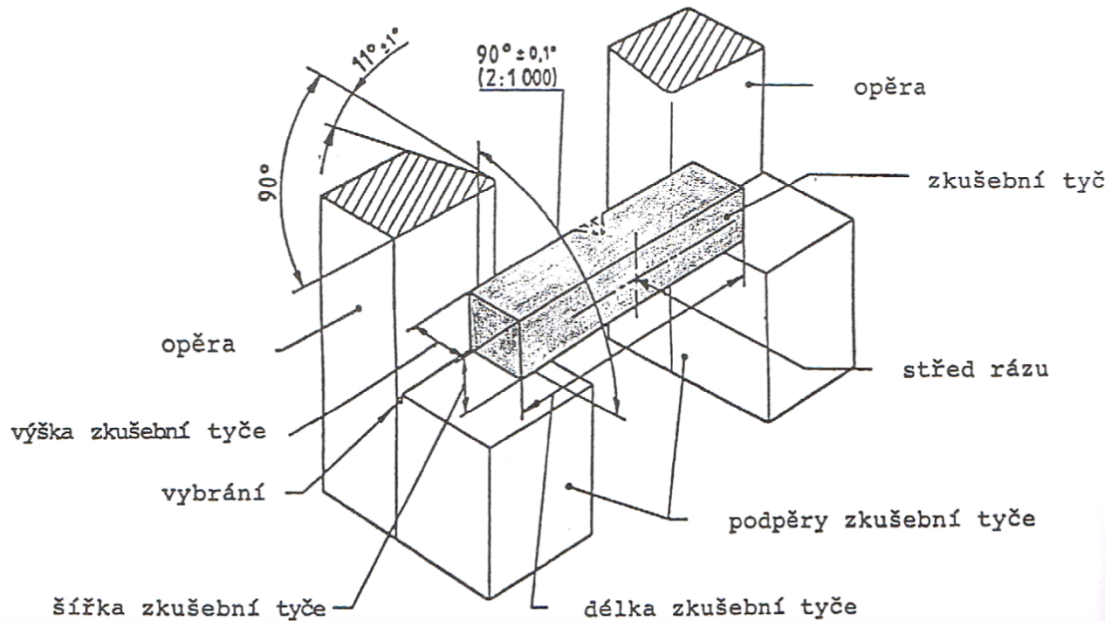
Opěry jsou od sebe vzdáleny 40 mm a jejich poloměr zaoblení je 1 mm. Poloměr zaoblení břitu kladiva je 2 mm a úhel břitu kladiva  $30^\circ$ . Kladivo s největší šířkou 18 mm má v okamžiku rázu rychlost 5–5,5 m/s [15].

*Příklad značení:* KV = 120 J (nominální energie 300 J, V-vrub, nárazová práce 120 J)

KU 150 = 80 J (nominální energie 150 J, U-vrub, nárazová práce 80 J)

*Vztah pro výpočet vrubové houževnatosti [15]:* 
$$KCV (KCU) = \frac{KV (KU)}{S_0} \left[ \frac{J}{\text{cm}^2} \right] \quad (6)$$

<b>Poznámky:</b>	KCV	vrubová houževnatost (V-vrub)
	KCU	vrubová houževnatost (U-vrub)
	KV	nárazová práce (V-vrub), [J]
	KU	nárazová práce (U-vrub), [J]
	$S_0$	počáteční průřez pod vrubem [cm <sup>2</sup> ]



Obrázek 4.11 Zkušební těleso na podpěrách kyvadlového kladiva [15]

Hodnota vrubové houževnatosti se zjišťuje i v podmínkách jiných než okolních, kdy je zkušební těleso vloženo do chladícího nebo vyhřívacího prostředí na dostatečnou dobu potřebnou k dosažení dané teploty. Následně musí být zkušební těleso přeraženo do 5 sekund po vyjmutí z daného prostředí. Nárazovou práci nelze určit, pokud se zkušební těleso zcela nepřerazí [15].

Z teplotní závislosti výsledků zkoušek rázem v ohybu lze určit přechodovou (tranzitní) teplotu, která je jedním z důležitých kritérií pro hodnocení základních mechanických vlastností ocelí. Přechodová teplota  $t_p$  je teplota přechodu od houževnatého ke křehkému lomu. Pro její stanovení existuje mnoho metod. Mezi ty nejrozšířenější patří určení přechodové teploty z inflexního bodu křivky teplotní závislosti měřené veličiny. Další metodou je stanovení teplotní oblasti z rovnosti ploch přechodu ke křehkému lomu. Pro stanovení tranzitní teploty se nejčastěji používají kritéria nárazové práce a vrubové houževnatosti [15].

## 4.8 Zkoušky tvrdosti

Zkoušky tvrdosti jsou snadno proveditelné zkoušky, které patří do nejvíce používaných způsobů zkoušení materiálu. Výhodou těchto zkoušek je možnost zkoušení již hotových dílců bez jejich porušení nebo znehodnocení. Existují různé typy zkoušek, které mezi sebou nelze exaktně porovnávat. Každá metoda má svoji stupnici. Nejpoužívanějšími metodami jsou metody statické vnikací. Principem těchto zkoušek je pozvolné vtlačování vnikacího tělesa (indentoru) do povrchu materiálu, čímž se vytvoří vtisk. Tvrdost lze definovat jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Hodnota tvrdosti se určuje z poměru zátěžné síly a plochy vtisku. Tento poměr se používá pro stanovení tvrdosti dle Vickerse a Brinella. Dále lze hodnotu tvrdosti určit z hloubky vtisku při daném zatížení indentoru. Tento princip užívá Rockwellova metoda. U zkoušení podle Vickerse je nutné vtlačovat indentor do alespoň jemně broušeného povrchu, aby byla plocha vtisku dobře viditelná a změřitelná. Povrch před zkoušením tvrdosti by měl být bez maziva, okují nebo dalších nečistot. Všechny zkoušky tvrdosti se musí provádět při teplotě 10–35 °C (v arbitrážních případech při teplotě 23±3 °C). Předepsaná doba od počátku do dosažení plného zatížení je 8±2 s [15].

### 4.8.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Tvrdost zkušebních těles zhotovovaných technologií DMLS se bude stanovovat Vickersovou metodou. Norma zkoušky má označení ČSN EN ISO 6507-1. Tato metoda spočívá ve vnikání diamantového indentoru do zkušebního tělesa při zatížení  $F$  působícím ve směru kolmém k povrchu. Diamantový kužel má čtvercovou základnu a vrcholový úhel 136°. Zatížení se pohybuje v rozsahu 49–981 N. Standardním zatížením je 294 N. Jiné zatížení je nutné vyznačit s odpovídajícím symbolem tvrdosti. Po dokončení vtlačování a odlehčení se změří obě délky vzniklých úhlopříček, které se zprůměrují. Obvyklá doba plného zatěžování je 10–15 s. Tvrdost podle Vickerse se označuje symbolem HV [15].

Vztah pro určení tvrdosti podle Vickerse [15]:

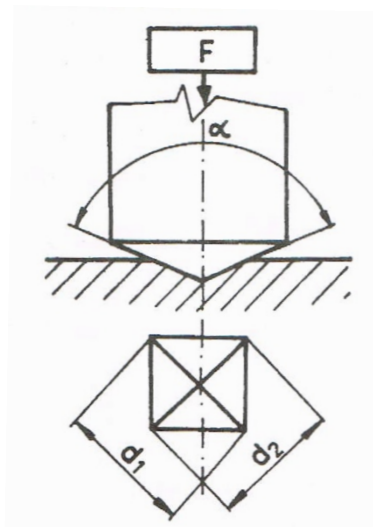
$$HV = 0,102 \cdot \frac{2F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{\left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2} \quad (7)$$

**Poznámky:**  $d_1, d_2$  délky úhlopříček [mm]  
 $d$  aritmetický průměr délek úhlopříček [mm]  
 $F$  zkušební zatížení [N]

Při zatěžování je nutné umístit zkušební těleso na tuhou podložku. Tloušťka zkušebního tělesa musí být aspoň  $1,5 d$ . Vzdálenost mezi středy sousedících vtisků musí být pro ocel trojnásobkem průměrné délky úhlopříček vtisku. Vzdálenost středu vtisku od okraje musí být minimálně  $2,5 d$  [15].

*Příklad značení:*

650 HV1 (tvrdost 650 dle Vickerse určená zatížením  $1 \text{ kp} = 9,81 \text{ N}$ )  
650 HV1/20 (tvrdost 650 dle Vickerse určená zatížením  $9,81 \text{ N}$  působícím po nestandardní dobu 20 s)



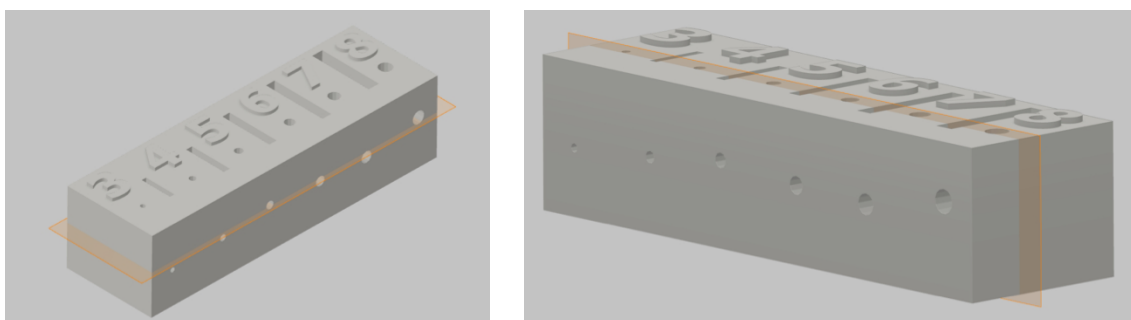
Obrázek 4.12 Schéma zatěžování při zkoušce tvrdosti dle Vickerse [15]

## 4.9 Metalografie vzorků pro analýzu průchozích otvorů

Cílem metalografického zkoušení je sledování struktury nebo vad materiálu, které jsou pozorovatelné pouze v případě přesného dodržení jednotlivých kroků přípravy vzorku. Během této přípravy nesmí dojít k ovlivnění struktury (plastickou deformací, vysokou teplotou vedoucí k fázovým transformacím). Nejvíce používanou metodou sledování metalografických výbrusů je optická mikroskopie nebo skenovací elektronová mikroskopie. Pozorováním vzorků lze získat poměrné zastoupení metalurgických fází, zjišťovat výskyt pórozity materiálu nebo vyhodnocovat měření mikrotvrdosti [16].

### 4.9.1 Příprava metalografických výbrusů

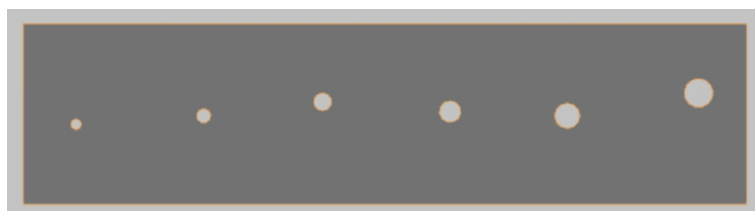
Prvním krokem je oddělení části materiálu (vzorku), která má být metalograficky zkoumána, z testované součásti. Tento úkon se provádí pomocí řezání nebo odfrézování. Velikost jednotlivých vzorků se stanoví dle parametrů mikroskopu. V případě přípravy vzorků pro analýzu průchozích otvorů je vytištěná součást rozdělena v rovině, která protíná otvory směřující kolmo na směr tisku. Druhý řez je veden v rovině procházející otvory, které jsou rovnoběžné se směrem tisku. Takto jsou rozděleny oba typy vzorků (tepelně zpracovaný i bez tepelného zpracování) [16].



Obrázek 4.13 Vyznačení řezných rovin na modelu zkušebního tělesa



*Obrázek 4.14 Řez kolmý na směr tisku (model)*



*Obrázek 4.15 Řez rovnoběžný se směrem tisku (model)*

Řez vedoucí kolmo na směr tisku byl realizován metalografickou pilou Struers Labotom-3 s tloušťkou kotouče 1,5 mm. Kotouč a místo řezu jsou po celou dobu dělení intenzivně chlazeny chladícím médiem, aby v materiálu nedošlo k výraznému zvýšení teploty vlivem tření a tím k fázovým transformacím.



*Obrázek 4.16 Metalografická pila Struers Labotom-3*

Řez vedoucí rovnoběžně se směrem tisku byl proveden na pile Buehler IsoMet 1000 s diamantovým kotoučem o tloušťce 0,7 mm. Tato pila umožňuje upnout



vzorek do speciálního přípravku, který je následně připevněn na přidržovač s automatickým přitlakem. Přítlak je vyvolán stavitelným závažím. Celý proces dělení je chlazen vodou, která je do styčné plochy přiváděna rotací diamantového kotouče. Jelikož jsou vzorky zhotoveny z korozivzdorné oceli, není problém použít vodu jako chladicí médium. Důvodem použití přesné pily je menší plocha pro upnutí vzorku, v případě tohoto typu řezu, vzhledem k menším rozměrům zkušební vzorku. Výhodami jsou menší tloušťka kotouče a plynulý chod řezu.



Obrázek 4.17 Přesná metalografická pila Buehler IsoMet 1000

Po odběru části vzorku k analýze následuje preparace. Tento krok je usnadněním pro jednodušší manipulaci se vzorkem při následném broušení a také pro nutnost dodržení ostrých hran nebo zachování povrchových vrstev. Zalití vzorku do válce definovaného průměru usnadňuje poloautomatickou přípravu během procesu broušení a leštění. Jako zalévací médium byla použita pryskyřice ve formě sypkého prášku, která se pomocí odměrky nadávkovala do přípravné komory lisu. Zalisování za tepla probíhá při teplotách 100–180 °C při vysokém tlaku 30–50 kN. Pro zalisování vzorků za tepla byl použit přístroj Stuers CitoPress-1 [16].



Obrázek 4.18 Lis Stuers CitoPress-1 pro zalisování za tepla

Nyní je vzorek připraven pro vyhlazení povrchu. Musí být dosaženo dokonale „skleněného“ povrchu bez viditelných rýh. Toho se dosáhne postupným úběrem materiálu v místě určeném k analýze. Jelikož je vzorek zalisován do vytvrzené pryskyřice ve tvaru válce, je velmi pevně uchycen a umožňuje snadné upnutí do držáku poloautomatické brusky. V první řadě se využívá brusného papíru s brusivem SiC nebo  $Al_2O_3$  s nižší zrnitostí (např. 60 dle normy FEPA). Časový interval pro broušení je okolo dvou minut. Proces broušení je rozdělen do více kroků, kdy se v každém kroku použije materiál s vyšší zrnitostí. Vzorek rotuje v držáku ve směru otáčení brusného kotouče, který se pohybuje rychlostí 30–150 ot./min. Díky těmto vysokým otáčkám je zapotřebí chladit brusný kotouč vodou, aby nedošlo ke změně struktury a ovlivnění výsledků. Přítlačná síla na povrch brusného kotouče je 1–100 N. Držák poloautomatické brusky umožňuje brousit více vzorků najednou, které mohou být přitlačovány každý jinou silou [16].

Při následném procesu leštění již materiál z povrchu vzorku neubývá (zanedbatelné úbytky). Dochází zde pouze k deformaci vrcholů povrchové drsnosti. Proces je obdobný jako u broušení. Vzorek je stanoveným přítlakem přitlačen ke kotouči, na kterém je umístěna speciální lešticí podložka (saténová, flanelová, sametová aj.) s naneseným volným brusivem. Jako volné brusivo se obvykle používá  $Al_2O_3$ , MgO,  $Cr_2O_3$  nebo diamant v podobě pasty, suspenze či prášku. Při procesu leštění se již chlazení vodou nepoužívá. Držák se vzorkem se otáčí proti směru otáčení

leštící podložky s brusivem. Tím je dosaženo zrcadlového lesku na povrchu vzorku. Pod mikroskopem tak lze sledovat například nečistosti nebo vměstky v materiálu [16].



*Obrázek 4.19 Poloautomatická bruska Buehler Beta*

Pro pozorování mikrostruktury je nutné vzorek naleptat. Každé skupině materiálů náleží jiný druh leptadla a jiné podmínky leptání, které je nutné, pro co možná nejprokazatelnější výsledky, striktně dodržovat. Vzorek určený k leptání se na přesně definovanou dobu ponoří do leptacího média a následně osuší. Takto se vytvoří a zviditelní požadovaný povrchový reliéf. Vzorek je tak připraven k pozorování pod mikroskopem [16].

## 5 Vyhodnocení experimentů

### 5.1 Vliv tepelného zpracování oceli 316L

Korozivzdorná ocel 316L patří mezi austenitické oceli. Tuto ocel nelze vytvrzovat pomocí tepelného zpracování (nelze měnit mechanické vlastnosti). Tepelného zpracování je zde používáno z důvodu náchylnosti oceli ke vniku mezikrystalové koroze. Ta vede k omezení korozivzdorných vlastností oceli. Proto je vhodné aplikovat rozpouštěcí žíhání, při kterém se ale ocel nesmí nauhličit. Toto zpracování vede k rozpuštění karbidů na hranicích zrn [17].

#### 5.1.1 Tepelné zpracování bez ochrany

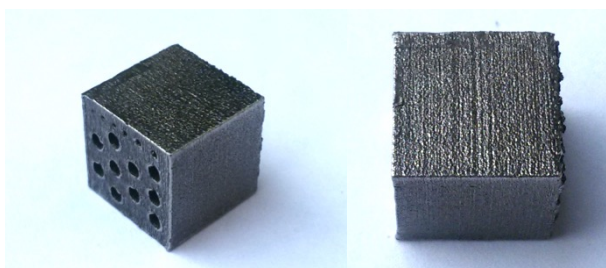
V případě tepelného zpracování bez ochrany, u vzorku pro analýzu průchozích otvorů, se ocel zahřála na teplotu 1100 °C (tato teplota by neměla být přesažena) s výdrží 2 hodiny. Následně se vzorek rychle zchladil ve vodě. Po osušení jsou na povrchu vzorku patrné zčernalé okuje. Ty jsou způsobeny oxidací povrchu, kdy se za vyšších teplot rozpadají zbytky organických nečistot bohaté na kyslík. Dalším důvodem je reakce s okolní atmosférou, kdy dochází k nauhličení oceli za vysokých teplot. Aby k produkci okují nedocházelo, měl by se povrch součásti dokonale odmastit nejlépe alkalickým činidlem a provádět proces tepelného zpracování v ochranné atmosféře nebo povrch ošetřit vhodným ochranným nátěrem [17].



Obrázek 5.1 Zokujený povrch vzorku po TZ bez ochranné atmosféry

### 5.1.2 Tepelné zpracování s ochrannou nátěrovým systémem CONDURSAL

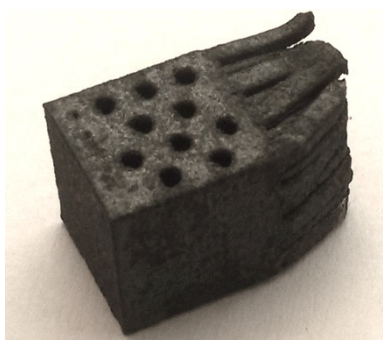
Zkušební těleso bylo ošetřeno dvěma vrstvami nátěrové hmoty CONDURSAL Z1100. Takto ošetřený povrch má nazelenalou barvu, která je dána odstínem ochranného nátěru. Ohřev se prováděl v komorové peci při teplotě 1100 °C s výdrží 2 hodiny. Po vyjmutí z pece se vzorek rychle zchladil ve vodě. Na povrchu součásti již nejsou viditelné žádné stopy okují. Jednou z předností nátěru CONDURSAL je vypálení této ochranné vrstvy. Povrch po tepelném zpracování vykazuje pouze drobné množství načervenalých zbytků, které jsou usazeny ve spárách mezi jednotlivými vrstvami. Tyto zbytky lze mechanicky odstranit například jemným ocelovým kartáčem.



Obrázek 5.2 Zkušební těleso po TZ ošetřené nátěrem CONDURSAL Z1100

### 5.1.3 Tepelné zpracování v ochranné atmosféře

Druhé zkušební těleso bylo žíháno v trubkové peci v prostředí ochranné atmosféry. Žíhání se stejně jako v případě použití ochranného nátěru provádělo při 1100 °C po dobu 2 hodiny. Po vyjmutí jsou na povrchu vzorku patrné okuje, které však nejsou tak výrazné jako v případě žíhání bez ochrany. Vznik okují je důsledkem nízké koncentrace ochranného plynu. Pro zajištění povrchu bez okují je nutná vyšší koncentrace ochranného plynu a po dobu ohřevu zamezení přístupu vzduchu.

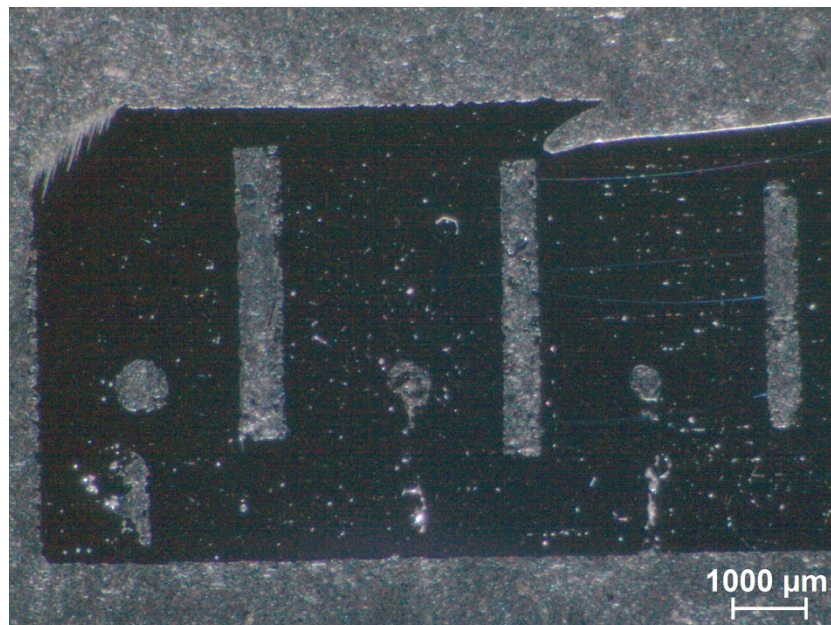


Obrázek 5.3 Zkušební těleso po TZ v ochranné atmosféře

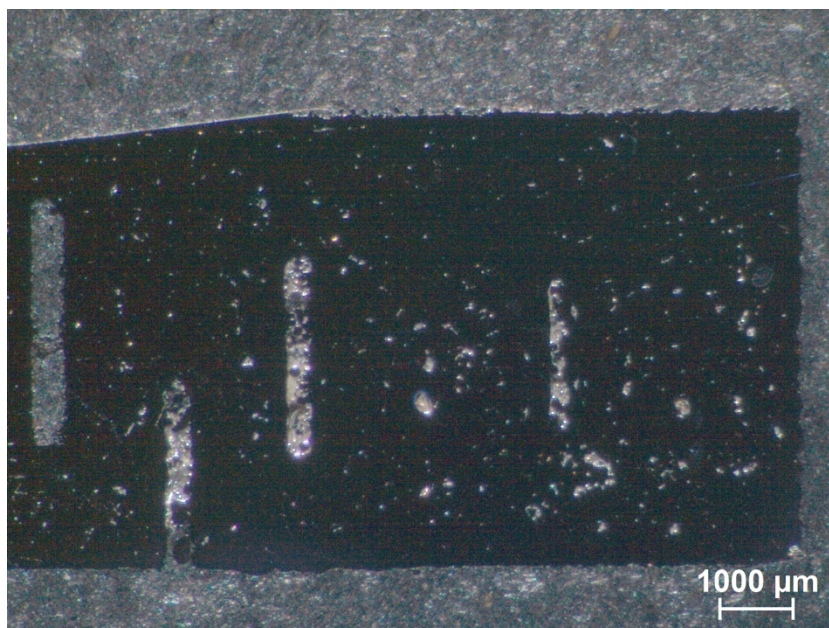
## 5.2 Metalografické výsledky vzorků pro analýzu průchozích otvorů

### 5.2.1 Konfigurace – etapa 1

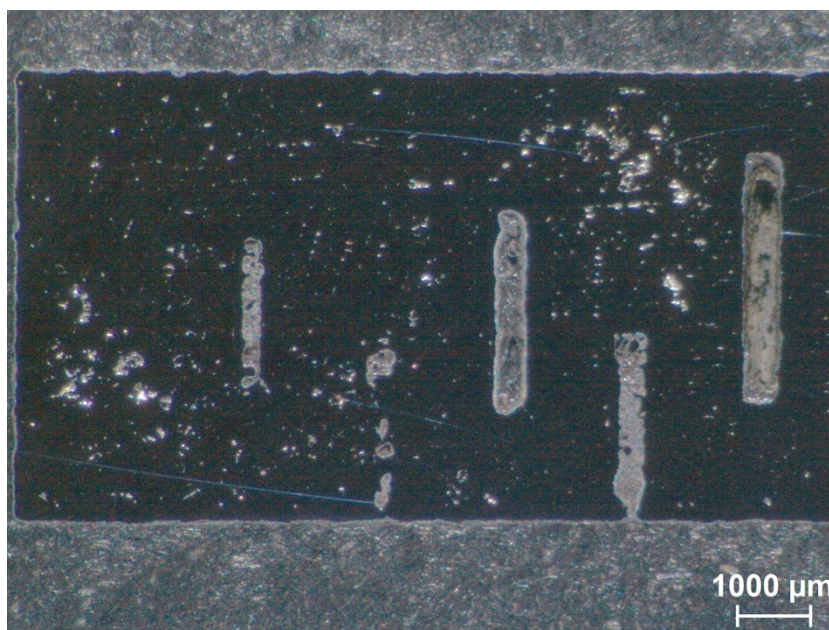
Metalografický výbrus byl připraven ze tří vzorků. První vzorek (bez TZ) byl rozdělen kolmo na směr tisku (rovnoběžně k tiskové platformě). Vzhledem k velmi malým rozměrům zkušebního tělesa je řez veden tak, aby bylo možné těleso upnout a rozdělit na metalografické pile. Řez tak prochází polovinou výšky součásti. Rozdělení tělesa rovnoběžně se směrem tisku (kolmo k tiskové platformě) nebylo možné, vzhledem k malým rozměrům zkušebního vzorku a možnostem upínání na metalografické pile, realizovat v případě vzorku bez TZ. Druhý a třetí vzorek (tepelně zpracované) měly lépe orientované podpěry, které před dělením vzorků nebyly odstraněny. Tyto podpěry napomohly upnutí vzorků tak, aby bylo možné realizovat jak svislý, tak vodorovný řez. Po zalisování, broušení, leštění a naleptání vzorků se preparáty umístily pod světelný mikroskop, který zaznamenal snímky povrchu s desetinásobným zvětšením.



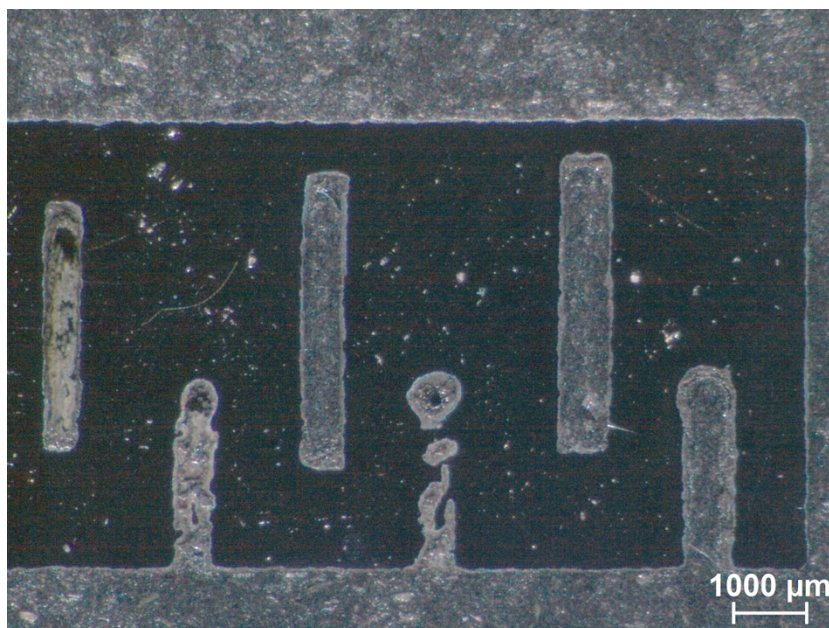
Obrázek 5.4 Metalografický snímek tělesa bez TZ (řez kolmý na směr tisku, strana s krajním otvorem 0,8 mm)



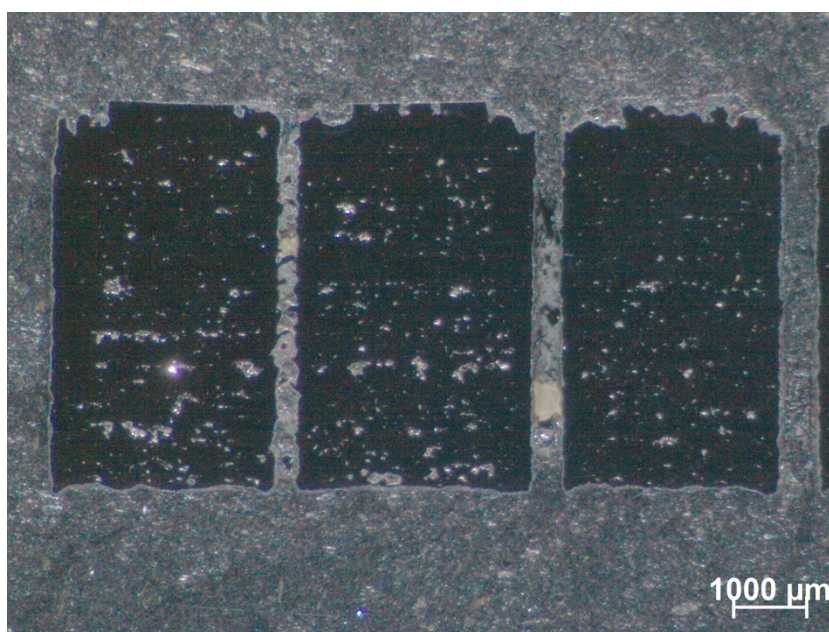
Obrázek 5.5 Metalografický snímek tělesa bez TZ (řez kolmý na směr tisku, strana s krajním otvorem 0,3 mm)



Obrázek 5.6 Metalografický snímek TZ tělesa (řez kolmý na směr tisku, strana s krajním otvorem 0,3 mm)

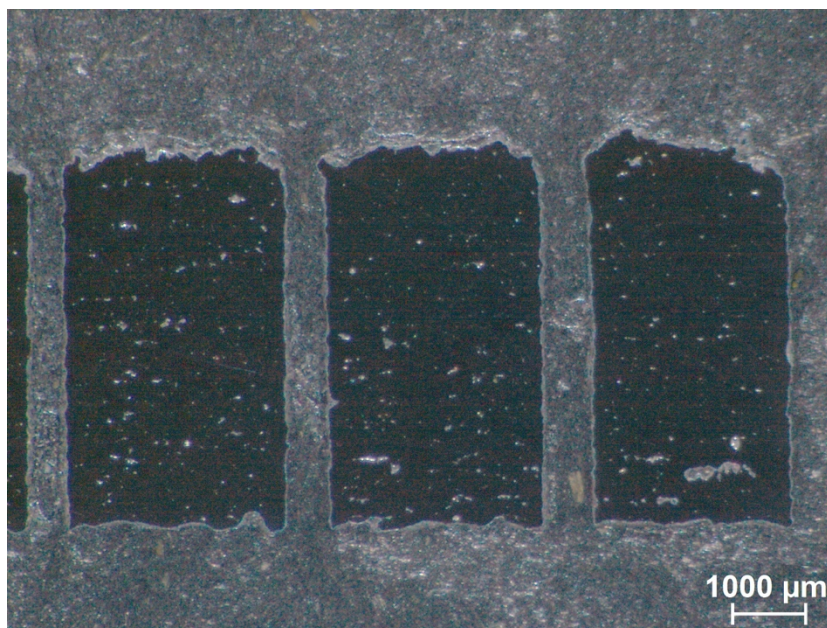


Obrázek 5.7 Metalografický snímek TZ tělesa (řez kolmý na směr tisku, strana s krajním otvorem 0,8 mm)



Obrázek 5.8 Metalografický snímek TZ tělesa (řez rovnoběžný se směrem tisku, strana s krajním otvorem 0,3 mm)





Obrázek 5.9 Metalografický snímek TZ tělesa (řez rovnoběžný se směrem tisku, strana s krajním otvorem 0,8 mm)

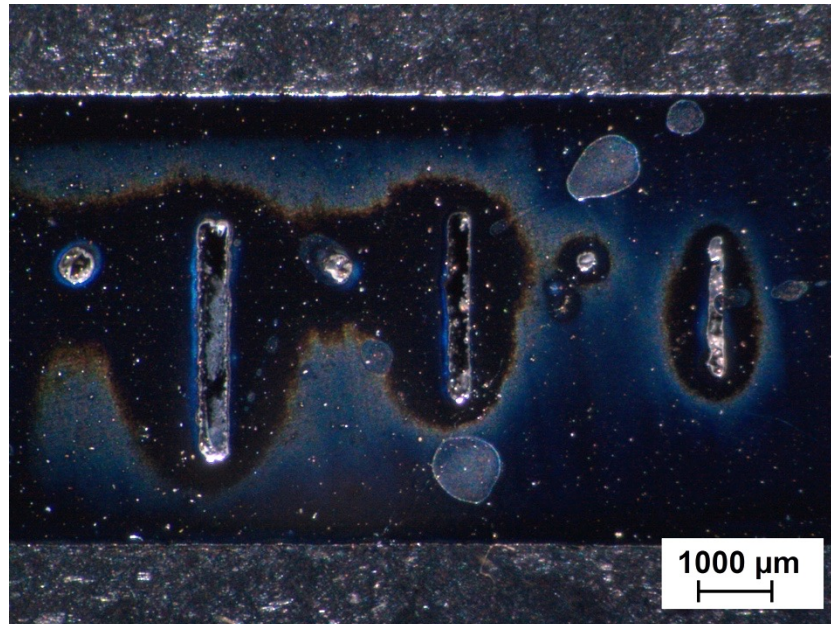
Na metalografických snímcích je patrná pórozita, která se zvětšuje směrem ke středu zkušebního tělesa. To může být zapříčiněno rozdílným způsobem spékání a malým překryvem jednotlivých tiskových linií. Obvod součásti je realizován vedením laserového paprsku kopírujícím tvar. Naproti tomu výplň tvaru je realizována předem definovanou strategií. Nastavení parametrů těchto strategií může ovlivnit vznik pórů v materiálu a tím výrazně ovlivnit hodnoty mechanických vlastností. Při porovnání řezů u TZ vzorků byla větší pórozita zaznamenána v řezu rovnoběžném se směrem tisku.

Otvory si zachovávají průchodnost do průměru 0,3 mm. Otvor s průměrem 0,3 mm je na metalografickém výbrusu hůře identifikovatelný, přesto však lze rozeznat jeho hranici. Tvarová přesnost se odvíjí od hodnoty průměru. Již v případě průchozího otvoru o průměru 0,6 mm je kruhový průřez zdeformován do tvaru elipsy a s klesající hodnotou průměru se tvarová přesnost zhoršuje.

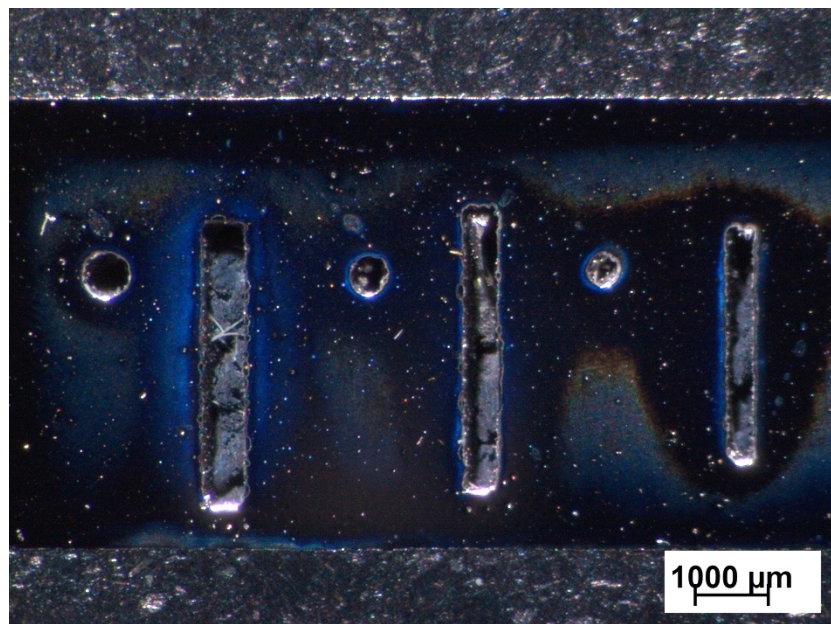
### 5.2.2 Konfigurace – etapa 2

Pro analýzu pórovitosti, průchodnosti otvorů a jejich tvarové přesnosti v rámci druhé konfigurace tisku byl zhotoven jediný vzorek bez tepelného zpracování. Vstupní data (model vzorku) jsou stejná jako v první konfiguraci. Změněny jsou však parametry

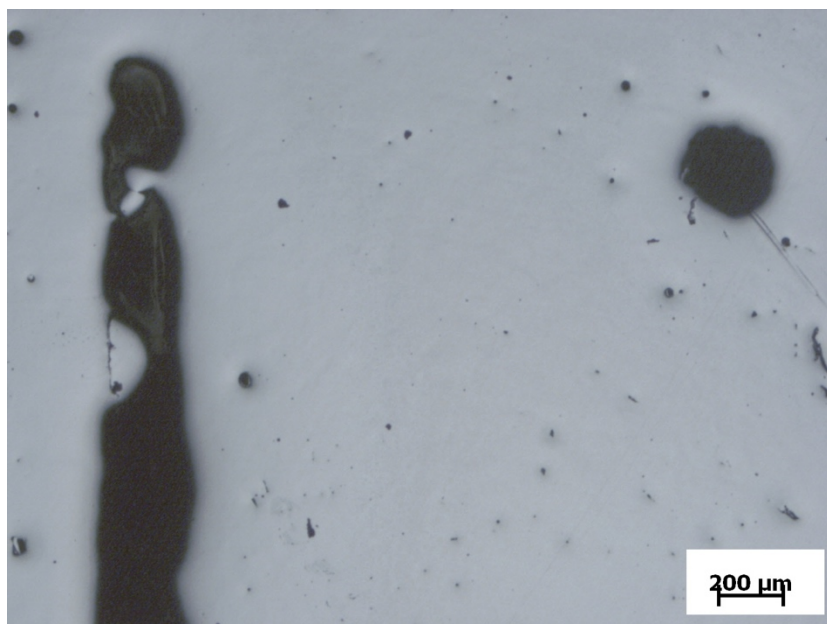
tiskové strategie. Vzorek se rozdělil řezem v rovině kolmé na směr tisku (rovnoběžné s platformou). Po přípravě vzorku a jeho naleptání byly pořízeny snímky se zvětšením 10x a 25x.



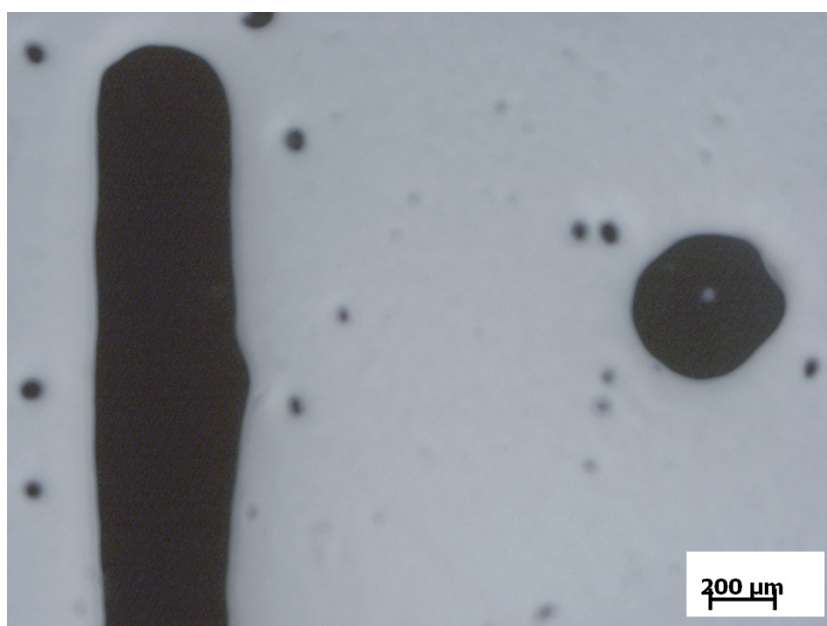
Obrázek 5.10 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, strana s krajním otvorem 0,3 mm, zvětšení 10x)



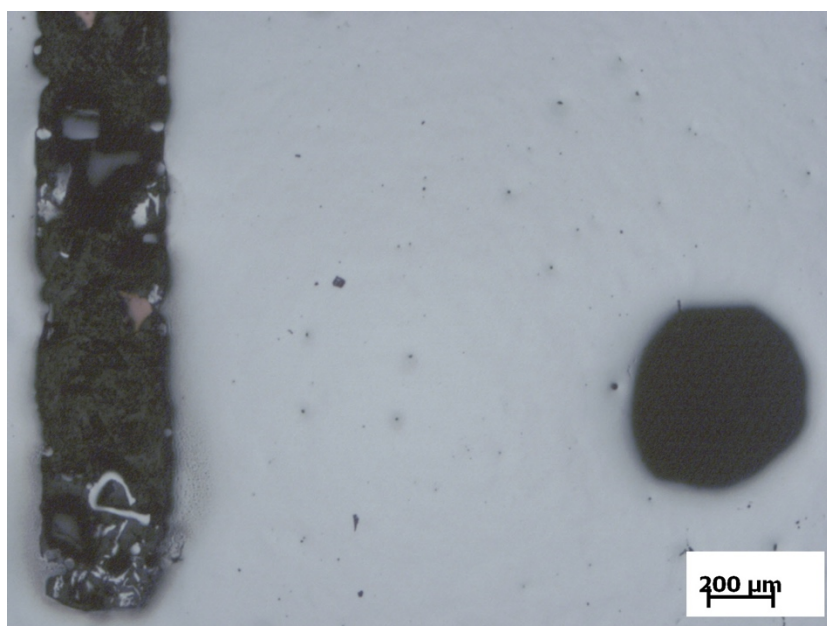
Obrázek 5.11 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, strana s krajním otvorem 0,8 mm, zvětšení 10x)



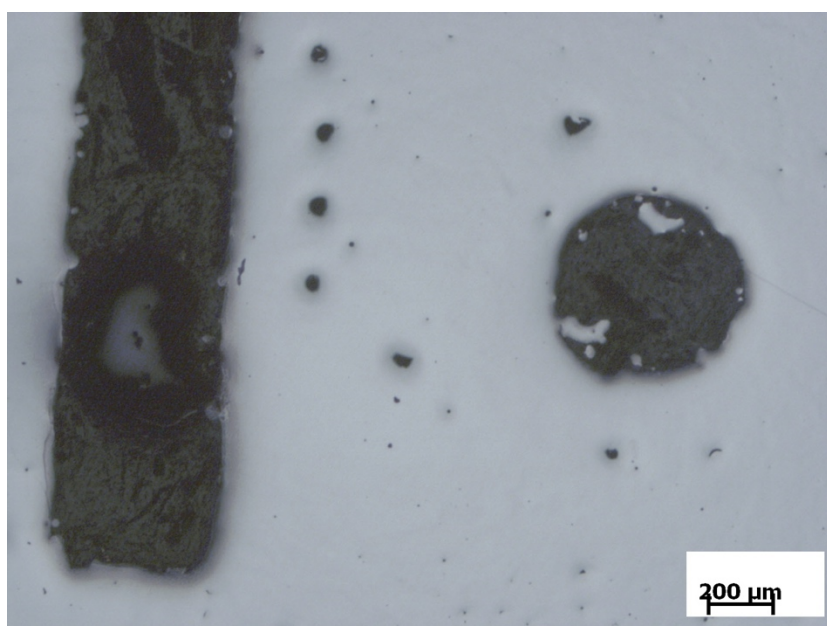
Obrázek 5.12 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, otvor 0,3 mm, zvětšení 25x)



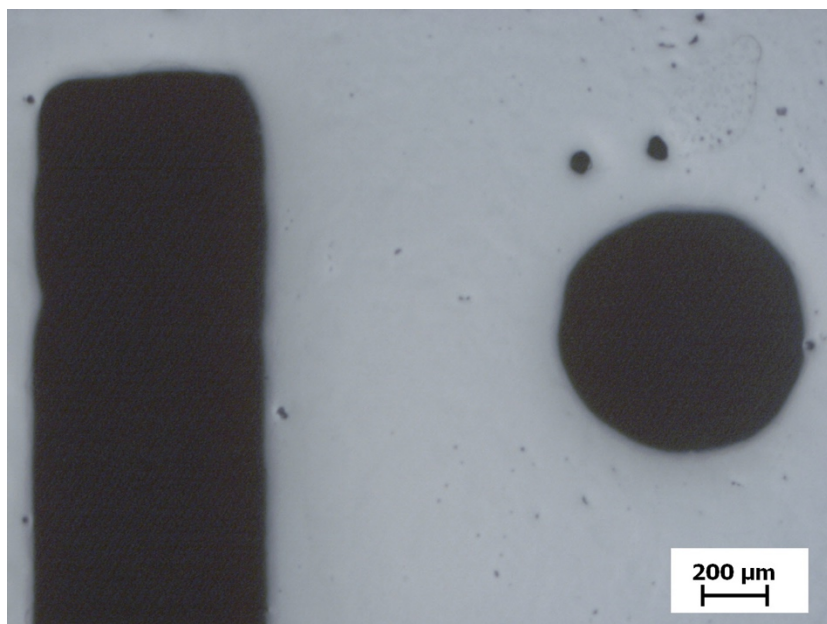
Obrázek 5.13 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, otvor 0,4 mm, zvětšení 25x)



Obrázek 5.14 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, otvor 0,5 mm, zvětšení 25x)



Obrázek 5.15 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, otvor 0,6 mm, zvětšení 25x)



Obrázek 5.16 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, otvor 0,7 mm, zvětšení 25x)

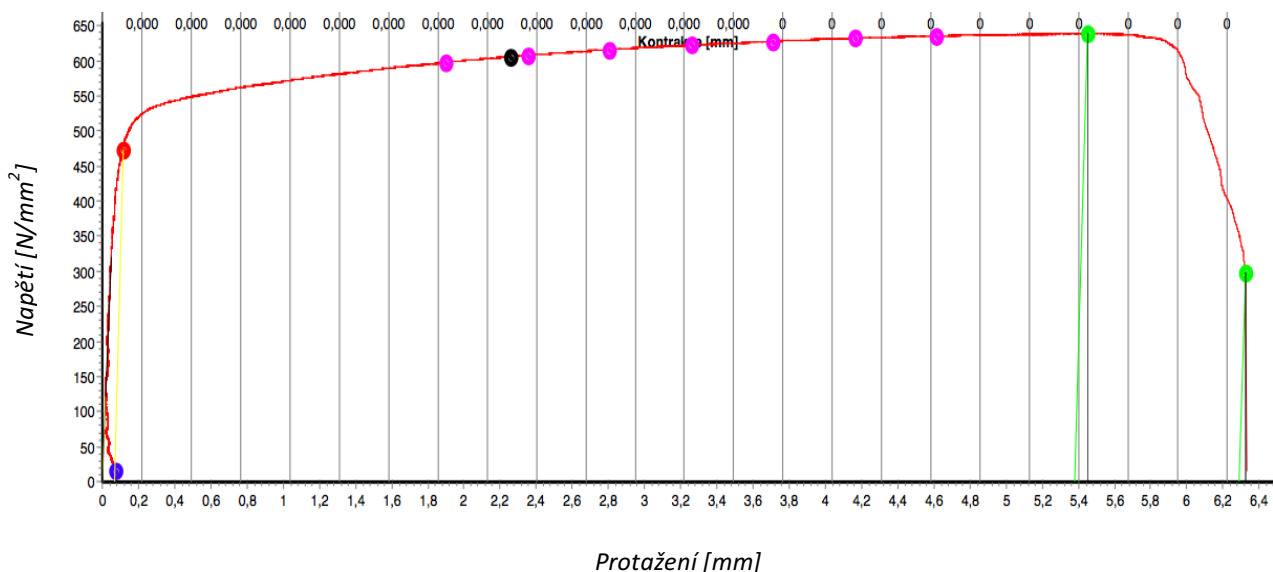
Změna parametrů tisku (Hatch Distance) a použití novější verze Build Processor 1.2 vede k nižší pórizitě ve struktuře materiálu. Hodnota parametru Hatch Distance se snížila na 0,06 mm a odpovídá vzdálenosti bodů laseru (Point Distance). Snížení této hodnoty zapříčiní větší překryv natavených oblastí, čímž se sníží pórizita. Přesto však lze pozorovat určité množství pórů, které vznikají v místech s malým překryvem. Novější verze Build Processor pracuje s přesnějším zaostřením laserového paprsku. Zkušební těleso tak vykazuje hladší povrch a tvarově přesnější otvory i menších průměrů. Průchozí otvor 0,3 mm je zřetelněji identifikovatelný než v případě první konfigurace tiskových parametrů. Menší pórizita materiálu by měla způsobit zvýšení hodnot mechanických vlastností. Tiskové vrstvy by měly být navzájem lépe provázané a neměly by se tak oddělovat v méně namáhaných místech.

## 5.3 Vyhodnocení zkoušky tahem

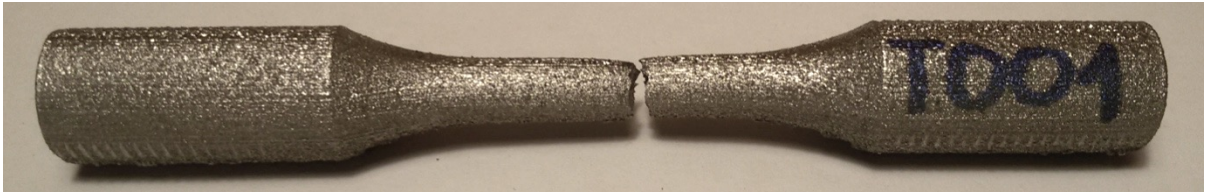
### 5.3.1 Konfigurace – etapa 1

Vyhodnocení měření zahrnuje zkušební tělesa dle normy ASTM E8 bez tepelného zpracování. Byly vytištěny tři sady zkušebních těles po třech vzorcích. Sady se liší polohou zkušebního tělesa vzhledem k tiskové platformě. První trojice je pod úhlem 0°, druhá pod úhlem 45° a třetí pod úhlem 90°. Na trhacím stroji LabTest 5.100SP1 jsou vyhodnocovány (dle normy ČSN EN ISO 6892-1) mez pevnosti  $R_m$ , mez kluzu  $R_{p0,2}$  a tažnost A. Jelikož materiál nevykazuje výraznou mez kluzu  $R_e$ , je zjišťována smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  pomocí průtahoměru na zvolené délce  $L_u = 22 \pm 0,4$  mm. Zkušební rychlost je stanovena na 0,5 mm/min. Zkušební zařízení je propojeno s počítačem, který zaznamenává hodnoty zatěžující síly a dráhy posuvu každé čtyři setiny sekundy. Z těchto dat se vyhodnotí potřebné veličiny a následně se zapíše do protokolu, který obsahuje i příslušný graf. Výsledky zkoušky tahem jsou zapsány do tabulky, kde jsou porovnány s hodnotami, které uvádí výrobce Renishaw v katalogovém listu pro materiál SS 316L-0407.

#### Zkušební těleso T001

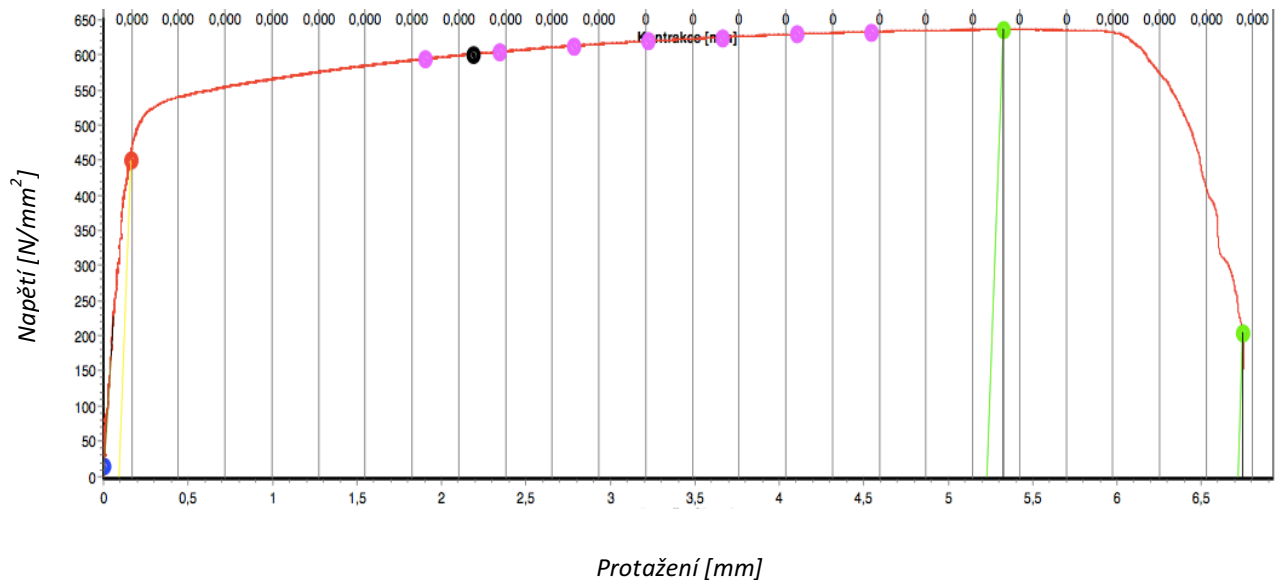


Obrázek 5.17 Diagram zkoušky tahem – těleso T001

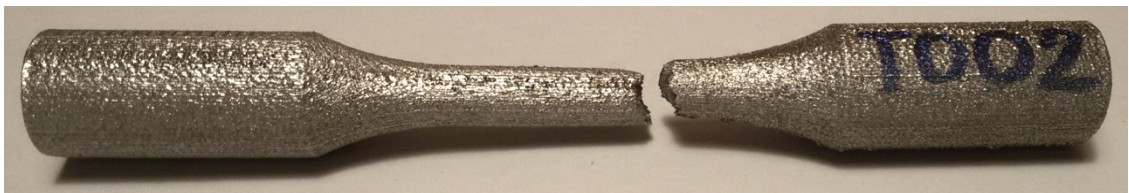


Obrázek 5.18 Zkušební těleso T001 po přetržení

**Zkušební těleso T002**

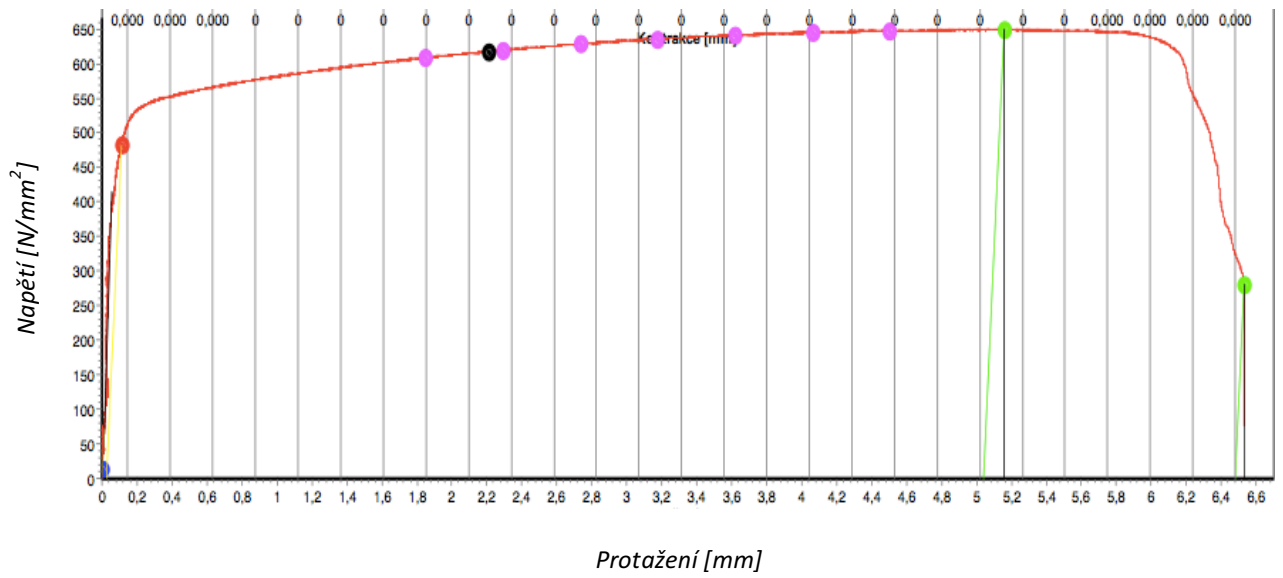


Obrázek 5.19 Diagram zkoušky tahem – těleso T002

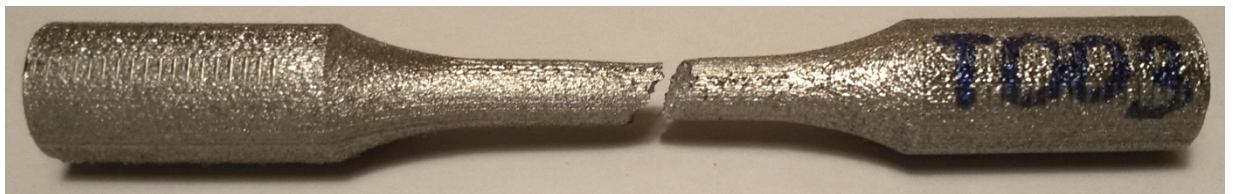


Obrázek 5.20 Zkušební těleso T002 po přetržení

### Zkušební těleso T003

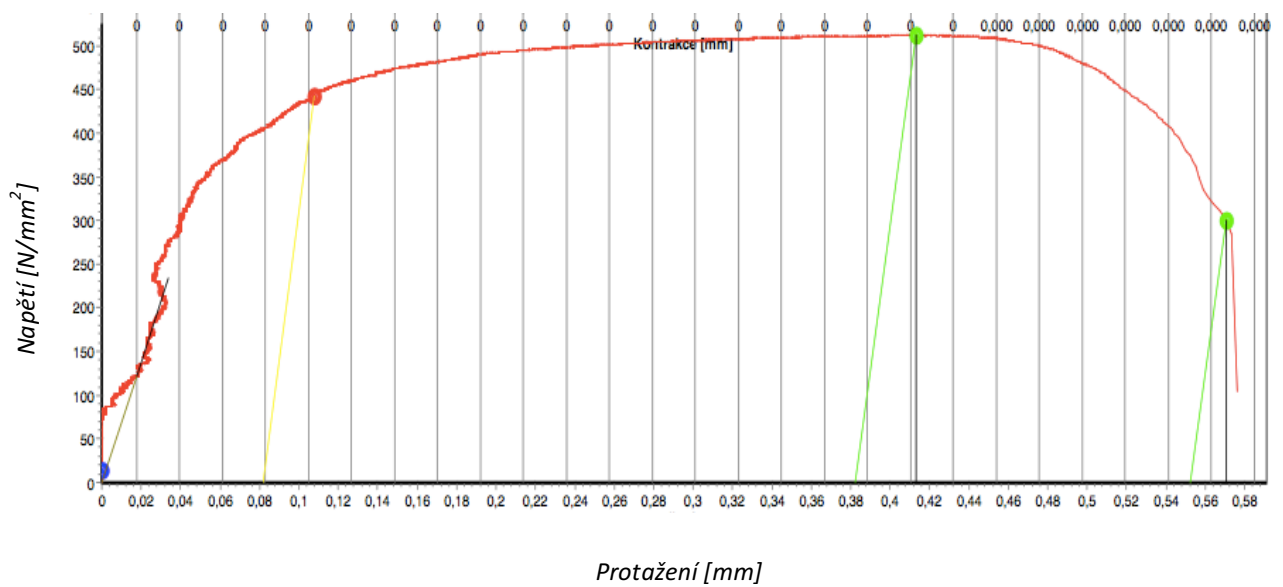


Obrázek 5.21 Diagram zkoušky tahem – těleso T003



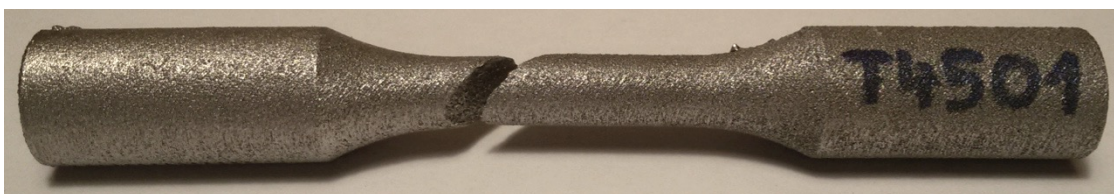
Obrázek 5.22 Zkušební těleso T003 po přetržení

### Zkušební těleso T4501



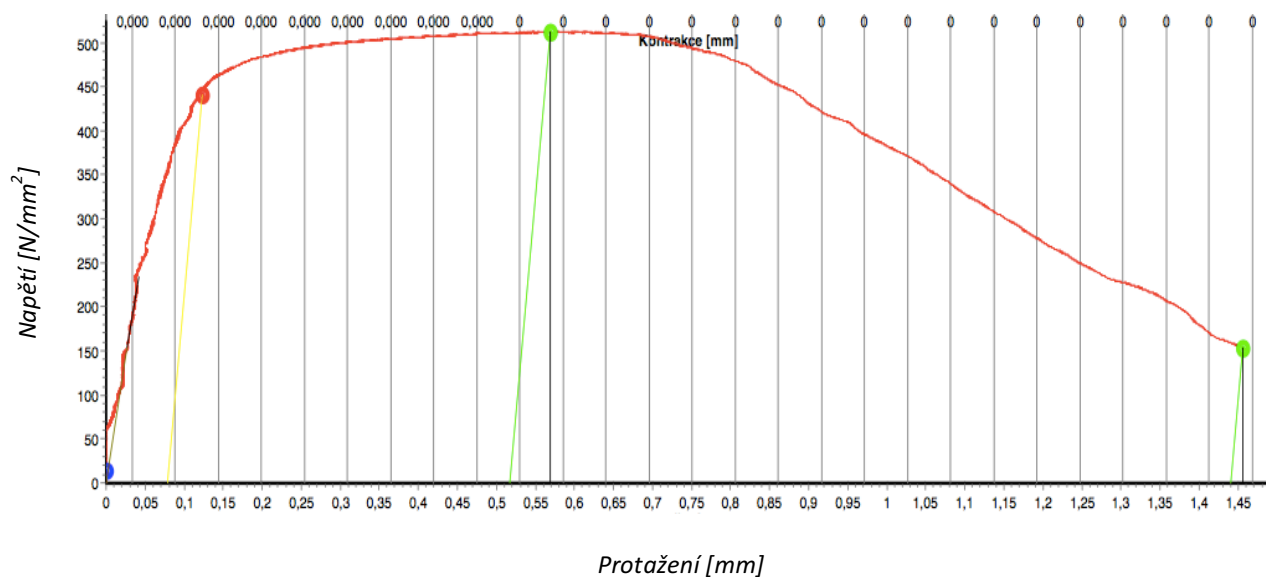
Obrázek 5.23 Diagram zkoušky tahem – těleso T4501



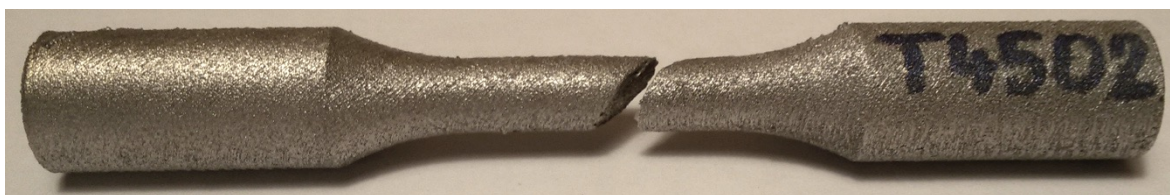


Obrázek 5.24 Zkušební těleso T4501 po přetržení

### Zkušební těleso T4502

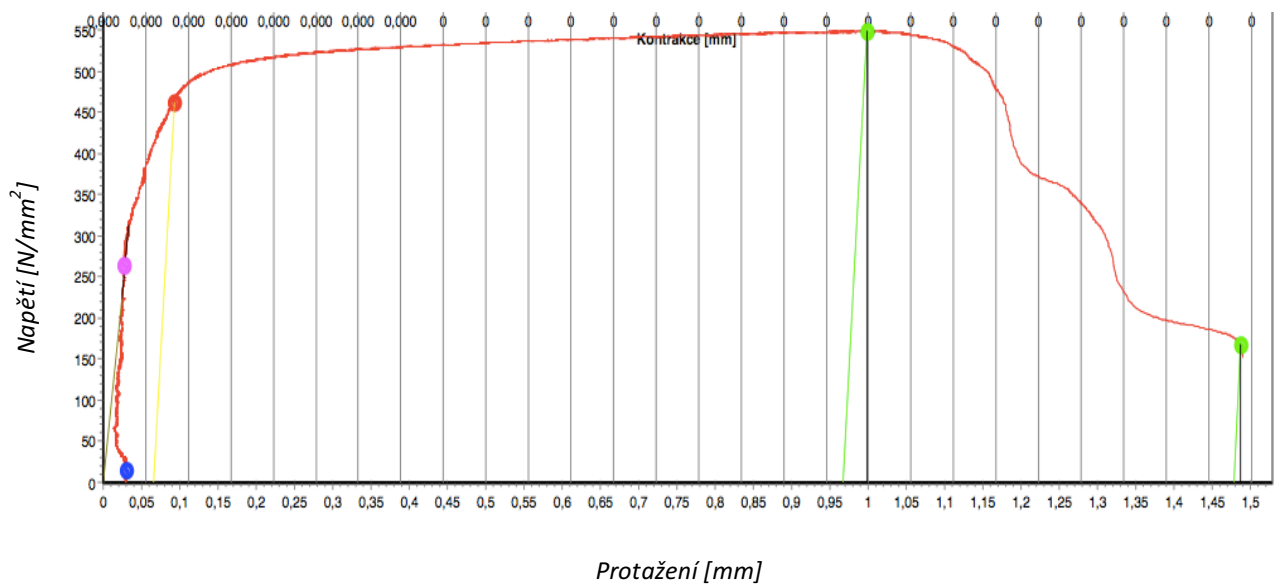


Obrázek 5.25 Diagram zkoušky tahem – těleso T4502

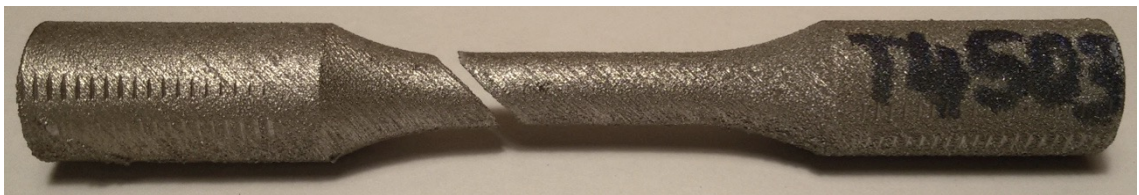


Obrázek 5.26 Zkušební těleso T4502 po přetržení

### Zkušební těleso T4503

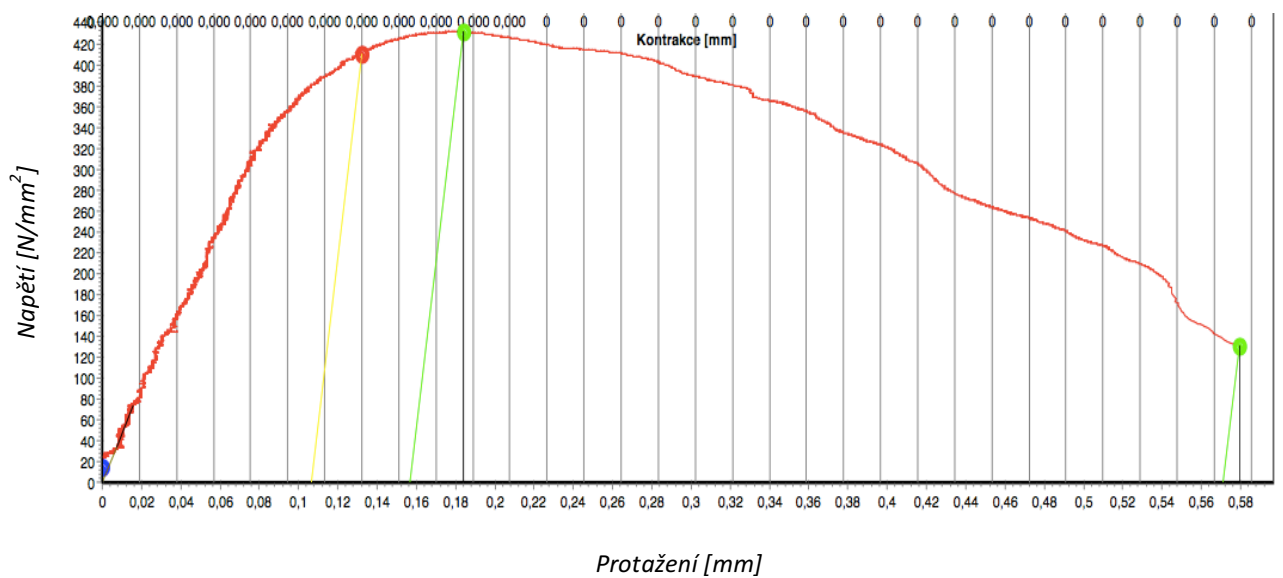


Obrázek 5.27 Diagram zkoušky tahem – těleso T4503

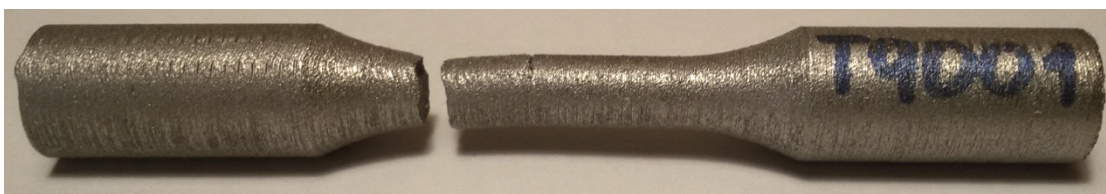


Obrázek 5.28 Zkušební těleso T4503 po přetržení

### Zkušební těleso T9001

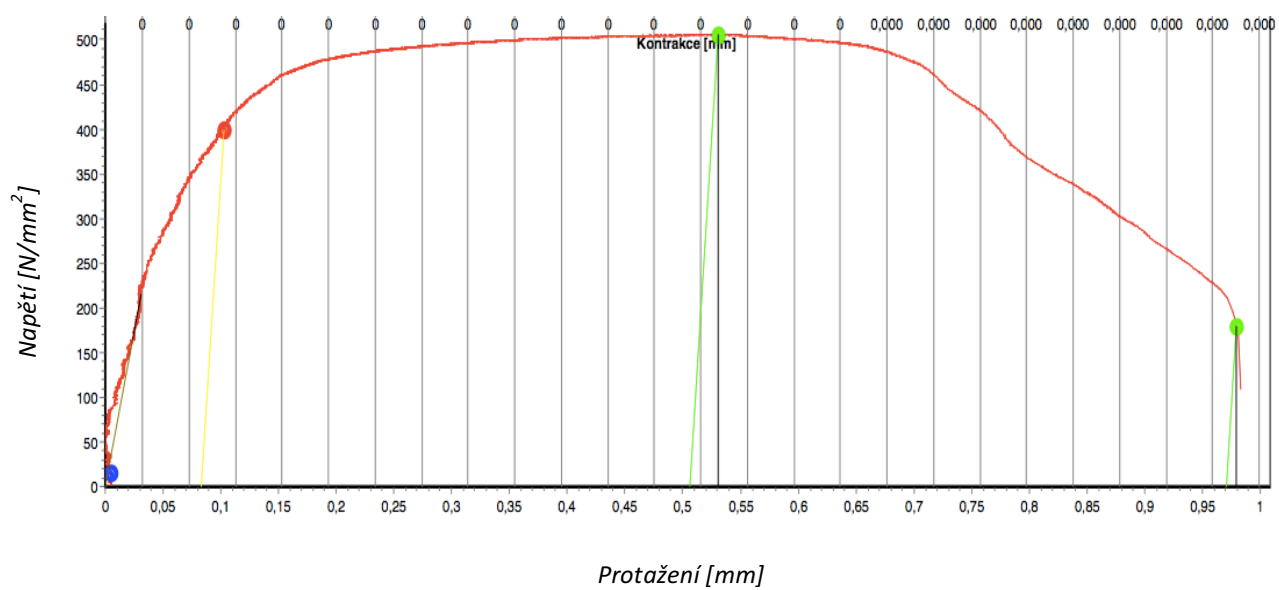


Obrázek 5.29 Diagram zkoušky tahem – těleso T9001

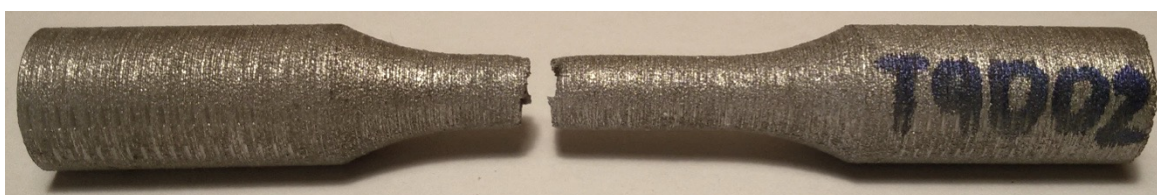


Obrázek 5.30 Zkušební těleso T9001 po přetržení

### Zkušební těleso T9002

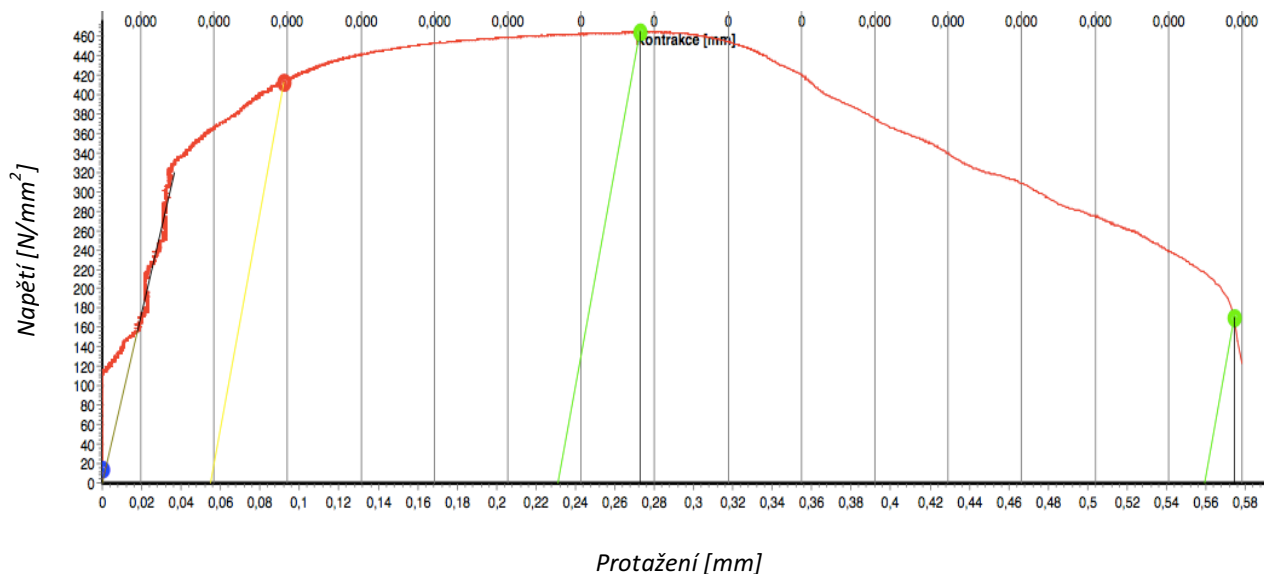


Obrázek 5.31 Diagram zkoušky tahem – těleso T9002

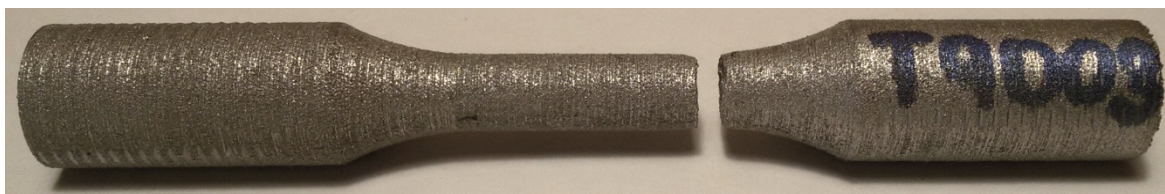


Obrázek 5.32 Zkušební těleso T9002 po přetržení

### Zkušební těleso T9003



Obrázek 5.33 Diagram zkoušky tahem – těleso T9003



Obrázek 5.34 Zkušební těleso T9003 po přetržení

Tabulka 5.1 Výsledné hodnoty zkoušky tahem

poloha tělesa [°]	označení vzorku	mez pevnosti $R_m$ (změřená) [MPa]		mez pevnosti $R_m$ (katalog) [MPa]	mez kluzu $R_{p0,2}$ (změřená) [MPa]		mez kluzu $R_{p0,2}$ (katalog) [MPa]	tažnost A (změřená) [%]		tažnost A (katalog) [%]
0	T001	639	∅	662±2	474	∅	518±5	28,6	∅	38±1
0	T002	636	641		451	469		30,4	29,5	
0	T003	649	±6		482	±13		29,5	±1	
45	T4501	512	∅	-	443	∅	-	2,4	∅	-
45	T4502	512	524		440	449		6,5	5,2	
45	T4503	549	±17		463	±10		6,7	±2	
90	T9001	431	∅	574±10	411	∅	440±10	2,5	∅	26±12
90	T9002	505	467		400	408		4,3	3,1	
90	T9003	464	±54		412	±5		2,5	±1	

Naměřené hodnoty při zkoušce tahem byly ve všech případech nižší než katalogové hodnoty uváděné výrobcem kovových prášků. Tyto hodnoty bude v první řadě ovlivňovat nastavení tisku. Měřené hodnoty se pomocí obslužného programu pro zařízení LabTest 5.100SP1 zaznamenaly do grafů. Každé z devíti zkušebních těles má zaznamenanu závislost napětí na protažení zkušební vzorku. V grafech jsou vyznačeny body různých barev. Modrý označuje počátek zkoušky, červený smluvní mez kluzu, první zelený mez pevnosti a druhý zelený přetržení zkušební tělesa. Výsledné hodnoty každé ze tří trojic jsou zaznamenány do tabulky a zprůměrovány. Patrné jsou značné výchylky, hlavně v případě hodnot tažnosti. Obrázky jednotlivých vzorků ukazují tvar plochy při přetržení. Tento tvar kopíruje úhel vrstvení, pod kterým byly vzorky tištěny. Největší tažnost byla zaznamenána u vzorků tištěných pod úhlem 0°. To je právě z důvodu směru tištění vrstev. Vrstvy (symbolizující vlákna) se natahovaly ve směru působení síly. Tím došlo k viditelnému zúžení, vzniku krčku a protažení zkušební tyče. Tělesa tištěná pod úhlem 45° a 90° vykazují malou tažnost. U těchto těles nedošlo k viditelnému zúžení ani ke vzniku krčku. Největší pevnosti bylo dosaženo u vzorků tištěných pod úhlem 0°. Průměrná hodnota meze pevnosti v tahu u těchto zkušebních těles je 641 MPa. Naopak nejnižších hodnot pevnosti dosahovaly vzorky tištěné pod úhlem 90°. Průměrná hodnota meze pevnosti činí 467 MPa, což je o 174 MPa méně než v případě vzorků tištěných pod úhlem 0°. U hodnot tažnosti byly mezi jednotlivými typy vzorků zaznamenány podstatně větší rozdíly. V případě zkušebních těles tištěných pod úhlem 0° byla průměrná hodnota tažnosti 29,5 %, což je o 26,4 % více než v případě průměrné hodnoty tažnosti vzorků tištěných pod úhlem 90°. Zkušební tělesa tištěná kolmo k tiskové podložce měla tendenci rozdělit se na více místech.

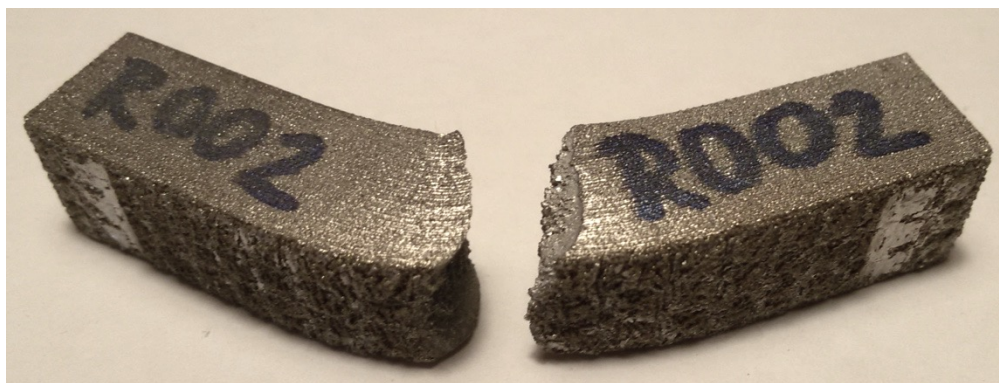
## **5.4 Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu**

### **5.4.1 Konfigurace – etapa 1**

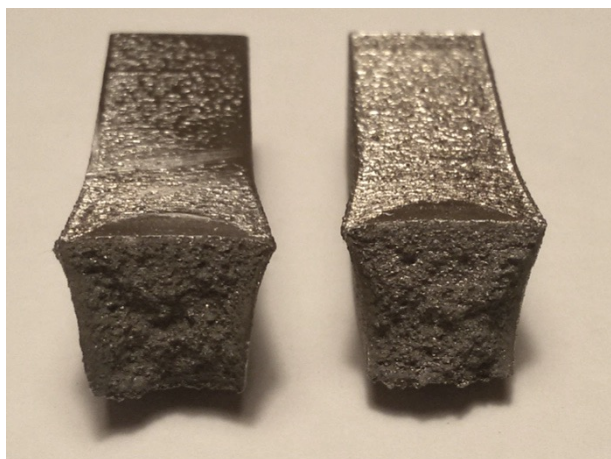
V rámci vyhodnocování těles pro zkoušku rázem v ohybu byly (podobně jako u zkoušek tahem) zhotoveny tři sady zkušebních těles dle normy ČSN ISO 148-1. Celkem devět zkušebních těles bylo rozmístěno po tiskové platformě pod úhly 0°, 45° a 90°. Vzhledem k předepsanému způsobu zhotovení obráběním neobsahují zkušební

tělesa vrub. Výsledkem zkoušky je hodnota rázové energie, která se, v případě zkušebního tělesa s plochou v místě přeražení  $1 \text{ cm}^2$ , rovná hodnotě vrubové houževnatosti.

***Zkušební těleso tištěné pod úhlem  $0^\circ$***



*Obrázek 5.35 Zkušební těleso R002 po přeražení*



*Obrázek 5.36 Zkušební těleso R002 – plocha lomu*

**Zkušební těleso tištěné pod úhlem 45°**



*Obrázek 5.37 Zkušební těleso R4503 po přeražení*



*Obrázek 5.38 Zkušební těleso R4503 – plocha lomu*

**Zkušební těleso tištěné pod úhlem 90°**



*Obrázek 5.39 Zkušební těleso R9001 po přeražení*



Obrázek 5.40 Zkušební těleso R9001 – plocha lomu

Tabulka 5.2 Výsledné hodnoty zkoušky rázem v ohybu

poloha tělesa [°]	označení vzorku	Rázová energie [J]	Vrubová houževnatost [J/cm <sup>2</sup> ]	
0	R001	242	242	Ø 249±24
0	R002	224	224	
0	R003	282	282	
45	R4501	72	72	Ø 115±47
45	R4502	94	94	
45	R4503	180	180	
90	R9001	180	180	Ø 145±39
90	R9002	90	90	
90	R9003	164	164	

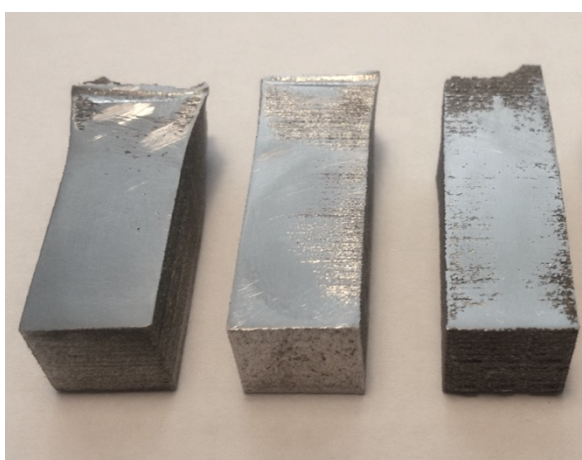
Nejvyšších hodnot vrubové houževnatosti bylo dosaženo v případě vzorků tištěných pod úhlem 0°, a to průměrné hodnoty 249 J/cm<sup>2</sup>. V dalších dvou směrech jsou hodnoty velmi rozdílné. Důvodem je oddělení v různých místech, kde vrstvy nebyly tak dokonale spojené. U vzorků tištěných pod úhlem 45° mělo zkušební těleso tendenci oddělit se pod stejným úhlem. Obdobně tomu bylo i v případě vzorků tištěných pod úhlem 90°. Hodnoty vrubových houževnatostí u těchto vzorků vycházejí v některých případech o více jak 100 J/cm<sup>2</sup> menší než v případě vzorků tištěných pod úhlem 0°.



## 5.5 Vyhodnocení zkoušky tvrdosti podle Vickerse

### 5.5.1 Konfigurace – etapa 1

Zkoušky tvrdosti dle Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1) byly prováděny na třech přeražených tělesech pro zkoušku rázem v ohybu. Vybrány byly tak, aby se stanovily hodnoty tvrdosti u všech tří orientací tisku, tedy 0°, 45° i 90°. Plochy měření jsou ručně obroušeny, aby šly lépe odečítat velikosti úhlopříček vzniklých indentorem. Použité zatížení odpovídá 30 kg.



Obrázek 5.41 Zkušební tělesa pro zkoušku tvrdosti podle Vickerse

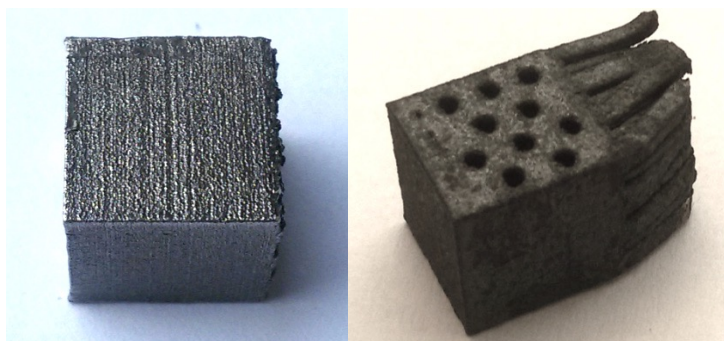
Tabulka 5.3 Výsledné hodnoty zkoušky tvrdosti podle Vickerse

poloha tělesa [°]	označení vzorku	HV30 [-] (změřená)	HV0,5 [-] (katalog)
0	<b>R001</b>	223±5	212±2
45	<b>R4501</b>	216±9	-
90	<b>R9001</b>	206±7	220±6

Naměřené hodnoty se téměř shodují s hodnotami, které deklaruje výrobce Renishaw. Odchyly hodnot tvrdostí mezi jednotlivými polohami tisku jsou v tomto případě zanedbatelné, a to z důvodu velkých výkyvů hodnot tvrdostí jednotlivých vtisků. V tabulce je uvedena vždy průměrná hodnota tvrdosti určená aritmetickým průměrem ze tří hodnot vtisků.

## 6 Závěrečné zhodnocení

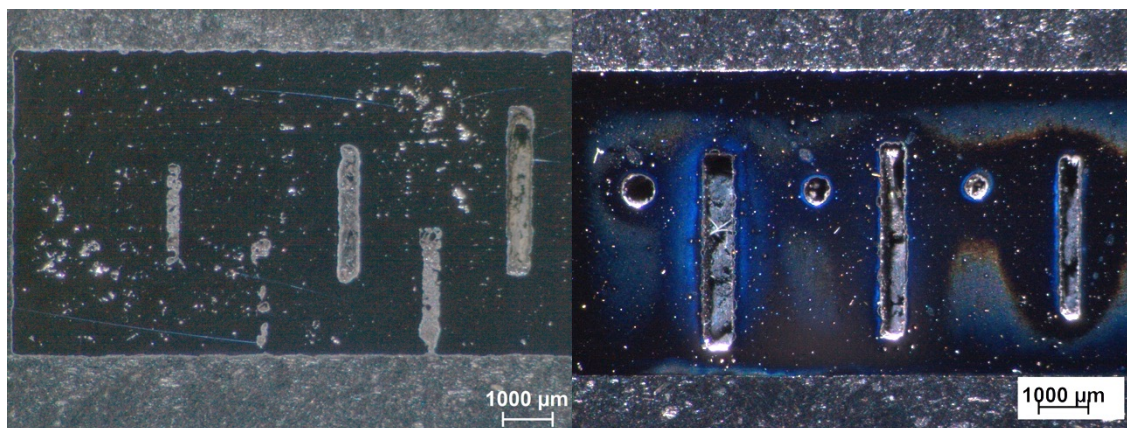
Při rozpouštěcím žíhání dochází vlivem vysokých teplot dosahujících 1100 °C a dlouhé doby ohřevu k zokujení povrchu vzorků. Pokud není povrch chráněn, vzniklé okuje výrazně ovlivní jeho kvalitu a geometrické proporce součásti. Pro ochranu povrchu během žíhání byly zvoleny dva způsoby ochrany, v ochranné atmosféře a s použitím ochranného nátěru CONDURSAL Z1100. Spolehlivější způsob ochrany zajistil ochranný nátěr, při jehož aplikaci nejsou na povrchu vzorku patrné žádné okuje. Vrstva ochranného nátěru se vypálila a načervenalé zbytky lze lehce odstranit mechanicky. Oproti tomu vzorek, který byl chráněn ochrannou atmosférou, vykazuje po žíhání na povrchu určité množství viditelných okují. Ty však nejsou tak rozsáhlé, jako v případě vzorku bez ochrany. Pro zajištění optimální struktury povrchu bez okují by musel být celý proces dokonale izolován od okolní vzdušné atmosféry a musela by být zajištěna vyšší koncentrace ochranného plynu. Vzhledem ke složitosti celého procesu je výhodnější ochrana prostřednictvím nátěru CONDURSAL.



Obrázek 6.1 Porovnání způsobů ochrany (vlevo – ochranný nátěr, vpravo – ochranná atmosféra)

Zhotovení vzorků pro analýzu vnitřní struktury bylo rozděleno do dvou etap, z nichž každá pracuje s jiným nastavením tiskového parametru Hatch Distance a jiným konfiguračním systémem Build Processor. Právě parametr Hatch Distance, tedy vzdálenost šrafovaní vrstvy, a parametr Point Distance, který udává vzdálenost mezi jednotlivými body působení laseru, výrazně ovlivnily výskyt pórovitosti ve struktuře materiálu. Rozdílnou kvalitu povrchu a zlepšení přesnosti vedení paprsku vykazuje nová verze konfiguračního nástroje Build Processor s označením 1.2. Vzorky tištěné

starší verzí 1.0 mají hrubší povrch a hůře identifikovatelné průchozí otvory menších průměrů. Z důvodu malého průřezu zkušebních těles a omezení vlivu studených spojů byla v obou případech zvolena strategie typu „Meander“. Metalografické snímky zaznamenaly rozdílnou pórovitost vzorků z první a druhé etapy tisku. Snížením hodnoty vzdálenosti šrafování došlo k většímu překryvu jednotlivých natavených oblastí a tím k omezení míst vzniku pórů. Otvory s průměrem 0,3 mm si zachovávají průchodnost v obou konfiguracích. Hranice průchozích prvků je přesnější u vzorků tištěných v etapě 2 vlivem přesnější verze Build Processor. Tvarová přesnost otvorů klesá s klesající hodnotou průměru. Již v případě průchozího otvoru s průměrem 0,6 mm je tvar kruhového průřezu viditelně deformován.



Obrázek 6.2 Porovnání přítomnosti pórovitosti (vlevo – konfigurace 1, vpravo – konfigurace 2)

Naměřené hodnoty zkoušky tahem ukazují, že volbou polohy vzorku vzhledem k tiskové platformě lze významně ovlivnit pevnost v tahu i tažnost. Důvodem je orientace vrstev symbolizující směr „vláken“. Zkušební tělesa tištěná pod úhlem 0° (ležící na tiskové platformě) mají směr vrstev orientovaný ve směru délky zkušebního tělesa. Tato tělesa vykazují nejvyšší hodnoty všech zkoumaných veličin. Nejvýznamnější vliv má orientace směru tisku na tažnost. Je-li zkušební těleso tištěno pod úhlem 0°, směr „vláken“ je shodný se směrem působení zatěžující síly a nedochází tak k oddělování jednotlivých vrstev, nýbrž k jejich protažení. Naopak tělesa tištěná pod úhlem 90° mají tendenci oddělovat se během zatěžování v místech napojení vrstev. Při přetržení zkušební tyče je lom orientován ve směru průběhu vrstev. To lze nejlépe pozorovat u vzorků tištěných pod úhlem 45°. Zde je klíčové správné nastavení tiskových parametrů, které by mělo zabezpečit maximální spojení (spečení) všech

vrstev a dostatečný překryv natavených oblastí k dosažení minimální pórozity. Vliv těchto parametrů je patrný z výsledků zkoušky. V první etapě mají vzorky ve struktuře významný podíl pórů a natavené oblasti se nedostatečně překrývají. Tyto nedostatky snižují hodnoty mechanických vlastností. Metalografické snímky při nastavení Hatch Distance a Point Distance 0,06 mm ukazují, že ve struktuře je stále přítomna drobná pórozita. V ideálním případě by hodnota těchto parametrů měla být snížena aspoň na 0,05 mm, čímž by odpovídala překryvu natavených oblastí o 1/3 při jejich průměru 75  $\mu$ m. To vysvětluje také nižší hodnoty mechanických vlastností oproti hodnotám, které deklaruje výrobce Renishaw v katalogových listech pro materiál SS 316L-0407. Předepsané hodnoty výrobce dosahují maximálních hodnot právě při optimální konfiguraci tiskových parametrů.

Tabulka 6.1 Hodnoty zkoušky tahem

<i>poloha tělesa [°]</i>	<i>mez pevnosti <math>R_m</math> (změřená) [MPa]</i>	<i>mez pevnosti <math>R_m</math> (katalog) [MPa]</i>	<i>mez kluzu <math>R_{p0,2}</math> (změřená) [MPa]</i>	<i>mez kluzu <math>R_{p0,2}</math> (katalog) [MPa]</i>	<i>tažnost A (změřená) [%]</i>	<i>tažnost A (katalog) [%]</i>
<b>0</b>	641±6	662±2	469±13	518±5	29,5±1	38±1
<b>45</b>	524±17	-	449±10	-	5,2±2	-
<b>90</b>	467±54	574±10	408±5	440±10	3,1±1	26±12

V případě zkoušky rázem v ohybu mají naměřené hodnoty u vzorků tištěných ve stejné poloze velké výkyvy. Ty mohou být způsobeny tendencí oddělit nejdříve vrstvy, které mezi sebou mají menší provázanost. Zkušební tělesa s nižší hodnotou vrubové houževnatosti mají v místě lomu horší napojení vrstev. Směr lomu, podobně jako při zkoušce tahem, kopíruje úhel vrstvení materiálu. Ze snímků je patrné, že se v největší míře jedná ve všech případech o křehké porušení. Nejvyšších hodnot vrubové houževnatosti dosahují vzorky tištěné pod úhlem 0°, nejnižších vzorky tištěné pod úhlem 45°. To je dáno směrem orientace tiskových hladin vůči směru působení rázu.

Tabulka 6.2 Hodnoty zkoušky rázem v ohybu

<i>poloha tělesa [°]</i>	<i>Vrubová houževnatost [J/cm<sup>2</sup>]</i>
<b>0</b>	249±24
<b>45</b>	115±47
<b>90</b>	145±39

Hodnoty zkoušek tvrdosti dle Vickerse odpovídají katalogovým hodnotám společnosti Renishaw. Nejvyšších hodnot tvrdosti dosahuje vzorek tisknutý pod úhlem 0°. Hodnoty tvrdosti ovlivňuje kromě polohy vzhledem k platformě také místo vtisku. Vtisk lze provést do hladiny tisku (orientován rovnoběžně s platformou) nebo na hladinu tisku (orientován kolmo na platformu). Jelikož byly v případě vzorku tištěných pod úhlem 0° vtisky prováděné na hladinu, jsou hodnoty tvrdosti v tomto případě nepatrně vyšší. Tato odchylka je však vlivem výkyvů jednotlivých vtisků a možných nepřesností měření zanedbatelná.

Tabulka 6.3 Hodnoty zkoušky tvrdosti podle Vickerse

<i>poloha tělesa [°]</i>	<i>HV30 [-]</i> <i>(změřená)</i>	<i>HV0,5 [-]</i> <i>(katalog)</i>
<b>0</b>	223±5	212±2
<b>45</b>	216±9	-
<b>90</b>	206±7	220±6

V porovnání s ocelí válcovanou za studena vykazují obě technologie zpracování kovů podobnou pevnost v tahu, která se pohybuje okolo 500–650 MPa. Napětí na mezi kluzu dosahuje v případě oceli válcované za studena hodnoty okolo 290 MPa, což je o více jak 100 MPa méně než v případě technologie DMLS. Ocel válcovaná za studena má však o více jak 10 % lepší tažnost, která dosahuje hodnot okolo 55 %. Dále má vyšší modul pružnosti až o 70 GPa. Hodnota tvrdosti dle Vickerse je srovnatelná s technologií DMLS. Pohybuje se okolo 200 HV30.

Zvolená konfigurace tiskových parametrů a samotná volba tiskové strategie směřuje k dosažení homogenity materiálu bez vlivu studených spojů, k dosažení minimální pórizity a maximální soudržnosti vrstev. Takto nastavené parametry jsou

vhodné k aplikaci na zkušební tělesa pro zkoušku tahem, rázem v ohybu nebo tvrdosti. Při této konfiguraci však může docházet k výraznějším deformacím součástí vlivem nahromaděného vnitřního napětí a k výrazně delšímu času tisku. Součásti, u nichž je kladen důraz na přesnost, kvalitu povrchu nebo kratší dobu zhotovení a u nichž není hlavním kritériem mechanická pevnost a nulová pórozita ve struktuře, by se zhotovovaly jinou strategií a jinak nastavenými parametry. Proto nelze striktně přednastavit jedinečný tiskový profil tak, aby se dal aplikovat pro jakékoliv zadání.

## Seznam použité literatury

- [1] SHELLABEAR, M. DMLS-development history and state of the art. In: *Proceedings of the Fourth Laser Assisted Net Shape Engineering* [online]. Erlangen, Německo, 2004, 393-404 [vid. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.i3dmfg.com/wp-content/uploads/2015/07/History-of-DMLS.pdf>
- [2] GRÜNBERGER, Thomas a Robert DOMRÖSE. Direct Metal Laser Sintering. *Laser Technik Journal* [online]. 2015, **12**(1), 45-48 [vid. 2017-03-02]. DOI: 10.1002/latj.201500007. ISSN 16137728. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/latj.201500007>
- [3] FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, **23**(6), 1917-1928 [vid. 2017-03-02]. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [4] WHEELER, Andrew. 3D printing: The Renishaw AM250 Additive Manufacturing System. In: *Engineering.com* [online]. 2015 [vid. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/10527/The-Renishaw-AM250-Additive-Manufacturing-System.aspx>
- [5] Naše technologie: Technologie aditivní výroby z kovu. *Renishaw* [online]. [vid. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://renishaw.cz/cs/nase-technologie--27362>
- [6] RENISHAW PLC. [online]. *QuantAM file preparation software for Renishaw additive manufacturing systems*. 2015 [vid. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://renishaw.cz/media/pdf/en/fb3c5bb0944f463d8adbc19fcf9311af.pdf>
- [7] SKOTNICOVÁ, Kateřina. *Prášková metalurgie: studijní opory: učební text, scénáře, testy* [online]. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013

- [vid. 2017-03-07]. ISBN 978-80-248-3378-1. Dostupné z:  
[https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/praskova-metalurgie/Skotnicova\\_Praskova-metalurgie.pdf](https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/praskova-metalurgie/Skotnicova_Praskova-metalurgie.pdf)
- [8] LI, Ruidi, Yusheng SHI, Zhigang WANG, Li WANG, Jinhui LIU a Wei JIANG. Densification behavior of gas and water atomized 316L stainless steel powder during selective laser melting. *Applied Surface Science* [online]. 2010, **256**(13), 4350-4356 [vid. 2017-03-07]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.02.030. ISSN 01694332. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433210001947>
- [9] RENISHAW PLC. [online]. *SS 316L-0407 powder for additive manufacturing*. 2015 [vid. 2017-02-12]. Dostupné z:  
<http://renishaw.cz/media/pdf/en/736d4fc6c5184003b60fa361dfb68735.pdf>
- [10] Outokumpu Stainless AB [online]. *Standard Cr-Ni-Mo Stainless Steel*. 2015 [vid. 2017-07-08]. Dostupné z:  
[https://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Standard\\_Cr-Ni-Mo\\_Stainless\\_Steels\\_Datasheet.pdf](https://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Standard_Cr-Ni-Mo_Stainless_Steels_Datasheet.pdf)
- [11] Crucible Design Ltd. [online]. *Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*. 2015 [vid. 2017-03-18]. Dostupné z:  
<https://www.crucibledesign.co.uk/images/uploaded/guides/bs7000-part-2-a-management-guide-download-original.pdf>
- [12] Scanning patterns in SLM. *Inside metal additive manufacturing* [online]. 2015, [vid. 2017-03-16]. Dostupné z:  
<http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/-scanning-patterns-in-slm>
- [13] RENISHAW PLC. *Machine Profile Editing: Build Processor*.



- [14] E8/E8M – 09. *Standard test methods for tension testing of metallic materials*. West Conshohocken Pennsylvania 19428-2959, United States: Highway and Transportation Officials Standard, 2009.
- [15] MACEK, Karel. *Nauka o materiálu: Cvičení*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-02901-5.
- [16] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii*[online]. 2013 [vid. 2017-03-08]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
- [17] Vliv kvality povrchu na korozní odolnost korozivzdorných ocelí. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2002, **2002**(5), str. 21. [vid. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-kvality-povrchu-na-korozni-odolnost-korozivzdornych-oceli.html>

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Oběžné kolo vytištěno na zařízení EOS EOSINT z oceli 17-4 PH [1].....	10
Obrázek 2.2 Princip technologie DMLS [3].....	11
Obrázek 2.3 Zařízení Renishaw AM250 [4].....	12
Obrázek 2.4 Zásobník stroje Renishaw AM250 [5].....	13
Obrázek 2.5 Vložení tiskové platformy [5] .....	13
Obrázek 2.6 Model připravený k exportu .....	13
Obrázek 2.7 Výměna plynů (vlevo – odčerpání vzduchu, vpravo – plnění argonem) [5] .....	14
Obrázek 2.8 Nanesení první vrstvy prášku [5].....	14
Obrázek 2.9 Spékání kovového prášku laserem [5] .....	15
Obrázek 2.10 Nanesení dalších vrstev [5] .....	15
Obrázek 2.11 Prostředí programu Magics.....	16
Obrázek 2.12 Princip výroby kovového prášku atomizací vody [7].....	17
Obrázek 2.13 Fáze tvorby kapek při atomizaci taveniny plynem [7].....	18
Obrázek 2.14 Atomizace taveniny SS oceli 316L – (a) plynem, (b) vodou [8] .....	19
Obrázek 3.1 Znázornění limitního úhlu [11].....	21
Obrázek 3.2 Podepření součásti [11] .....	21
Obrázek 3.3 Realizace modelu s otvorem (vlevo – s podpěrou, vpravo – optimalizace tvaru) [11] .....	22
Obrázek 3.4 Realizace modelu při změně polohy [11] .....	22
Obrázek 3.5 Nevhodná poloha modelu vzhledem k nanášení [11].....	23
Obrázek 3.6 Vhodná poloha modelu vzhledem k nanášení [11].....	23
Obrázek 3.7 Tisk dlouhé součásti (vlevo – vychýlení, vpravo – vzepření součásti) [11].	24
Obrázek 3.8 Zaoblení hran na modelu [11].....	24
Obrázek 3.9 Poloha modelu pro omezení pnutí v oblasti tiskové platformy [11].....	25
Obrázek 3.10 Odtržení podpěr (vlevo – od platformy, vpravo – od modelu) [11].....	25
Obrázek 3.11 Princip strategie „Meander“ [13].....	26
Obrázek 3.12 Princip strategie „Stripes“ [13].....	27
Obrázek 3.13 Princip strategie „Chessboard“ [13].....	27
Obrázek 3.14 Princip strategie "Total Fill" [13] .....	27

Obrázek 3.15 Definovaná výška vrstvy [13] .....	28
Obrázek 3.16 Schéma „melt pool“ a vzdálenosti mezi jednotlivými body [13].....	29
Obrázek 3.17 Oblast nastavení ohniska [13] .....	30
Obrázek 3.18 Vliv posunutí ohniska [13].....	30
Obrázek 3.19 Detail vzdálenosti šrafování uvnitř obrazce [13].....	30
Obrázek 3.20 Schéma Hatch Distance [13] .....	31
Obrázek 3.21 Optimalizace vzdálenosti šrafování pro odstranění pórizity [13] .....	31
Obrázek 4.1 Výkres zkušební tělesa pro analýzu průchozích otvorů (hodnoty v mm) .....	34
Obrázek 4.2 Model zkušební tělesa pro analýzu průchozích otvorů.....	35
Obrázek 4.3 Zkušební těleso pro analýzu průchozích otvorů realizované technologií DMLS .....	35
Obrázek 4.4 Výkres zkušební tělesa pro zkoušku tahem (hodnoty v mm).....	36
Obrázek 4.5 Výkres zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu (hodnoty v mm) ...	36
Obrázek 4.6 Zkušební těleso pro vyhodnocení vlivu TZ .....	37
Obrázek 4.7 Rozložení zkušebních těles na tiskové platformě (prostředí Magics) .....	38
Obrázek 4.8 Zkušební tělesa před odstraněním podpěr .....	38
Obrázek 4.9 Zkušební tělesa po odstranění podpěr.....	39
Obrázek 4.10 Sada zkušebních těles po odstranění podpěr a označení .....	39
Obrázek 4.11 Zkušební těleso na podpěrách kyvadlového kladiva [15].....	43
Obrázek 4.12 Schéma zatěžování při zkoušce tvrdosti dle Vickerse [15] .....	45
Obrázek 4.13 Vyznačení řezných rovin na modelu zkušební tělesa .....	46
Obrázek 4.14 Řez kolmý na směr tisku (model) .....	47
Obrázek 4.15 Řez rovnoběžný se směrem tisku (model) .....	47
Obrázek 4.16 Metalografická pila Stuers Labotom-3 .....	47
Obrázek 4.17 Přesná metalografická pila Buehler IsoMet 1000 .....	48
Obrázek 4.18 Lis Stuers CitoPress-1 pro zalisování za tepla .....	49
Obrázek 4.19 Poloautomatická bruska Buehler Beta .....	50
Obrázek 5.1 Zokujený povrch vzorku po TZ bez ochranné atmosféry .....	51
Obrázek 5.2 Zkušební těleso po TZ ošetřené nátěrem CONDURSAL Z1100.....	52
Obrázek 5.3 Zkušební těleso po TZ v ochranné atmosféře .....	52
Obrázek 5.4 Metalografický snímek tělesa bez TZ (řez kolmý na směr tisku, strana s krajním otvorem 0,8 mm) .....	53

Obrázek 5.5 Metalografický snímek tělesa bez TZ (řez kolmý na směr tisku, strana s krajním otvorem 0,3 mm) .....	54
Obrázek 5.6 Metalografický snímek TZ tělesa (řez kolmý na směr tisku, strana s krajním otvorem 0,3 mm) .....	54
Obrázek 5.7 Metalografický snímek TZ tělesa (řez kolmý na směr tisku, strana s krajním otvorem 0,8 mm) .....	55
Obrázek 5.8 Metalografický snímek TZ tělesa (řez rovnoběžný se směrem tisku, strana s krajním otvorem 0,3 mm) .....	55
Obrázek 5.9 Metalografický snímek TZ tělesa (řez rovnoběžný se směrem tisku, strana s krajním otvorem 0,8 mm) .....	56
Obrázek 5.10 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, strana s krajním otvorem 0,3 mm, zvětšení 10x) .....	57
Obrázek 5.11 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, strana s krajním otvorem 0,8 mm, zvětšení 10x) .....	57
Obrázek 5.12 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, otvor 0,3 mm, zvětšení 25x) .....	58
Obrázek 5.13 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, otvor 0,4 mm, zvětšení 25x) .....	58
Obrázek 5.14 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, otvor 0,5 mm, zvětšení 25x) .....	59
Obrázek 5.15 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, otvor 0,6 mm, zvětšení 25x) .....	59
Obrázek 5.16 Metalografický snímek tělesa – etapa 2 (řez kolmý na směr tisku, otvor 0,7 mm, zvětšení 25x) .....	60
Obrázek 5.17 Diagram zkoušky tahem – těleso T001 .....	61
Obrázek 5.18 Zkušební těleso T001 po přetržení .....	62
Obrázek 5.19 Diagram zkoušky tahem – těleso T002 .....	62
Obrázek 5.20 Zkušební těleso T002 po přetržení .....	62
Obrázek 5.21 Diagram zkoušky tahem – těleso T003 .....	63
Obrázek 5.22 Zkušební těleso T003 po přetržení .....	63
Obrázek 5.23 Diagram zkoušky tahem – těleso T4501 .....	63
Obrázek 5.24 Zkušební těleso T4501 po přetržení .....	64
Obrázek 5.25 Diagram zkoušky tahem – těleso T4502 .....	64

Obrázek 5.26 Zkušební těleso T4502 po přetržení.....	64
Obrázek 5.27 Diagram zkoušky tahem – těleso T4503 .....	65
Obrázek 5.28 Zkušební těleso T4503 po přetržení.....	65
Obrázek 5.29 Diagram zkoušky tahem – těleso T9001 .....	65
Obrázek 5.30 Zkušební těleso T9001 po přetržení.....	66
Obrázek 5.31 Diagram zkoušky tahem – těleso T9002 .....	66
Obrázek 5.32 Zkušební těleso T9002 po přetržení.....	66
Obrázek 5.33 Diagram zkoušky tahem – těleso T9003 .....	67
Obrázek 5.34 Zkušební těleso T9003 po přetržení.....	67
Obrázek 5.35 Zkušební těleso R002 po přeražení .....	69
Obrázek 5.36 Zkušební těleso R002 – plocha lomu.....	69
Obrázek 5.37 Zkušební těleso R4503 po přeražení .....	70
Obrázek 5.38 Zkušební těleso R4503 – plocha lomu.....	70
Obrázek 5.39 Zkušební těleso R9001 po přeražení .....	70
Obrázek 5.40 Zkušební těleso R9001 – plocha lomu.....	71
Obrázek 5.41 Zkušební tělesa pro zkoušku tvrdosti podle Vickerse .....	72
Obrázek 6.1 Porovnání způsobů ochrany (vlevo – ochranný nátěr, vpravo – ochranná atmosféra).....	73
Obrázek 6.2 Porovnání přítomnosti pórozity (vlevo – konfigurace 1, vpravo – konfigurace 2) .....	74

## Seznam tabulek

Tabulka 2.1 Všeobecné charakteristiky oceli 316L dle katalogového listu Renishaw (technologie DMLS) a katalogového listu Outokumpu (válcovaná za studena) [9], [10] .....	20
Tabulka 3.1 Konfigurace parametrů tisku v oblasti „Volume“ – etapa 1.....	33
Tabulka 3.2 Konfigurace parametrů tisku v oblasti „Volume“ – etapa 2.....	33
Tabulka 5.1 Výsledné hodnoty zkoušky tahem.....	67
Tabulka 5.2 Výsledné hodnoty zkoušky rázem v ohybu.....	71
Tabulka 5.3 Výsledné hodnoty zkoušky tvrdosti podle Vickerse.....	72
Tabulka 6.1 Hodnoty zkoušky tahem.....	75
Tabulka 6.2 Hodnoty zkoušky rázem v ohybu.....	76
Tabulka 6.3 Hodnoty zkoušky tvrdosti podle Vickerse.....	76