

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI  
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA  
SPOLEČNÁ LABORATOŘ OPTIKY UP A FZÚ AV ČR  
V OLOMOUCI

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Aditivní tavení kovových prášků pomocí laseru



<b>Vypracoval:</b>	<b>Jan Vaněk</b>
<b>Studijní program:</b>	<b>B1701 Fyzika</b>
<b>Studijní obor:</b>	<b>1701R030 Přístrojová fyzika</b>
<b>Vedoucí diplomové práce:</b>	<b>prof. RNDr. Miroslav Mašláň, CSc.</b>
<b>Termín odevzdání práce:</b>	<b>květen 2018</b>

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením prof. RNDr. Miroslava Mašláně, CSc. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne 1. 5. 2018

.....

Jméno a příjmení

## Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora	Jan Vaněk
Název práce	Aditivní tavení kovových prášků pomocí laseru
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	prof. RNDr. Miroslav Mašláň, CSc.
Rok obhajoby práce	2018
Abstrakt	Cílem bakalářské práce je otestovat kvalitu tisku nerezové oceli na 3D tiskárně M2 cusing. V textové části provede student rešerši funkčních součástí použité tiskárny a klasifikace laserů. Mimo jiné vybere a popíše vybrané metody 3D tisku. V praktické části bude provedeno několik testů na příkladných objektech za odlišných parametrů laseru. Dále bude řešena otázka polohového umístění objektů na stavební desce tiskárny a její vliv na samotný průběh tisku. Výsledkem práce bude stanovení funkčních závislostí pro parametry laseru tiskárny a jejich nedílných součástí (pro celý tiskový proces) na výsledný produkt 3D tiskárny M2 Cusing.
Klíčová slova	aditivní výroba, 3D tisk, laser, cusing
Počet stran	52
Počet příloh	3
Jazyk	český

## Bibliographical identification

Autor's first name and surname	Jan Vaněk
Title	Additive metal powders melting by means of laser
Type of Thesis	Bachelor
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	prof. RNDr. Miroslav Mašláň, CSc.
The year of presentation	2018
Abstract	Aim of the bachelor thesis is to examine print quality of a stainless steel by 3D printer M2 Cusing. In recherse part of the thesis student examine the functional parts of the printer and carry out laser classifications. Among other things, student choose and describe some of the 3D print methods. In the experimental part of the thesis multiple test of the printed objects printed with variation of print process parameters will take a place. The thesis outcome is to come with dependency of printed parts quality on parameters of the 3D printer M2 Cusing.
Keywords	additive manufacturing, 3D printing, laser, cusing
Number of pages	52
Number of appendices	3
Language	czech

Rád bych poděkoval prof. RNDr. Miroslavovi Mašláňovi, CSc. za vedení a odborné rady. Dále bych rád poděkoval Mgr. Tomáši Burianovi za odborné rady, připomínky a také umožnění vzniku této bakalářské práce v centru UPrint 3D Vědeckotechnického parku UP v Olomouci. Rovněž chci poděkovat Mgr. Haně Kubičkové za pomoc a asistenci při realizaci výtisků.

# Obsah

Úvod . . . . .	7
1 Historie . . . . .	8
2 Materiály a metody 3D tisku . . . . .	9
2.1 SLS - Selective Laser Sintering . . . . .	10
2.2 SLM - Selective Laser Melting . . . . .	12
2.3 FDMm - Fused Deposition Modeling of metals . . . . .	12
2.4 WAAM - Wire and Arc Additive Manufacturing . . . . .	13
2.5 EBM - Electron Beam Melting . . . . .	14
2.6 DED - Directed Energy Deposition . . . . .	15
2.7 LOM - Laminated Object Manufacturing . . . . .	15
3 3D tisk z kovů v ČR . . . . .	17
4 Laser . . . . .	19
5 Elektronová skenovací mikroskopie . . . . .	21
6 SLM tiskárna M2 Cusing . . . . .	22
6.1 Laserová kabina . . . . .	23
6.2 Odvětrávací a filtrační zařízení . . . . .	24
6.3 Tiskový stroj . . . . .	24
6.3.1 Tiskový modul . . . . .	25
6.3.2 Manipulační komora . . . . .	26
6.3.3 Procesní komora . . . . .	26
6.3.4 Kontrolní panel, PC a světelné signalizační zařízení . . . . .	27
7 Výrobní proces . . . . .	28
7.1 Tvorba digitálního 3D modelu . . . . .	28
7.2 Příprava tiskového materiálu, tiskárny a jejích částí . . . . .	29
7.3 Nastavení tiskových parametrů tiskárny . . . . .	30
7.4 Tisk . . . . .	31
7.5 Očištění výtisku od nespotřebovaného materiálu a podpor . . . . .	31
7.6 Post-processing . . . . .	32
8 Vyhodnocení . . . . .	34
8.1 SEM mikroskopie . . . . .	34
8.2 Mössbauerova spektroskopie . . . . .	38
8.3 Mechanické zkoušky . . . . .	40
8.4 Tenké destičky . . . . .	41
Závěr . . . . .	43
Reference . . . . .	45
Seznam obrázků . . . . .	48
Seznam tabulek . . . . .	49
Přílohy . . . . .	50

## Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá 3D tiskem, aneb také aditivní výrobou, z kovových materiálů pomocí laseru. Tato technologie spolu s dalšími způsoby aditivní výroby z kovů si rychle získává své místo nejen ve výzkumu, ale i v průmyslu. Stále více se uplatňuje pro výrobu prototypů a zkušebních výrobků. V poslední době se však lze setkat i s výrobou finálních produktů, například v oboru letectví, či kosmonautiky.

Aditivní technologie jsou velmi mladé. Využití nacházejí v mnoha odvětvích, mezi jinými se jedná o strojírenství, například automobilový nebo letecký průmysl, dále stavební průmysl a architektoniku, lékařské aplikace či umění. Hlavní výhodou 3D tisku je možnost rychlé kusové výroby prototypů, nebo dokonce finálních výrobků, a mnohdy také výroba objektů, jejichž komplexnost přesahuje možnosti tradičních metod výroby, jakými je například obrábění. Existuje velmi mnoho metod a pro výrobu se používá celá škála materiálů. Navíc se principy aditivních technologií dají uplatnit nejen v makrosvětě, ale i mikrosvětě. Aditivní technologie jsou dnes velmi progresivní a rychle se vyvíjející.

Předmětem této bakalářské práce je popsat a vysvětlit principy aditivních technologií používající kovy. Tedy vysvětlit způsoby a metody, které se pro takovou výrobu z kovů dají využít. Rovněž je předmětem zmapovat využití aditivních technologií z kovu v českém prostředí, a to jak výzkumném, tak průmyslovém. Dále si práce klade za cíl popsat technické parametry 3D tiskového stroje ConceptLaser M2 Cusing, jeho možnosti a limity, a také vysvětlit způsob práce s ním, tedy jaké kroky je nutno podniknout k dosažení výroby výtisku. Součástí práce je rovněž výroba několika zkuškových výtisků na tiskárně M2 Cusing a rozbor této výroby. Smyslem takové výroby je porovnat dvě výkonová nastavení tiskového stroje a vliv těchto výkonových nastavení na podobu výsledných výtisků. Zkuškové výtisky jsou dále podrobeny několika testům, kdy jsou zkoumány jejich strukturní a mechanické vlastnosti a jsou rozebrány rozdíly mezi výtisky vyrobenými za použití rozdílných výkonových nastavení 3D tiskárny.

# 1 Historie

Za dobu zrodu aditivní výroby lze považovat osmdesátá léta. Výrobky, resp. prototypy vyráběné tradičním přístupem, tedy obráběním, vstřikováním, tvarováním apod., jsou nákladné a časově náročné na výrobu. Hlavním cílem bylo tedy snížit cenu a náročnost výroby prototypů. V roce 1983 tak vzniká stereolitografické zařízení (technologie SLA). V roce 1986 byl udělen patent na toto zařízení Charlesi Ch. Hullovi. První komerční SLA stroj byl uveden na trh roku 1987 a to firmou RP Systems Corporation. Dalším patentovaným způsobem aditivní výroby bylo selektivní laserové sintrování (SLS – Selective Laser Sintering). Na technologii SLS byl vydán patent v roce 1989 Carlu Deckardovi, později Deckard prodal licenci firmě DTM Inc. Ve stejném roce Hans Langer založil německou firmu EOS GmbH. Firma se zaměřovala na technologii laserového sintrování (LS – Laser Sintering). Tato firma spolu s finskou divizí Elektrolux také stála za technologií přímého sintrování kovů laserem (DMLS – Direct Metal Laser Sintering). V roce 1989 byl rovněž udělen patent na technologii FDM a to S. S. Crumpovi a L. Crumpové. Ti byli spoluzakladateli společnosti Stratasys. V průběhu následujících let vznikla celá řada technologií aditivní výroby a firem, které vyráběly stroje využívající zmíněných technik. Z této doby se však do dnešních let zachovaly pouze tři firmy: 3D Systems, Stratasys a EOS. [1, 2]

V devadesátých letech docházelo především k rozvoji již zmíněných technologií. V dalších letech ale vznikaly i další, například technologie selektivního laserového tavení (SLM – Selective Laser Melting). Ta vznikla v roce 2000 ve firmě MCP Technologies. V období po roce 2000 se ujal zastřešující pojem „aditivní technologie“. V rozmezí let 2005 až 2010 dochází k masivnímu zlevnění technologií aditivní výroby. Důsledek tohoto zlevnění je vidět dodnes, neboť je 3D tisk dostupný široké veřejnosti. Významnou měrou se na tom podílí taky konec platnosti patentů na technologii FDM v roce 2005. Jedním z průkopníků zpřístupnění 3D tisku široké veřejnosti byl projekt RepRap, a to právě rozšířením technologie FDM. V dnešní době je tak možné si nejen levně 3D tiskárnu zakoupit, ale dokonce zkonstruovat svoji vlastní, což může výrazně snížit pořizovací cenu, při srovnatelných výstupních parametrech komerčně dodávaných 3D tiskáren. [1, 2]

Za zmínku jednoznačně stojí jméno českého konstruktéra 3D tiskáren Josefa Průšy. V oboru 3D tisku pracuje od roku 2009. Za tu dobu jeho firma Prusa Research s.r.o. zaujala přední místo na celosvětovém trhu 3D tiskáren. Jeho tiskárny rovněž využívají technologii FDM. [3, 4]



## 2 Materiály a metody 3D tisku

Technologie 3D tisku, také zvaná aditivní výroba, je v poslední době rozsáhlý fenomén. Její nesporné výhody jí zajistily jisté místo ve světě, především pak ve vědě, průmyslu a zdravotnictví. Ačkoliv je dnes technologie 3D tisku již značně rozšířená, do obecného povědomí se dostala teprve v posledním desetiletí. Důvodem je především klesající cena 3D tiskáren a dále pak taky projekt Rep-Rap, jehož cílem je zpřístupnit technologii 3D tisku z plastů široké veřejnosti a to vše na bázi open source (GNU GPL) licence. [5]

Existuje nespočet typů 3D tiskáren. Vzhledem k velkému množství způsobů a technik použitých ve výrobcích různých producentů, kdy je nemožné jmenovat všechny z nich, se zatím omezíme na klasifikaci dle materiálu, ze kterého tisknou. Tyto materiály jsou:

- Polymery
- Kovy
- Papír
- Jiné (keramika, beton atd.)

Bezkonkurenčně nejrozšířenějším materiálem celosvětově používaným k 3D tisku jsou polymery, lidově plasty. Přístupů je několik, nejčastější je postupné nanášení taveného polymerového vlákna po vrstvách metodou FDM - Fused Deposition Modeling. Tato metoda a její obdoby jsou jako jediné rozšířené nejen v průmyslu a výzkumu, ale i mezi širokou veřejností (především pak mezi domácími kutily, modeláři, umělci apod.) Dalším často používaným způsobem je postupné vytvrzování fotosensitivního polymeru světlem metodou SLA, tedy stereolitografií. [6]

Pro tisk z papíru se používá metoda LOM - Laminated Object Manufacturing. Papír je na poli 3D tisku spíše nový materiál v porovnání s kovem, či plasty. Nabízí však některé výhody, které tiskárny používající jiné materiály stěží mohou poskytnout. Jedná se především o možnost plně barevného tisku a dále pak také velmi nízká cena výrobku, protože se výrobek zpravidla tvoří z běžného kancelářského papíru. [6]

3D tisk budov nebo jiných objektů ze stavebních materiálů je zcela samostatnou skupinou a na rozšíření takových technologií do praxe se v podstatě teprve čeká. Do budoucna však lze počítat s bohatým vývojem. Tisknout lze obytné budovy, mosty a uvažuje se o možné aplikaci využití technologie 3D tisku ze stavebních materiálů pro budování kosmických základen, například na Měsíci. Výhodou je možnost konstrukce objektu s co nejmenším zapojením lidských sil, což by případnou stavbu v prostředích jako jsou Měsíc (tedy vysoké vakuum a extrémní výkyvy teplot) značně zjednodušilo. [7]

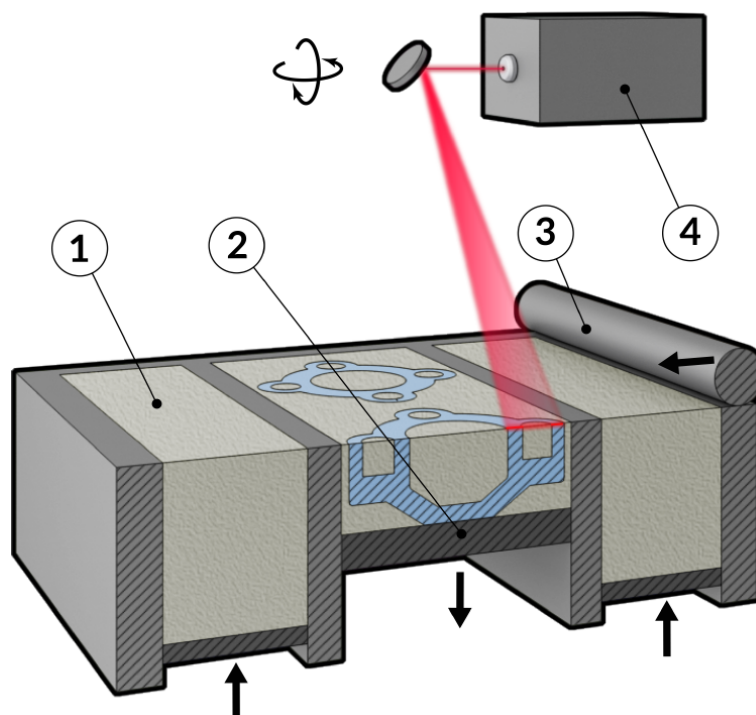
Zdaleka nejlepší pevnost pro skutečné využití v mechanicky náročných aplikacích nabízí kovy. Tisk z kovu je perspektivní hned z několika důvodů. Největší výhodou je bezesporu o mnoho vyšší mechanická odolnost, než u tisku z plastu nebo papíru. Další výhodou je možnost tisknutí z kovů, které jsou jinak velmi obtížně obrobitelné, a tak jsou v průmyslu, i přes nabízené materiálové benefity, zatím používány jen velmi zřídka. Mezi takové kovy řadíme například titan. Pro tisk z kovů lze použít různé metody, jmenovitě:

- SLS - Selective Laser Sintering
- SLM - Selective Laser Melting
- FDMm - Fused Deposition Modeling of metals
- WAAM - Wire and Arc Additive Manufacturing
- EBM - Electron Beam Melting
- DED - Directed Energy Deposition
- LOM - Laminated Object Manufacturing

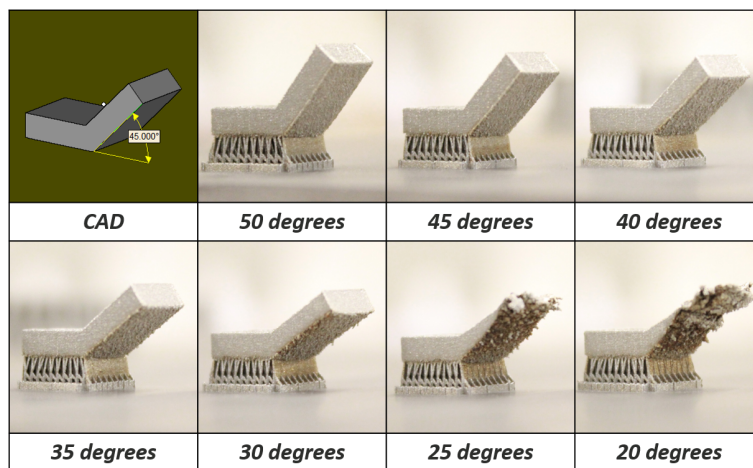
## 2.1 SLS - Selective Laser Sintering

3D tisk metodou laserového sintrování je patrně nejrozšířenější metoda 3D tisku z kovů. Používané kovy jsou hliník, ocel, titan, zlato, stříbro, měď, slitiny niklu a slitina kobaltchrom. Metoda spočívá v sintrování kovového prášku nanášeného po vrstvách. Nejprve se nanese vrstva prášku, následným sintrováním laserovým svazkem se sousední zrna prášku částečně spečou a prolnou. Toto se opakuje po vrstvách tak dlouho, dokud není výrobek hotov. Tisk se provádí v ochranné atmosféře, typ plynu je volen podle použitého práškového materiálu. Selektivní laserové sintrování je přesná metoda, produkující dobře vypadající výrobky s vysokou kvalitou povrchu v porovnání s jinými metodami 3D tisku. Nevýhodou je, že sintrování neposkytuje finální mechanickou odolnost jako mateřský materiál. Jinými slovy, výrobek vyprodukovaný metodou SLS nedosahuje mechanických kvalit jako výrobek vyrobený ze stejného materiálu tradičními metodami, např. obráběním. Metoda je rovněž finančně nákladná. Vyžaduje výkonný laser a ochrannou atmosféru. Kromě kovových materiálů lze tuto metodu efektivně využít i pro tisk z plastů, písku a vosku. [6, 8]

Při použití metody SLS (a i většiny dalších jmenovaných metod s výjimkou WAAM a LOM) je v případě potřeby nutné generovat podpůrné struktury. V případě, že výrobek obsahuje převisy, tedy nastává situace, kdy se následná část vrstvy nachází na pozici, pod níž není žádná část výrobku, je nutno vytvořit podpůrné struktury. Pokud by jich nebylo využito, výrobek by se mohl v průběhu tisku zhroutit vlivem vlastní hmotnosti v dané oblasti. Podpory se tvoří stejnou metodou jako výrobek sám, zpravidla jsou však výrazně porézní a síťované, aby se snadno odstraňovaly z výsledného výrobku a také aby se jejich tvorbou nespotebovalo zbytečně mnoho práškového materiálu. Nespotebovaný prášek obklopující výrobek lze totiž opět použít. [6]



Obrázek 1: Metoda SLS [8]



Obrázek 2: Ukázka nutnosti použití podpor v závislosti na úhlu [9]

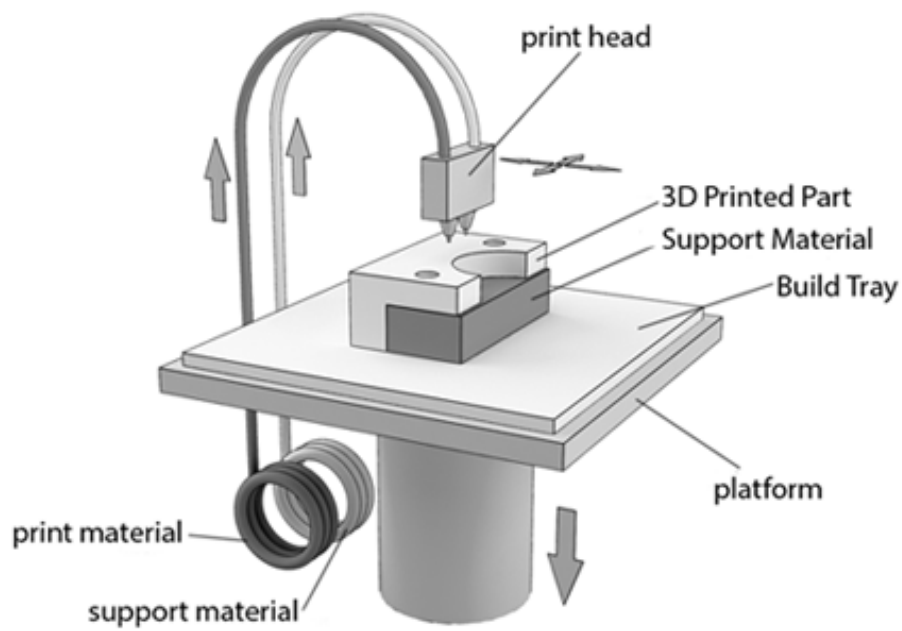
## 2.2 SLM - Selective Laser Melting

Selective Laser Melting, neboli selektivní laserové tavení, je metoda z velké části podobná selektivnímu laserovému sintrování. Zařízení tiskárny a způsob výroby jsou skoro totožné. Rozdíl tvoří skutečnost, že zatímco u sintrování dochází pouze k vzájemnému prolnutí zrn prášku, při metodě SLM dochází k úplnému roztavení materiálu, a také natavení podkladové vrstvy. Díky tomu jsou výrobky mechanicky odolnější a pevnější, než v případě selektivního laserového sintrování. Stejně jako v případě SLS se jedná o finančně nákladnou metodu. Rovněž lze využít i jiných tiskových materiálů, stejně jako u metody selektivního laserového sintrování (plasty, atd.). [6, 10]

## 2.3 FDMm - Fused Deposition Modeling of metals

Metoda FDM, tedy Fused Deposition Modeling, je využívána primárně pro tisk z polymerů. Jedná se v principu o velmi jednoduchou metodu, kdy je plastové vlákno zaváděno do nahřívací hlavičky, kde je teplo dodáváno odporovým topným tělesem. Ta pak pohybem po vrstvách nanáší na požadovaná místa tenké vrstvy roztaveného vlákna. Polymery jsou pro tuto metodu vhodné zejména svým nízkým bodem tání ( $< 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), což je vitální jak pro možnost rychle dodávat dostatek tepla nahřívací hlavičce materiálu za účelem zvýšení rychlosti procesu, tak i skutečností, že nanesený materiál rychle tuhne zpět do pevného skupenství, a tak mohou být výrobky vyrobeny s velkou rozměrovou přesností. Nanášení roztaveného materiálu tímto způsobem je rychlé, účinné a levné. Tato metoda (či její variace) je použitelná i pro jiné materiály, například beton, keramickou hlínu, potraviny či právě kovy. [6]

FDMm je obdoba FDM metody využívající k tisku kov. Hlavní problém je vysoká teplota tání většiny kovových materiálů, která 3D tisk touto metodou prakticky znemožňuje. Jedinou variantou tak zůstává použít slitiny s nízkým bodem tání ( $< 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Výhodou je snadná realizace tisku, jelikož tato metoda je jednoduchá a levná, nicméně nevýhodou zůstává skutečnost, že výrobek má nízkou tepelnou odolnost. [6]



Obrázek 3: Metoda FDM [11]

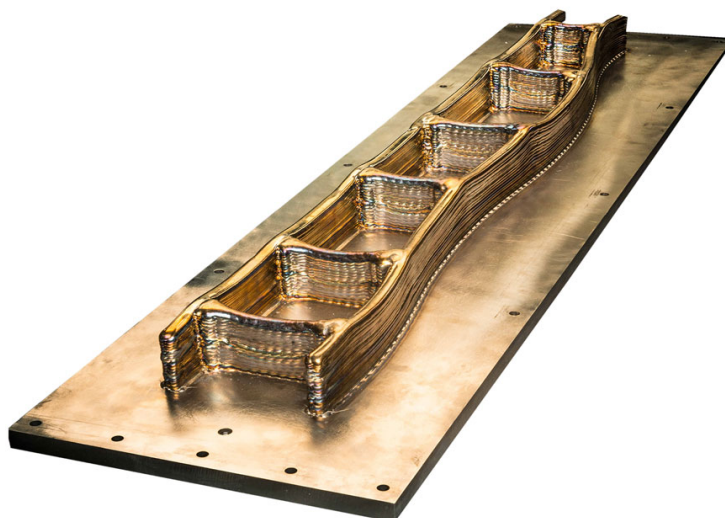
## 2.4 WAAM - Wire and Arc Additive Manufacturing

WAAM je další z metod 3D tisku kovů. Princip činnosti je podobný předchozí jmenované metodě FDM, jinými slovy: roztavený materiál je hlavicí nanášen ve vrstvách. Tato metoda však umožňuje tisknout z běžně používaných kovů ve strojírenském průmyslu. Namísto zahřívání materiálu průchodem zahřívací hlavicí se materiál navařuje technologií MIG/MAG. Technologie MIG/MAG, aneb také česky svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře, je ve strojírenském průmyslu běžně využívána. MIG - Metal Inert Gas, aneb česky svařování s inertním plynem, využívá k ochraně svarové lázně plyny jakými jsou argon, či směs argonu s heliem, kdy nedochází k reakci svařovaného kovu s plynem. MAG - Metal Active Gas, tedy svařování s aktivním plynem využívá například oxidu uhličitého, nebo směsi argonu a oxidu uhličitého, či argonu a kyslíku. V případě technologie MAG dochází k chemickým reakcím mezi svařovaným kovem a ochranným plynem. Svařování s inertním plynem je vhodné pro materiály jakými jsou měď, hliník nebo titan. Svařování s aktivním plynem je vhodnější pro spojování ocelí. [6, 12]

K pohybu navařovací hlavy se používá běžný ramenový průmyslový robot. Výhodou této metody je tedy nejen možnost tisknout například z mědi, bronzí, hliníku, oceli, či titanu, ale i skutečnost, že průmysloví roboti i MIG/MAG svařecí stroje jsou v průmyslu běžně používaná zařízení. Metoda je sice méně přesná, než SLS, či SLM, ale umožňuje tisk i velmi rozměrných objektů (až řádově metry). [6, 14]



Obrázek 4: Průmyslový robot - rameno [13]



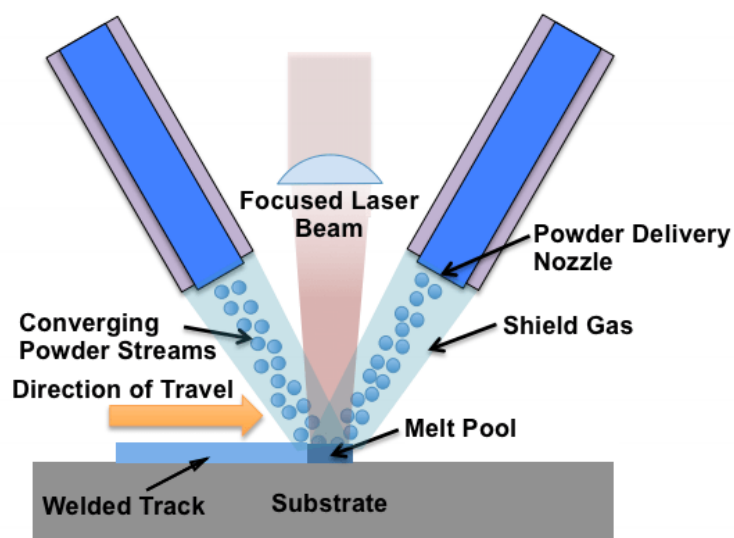
Obrázek 5: Výtisk provedený metodou WAAM [15]

## 2.5 EBM - Electron Beam Melting

Jak již název napovídá, tato metoda využívá k práci elektronového svazku. V principu se jedná o podobnou metodu jako v případě SLS, či SLM. Jsou zde však dva zásadní rozdíly: Namísto laseru je použito elektronového svazku. To podmiňuje druhý rozdíl, a tedy nutnost vytvoření vakua v místě výroby. Narozdíl od SLS, či SLM metod tak není zapotřebí ochranná atmosféra, nýbrž vakuum. Jelikož k vychylování elektronového svazku nepoužíváme čoček a zrcadel, nýbrž elektrických cívek, celý systém může dosáhnout vyšší přesnosti, než jak je tomu u metod SLS, či SLM. Navíc celý tisk probíhá ve vakuu, což vyšší rozměrovou přesnost výrobku ještě zvyšuje. [6]

## 2.6 DED - Directed Energy Deposition

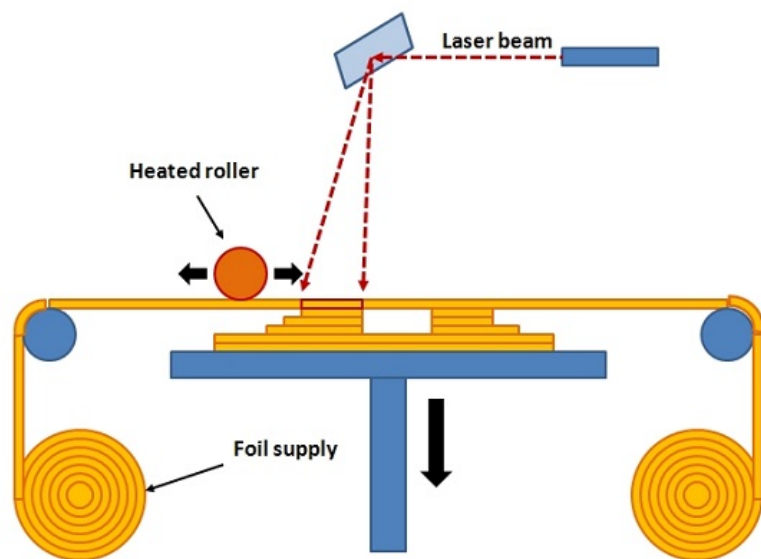
Další metodou je DED, aneb Directed Energy Deposition. V mnoha ohledech je tato metoda podobná metodě WAAM. Pracuje na tom principu, že do ohniska laserového svazku je vnášen práškový kov, který se spolu s podkladem roztaví a vytvoří tak novou vrstvu výrobku. Výhodou této metody je, že lze v průběhu průběhu tisku měnit složení přiváděného prášku, což může být použito pro tisk objektů s nevídanými mechanickými kvalitami. Navíc jde touto metodou nejen od základu tisknout nový výrobek, ale dokonce opravit již existující kovové těleso nebo na něj navařit další struktury. Lze tisknout z hliníku, titanu, nerezové oceli, niklu, mědi i kobaltu. [6]



Obrázek 6: Metoda DED [16]

## 2.7 LOM - Laminated Object Manufacturing

Poslední jmenovanou metodou je Laminated Object Manufacturing. Jak je z názvu patrné, jádrem metody je laminace. Zatímco všechny předchozí metody využívaly ke tvorbě zahřátí materiálu a jeho úplné, či alespoň částečné natavení, tato metoda pracuje bez nutnosti tavení materiálu. Ačkoliv se tato metoda používá spíše pro tisk z papíru, lze ji využít i pro tisk z kovů. 3D tisk probíhá tak, že se nabere vrstva materiálu (např. tenká kovová folie) který se nanese na podklad a spojí se s ním. Následně se laserem vyřízne tvar aktuální vrstvy a pokračuje se dalším nanesením následné vrstvy. Ke spojení dvou vrstev se dá využít buď lepení a nebo svařování ultrazvukem.[6]



Obrázek 7: 3D tisk metodou LOM [17]



### 3 3D tisk z kovů v ČR

3D tisk z kovů má své zájemce v České republice zpravidla z podobných důvodů jako v zahraničí. Těmi jsou v průmyslu rychlá výroba prototypů, čím dál snadnější dostupnost a možnost tvorby výrobků z členitou vnitřní strukturou, které by nebylo možné vyrobit žádnou jinou tradiční technologií, či by taková výroba byla časově i finančně velmi nákladná. I přesto je 3D tisk z kovů zpravidla nákladný natolik, že se opravdu vyplatí jen pro velké firmy, nebo výzkumný sektor. Menší české firmy však mají možnost si nechat výtisk vyrobit firmou nebo jinou institucí, která se na 3D tisk specializuje. Takovou institucí může být například vysoká škola. V České republice se 3D tisk z kovů realizuje na několika místech.

Jedním z takových míst je UPrint 3D, který patří pod Univerzitu Palackého v Olomouci, kde byla realizována praktická část této bakalářské práce. Kromě kovů je zde možno tisknout i z běžných termopolymérů, fotopolymérů, nebo papíru. Kromě 3D tisku nabízí i 3D optické skenování těles a tedy možnost přenosu rozměrů skutečného tělesa do 3D modelu. UPrint 3D je součástí Vědeckotechnického parku Univerzity Palackého v Olomouci a existuje od roku 2015. Zákazníky UPrint 3D jsou například firmy Meopta, Hella či Miele. [18]

3D tiskem z kovů se dále zabývá Odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. V rámci 3D tisku z kovů zde disponují strojem SLM 280 HL německé firmy SLM Solutions. Podobně jako UPrint 3D nabízí i možnost optického skenování. [19]

Dalším místem, kde se v České republice lze setkat s 3D tiskem z kovů je Laboratoř aditivní výroby patřící pod Fakultu strojní Vysoké školy báňské - Technickou univerzitu Ostrava. K výrobě z kovů využívají zařízení bristkové firmy Renishaw AM400. Laboratoř aditivní výroby pod VŠB-TUO je relativně mladá, svou činnost započala v listopadu roku 2016. [20]

V Česku však lze nalézt i místa bez přímé spojitosti s některou z vysokých škol. Jednou z takových společností je METAL3D, s.r.o., která sídlí ve Vědeckotechnickém parku CAVD - Centru aplikovaného výzkumu Dobříš. Disponují tiskárnou Renishaw AM250. Spolupracují se Strojní fakultou Českého vysokého učení technického v rámci projektu „Zkoušky mechanických vlastností 3D tištěných kovových dílů“. [21]

Zakázkové zpracování 3D tisku z kovů dále v ČR nabízí několik dalších firem, jmenovitě se jedná o Makers Lab v Praze, Materialpro 3D v Brně, Innomia v Jaroměři, Trider v Brně nebo Lascam v Praze. [24, 25, 26, 27, 28]

Zajímavý je rovněž Klastř Aditivní výroby, z.s., což je organizace sdružující výzkumné a průmyslové subjekty interesované v aditivní výrobě. Cílem je popularizovat tento obor, pomáhat svým členům navázat kontakt s dalšími zainteresovanými subjekty, zprostředkovává přístup k informacím a pomáhá k možnosti získu dotací z fondů Evropské unie. Klastř aditivní výroby vznikl v roce 2016 a jeho členy jsou například Univerzita Palackého v Olomouci, Vysoké učení technické v Brně, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava nebo firmy Renishaw, MCAE Systems, 3-R Systemes, SLM Solutions Group AG a další. [29]

Zvláštní pozornost si zcela jistě zaslouží firma Kovosvit MAS. Ve spolupráci s Ústavem výrobních strojů a zařízení, Fakulty strojní ČVUT v Praze, vyrobila první českou 3D tiskárnu používající kov. Navíc zkombinovala možnost tisku MIG/MAG technologií s pětiosým třískovým obráběním. Umožňuje tak z obou způsobů výroby využít právě jejich pozitiva. Nejedná se tedy o čistě aditivní výrobu, ale o tzv. HM - Hybrid Manufacturing, neboli hybridní výrobu. Zařízení je na poli 3D technologií stále horkou novinkou. Stroj byl představen v dubnu roku 2017. Výhodami technologie jsou nízká cena v porovnání například s metodami SLS nebo SLM. [22, 23]

Technologie 3D tisku jsou v České republice relativně mladá záležitost. Přesto v posledních letech zažívají velice rychlý vývoj a čím dál více se uplatňují nejen v průmyslu a umění, ale dokonce i v domácnostech. Co se tisku z kovů týče je situace zatím jiná. Zatímco počet průmyslových aplikací 3D tisku z kovů strmě roste, domácí použití „v garáži“ nebo dokonce v obývacím pokoji jsou zatím v nedohlednu. To se již nedá říct o 3D tisku z polymerů, který se pomalu, ale jistě zabydluje i v domácnostech.

## 4 Laser

Název (či spíše zkratka) LASER vznikl spojením počátečních písmen slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, čili v doslovném překladu "zesilování světla stimulovanou emisí záření". Laser je jedním z nejvíce ikonických zařízení a jeho objev byl bezesporu jedním z nejdůležitějších milníků minulého století. Častou aplikací laseru je jeho využití kvůli jeho tepelným účinkům, které jsou značně lokální. Umožňuje nám zahřívání materiálu ve velmi malém bodě, což lze využít k vrtání, řezání, sváření, povrchovému kalení, cementování či nitridaci kovů a dalších materiálů, jakými jsou dřevo, plasty, keramika a jiné. V mnoha případech navíc vykoná svou práci daleko kvalitněji, než tomu je za použití konvenčních metod. Právě laser je jádrem technologie 3D tisku z kovů, která je předmětem této bakalářské práce.

Historie laseru se začala rýsovat po druhé světové válce. Po teoretickém předpokladu, že by takové zařízení bylo sestrojitelné, následovaly četné pokusy tohoto jevu, tedy stimulované emise světla, dosáhnout. V roce 1949 Alfred Kastler a Jean Brossel potvrdili, že je možné elektrony excitovat a dosáhnout inverze populace, což je nezbytný předpoklad technické realizace laseru, jak je popsáno dále. V roce 1954 jsou sestrojeny první MASERY (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) na světě. To skoro současně dvěma nezávislými týmy. Jeden z výzkumů spojený se jmény N. G. Basov a A. M. Prochorov byl veden v Sovětském svazu, přesněji v moskevském Fyzikálním ústavu akademie věd SSSR, druhý výzkum vedl Ch. H. Townes na Kolumbijské univerzitě v New Yorku v USA. V roce 1958 padlo u Ch. H. Townese a jeho kolegy A. L. Schawlowa rozhodnutí pro konstrukci laseru použít Fabry-Pérotův rezonátor. V roce 1960 pak T. H. Maiman sestrojil první funkční laser. Jednalo se o pulzní rubínový laser s vlnovou délkou 694,3 nm. V roce 1961 vznikl první He-Ne laser a v roce 1965 se objevily také první polovodičové lasery. Zatímco první laser, tedy rubínový laser T. H. Maimana, byl pevnolátkový, He-Ne laser je plynový. Dnes známe ovšem daleko více typů aktivních prostředí laserů. Kromě pevnolátkových a plynových existují lasery také lasery polovodičové, excimerové nebo kapalinové. Kategorie pevnolátkových laserů dále obsahuje dva další typy, jejichž konstrukce je svým způsobem dost odlišná od běžných pevnolátkových laserů. Jedná se o lasery diskové a vláknové. [30, 31, 32]

Ačkoliv moderní lasery jsou vysoce sofistikovaná a vzájemně dost rozdílná zařízení, jejich funkce se v principu podstatně neliší od funkce prvního rubínového laseru. Co je odlišné, jsou především makroskopicky měřitelné parametry, jakými jsou výkon, vlnová délka, délka pulzu, chování laserového svazku, účinnost apod. Laserový svazek je charakteristický z několika důvodů. Jedná se o přímou propagaci monochromatického a koherentního světla. Laser se v základu skládá ze tří částí: zdroje energie, kterým může být například výbojka, aktivního prostředí a rezonátoru. Pro funkci laseru se využívá excitování elektronů na vyšší energetické hladiny. V této hladině sestávají velmi krátkou dobu, načež klesnou na metastabilní hladinu. K emisi je v této fázi potřeba nějakého stimulu. Ten je dodán v podobě fotonu s potřebnými parametry. Aby laser fungoval je potřeba zajistit inverzi populace. To v praxi znamená, že počet elektronů nacházejících se na metastabilní hladině je větší, než počet elektronů nacházejících se v nejnižší základní hladině. Splnění tohoto předpokladu je dáno celkovou konstrukcí laseru a především typem aktivního prostředí. Následně dochází k deexcitaci, kdy nově vygenerovaný foton má stejné vlastnosti, jako stimuluující. Díky tomuto se postupně tvoří další a další fotony, které mají stejné parametry, jako ty, které je stimulovaly. Mimo jiné parametry se jedná o stejnou vlnovou délku a směr pohybu. Abychom uchovali v aktivním prostředí co nejvíce fotonů pokud možno co nejvyšší míru jejich interakce s aktivním prostředím, je nutno použít optický rezonátor, který tvoří dvě zrcadla. Jedno je odrazné a druhé je částečně propustné. Tím se celý proces maximalizuje. Podmínkou konstrukce optického rezonátoru je aby vzdálenost odrazných ploch byla celočíselným násobkem vlnové délky laseru. Částečně propustným zrcadlem vystupuje výsledný laserový svazek. Tento popis laseru je však značně zjednodušený a omezuje se pouze na nejzákladnější princip jeho funkce. [33]

## 5 Elektronová skenovací mikroskopie

Elektronová mikroskopie plní v oblasti studia mikrosvěta velice důležitou roli. Umožňuje nám totiž sledovat objekty tak malé, že již nelze použít optické mikroskopie, neboť velikost sledovaných objektů optickou mikroskopií je limitována. Minimální rozměr, který můžeme rozlišit optickou mikroskopií odpovídá přibližně polovině vlnové délky použitého světla. Chceme-li sledovat objekty menší, než toto minimum, musíme využít jiného typu mikroskopie. V případě elektronové mikroskopie využíváme namísto fotonů elektrony. Na elektrony lze z hlediska částicově vlnového dualismu pohlížet jako na vlny. Navíc mají svůj náboj, čehož se využívá pro ovládání průchodu elektronového svazku mikroskopem. Základním principem je zdroj elektronů (tzv. elektronové dělo), který určitým směrem produkuje svazek elektronů. Množství elektronů vylučovaných zdrojem závisí na jeho konstrukci. U termoemisních zdrojů dochází k zahřátí zdroje elektrickým proudem, což způsobí únik elektronů, v případě autoemisního zdroje jsou elektrony vytrhávány elektrickým polem z wolframového hrotu. Tento svazek je pak dále upravován soustavou elektromagnetických „čoček“, tedy vhodně uspořádaných cívek, které elektromagnetickým polem proud elektronů ovlivňují. Celý proces probíhá ve vakuu. [34]

Skenovací mikroskopie skutečně „skenuje“ povrch zkoumaného objektu. Elektronový svazek je cívkami prováděn po jednotlivých místech objektu bod po bodu. Skenovací elektronový mikroskop historicky navazuje na transmisní elektronový mikroskop. Rozdílem je, že zatímco v transmisním elektronovém mikroskopu dochází k průchodu elektronů zkoumaným objektem, u skenovacího elektronového mikroskopu pozorujeme elektrony odražené, a také tzv. sekundární elektrony, které vycházejí ze zkoumaného objektu vlivem jeho interakce s elektronovým svazkem. Zatímco sekundární elektrony pocházejí z hloubky objektu v řádech desítek nanometrů a dobře tedy popisují povrch objektu, odražené elektrony vycházejí z větších hloubek zkoumaného materiálu a nesou s sebou informaci o složení látky, neboť jsou delším pobytem v objektu více ovlivněny. Elektrony poté detekujeme kombinací scintilačního krystalu a fotonásobiče. Výhodou skenovací elektronové mikroskopie je, že dobře popisuje povrch zkoumaného objektu. [34]

## 6 SLM tiskárna M2 Cusing

3D tiskárna M2 Cusing firmy ConceptLaser je komplexní zařízení. K výrobě využívá metodu LaserCusing, což je v obdoba metody SLM. Celý systém se skládá z tří hlavních komponentů:

- Laserovací kabina
- Odvětrávací a filtrační zařízení
- Tiskový stroj

K plnohodnotnému provozu jsou dále nezbytné přídatná zařízení, jakými jsou tryskácká kabina, pec, prosévací stroj atd., která jsou popsána v dalších částech této práce. Tiskový stroj M2 Cusing je zařízení vyžadující prostor  $2,4 \times 1,6 \times 2,4$  m a vážící přibližně 2 tuny. Příkon systému je přibližně 7,4 kW. Prostor, ve kterém je možno tisknout je  $250 \times 250 \times 280$  mm. [36]

Tisknout je možné z následujících materiálů:

Druh materiálu	Typ slitiny
Nerezová ocel	CL 20ES (1.4404)
Nástrojová ocel	CL 50WS (1.2709)
	CL 60DG (1.2709)
	CL 80Quick
	CL 90RW (odpovídající 1.2083)
	CL 91RW
Hliník	CL 30AL (AlSi12)
	CL 31AL (AlSi10Mg)
Titan	CL 40TI (TiAl6V4)
	CL 41TI
Slitina niklu	CL 100NB (Inconel 718)
Slitina kobalt - chrom	CL 110CoCr
Remanium	Remanium® star CL
	Remanium® CL

Tabulka 1: Materiály podporované tiskárnou M2 Cusing [36]



Obrázek 8: 3D tiskárna M2 Cusing [36]

## 6.1 Laserová kabina

Laser je v systému umístěn externě. Jedná se o samostatnou skříň ve které je umístěn rezonátor. Laserový svazek je pak vyveden do tiskového stroje (do procesní komory) za pomoci optického vlákna. Jedná se o vláknový Yb: YAG laser StarFiber 400 firmy Rofin – Baasel Lasertechnik. [36]

Parametry laseru jsou:

Parametr	Hodnota
Vlnová délka	1070 nm
Maximální výkon	400 W
Divergence svazku	< 150 mrad
Kvalita svazku ( $M^2$ )	< 1,1
Frekvence pulzů	Single-shot až 50 kHz
Délka pulzů	1 $\mu$ s – kontinuální provoz
Chlazení	vzduchem

Tabulka 2: Parametry laseru [36]



Obrázek 9: Laserová kabina

## 6.2 Odvětrávací a filtrační zařízení

Odvětrávací zařízení slouží k odvodu spalin z procesní komory tiskového stroje. To je provedeno stálou cirkulací ochranného plynu přes filtrační zařízení. Z tiskového stroje je odsáván ochranný plyn, načež je vyčištěn od spalin a jemných kovových částic. Spaliny a kovové částice jsou shomažďovány v zásobníku. Tato činnost je pro úspěšný proces nezbytná, neboť od čistoty plynu se odvíjí i jeho optické vlastnosti. Nepříznivé optické vlastnosti by nepříznivě ovlivňovaly průchod laserového svazku atmosférou procesní komory. [36]

## 6.3 Tiskový stroj

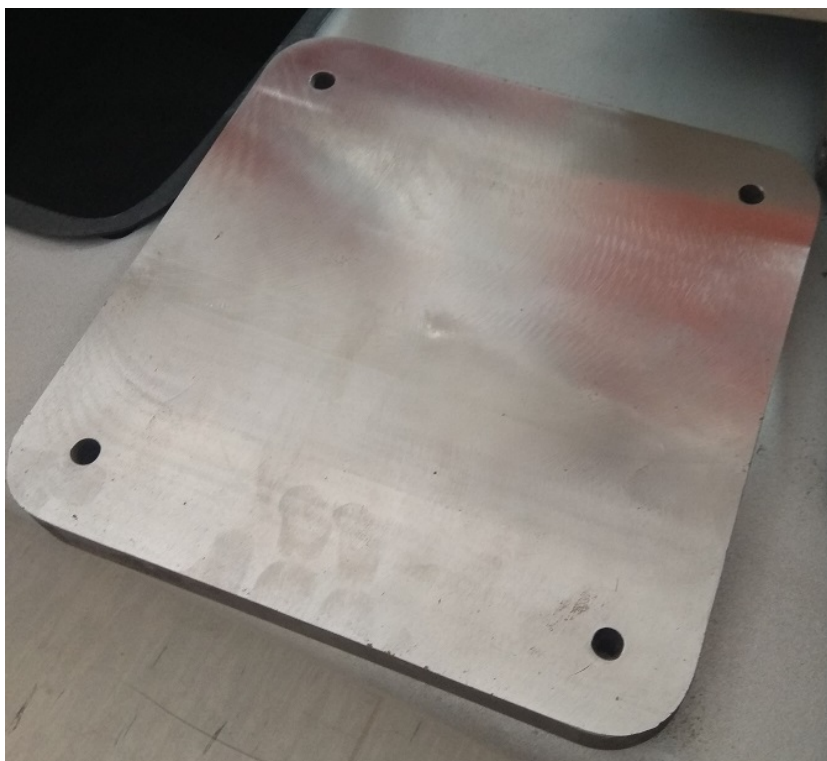
Samotná tiskárna je komplexní zařízení složené z několika částí:

- Tiskový modul
- Manipulační komora
- Procesní komora
- Kontrolní panel, PC a světelné signalizační zařízení
- Další (rozvody ochranného plynu, pneumatika pístů a ventilů, atd.)



### 6.3.1 Tiskový modul

Tiskový modul slouží k samotnému tisku výrobku. Lze jej jako celek přesunout mezi manipulační a procesní komorou. Skládá se z šachty s tiskovým pístem, šachty s podávacím pístem a nanašeče. V první šachtě je umístěn tiskový píst. Na ten se upevňuje tisková podložka, což je deska sloužící k tomu, aby se na ni přivařila první tiskutá vrstva. Fixace k tiskovému pístu je realizována čtyřmi šrouby.



Obrázek 10: Tisková podložka

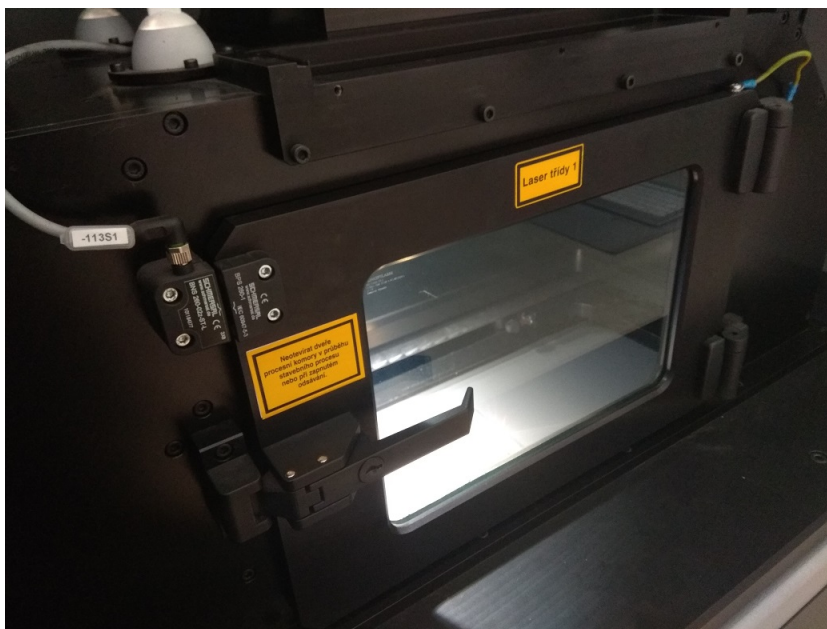
Po dokončení tisku se tisková podložka vyjme z tiskárny spolu s výtiskem. Tisková podložka se používá ze stejného materiálu, jaký je použit k tisku, aby první vrstva výrobku k podložce přilnula. Druhá šachta obsahuje podávací píst. Tato šachta slouží jako zásobník kovového prášku, ze kterého je materiál nanášen na tiskovou podložku (a již vytisklé vrstvy) nanašečem. Nanašeč je umístěn na pojezdu tak, aby byl schopen volně přejíždět nad šachtami. O aplikaci vrstev prášku se stará pryžová lamela, která se před tiskem upevní do nanašeče. [36]

### 6.3.2 Manipulační komora

Manipulační komora slouží k umístění tiskové podložky, očištění výtisku a jeho vyjmutí z tiskárny a k manipulaci s kovovým práškem. Nad manipulační komorou se nachází prostor pro kontejner na nového prášku. To se provádí z důvodu vysoké hmotnosti za asistence jeřábu. Pod manipulační komorou je také prostor pro kontejner pro odsypání použitého prášku po dokončení tisku. Pro účely manipulace s práškem v ochranné atmosféře je procesní komora vybavena integrovanými pryžovými rukavicemi, jejichž pomocí lze provádět operace i v zavřené manipulační komoře (např.: vsypání, udusání a vyjmutí prášku). Pro případy práce s reaktivními materiály, jako například titanem, je vybavena ESD náramkem zemním operátora. Tím je zabráněno možnému nebezpečí vybití statického náboje, což v případě práce s reaktivními materiály může mít vážné, život ohrožující následky z důvodu možného zápalu nebo výbuchu prášku. [36]

### 6.3.3 Procesní komora

Tento prostor slouží k samotnému tisku. Stejně jako manipulační komoru ji lze otevřít, avšak to je určeno pouze pro účely čištění. Ve stropu procesní komory se nachází fokusační čočka a osvětlovací žárovky. Dění v procesní komoře během tisku je možné sledovat oknem ve dvířkách komory vybaveným příslušným optickým IR filtrem. [36]



Obrázek 11: Procesní komora

### 6.3.4 Kontrolní panel, PC a světelné signalizační zařízení

K ovládání tiskárny a k nastavení tiskových parametrů se používá kontrolního panelu. Ten je umístěn na výkyvném ramenu. Skládá se z monitoru, myši, klávesnice a několika tlačítek. Nastavení procesních a tiskových parametrů se provádí přímo na kontrolním panelu. Model se přenáší do interního PC tiskárny skrz USB rozhraní. Kontrolní panel je zobrazovacím a ovládacím zařízením interního PC. Tiskárnu lze také připojit do počítačové sítě ethernet 100 MB/s skrze konektor RJ45. Tiskárna je na vrchní části tiskového stroje vybavena světelným signalizačním zařízením se čtyřmi světelnými signály. [36]

Signál	Význam
Červené blikající světlo	Tisk byl přerušen z důvodu chyby
Oranžové stálé světlo	Bylo započato plnění ochranným plynem
Zelené blikající světlo	Tisk byl dokončen
Zelené stálé světlo	Probíhá tisk

Tabulka 3: Světelná signalizace [36]



Obrázek 12: Kontrolní panel

## 7 Výrobní proces

Úspěšný a bezpečný tisk výrobku na tiskárně s technologií selektivního spékání kovových prášků vyžaduje pečlivou přípravu. Celý tiskový proces spočívá z několika kroků:

1. Tvorba digitálního 3D modelu,
2. mechanická příprava materiálu, tiskárny a jejích částí,
3. nastavení tiskových parametrů tiskárny,
4. tisk,
5. očištění výtisku od nespotřebovaného materiálu a podpor,
6. post-processing, nebo-li dodatečná úprava výtisku.

Vyjma posledního kroku jsou všechny ostatní kroky k uskutečnění výtisku nutné. Post-processing je v jistých případech potřebný, ne vždy však nezbytný.

### 7.1 Tvorba digitálního 3D modelu

V první fázi celého procesu je potřeba vytvořit digitální model výrobku. K tomu lze využít široké škály modelovacích programů. Pro účely této práce jsou použity programy DesignSpark Mechanical [37] a Materialise Magics [38]. První jmenovaný je použit pro tvorbu potřebných 3D modelů a druhý slouží k pro dokončení 3D modelů, vymodelování podpor a pro tvorbu výsledného tiskového souboru s jednotlivými vzájemně rozmístěnými modely.

Jednotlivé použité modely jsou trojího typu. Prvním je hranol o základně 11 x 11 mm a výšce 56 mm, druhým pak válec o průměru 15 mm a výšce 100 mm. Oba tyto tvary jsou předmětem diplomové práce Jana Dobrovolného. Technické výkresy kreslené Janem Dobrovolným a jeho tiskové zadání se nachází v přílohách. Další typ modelů jsou tenké vrstvy. Jedná se o destičky o rozměru 10 x 10 mm a výšce 2 vrstev a 4 vrstev, což odpovídá cca 90  $\mu\text{m}$  a 180  $\mu\text{m}$ . Z každé tloušťky se jedná o 4 ks destiček. Protože příprava tiskárny a následný tisk je časově velmi náročný, je zvolen dvojí způsob usazení modelů, aby se zvýšila šance úspěšného vytisknutí tenkých vrstev. Dvě z dvouvrstevých destiček a dvě z čtyřvrstevých destiček jsou umístěny svisle, další dvě dvojice pak jsou umístěny se sklonem 45° vůči podložce. Principem tvorby těchto destiček je zkouška, jak tenké objekty je možné vytisknout. Výsledný soubor určený k tisku sestává z 36 ks modelů, neboli 12 ks hranolů, 16 ks válců a 8 ks tenkých destiček. Jednotlivé modely je nutno umístit tak, aby se nacházely v prostoru dostatečně vzdáleném od ostatních kusů a zároveň tak, aby po tisku nebránily odmontování základové desky (viz. dřívější popis součástí tiskárny). Jednotlivé modely rovněž nemohou být umístěny přímo na podložce, neboť by se z ní nedaly citlivě sejmut a zcela jistě by tak došlo k jejich nevratnému poškození. Pro tento účel se používá perforovaných podpor pod každým modelem. Ty se, stejně jako model sám, vytvoří během tiskového procesu.

## 7.2 Příprava tiskového materiálu, tiskárny a jejích částí

Nejprve je potřeba připravit tiskovou podložku. Jedná se o kovovou desku se čtyřmi fixačními otvory. Deska musí být před započetím tisku čistá a zbavená lesklých ploch. Lesklé plochy působí zpětné odrazy laserového svazku, což může být nebezpečné pro vnitřní součásti tiskové komory. Navíc prášek dostatečně nepřilne k podložce, neboť energie absorbovaná podložkou je díky vysoké reflexivitě podložky příliš malá. Podložka se obrousí otryskáním abrazivem pod tlakem. Použité abrazivum je MS 3035 A firmy IEPCO, dodané výrobcem tiskárny. Otryskávání probíhá v tryskací kabině IEPCO PEENMATIC PM 620 S. Otryskáním se rovněž zarovnají malé nerovnosti povrchu tiskové podložky. V případě větších nerovností je nutné jejich mechanické odstranění, například bruskou. Tiskovým procesem, otryskáváním a přítomností okolních elektromagnetických polí se podložka časem magnetizuje. Po otryskání je tak potřeba podložku demagnetizovat. V případě, že by podložka byla zdrojem magnetického pole, nepříznivě by to ovlivňovalo kovová zrna na jejím povrchu, což je nežádoucí. Demagnetizace se provádí tahem zapnutého demagnetizačního přístroje po povrchu podložky. Je nutno dbát na to, aby se na podložce tahem demagnetizačního přístroje opětovně nevytvořily lesklé plochy.



Obrázek 13: Otryskávací kabiny

Poté, co je tisková podložka otryskaná a demagnetizovaná, je umístěna do tiskového modulu a fixována čtyřmi šrouby. Následně se připraví nanašeč prášku, do kterého se umístí pryžová lamela. Nanašecí lamela musí být bez poruch, vrypů, či chybějících částí. Nanašeč se spolu s lamelou po kontrole umístí do pojezdu tiskového modulu.

Pro tisk objektů je použit kovový prášek dodaný výrobcem tiskárny z materiálu CL 20ES, což je austenitická korozivzdorná ocel (ekvivalentní značení: 1.4404, X2CrNiMo17132, 316L, ČSN 17 349) o velikosti zrn  $45 \pm 10 \mu\text{m}$ . Materiál je možno použít buď nový nebo již použitý a řádně vyčištěný. [39, 40]

Složka	Obsah
[-]	[%]
Cr	16,5 – 18,5
Ni	10,0 – 13,0
Mo	2,0 – 2,5
Mn	0 – 2,0
Si	0 – 1,0
P	0 – 0,045
C	0 – 0,030
S	0 – 0,030

Tabulka 4: Složení oceli CL 20ES, obsah neželezných příměsí [39]

Během tiskového procesu se nespotřebovává všechn vkladný materiál. Nespotřebovaná část prášku je tak opětovně použitelná. Po tisku je však prášek nutno prosít a vyčistit jej tak od nežádoucích částic. Prosívání se provádí za pomoci zařízení dodaného výrobcem. Jedná se o prosévací stroj MR16S/4.3/KL/C firmy Vibrowest Italiana.

Za pomoci jeřábu je nádoba s práškem umístěna nad tiskárnu, kde se z této nádoby zavede prášek hadicí na podávací píst tiskového modulu. Píst je třeba předem zasunout směrem dolů. Poté je prášek ručně udusán lopatkou tak, aby v něm nebyly vzduchové mezery. To se provádí pomocí integrovaných pryžových rukavic. Poté se tiskový modul, tedy podávací píst, nanašeč a tisková podložka na vlastním pístu, odsune z manipulační komory do procesní komory. Následuje zaplnění procesní komory ochranným plynem. V případě austenitické korozivzdorné oceli je standartně používán dusík.

### 7.3 Nastavení tiskových parametrů tiskárny

Poté, co je tiskárna připravena k práci, je potřeba nastavit parametry tisku. Toto se provádí přímo na terminálu tiskárny. Pro každý model jsou tiskové parametry nastavovány zvlášť. Je však možno si vytvořit přednastavené profily a tak si práci zjednodušit.

Modely hranolů a válců jsou dodány se zadáním, že polovina válců spolu s polovinou hranolů má být vyrobena s výkonovým nastavením laseru na 200 W a druhé dvě poloviny s výkonovým nastavením 400 W. Tato definice však není tak prostá. Výkon laseru není to jediné, co je možné ovládat. Nastavitelné jsou i další parametry jako například vzdálenost ohniska od povrchu, či rychlost posuvu svazku po povrchu naneseného prášku, atd.



Navíc se používají jiné parametry pro kontury, výplně a podpory. Procesní tiskové parametry tiskárny jsou tedy nastaveny zvlášť pro jednu polovinu výtisků a zvlášť pro druhou polovinu výtisků. Použitá nastavení jsou nativní, dodaná výrobcem tiskového stroje M2 Cusing. Některé parametry jsou shodné pro program 200 W i 400 W. V obou případech je definována výška jedné vrstvy na 45  $\mu\text{m}$  a pro vypalování je použit vzor „Chess“, tedy šachovnice, s šířkou stopy výplně 150  $\mu\text{m}$ . Dále je nastaven posun ohniskové vzdálenosti -5 mm. Rozdílná profilová nastavení se nachází v tabulce níže.

	Podpory		Kontury		Výplň	
	Výkon	Rychlost	Výkon	Rychlost	Výkon	Rychlost
	[W]	[mm · s <sup>-1</sup> ]	[W]	[mm · s <sup>-1</sup> ]	[W]	[mm · s <sup>-1</sup> ]
Program 200 W	180	1200	200	1440	200	1200
Program 400 W	130	1000	200	1600	400	1800

Tabulka 5: Tabulka parametrů 200 W a 400 W programu

## 7.4 Tisk

Před samotným započítáním tisku se tisková podložka nahřeje laserovým svazkem. Poté je možné tisknout. Tiskový proces si tiskárna řídí sama. Tisk probíhá po vrstvách. Každá vrstva se tvoří následující sekvencí:

1. Píst s podložkou se posune dolů o tloušťku jedné vrstvy,
2. píst se zásobním práškem se posune nahoru,
3. nanašeč nanese na tiskovou podložku jednu vrstvu prášku a vrátí se zpět,
4. píst s podložkou se posune nahoru do roviny ohniska svazku,
5. laserový svazek speče naprogramované oblasti a píst se posune dolů z roviny ohniska.

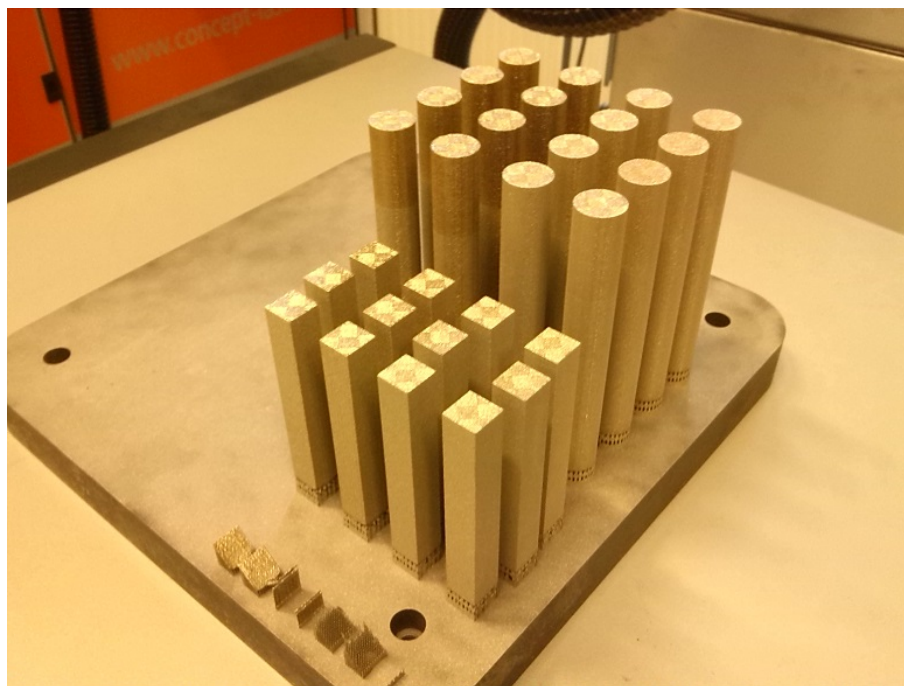
Tyto kroky se opakují tolikrát, aby bylo dosaženo potřebného počtu vrstev. V delším časovém horizontu se tedy píst s tiskovou podložkou zasouvá s výrobkem směrem dolů. Výtisk 36 ks modelů trval přibližně 1 den a 52 minut. Nebereme-li v potaz malý objem tenkých vrstev a zanedbáme-li objem podpor, vytvořil se tak celkový objem výrobků přibližně 364  $\text{cm}^3$ .

## 7.5 Očištění výtisku od nespotřebovaného materiálu a podpor

Po dokončení tisku je nutné odstranit výtisk od tiskové podložky a zbytku nespotřebovaného, avšak výtisk objímajícího prášku. Nejprve je potřeba odsunout výtisk z procesní do manipulační komory. Následně je potřeba umístit kontejner na nespotřebovaný prášek pod manipulační komoru. Za postupného vysouvání pístu s podložkou a odstraňování zbylého prášku do násypky v manipulační komoře vedoucí do kontejneru, je model postupně zbavován okolního nespotřebovaného prášku. Toto celé je prováděno ručně za

pomocí integrovaných rukavic. Poté, co je všechen prášek odsypán do kontejneru, je tento kontejner jeřábem vyjmut z prostoru pod manipulační komorou. Následně se otevře manipulační komora a odmontuje se tisková podložka i s výrobkem.

Po vyjmutí desky s výrobky je nutné je sejmut z podložky. V případě hranolů, válců a čtyřvrstvých tenkých destiček je to reálné bez významných potíží. Odstranění je možné rukou, případně za pomoci kleští.



Obrázek 14: Výsledek tisku po očištění od přebytečného prášku

## 7.6 Post-processing

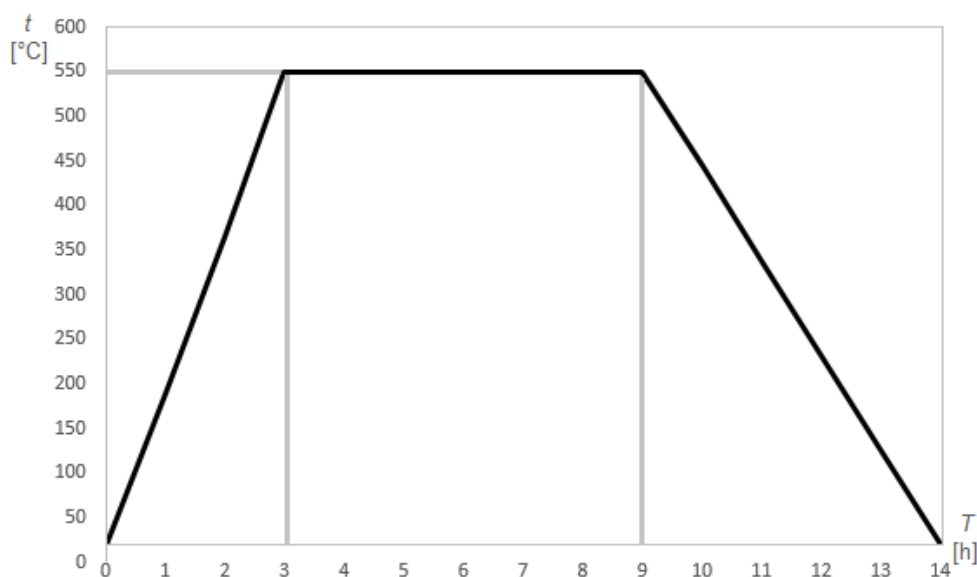
Po sejmutí výrobků je potřeba z nich odstranit zbytky podpor. Toto se provádí ručně, pomocí abrazivních nástrojů, například brusky. Zatímco velké výrobky, jako jsou hranoly a válce je možné sejmut z podložky bez nutnosti následného odstraňování podpor (odlomení probíhá na hraně výrobků), tenké čtyřvrstvé destičky je nutno ručně za pomoci kleští a brusky mechanicky podpor zbavit.





Obrázek 15: Tenké destičky

Polovina hranolů a polovina válců je podrobena procesu žíhání (tak aby polovina z žíhaných válců a hranolů byla vyrobena 200 W programem a druhá polovina 400 W programem), druhé dvě poloviny hranolů a válců a tenké vrstvy žíhány nejsou. Tepelná úprava žíháním byla provedena v peci Nabertherm N 41/H s příkonem 15 kW a maximální teplotou 1280 °C. Proces žíhání probíhá dle teplotní křivky níže.



Obrázek 16: Teplotní křivka žíhání v peci, závislost provozní teploty na čase v hodinách

Obsah pece se tedy po dobu tří hodin nahřívá na teplotu 550 °C, následně při této teplotě setrvává celkem šest hodin, načež následuje pomalé chlazení v délce pěti hodin.

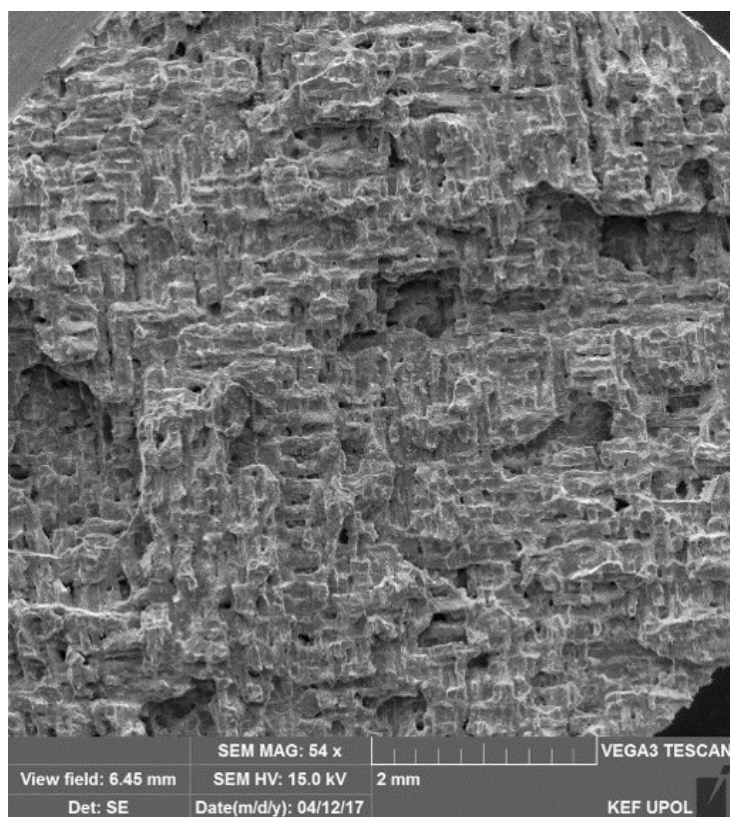
Po dokončení všech kroků je vhodné materiál otryskat a zbavit jej tak různých povrchových artefaktů a částečně vyhladit povrch. To je žádoucí nejen po stránce funkční, kdy z povrchu odstraníme například malá připečená zrna, tak hlavně po stránce vzhledové, neboť otryskání výrobku učiní jeho vzhled méně drsný.

## 8 Vyhodnocení

Hodnocení výsledných výrobků bylo provedeno především dvěma způsoby. Prvním je SEM mikroskopie v místě lomu. Druhým je Mössbauerova spektroskopie s cílem potvrdit, nebo vyloučit přítomnost neaustenitických struktur (například martenzitu) či oxidických příměsí (například hematitu). Dále budou uvedeny výsledky mechanických zkoušek provedených v rámci diplomové práce Jana Dobrovolného. Nakonec budou zhodnoceny tenké vrstvy vyrobené na tiskárně Concept Laser M2 Cusing za účelem vyhodnocení minimální tisknutelné tloušťky touto tiskárnou.

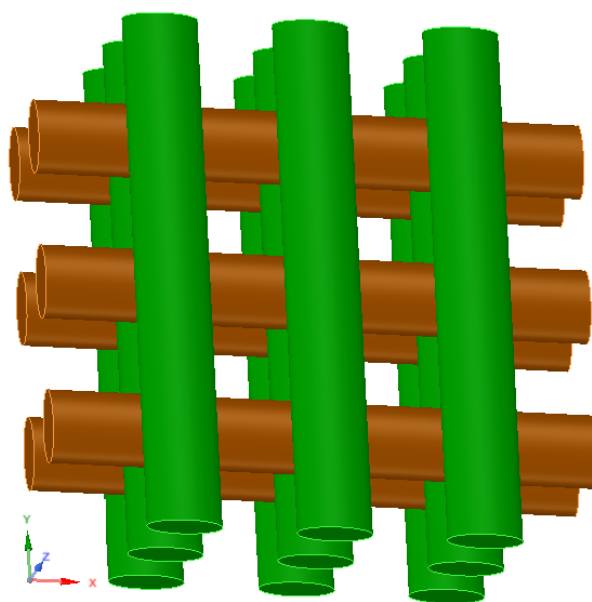
### 8.1 SEM mikroskopie

Toto hodnocení se opírá o data získaná skenovací elektronovou mikroskopií sledováním lomových ploch. Ty vznikly důsledkem mechanických zkoušek, přesněji řečeno zkoušek rázem v ohybu, v rámci diplomové práce Jana Dobrovolného. Pro skenovací elektronovou mikroskopii byl vybrán jeden vzorek z skupiny žíhaných, obou výkonových nastavení, tedy 200 W a 400 W, s odpovídajícími doprovodnými parametry, viz. dříve.



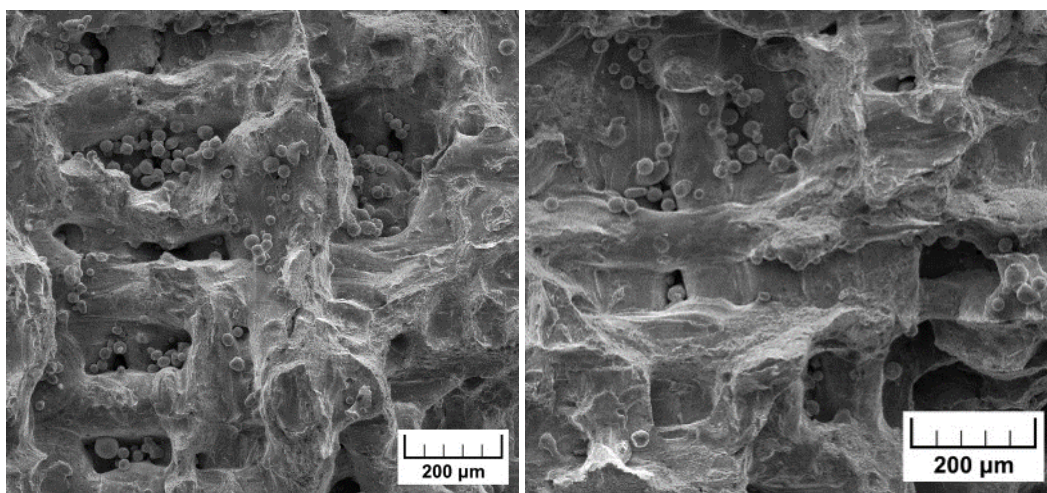
Obrázek 17: Plocha lomu 200 W výtisku

Při pohledu na snímek lomové plochy výtisku vyrobeném 200 W programem si můžeme všimnout zřetelných, a na sebe vzájemně kolmých linií. Tyto linie jsou stopy svarových lázní způsobené procházejícím laserovým svazkem. Je tedy vidět, že vnitřní struktura výtisku je značně porézní. Dá se tedy předpokládat, že takto vyrobený kus bude mít oproti mateřskému materiálu menší mechanickou odolnost. Lze rovněž vidět, že kavity vznikají především na místech mezi jednotlivými liniemi. V kavitách se tak nachází nespеченý prášek.



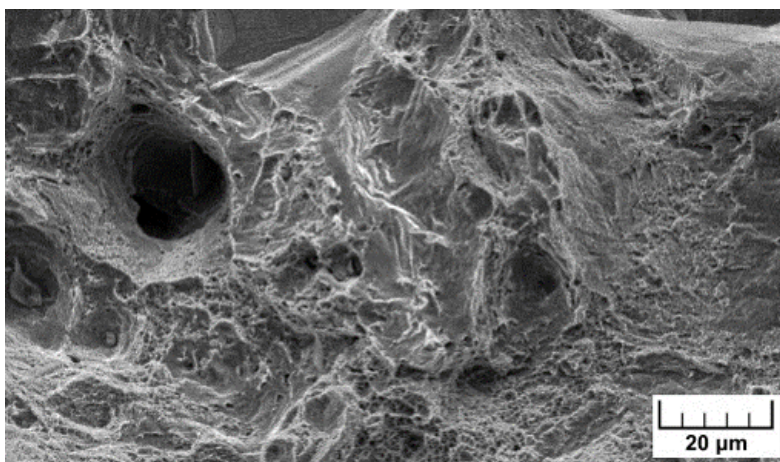
Obrázek 18: Vizualizace křížících se linií s kavitami

Obrázek výše vizualizuje problém s kavitami, kdy mezi vzájemně se křížícími se liniemi průchodu laserového svazku vznikají oblasti, kde může dojít ke vzniku kavit bez přetaveného materiálu.



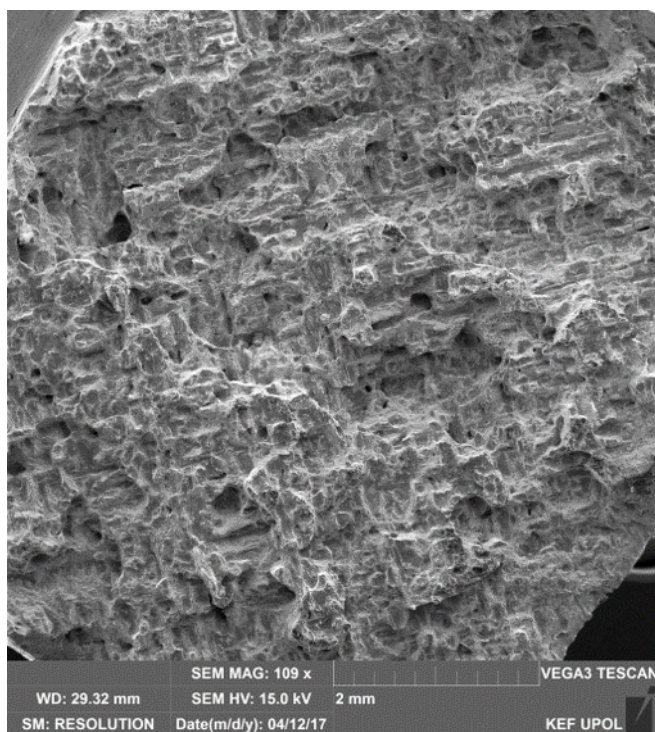
Obrázek 19: Detailní snímky 200 W výtisku s viditelnými nespечenými zrny





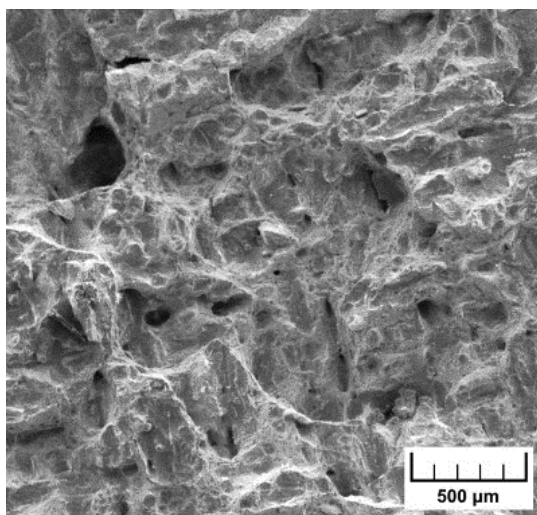
Obrázek 20: Detailní snímek 200 W vzorku se zřetelnou kavitou

Na detailních snímcích 200 W výtisků pořízených skenovací elektronovou mikroskopií je jasné vidět problém se strukturou vytisknutého výrobku. Velký výskyt kavit mezi svařeným materiálem ukazuje na možný problém s mechanickou odolností takového výrobku.

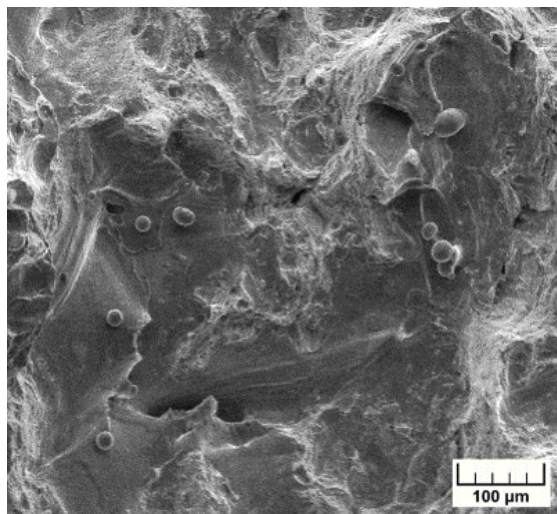


Obrázek 21: Plocha lomu 400 W výtisku

Výtisk programem 400 W vypadá obdobně jako v případě 200 W, nicméně jsou vzájemně kolmé linie průchodu laserového svazku méně rozeznatelné. Kavity se však vyskytují také. Lze tedy tvrdit, že i 400 W výtisk může mít nižší mechanickou odolnost než mateřský materiál.

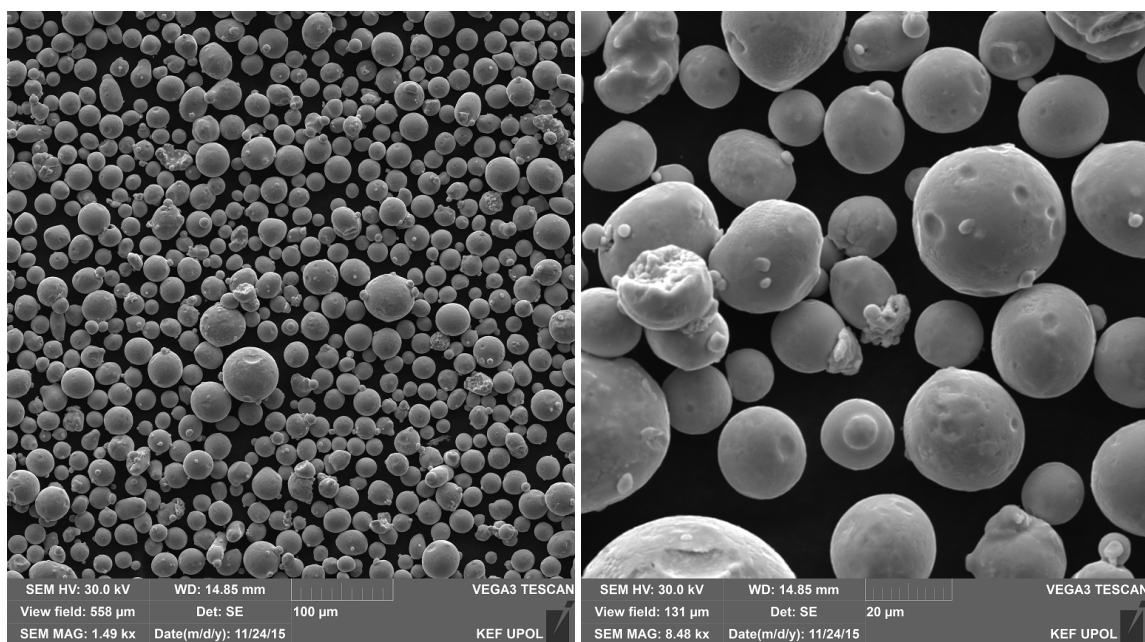


Obrázek 22: Detailní snímky 400 W výtisku s kavitami



Obrázek 23: Detailní snímky 400 W výtisku s viditelnými nespečenými zrny

Stejně jako u 200 W výtisku zde můžeme vidět nespečená zrna prášku. Že se jedná o nespečená zrna se dá určit odhadem z měřítka jednotlivých snímků. Jak již bylo uvedeno dříve, výrobce uvádí velikost zrn  $45 \pm 10 \mu\text{m}$ . Některá zrna na předchozích snímcích mohou být mírně větší z důvodu jejich vzájemného spečení, kdy už ovšem nedošlo k jejich přitavení k okolnímu materiálu. Pro představu velikosti zrn prášku slouží následující SEM snímky.



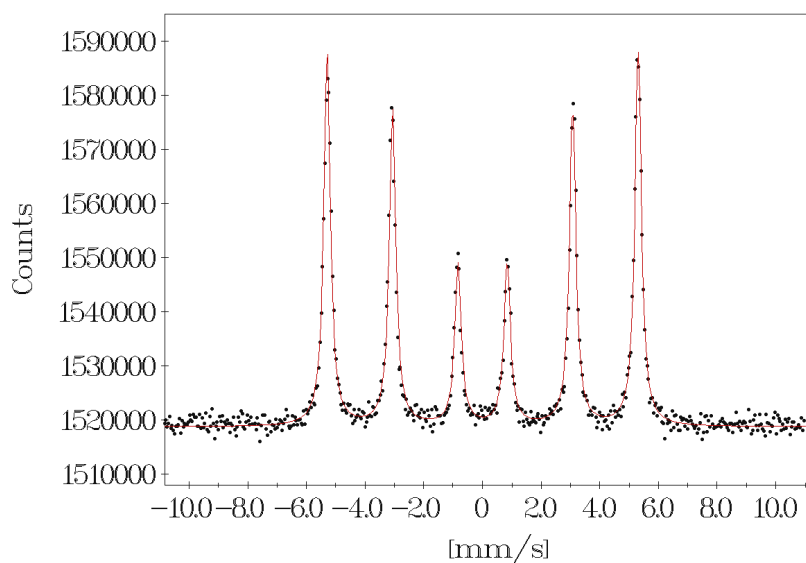
Obrázek 24: Detailní snímky tiskového materiálu CL 20ES

Ze snímků lomových ploch 200 W a 400 W výtisků jdou rozeznat jednotlivé linie průchodů laserového svazku. Rovněž jsou znatelné kavity v mezisvarových prostorech. Také jsou na snímcích vidět zrna velikostně odpovídající vstupnímu práškovému materiálu CL 20ES, což svědčí o tom, že ne všechny se v procesu 3D tisku přetavily. Dále jsou znatelné rozdíly mezi výtiskem tisknutým programem 200 W a výtiskem s programem 400 W. U programu 200 W jsou svarové linie daleko výraznější a lépe rozeznatelné, než u 400 W. Rovněž výskyt kavit je v porovnání s 400 W programem vyšší. Oba tyto poznatky vedou k závěru, že výtisky vyrobené programem 400 W budou mít lepší mechanické parametry.

## 8.2 Mössbauerova spektroskopie

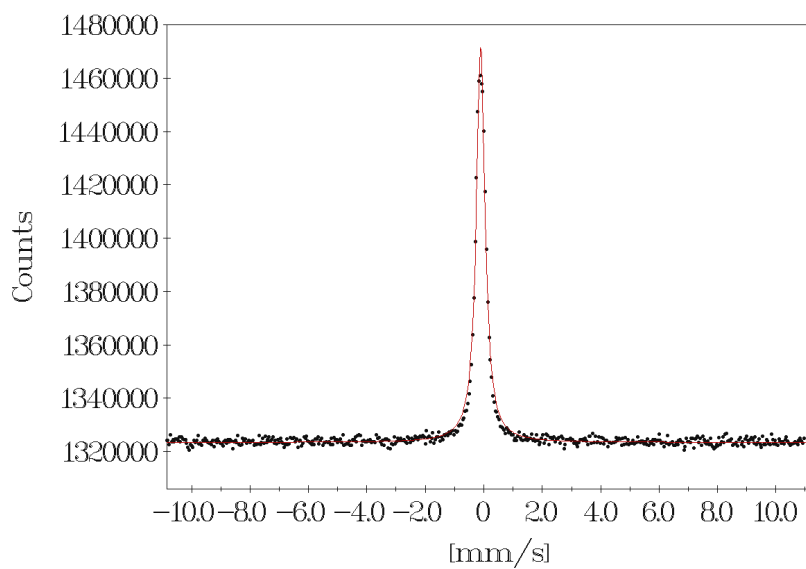
Mössbauerova spektroskopie byla provedena na několika vzorcích tak, že byly měřeny jak vzorky tvořené programy 200 W i 400 W, tak žíhané i nežíhané. K měření mikrostrukturního složení vzorků byl použit režim rozptylové geometrie Mössbauerovy spektroskopie a zvolena hloubka inspekce přibližně 50 µm. Měření bylo prováděno na povrchu a na ploše řezu těles.

Před měřením zmíněných výtisků bylo provedeno měření Mössbauerova spektra povrchu  $\alpha$  železa s jasně zřetelným sextetem typickým pro tento materiál. Toto spektrum slouží k porovnání.



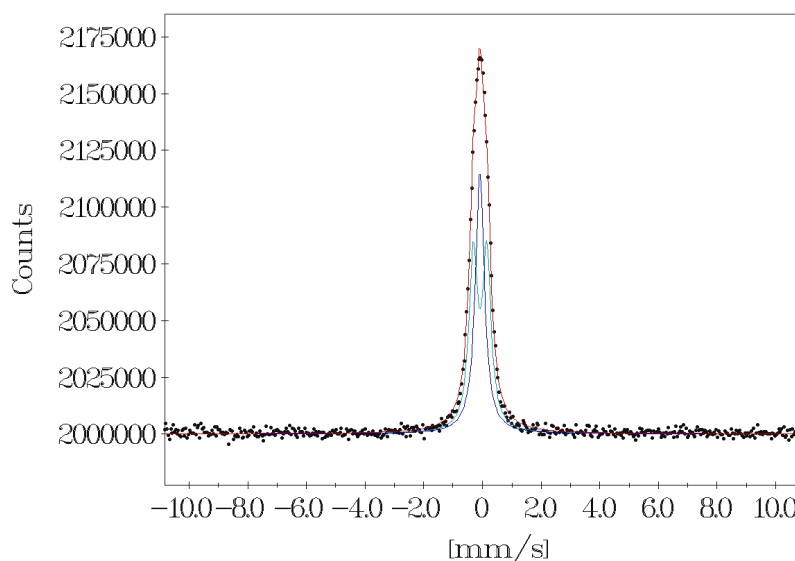
Obrázek 25: Mössbauerovo spektrum povrchu  $\alpha$  železa

Následně byl změřen povrch výtisků z materiálu CL 20ES.



Obrázek 26: Mössbauerovo spektrum povrchu výtisků z materiálu CL 20ES

Měření všech vzorků podalo stejný výsledek a tedy jeden peak ve spektru. Díky tomu lze tvrdit, že v austenitické struktuře povrchu výtisku nejsou žádné další neaustenitické příměsi.



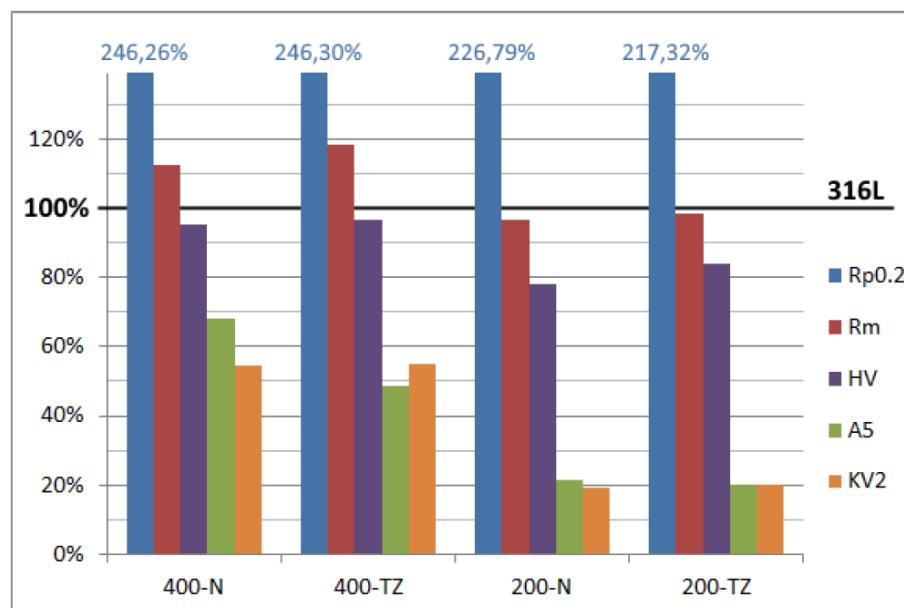
Obrázek 27: Mössbauerovo spektrum řezu výtisky CL 20ES

V Mössbauerově spektru řezu výtisky z materiálu CL 20ES nacházíme rozšířený peak, který byl u všech vzorků stejný. Tento peak byl matematicky rozložen na dvě komponenty. Zatímco první komponent odpovídá austenitické oceli podobně jako tomu je ve spektru povrchu výtisků, druhý komponent se nepodařilo určit a tato příměs je nejspíš důsledkem provádění mechanických řezů a jimi vyvolaných strukturních změn v materiálu.

### 8.3 Mechanické zkoušky

Výtisky, které jsou předmětem této bakalářské práce, sloužily mimo jiné pro účely mechanických zkoušek prováděných Janem Dobrovolným z Fakulty Strojní Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Tyto mechanické zkoušky zahrnovaly zkoušku tahem, rázem v ohybu a vickersovu zkoušku tvrdosti. Pro zkoušku tahem byla určena válcová tělesa. Tato zkouška probíhala v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1 za teploty 20 °C. Zkouška rázem v ohybu byla vykonána s vytisknutými hranoly metodou Charpy s přihlédnutím k normě ČSN EN ISO 148-1. Zkouška probíhala za teploty 20 °C. Měření tvrdosti bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 6507. Byla měřena tvrdost dle vickerse HV30, což odpovídá zatížení 294,2 N. Souhrnné výsledky jsou v následujícím obrázku. [41]





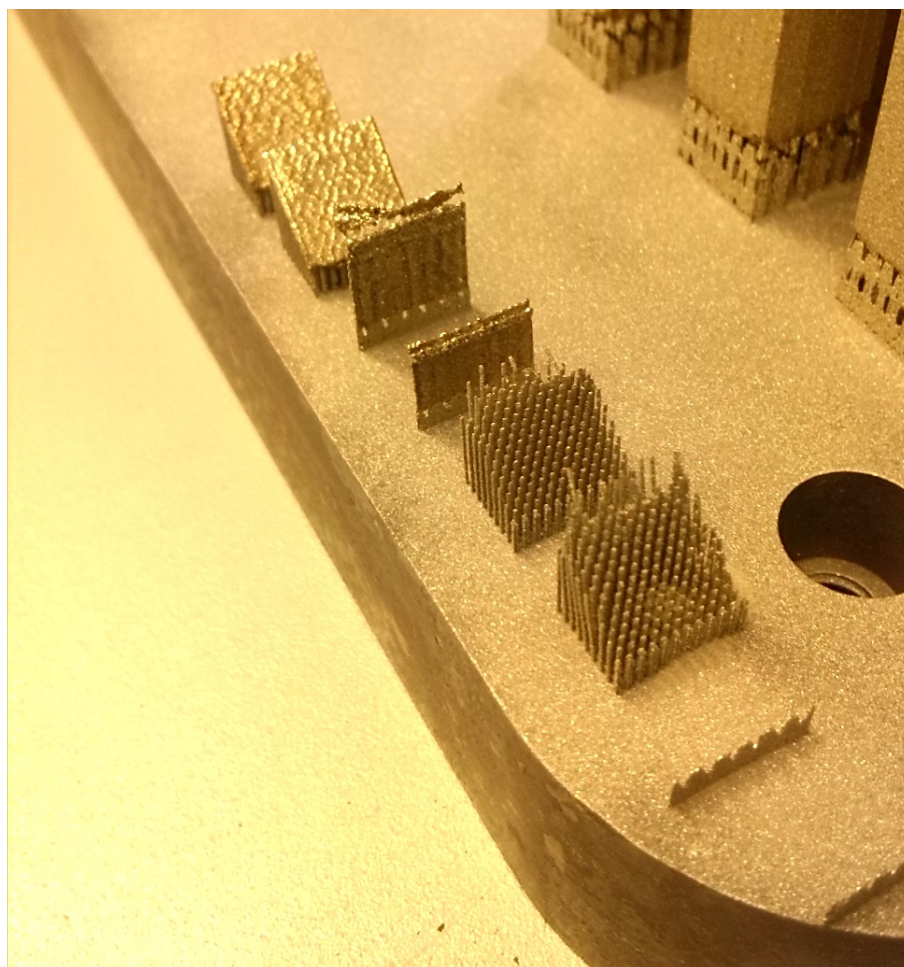
Obrázek 28: Výsledky mechanických zkoušek 3D výtisků z oceli CL 20ES [41]

Graf popisuje procentuální dosažení jednotlivých parametrů, které jsou charakteristické pro danou ocel CL 20ES (316L), kdy Rp0.2 je smluvní mez kluzu, Rm je mez pevnosti, HV je tvrdost dle Vickerse, A5 je tažnost a KV2 je nárazová práce zkoušky rázem v ohybu, 400-N jsou tepelně neopracované výtisky tvořené programem 400 W, 400-TZ jsou žíhané výtisky tvořené programem 400 W a 200-N a 200-TZ jsou obdobně výtisky tvořené 200 W programem. Z naměřených dat vyplývá, že smluvní mez kluzu i mez pevnosti nabývají hodnot, které jsou podobné mateřskému materiálu, či i o mnoho lepší. Tvrdost dle Vickerse vytisknutých výrobků nedosahuje hodnot mateřského materiálu. Stejně tak hodnoty mateřského materiálu nedosahují výtisky pokud jde o tažnost a nárazovou práci. Lze také zaznamenat, že výtisky vyrobené 400 W programem mají všechny tyto mechanické parametry na lepší úrovni, než výtisky tvořené programem 200 W. Jak je rovněž zřejmé, žíhání má na výsledné mechanické parametry jen malý vliv v porovnání s využitím jiného výkonového programu tiskárny. Z makroskopického hlediska lze tedy tvrdit, že vytvořené výtisky jsou podobně pevné jako mateřský materiál, ale jsou o mnoho křehčí. Nízké hodnoty nárazové práce a tažnosti je možné vysvětlit velkým množstvím kavit nalezených v lomových plochách SEM mikroskopii.

#### 8.4 Tenké destičky

Tisk tenkých dvouvrstvých a čtyřvrstvých destiček proběhl úspěšně jen z části. Dvouvrstvé tenké destičky bohužel nebyly vytisknuty dostatečně kvalitní a bytelné natolik, aby vydržely mechanické odstranění zbytků prášku v manipulační komoře. Lze tedy tvrdit, že tisk objektu o tloušťce 90  $\mu\text{m}$ , za použití tiskového stroje Concept Laser M2 Cusing s daným nastavením výkonových parametrů a svislou nebo o 45° skloněnou orientací na tiskové podložce, je nereálný. O poznání lépe dopadly čtyřvrstvé destičky o tloušťce 180  $\mu\text{m}$ . Ty

se podařilo úspěšně realizovat v obou orientacích a to za použití obou výkonových nastavení. Jediným problémem je sejmutí takových destiček z podpůrných struktur, které je fixují k tiskové podložce. Tyto tenké destičky musely být sundány i s částí podpor, které musely být následně z destiček odbroušeny.



Obrázek 29: Tenké destičky na tiskové podložce

Na fotografii výše vidíme v popředí zbytky podpůrných struktur dvouvrstvých destiček, které samotné již chybí. Dále lze vidět dvě čtyřvrstvé destičky se svislou orientací a dvě s orientací  $45^\circ$  k tiskové podložce. U svislých si lze všimnout delaminace vrchních vrstev, k čemuž došlo během tiskového procesu. Důvodem je nepochybně malá tloušťka zmíněných destiček, která činí  $180\text{ }\mu\text{m}$ , tedy necelé dvě desetiny milimetru.

## Závěr

Práce se zabývala 3D tiskem, aneb aditivní výrobou z kovů, přesněji řečeno jednou z možných metod takové výroby s názvem LaserCusing, což je obdoba metody Selective Laser Melting. V práci je stručně rozebrána historie 3D tisku z kovových materiálů, popsány vybrané metody 3D tisku z kovů a situace s možností aditivní výroby z kovových materiálů v České republice. V bakalářské práci byly dále stručně popsány použité metody hodnocení kvality výtisků, stručný popis laseru a elektronové skenovací mikroskopie. Dále se práce zabývala popisem tiskového stroje, 3D tiskárny LaserConcept M2 Cusing využívající právě metodu aditivní výroby zvanou LaserCusing. V práci byl dále podrobně rozepsán celý proces výroby výtisků na tomto tiskovém stroji, tedy jaké kroky bylo nutno vykonat za účelem úspěšného vytvoření požadovaných výrobků. Následně byl proveden rozbor a zhodnocení kvalit vyrobených výtisků 3D tiskárnou M2 Cusing.

Hodnocení probíhalo především za pomoci Mössbauerovy spektroskopie a skenovací elektronové mikroskopie. Obecně řečeno výtisky realizované v rámci této práce trpěly závažnými nedostatky. Při zkoumání vytisknutého materiálu si lze v jeho lomu všimnout jednotlivých a vzájemně se překrývajících svarových linií. Rovněž byly zjištěny kavity v mezisvarových prostorech, ve kterých byla nalezena nepřítavená zrna původního prášku - tedy materiálu, ze kterého se výtisky selektivním laserovým tavením vyrábí. Bylo rovněž zjištěno, že výtisky tvořené pomocí 200 W programu těmito nedostatky trpí více, než výtisky tvořené pomocí 400 W programu. Předpoklad, že výtisky s takovým výskytem kavit a nespečeného materiálu budou mít horší mechanické parametry byl potvrzen mechanickými zkouškami provedenými Janem Dobrovolným z Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava v rámci jeho diplomové práce. Analýza složení povrchu výtisků pomocí Mössbauerovy spektroskopie dopadla příznivě. Bylo zjištěno, že austenitická struktura oceli CL 20ES zůstala v rámci povrchu výtisků zachována. Při analýze Mössbauerovou spektroskopií v řezu byl zjištěn výskyt cizí příměsi. O jakou příměs se jedná se nepodařilo zjistit, avšak lze předpokládat, že pochází ze změn vyvolaných řezáním výtisků za účelem dosažení možnosti měření v řezu. V rámci tenkých destiček bylo zjištěno, že dvouvrstvé destičky o tloušťce 90  $\mu\text{m}$  použitím tiskového stroje M2 Cusing s danými parametry a použitým materiálem není možno vytvořit. Ze 4 destiček se ani jedna nevytiskla, či neustála odstraňování přebytečného prášku. Tisk čtyřvrstevných destiček byl o poznání úspěšnější, kdy se zcela úspěšně podařilo vytisknout čtyřvrstvé destičky se sklonem 45° vzhledem k podložce. Svisle orientované čtyřvrstvé destičky se vytiskly z části úspěšně, kdy u obou z nich nastala delaminace vrstev ve vrchní části. Z toho lze vyvodit, že je možné realizovat i takto tenké struktury, nese to ovšem svá rizika, především možnost nepřilnutí nové vrstvy k předešlé a tedy vzniknutí otvoru v takto tisknuté rovině, či povrchu.

Řešením problému s výskytem kavit, tedy patrně nedokonalému tavení jednotlivých vrstev může být úprava parametrů tiskového procesu. V základu se jedná o vzájemnou úpravu parametrů výkonu laserového svazku, rychlosti jeho posuvu po objektu a polohu ohniska laserového svazku. Předáním více energie materiálu by se tak tyto nedostatky

daly nepochybně snížit. Musí se však brát v potaz možný výskyt problémů spojených s dodáním většího množství tepla, například teplotní roztažnost a jí indukovaná vnitřní pnutí.

Aditivní technologie si postupně získávají svou oprávněnou pozici v mnoha odvětvích lidské činnosti. Zatím se v průmyslu na masivní nasazení 3D tisku z kovů teprve čeká a nelze s jistotou tvrdit, že nutně nastane. Technologie aditivní výroby totiž mají své limity. Jedním z takových limitů je nutnost asistence lidské síly při práci s tiskovým strojem, zaváděním materiálu a následná úprava vytisknutých výrobků. Pro masivní nasazení aditivních technologií v průmyslu bude nezbytné automatizovat tyto procesy a snížit roli lidské síly v celé úloze 3D tisku. Zajímavou budoucnost budou jistě mít přístupy hybridní výroby. Touto cestou se vydal například v práci zmíněný Kovošvit MAS, kdy jejich stroj je schopen zároveň obrábět i navařovat nové vrstvy materiálu. Automatizace takového procesu je výrazně jednodušší. Přes určitá negativa aditivní výroby však zatím stále převažují její výhody, především tedy možnost vytvořit výrobky, které je tradičním způsobem obtížné, nebo dokonce nemožné vyrobit. Důležitou úlohu rovněž hrají při výrobě prototypů.

## Reference

- [1] HORVATH, Joan C. Mastering 3D printing. Berkeley, California: Apress, 2014. Technology in action series.
- [2] The Free Beginner's Guide: History of 3D Printing. 3D Printing Industry [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#02-history>
- [3] Josef Průša [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/>
- [4] Prusa Research [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/>
- [5] About. RepRap [online]. 2018 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/About>
- [6] BARNATT, Christopher. 3D printing. 2nd edition. ExplainingTheFuture.com, 2014. ISBN 978-1-5028-7979-0.
- [7] Building a lunar base with 3D printing. ESA: Space engineering & technology [online]. 2013 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/Building\\_a\\_lunar\\_base\\_with\\_3D\\_printing](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing)
- [8] Selective Laser Sintering, SLS. <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls> [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/>
- [9] An Introduction to Designing for Metal 3D Printing. Solidworks Blog [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2017/06/introduction-designing-metal-3d-printing.html>
- [10] What is LaserCUSING?. Concept Laser [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: [https://www.concept-laser.de/contact\\_usa/faq-items/what-is-lasercusing/](https://www.concept-laser.de/contact_usa/faq-items/what-is-lasercusing/)
- [11] What are the advantages of the FDM technology?. Dddrop [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.dddrop.com/fdm-technology/>
- [12] MIG nebo MAG? Jaký je rozdíl?. Svarinfo [online]. 2008 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2007101501>
- [13] ARTICULATED ROBOT / 6-AXIS / PALLETIZING / SPOT WELDING: R-2000IB/250F. Direct Industry [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://en.industryarena.com/fanuc/products/articulated-robots--1463/m-10ia-8l--13786>
- [14] WAAM [online]. 2018 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://waammat.com/>

- [15] WP-197 Additive Layer Manufacturing (ALM). Huntingdon Fusion Techniques HFT [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.huntingdonfusion.com/index.php/fr/technical-support/white-papers-40017/2757-wp-197-additive-layer-manufacturing>
- [16] High Level Processes: Directed Energy Deposition: Directed Energy Deposition. Bits into Atoms, 3D Printing & Design [online]. 2017 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.bintoa.com/directed-energy-deposition/>
- [17] 3D Printing Research: Types of 3D printers. Pratt Paramedics [online]. 2017 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://prattparamedics.com/2017/09/18/3d-printing-research-6/>
- [18] UPrint 3D [online]. Olomouc, 2017 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.uprint3d.cz/>
- [19] Department of Reverse Engineering and Additive Technologies: Brno University of Technology [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://3dlaboratory.cz/>
- [20] Laboratoř aditivní výroby [online]. 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk-kovu.cz/>
- [21] Metal 3D [online]. 2015 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://metal3d.cz/>
- [22] WELDPRINT 5AX. MAS [online]. 2015 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.masmachinetools.com/weldprint-5ax>
- [23] První technologie 3D tisku z kovu vyvinutá v České republice. Fakulta strojní ČVUT v Praze [online]. 2015 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/aktuality/377-212/prvni-technologie-3d-tisku-z-kovu-vyvinuta-v-ceske-republice/>
- [24] Makers Lab [online]. Praha, 2016 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://makerslab.cz/>
- [25] 3D tisk z kovu na zakázku. Materialpro 3D [online]. 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk/>
- [26] DMLS (Direct Metal Laser Sintering) - 3D tisk kovu. Innomia [online]. 2012 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/sluzby/kovove-prototypy>
- [27] Trider [online]. Brno, 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://trider.cz/>
- [28] 3D tisk kovů / Prototyping. Lascam [online]. 2017 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/produkty/3d-tisk-kovu-prototyping/>
- [29] KAV [online]. Ostrava [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.3dklastr.cz/>

- [30] BERTOLOTTI, Mario. The history of the laser. Philadelphia: Institute of Physics Pub., c2005. ISBN 0750309113.
- [31] Laser : Fundamentals: Some important dates. Optique pour l'ingénieur [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI\\_ang\\_M01\\_C01/co/Contenu\\_02.html](http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M01_C01/co/Contenu_02.html)
- [32] Environmental Health and Safety: Laser Types and Classification. Oregon State University [online]. Oregon, 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://ehs.oregonstate.edu/laser/training/laser-types-and-classification>
- [33] HECHT, Jeff. The laser guidebook. 2nd ed. Blue Ridge Summit, Pa.: Tab Books, 1992, xiv, 498 s. Optical and electro-optical engineering series. ISBN 0-07-135967-2
- [34] VŮJTEK, Milan, Roman KUBÍNEK a Miroslav MAŠLÁŇ. Nanoskopie. V Olomouci: Univerzita Palackého, 2012. ISBN 978-80-244-3102-4.
- [35] PROCHÁZKA, Vít. Neobvyklá Mössbauerova spektroskopie. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-4011-8.
- [36] CONCEPT LASER. M2 Cusing Original Operating Manual. Verze 1.0.11. Concept Laser, 2012, 107 s.
- [37] Mechanical software. DesignSpark [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.rs-online.com/designspark/mechanical-software>
- [38] Materialise Magics: Product information. Materialise [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.materialise.com/en/software/magics/product-information>
- [39] CL 20ES Stainless steel. Concept Laser, 2011.
- [40] KRATINA, Jakub. Převodní tabulka značení ocelí: Převodní tabulka značení ocelí v různých normách - ČSN, EN, ISO, W.Nr., AISI. E-konstruktor [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/prevodni-tabulka-znacen-oceli>
- [41] DOBROVOLNÝ, J. Studium mikrostruktury a mechanických vlastností ocelových vzorků zhotovených 3D tiskem: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2017, 100 s.

## Seznam obrázků

1	Metoda SLS [8] . . . . .	11
2	Ukázka nutnosti použití podpor v závislosti na úhlu [9] . . . . .	11
3	Metoda FDM [11] . . . . .	13
4	Průmyslový robot - rameno [13] . . . . .	14
5	Výtisk provedený metodou WAAM [15] . . . . .	14
6	Metoda DED [16] . . . . .	15
7	3D tisk metodou LOM [17] . . . . .	16
8	3D tiskárna M2 Cusing [36] . . . . .	23
9	Laserová kabina . . . . .	24
10	Tisková podložka . . . . .	25
11	Procesní komora . . . . .	26
12	Kontrolní panel . . . . .	27
13	Otryskávací kabiny . . . . .	29
14	Výsledek tisku po očištění od přebytečného prášku . . . . .	32
15	Tenké destičky . . . . .	33
16	Teplotní křivka žhání v peci, závislost provozní teploty na čase v hodinách . . . . .	33
17	Plocha lomu 200 W výtisku . . . . .	34
18	Vizualizace křížících se linií s kavitami . . . . .	35
19	Detailní snímky 200 W výtisku s viditelnými nespečenými zrny . . . . .	35
20	Detailní snímek 200 W vzorku se zřetelnou kavitou . . . . .	36
21	Plocha lomu 400 W výtisku . . . . .	36
22	Detailní snímky 400 W výtisku s kavitami . . . . .	37
23	Detailní snímky 400 W výtisku s viditelnými nespečenými zrny . . . . .	37
24	Detailní snímky tiskového materiálu CL 20ES . . . . .	38
25	Mössbauerovo spektrum povrchu $\alpha$ železa . . . . .	39
26	Mössbauerovo spektrum povrchu výtisků z materiálu CL 20ES . . . . .	39
27	Mössbauerovo spektrum řezu výtisky CL 20ES . . . . .	40
28	Výsledky mechanických zkoušek 3D výtisků z oceli CL 20ES [41] . . . . .	41
29	Tenké destičky na tiskové podložce . . . . .	42



## Seznam tabulek

1	Materiály podporované tiskárnou M2 Cusing [36] . . . . .	22
2	Parametry laseru [36] . . . . .	23
3	Světelná signalizace [36] . . . . .	27
4	Složení oceli CL 20ES, obsah neželezných příměsí [39] . . . . .	30
5	Tabulka parametrů 200 W a 400 W programu . . . . .	31

# Přílohy

## Zadání vzorků pro tisk

Materiál: Austenitická korozivzdorná ocel

Označení:

- Dle ČSN 17 349
- Dle EN X2CrNiMo17-13-2
- Dle W. Nr. 1.4404
- Dle AISI 316L

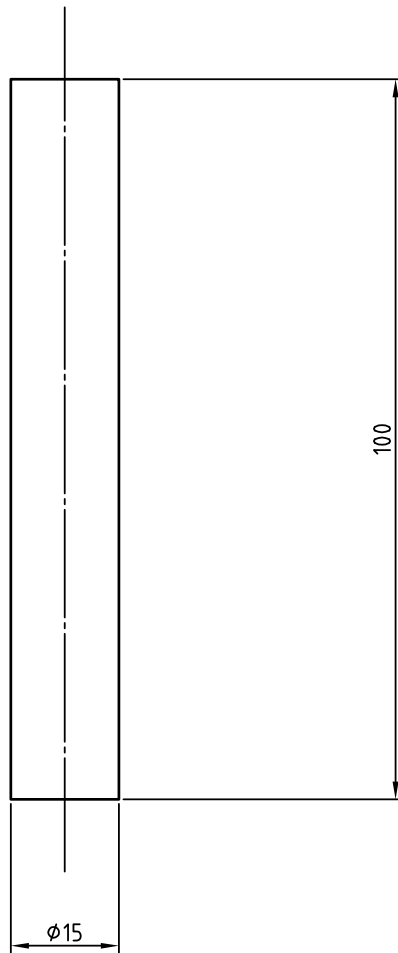
Vytisknuty budou celkem 4 sady vzorků, 2 sady při výkonu laseru 400 W a 2 sady při výkonu 200 W. Vždy jedna ze dvou sad vyrobených při stejném výkonu bude dále upravena tepelným zpracováním. Podrobný rozpis vzorků je uveden v tabulce níže.

sada vzorků	Výkon laseru	Tepelné zpracovní	název vzorku	rozměry	množství
[-]	[W]	[-]	[-]	[mm]	[ks]
400-TZ	400	s TZ	Vzorkový hranol	11 x 11 x 56	3
			Vzorkový válec	Ø15 x 100	4
400-n		bez TZ	Vzorkový hranol	11 x 11 x 56	3
			Vzorkový válec	Ø15 x 100	4
200-TZ	200	s TZ	Vzorkový hranol	11 x 11 x 56	3
			Vzorkový válec	Ø15 x 100	4
200-n		bez TZ	Vzorkový hranol	11 x 11 x 56	3
			Vzorkový válec	Ø15 x 100	4
			celkem	364,055 cm <sup>3</sup>	28 ks

Všechny vzorky budou tisknuty „na výšku“ tedy délkou vzorku kolmo na základnu.

Rozměry vzorků vychází z požadavků norem a z možností zkušebních a měřicích zařízení. Rozměry vzorků jsou navýšeny o přídavky na obrábění do finálního stavu.

**Rozměry vzorků nejsou navýšeny o případné technologické přídavky na prořez při separaci vzorků od základní desky, případně jiné. V případě potřeby proto prosím potřebný rozměr navyšte, případně mne kontaktujte. Zadané rozměry vzorků jsou minimální rozměry, kterých musí hotové vzorky dosahovat.**



A

B

C

D

E

F

				Materiál	1.4404	Tř. odpadu	Úprava hran	Měřítko	1:1
				Polotovary			Přesnost		
				Čistá hmotnost	Hrubá hmotnost		Promítání	Tolerování	ISO 8015
Index	Popis změny	Dne	Podpisy						
Oddělení	Technický referent	Druh dokumentu	Status dokumentu	Soubor	Č. sestavy	Č. seznamu položek			
345	Kreslil Dobrovolný	Název, doplňující název			Č. dokumentu	VŠB-DOB-01			
VŠB-TUO	Přezkoušel	Vzorkový válec			Změna	Datum vydání	Jazyk	Formát	List
						16.11.2016	cs	A4	1/1

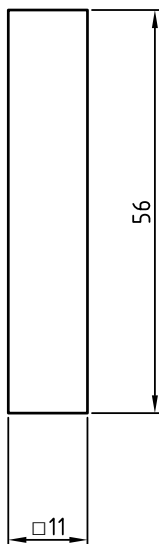
A

B

C

D

E



				Materiál	1.4404	Tř. odpadu	Úprava hran	Měřítko	1:1
				Polotovár			Přesnost		
				Čistá hmotnost	Hrubá hmotnost		Promítání	Tolerování	ISO 8015
Index	Popis změny	Dne	Podpisy						
Oddělení	Technický referent	Druh dokumentu	Status dokumentu	Soubor	Č. sestavy	Č. seznamu položek			
345									
VŠB-TUO	Kreslil Dobrovolný	Název, doplňující název	Vzorkový hranol			Č. dokumentu	VŠB-DOB-02		
	Přezkoušel				Změna	Datum vydání	Jazyk	Formát	List
						16.11.2016	cs	A4	1/1

F