

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Univerzitní strojírenství
Studijní zaměření: Katedra technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití metody spékání kovových prášků laserem pro konstrukci řezných nástrojů

Autor: **Pavel HANZL**

Vedoucí práce: **Ing. Ivana ČESÁKOVÁ**

Akademický rok 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel HANZL**
Osobní číslo: **S10B0058P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Název tématu: **Využití metody spékání kovových prášků laserem pro konstrukci řezných nástrojů**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Využití pro praxi
4. Závěr

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

AUTORSKÁ PRÁVA

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy se souhlasem autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Mé poděkování patří slečně Ing. Ivaně Češákové za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnovala. Odborným konzultantem byl Ing. Miroslav Zetek, Ph.D., kterému děkuji za kvalifikované rady. Dále bych rád poděkovat za spolupráci při získávání údajů Ing. Davidovi Aišmanovi a Ing. Jiřímu Vyšatovi, Ph.D. za odbornou pomoc.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Hanzl	Jméno Pavel	
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie – technologie obrábění		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Česáková	Jméno Ivana	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Využití metody spékání kovových prášků laserem pro konstrukci řezných nástrojů		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	49	TEXTOVÁ ČÁST	32	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Aditivní výroba je metoda, kterou lze vyrobit kovové díly spékáním kovového prášku. V současné době je tato metoda výroby rozšířena v různých odvětví průmyslu a přináší některé výhody ale i omezení. Proto tato bakalářská práce zkoumá možnosti využití této metody při výrobě soustružnického nože. Tento aditivně postavený nůž byl podroben mechanickým testům a výsledky byly porovnány s naměřenými hodnotami soustružnického nože, který byl vyrobený tvářením. Oba nože měly shodnou geometrii. Aby výsledky práce měly pokud možno co nejvyšší vypovídající hodnotu, bylo zapotřebí shrnout, jaké parametry ovlivňují výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti vytisknutého dílu.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Rapid prototyping, Additive Manufacturing, 3D tisk, SLS, SLM, řezné nástroje</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Hanzl	Name Pavel		
FIELD OF STUDY	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Česáková	Name Ivana		
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Application of the method of laser sintering of metal powders for the construction of cutting tools			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2014
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	49	TEXT PART	32	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	Additive manufacturing method is a way of producing metal parts sintering the metal powder. Currently, this method is extended in a variety of manufacturing industries and brings some benefits but also constraints. Therefore, this thesis explores the possibility of using this method in the production of a lathe cutting tool. This additively built tool has been tested and the results were compared with measured values of a lathe cutting tool, which was produced by molding. Both tools have the same geometry. It was necessary to summarize which parameters influence the resulting mechanical and physical properties of the printed product so that the results of the job if possible had the highest indicating value.
KEY WORDS	Rapid prototyping, Additive Manufacturing, 3D printing, SLS, SLM, Cutting tools

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Rozbor současného stavu	12
2.1	Popis metod spékání kovů tavícím paprskem.....	12
2.2	Práce s daty v systému.....	15
2.3	Možnosti využití materiálů pro konstrukci řezných nástrojů	16
2.4	Možnosti konstrukce řezných nástrojů	17
2.5	Mechanicko-fyzikální vlastnosti.....	18
2.5.1	Vliv výkonu paprsku (laser power) a rychlosti skenování (scanning speed) na strukturu materiálu	20
2.5.2	Balling	22
2.5.3	Vliv tloušťky vrstvy na mechanické vlastnosti	25
2.5.4	Vliv velikosti překrytí (overlap rate).....	26
2.5.5	Vliv orientace tisku (building direction) zkušební vzorku na mechanické vlastnosti.....	27
2.5.6	Vliv úhlu skenování (Hatch angle).....	29
2.5.7	Výsledná mikrostruktura zrn	30
2.5.8	Struktury a velikost zrn výrobního prášku	31
2.5.9	Ovlivnění fyzikálních vlastností (přesnosti) výrobku výrobou AM	32
2.5.10	Vliv situování výrobku při výrobě	33
2.5.11	Reprodukovatelnost.....	34
2.5.12	Mechanické vlastnosti vysokopevnostní ocele	35
3	Využití pro praxi	40
3.1	Geometrie řezného nástroje	40
3.2	Tvrдость řezného materiálu	41
3.3	Mikrografie vzorků.....	42
4	Závěr.....	43
5	Seznam použité literatury	44

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma selektivního laserového spékání [28].....	13
Obrázek 2 - Ukázka zubního můstku před postprocessingem s podpěrnými prvky (vlevo) a po leštění (vpravo) [29].....	14
Obrázek 3 - Schéma softwarové přípravy pro AM [6].....	15
Obrázek 4 - EOS CobaltChrome- MP1, Vlevo: 10x zvětšený. Střed: 1000x SEM Vpravo: 5000x SEM [7].....	18
Obrázek 5 - Vpravo: Závislost struktury na procesních parametrech; Vlevo: Postup skenování prášku laserem [16].....	20
Obrázek 6 - Struktury spečených materiálů [16]	21
Obrázek 7 - Schéma prvního druhu balling jevu, vznik hrubých kulových aglomerátů, způsobené nízkou tvorbou taveniny. [17]	22
Obrázek 8 - Schéma druhého druhu balling jevu, který je charakterizován malými kuličkami na spečeném povrchu. [17].....	23
Obrázek 9 - SEM charakterizace laserových spečených stop při různých skenovacích rychlostech: (a) $v = 0,05 \text{ m/s}$, (b) $v = 0,07 \text{ m/s}$, (d) $v = 0,10 \text{ m/s}$, (c) je místní zvětšení (b), (e) a (f) místní zvětšení (d). $P = 400 \text{ W}$ a $d = 0,25 \text{ mm}$ jsou konstantní [17].....	24
Obrázek 10 - Geometrie tahového vzorku [19].....	25
Obrázek 11 - Mikrografie SLM vzorků s hodnotou překrytí 0 % (a),(b) a 50 % (c),(d) [19]..	26
Obrázek 12 - SLM vzorky postavené pod směrovými úhly: 0° , 45° a 90° [19]	27
Obrázek 13 - Tahové vlastnosti SLM vzorků při různých stavebních směrech [19].....	27
Obrázek 14 - Chyba válcovitosti u AM. [3].....	28
Obrázek 15 - Znázornění natočení řádků v sousedních rovinách. [19].....	29
Obrázek 16 - Schéma intervalů při různých úhlech skenování. [19]	29
Obrázek 17 – Pole: a) Sloupcovitý růst zrn; b) Orientovaná textura [25]	30
Obrázek 18 - Idealizovaná velikost zrnitosti prášku [25].....	31
Obrázek 19 - Ukázka ideálního měděného prášku se dvěma velikostmi hrubosti [25]	31
Obrázek 20 - (a) CAD model válce; (b) STL model válce [3].....	32
Obrázek 21 - Porovnání mechanických vlastností EOS PH1 [22].....	33
Obrázek 22 - Mechanické vlastnosti vzorků postavených z PH1 na různých pracovištích EOSINT M 270 [22]	34
Obrázek 23 - a) Tvrdost vzorků o různých tloušťkách vrstev a rychlosti skenování; b) Relativní hustota vzorků různých rychlostí skenování a tloušťek vrstev [12].....	35
Obrázek 24 - Mikrotvrdost vzorků různých rychlostí skenování a tloušťek [12].....	36
Obrázek 25 - Mikrografie vzorků nástrojové ocele 18Ni-300: a) Horní pohled průřezu vzorku; b) Pohle z boku na vzorek (bokorys); c) Jemná dendritická struktura v důsledku rychlého tuhnutí [12].....	37

Obrázek 26 - Mikrotvrdost vzorků se stejnými výrobními parametry a různou dobou tepelného stárnutí [12].....	38
Obrázek 27- Pohled: napravo vytisknutý nůž a nalevo tvářený nůž	40
Obrázek 28 - Zvětšený pohled na nože; napravo vytisknutý nůž, nalevo tvářený nůž	41
Obrázek 29 - Mikrografie vzorku před tepelném zpracování	42
Obrázek 30 - Mikrografie po tepelném zpracování	42

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Chemické složení MS1 (18Ni-300) a H13 (W.Nr. 1.2344) [12][13][14].....	17
Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti SLM vzorků různých tloušťek vrstvy [19]	25
Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti SLM vzorků různých velikostí překrytí [19]	26
Tabulka 4 - Porovnání horizontálně a svisle vystavených vzorků. [22]	28
Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti SLM vzorků v závislosti na úhlu skenování. [19]	30
Tabulka 6 - Mechanické vlastnosti nástrojové ocele 300 [12].....	39
Tabulka 7 - Tvrdost před a po tepelném zpracování	41

Seznam příloh

Příloha č.1: Technický výkres soustružnického nože

Příloha č.2: Souhrn mechanických vlastností EOS MaragingSteel

Seznam symbolů a zkratek

RP – Rapid prototyping

AM – Additive Manufacturing

SLS – Selective Laser Sintering

SLM – Selective Laser Melting

LENS – Laser Engineered Net Shaping

EBM – Electron Beam Melting

DMLS – Direct Metal Laser Sintering

CAD – Computer aided design

STL – Standard Tessellation Language nebo Stereolithography

SW – Software

VBD – Vyměnitelná břitová destička

SEM – Scanning electron microscope

ANSI – American National Standards Institute

EDX – Energy Dispersive X-ray spectroscopy

1 Úvod

V poměrně blízké minulosti bylo možné vyrábět kovové a jiné díly například obráběním, tvářením nebo sléváním. Avšak technologický pokrok otevírá další, nové možnosti jako je výroba dílů technologií Rapid Prototyping, jež odstartovala revoluci v rychlé výrobě dílů ze široké nabídky materiálů. Výhody metod RP se uplatnily především k rychlé a nákladově přijatelné výrobě prototypů přímo z elektronických dat. Hlavním rozdílem oproti konvenčním metodám výroby jako je například obrábění, kde se materiál odebírá z polotovaru formou třísky, je, že metoda RP materiál neodebírá, ale naopak ho postupně vrství, tedy materiál přidává. Jak je z názvu patrné, byla tato technologie prvotně určena k rychlé výrobě prototypů. Jelikož se působnost takových technologií dále rozšiřuje a v současnosti jsou používány pro výrobu dílů, jejichž charakter není prototypový, byla mezinárodní komisí přijata nová terminologie pro aditivní výrobu dílů, jež se nyní označuje Additive Manufacturing (AM).

Protože se v AM skrývá velký potenciál, zabývá se mnoho výrobců a institutů vývojem a vylepšováním této výrobní technologie. A tak není divu, že je mnoho firem, které nabízejí svoje ucelené výrobní systémy, jež bojují o pozici na trhu a snaží se získat své zákazníky. Tyto výrobní systémy, které staví aditivně díly spékáním kovového prášku, mají pracovní proces založený na metodě Selective Laser Sintering (SLS), jež výběrovým spékáním prášku aditivně staví díly. Ovšem přesnější termín pro popis aditivní výroby z kovového prášku je Selective Laser Melting (SLM), protože se při procesu výroby prášek nespéká, ale taví. [2] Existují však i jiné metody, které pro výrobu dílů nepoužívají kovové prášky. Příkladem je technologie Ultrasonic Consolidation process od Solidica, která vytváří díl z kovových listů, které jsou k sobě spečeny ultrazvukem. Tyto metody nejsou ale předmětem zájmu tohoto bakalářského projektu a dále se o nich neuvažuje. [1]

Není vyloučeno, že AM v budoucnosti ve větší míře nahradí klasické metody výroby, proto se jejich problematice věnuje i tato bakalářská práce. Svou pozornost zaměřuje na výrobní technologie, které vytváří kovové díly spékáním kovového prášku laserem nebo elektronovým paprskem, a přibližuje možnosti uplatnění této moderní výroby pro konstrukci rezných nástrojů. K tomuto cíli se dopracuje postupným analyzováním současného stavu, kde se zhodnotí a vyberou možné kovové materiály pro samotné rezné nástroje, seznámí čtenáře se základním principem aditivního spékání a přípravou elektronických dat pro výrobu. Zároveň se uvede, jací činitelé formují výsledné mechanicko-fyzikální vlastnosti spečeného výtisku. Také budou zhodnoceny výsledky z podílení se na výzkumu. Rámec náplně výzkumu je, zda může soustružnický nůž vyrobený 3D tiskem obstát v porovnání s nástrojem (nožem), jež byl vyroben klasickou metodou a zda jsou v současné době na trhu takové materiály, které by mechanickými vlastnostmi dosahovaly stejných nebo i lepších výsledků při srovnání s materiály používanými v současné době při výrobě monolitických soustružnických nožů konvenčními metodami výroby.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Popis metod spékání kovů tavícím paprskem

Na trhu se objevují stále nové firmy, které nabízejí svoje výrobní technologie po boku s již zaběhlými výrobci, jako jsou Arcam, EOS, 3DSystems a Laser Engineered Net Shaping (LENS). První tři výrobci vyvinuli technologie s označením Electron Beam Melting (EBM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) a Direct Metal Selective Laser Melting (SLM). Tyto technologie výroby jsou typickým představitelem Additive Manufacturing a umožňují rychlou výrobu 3D prvku z kovového prášku automaticky a bez potřeby náradí s minimální produkcí odpadu. Samotný cyklus výroby těchto technologií, lze rozepsat do jednotlivých kroků, které jsou zobecněny a platí pro široké spektrum AM zařízení od různých výrobců, jelikož jejich princip sestavování je založen na SLS metodě, jak již bylo zmíněno v úvodu, a vývoj této metody zavedl osvědčené postupy a standardy. Jednotlivé kroky si nyní uvedme.

Krok 1: CAD

Všechny části AM, musejí začít od softwarového modelu, který plně popisuje geometrii. To je možno udělat za použití profesionálních CAD softwarů, ve kterých se model navrhne, nebo lze použít reverzní inženýrství (např. skenování laserem), které definuje vnější geometrii na základě skenu hmotného modelu, který je třeba v odlišném měřítku od toho plánovaného. [1]

Krok 2: Převod na STL

Téměř každé AM zařízení akceptuje vstupní data ve formátu STL (Stereolithography), který se stal v podstatě standardem, a téměř každý CAD (Computer Aided Design) systém umí takový formát vygenerovat. Tento formát souboru popisuje vnější uzavřené plochy původního CAD modelu nepravidelnou trojúhelníkovou sítí a takto připravený model tvoří základ pro výpočet řezů jednotlivých vrstev. [1], [3]

Krok 3: Přenos na AM zařízení a manipulace s STL souborem

STL soubor popisující model musí být přenesen na AM zařízení. Na zařízení je potom možné ovlivňovat některé základní atributy souboru tak, že se nastavuje velikost, pozice a směr výstavby. Popřípadě je možné ověřit, jestli je STL model v pořádku. [1]

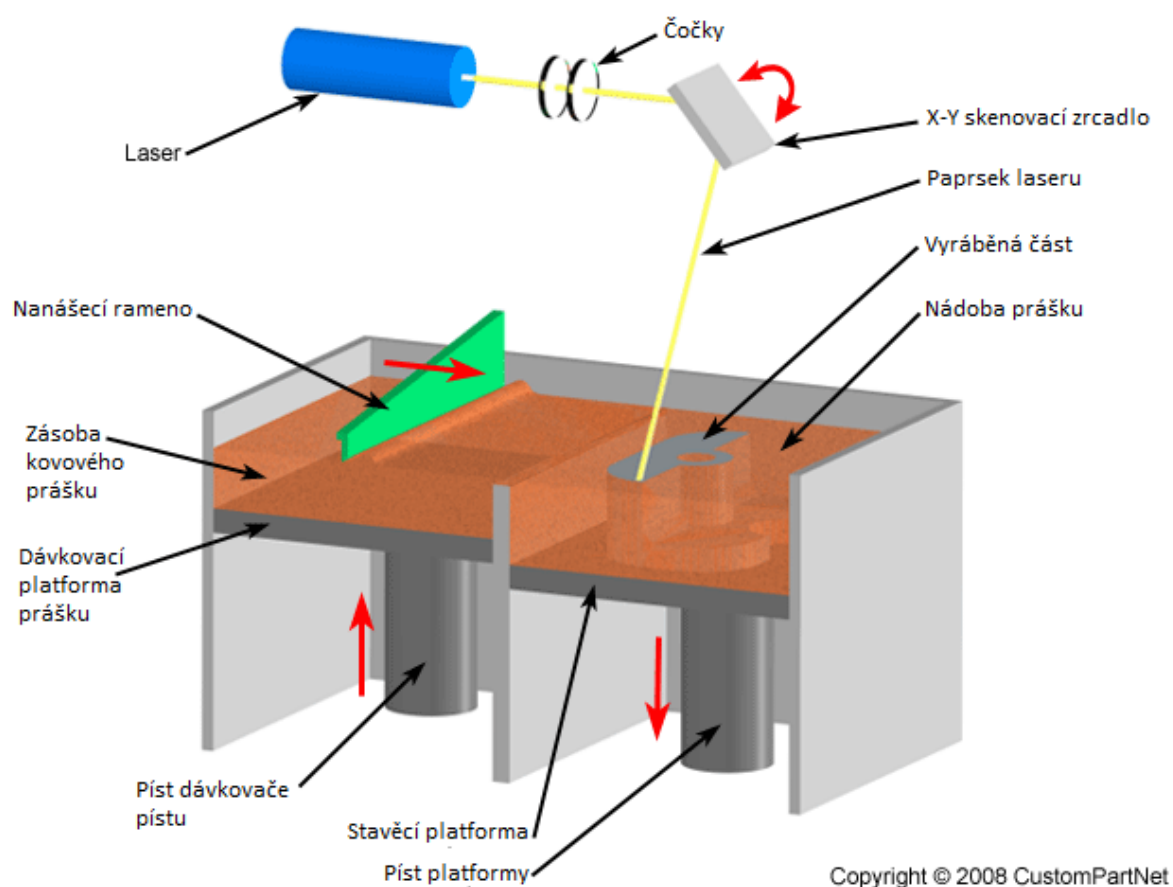
Krok 4: Nastavení zařízení

Zařízení AM musí být správně nastaveno před procesem výstavby¹. Toto nastavení se vztahuje k procesním parametrům, jako je materiálové omezení, výkon spékajícího paprsku, tloušťka vrstvy, časování, atd. [1]

¹ Termín „výstavba“ je zde použit jako překlad z cizojazyčné literatury ze slova „build“, „building“. Myslí se tím postupné stavění dílu z jednotlivých vrstev aditivní výrobou.

Krok 5: Výstavba

Samotný základní princip výroby je nanesení tenké vrstvy kovového prášku (obvykle mezi 20 μm až 100 μm) na stavěcí platformu². Nanesení se může provádět nanášecím ramenem (viz obr. 1). Tento prášek je poté vystaven energetickému paprsku, který jej speče do tvaru průřezu výrobku, který byl vygenerován z příčných řezů CAD modelu vždy pro konkrétní vrstvu. Zbylý kovový prášek zůstává nespečen. Dalším krokem je posunutí platformy o přírůstek hloubky dolů a je nanášena nová tenká vrstva prášku. Vrstva je znovu vystavena paprsku a spečena v místech průřezu výrobku. Tento postup se opakuje tak, že každá následná spečená vrstva se přitavuje během procesu k předchozí vrstvě. Takto aditivně postavené kovové těleso po spečení obklopuje neexponovaný kovový prášek. Ten se recykluje a použije na budoucí tisk. Na obrázku 1 jsou schematicky znázorněny jednotlivé hlavní části AM zařízení, které pracuje na principu SLS/ SLM. [4], [5]



Obrázek 1 - Schéma selektivního laserového spékání [28]

Tento proces výstavby součásti bývá automatizovaný a stroj může do značné míry pracovat bez dozoru. Ovšem některé první fáze výroby jsou poloautomatické a mohou vyžadovat značnou míru ručního řízení, interakce a rozhodování. Po zbytek času výroby přebírá řídicí počítač AM zařízení plnou kontrolu nad procesem výstavby, dokud není

² Základní horizontální deska, na které probíhá proces výstavby součásti. Je obdobou pracovního stolu obráběcího stroje.

výstavba dílu zcela dokončena, nebo není-li zásobník s výrobním práškem prázdný. V každém případě přístroj upozorní uživatele, aby přijal příslušná opatření.

Krok 6: Vynětí

Jakmile AM zařízení dokončí výstavbu, součást se odebere z pracovní komory. To může vyžadovat interakci se zařízením, které například zpřístupní obsluze pracovní komoru poté, co se systém AM přesvědčí, že v komoře je dostatečně nízká teplota nebo že všechny části zařízení v komoře jsou v klidu a nekonají žádný pohyb. [1]

Krok 7: Postprocessing

Po vyjmutí ze stroje, mohou díly vyžadovat množství dodatečných úprav, než budou připraveny k použití. Díly mohou mít například podpěrné prvky, které je nutné odstranit a případně zabrousit. Na obr. 2 je vpravo vidět podpěrná konstrukce před postprocessingem a vlevo již vyleštěný díl bez podpěr připravený na vsazení umělých zubů, jelikož je na obrázku vyobrazen zubní můstek. Povrch výrobku může také vyžadovat abrazivní úpravu, jako je proces leštění. Jedná se tedy především o manuální výkony, které s prospěchem využívají elektrická a jiná zpravidla ruční zařízení. Postprocessing tak představuje další čas, o který se zvětší celková doba výroby součásti a vyžaduje zručnou a pečlivou manipulaci. [1]



Obrázek 2 - Ukázka zubního můstku před postprocessingem s podpěrnými prvky (vlevo) a po leštění (vpravo) [29]

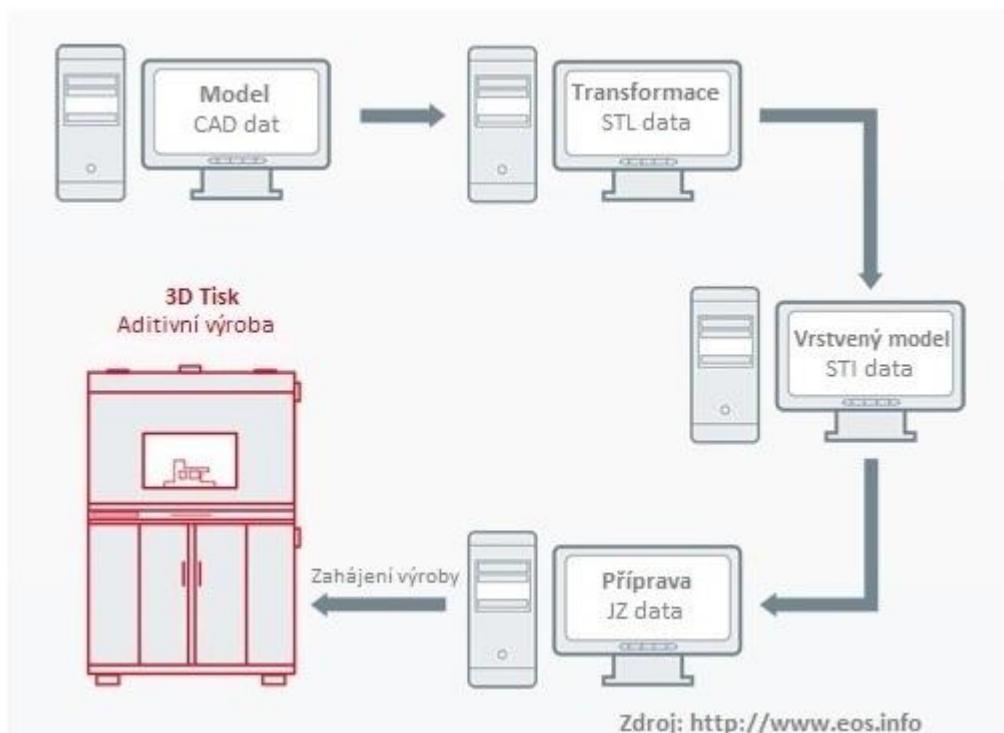
Krok 8: Aplikace

Části mohou být nyní připraveny k použití. Mohou si však také vyžadovat další zpracování předtím, než budou přijatelné pro použití. Například mohou díly vyžadovat lakování, aby se dosáhlo požadované povrchové textury, nebo mohou být požadovány tepelné úpravy atd. [1]

2.2 Práce s daty v systému

Jak již bylo výše uvedeno, vstupem 3D tisku jsou elektronická data vycházející z CAD modelu, tudíž předpokladem pro správně postavený kovový díl aditivním laserovým spékáním je korektní příprava a řízení CAD dat. Proto firmy zabývající se výrobou a vývojem 3D tiskáren věnují pozornost i softwarovým nástrojům pro přípravu dat a svým zákazníkům poskytují ucelené softwarové řešení pro všechny procesní kroky k výrobě dílu. Pro názornou ukázkou je vybráno uživatelsky přívětivé řešení od firmy EOS, které poskytuje rychlou přípravu a kvalitu tisku, což je nutné k zajištění ekonomičnosti a efektivnosti výroby.

Balíček zmíněných SW nástrojů poskytuje několik funkcí. Prostřednictvím nástroje Magics RP se řídí poloha a orientace dílu. Přeměnu CAD modelu do vrstvého formátu pro Magics RP lze řešit nástrojem BuildProcessor, nebo pomocí nástrojů EOS RP. Tato data se odešlou do závodu laserového spékání ve formě zakázky. V závodu se potom nástrojem EOSTATE sleduje průběh kvality tisku. [6]



Obrázek 3 - Schéma softwarové přípravy pro AM [6]

V prvním kroku je nutné mít virtuálně vymodelovanou součást v CAD programu. Pokud CAD model bude mít chybné prvky³, může se stát, že proces výroby se v některé následující části zhroutí, nebo výsledný díl nebude požadované kvality. Tento model se poté nahraje do Magics RP, který podporuje téměř všechny formáty souborů, a převede model standardní teselací na nepravidelnou trojúhelníkovou síť (STL-Standard Tessellation Language) a tím připraví data pro aditivní výrobu. Je zde i možnost přidání plastických nápisů, log. Následně EOS RP nebo BuildProcessor změní data STL na vrstvený model.

³ Tyto chybné prvky mohou být zvýrazněné ve stromu CAD modelu při jeho modelování v CAD systému.

Uživatel může nastavit parametry transformace, nebo může využít přednastavené sady parametrů, které jsou dodávány se softwarem. V další fázi se buď v režimu offline, nebo přímo na stroji sloučí, upraví a nahrají data modelu do podniku, kde se díly vyrobí. Zákazník nemusí podnik ani osobně navštívit a může zaslat zakázku prostřednictvím internetu. V samém závěru se data nahrají na 3D tiskárnu, popřípadě se editují, a poté vytisknou. [6]

2.3 Možnosti využití materiálů pro konstrukci řezných nástrojů

Z důvodu rostoucího zájmu o RP, se hledaly nové materiály, kterými by bylo možné vyrobit plnohodnotné kovové díly do různých aplikací. Proto je v současnosti široká škála nabízených materiálů, které jsou vhodné pro AM a vlastnostmi mohou konkurovat běžně používaným kovovým materiálům v konvenčních výrobních procesech. Jelikož vytvořené díly jsou často určeny k nahrazení stávajících výrobků vyrobených klasickými výrobními postupy, jsou uživatelé nuceni vyhledávat práškové materiály pro aditivní výrobu, kterými lze zaměnit materiály v konvenčních aplikacích. Výrobce prášků si je tohoto vědom a snaží se uživatelům usnadnit orientaci v nabízených materiálech a tím ulehčit přijetí této výrobní technologie pro nové výrobky a minimalizovat úsilí a náklady na zkoušky a certifikace. [7]

Použité prášky pro spékání dílů jsou z materiálů, které nemohou být označovány jako standardní, jelikož jejich složení bylo speciálně přizpůsobeno pro proces AM. Z toho plynou výhody, kdy aplikací materiálu „na míru“ se mohou optimalizovat vlastnosti kovového dílu a vyhnout se tak omezením, která by se dala očekávat použitím materiálů konvenčních metod.

Z povahy řezných nástrojů vyplývají určité vlastnosti, které jsou nezbytně nutné, aby se zabránilo nadměrnému opotřebení. Jsou jimi tvrdost při zvýšených teplotách, chemická stálost, houževnatost, ořezuvzdornost a dobrá tepelná vodivost. Tyto vlastnosti jsou obecnými předpoklady funkčního řezného nástroje. Proto jsou z povahy bronzové, titanové a hliníkové slitiny nevhodné. Materiálem, který je používán běžně na výrobu řezných nástrojů v koncepčních metodách je nástrojová ocel 19 830 (W.Nr. 13343). [8] Tato ocel se v průběhu let osvědčila. Proto se vychází z předpokladu, že nejvhodnější varianta pro konstrukci řezných nástrojů je materiál, který bude mutací výše zmíněné ocele pro AM. [9]

Z průzkumu byl vybrán jako nejvíce podobný materiál 18Ni-300. Tento materiál nabízí několik výrobců a dodavatelů AM prášků. Příkladem je firma EOS, která tento prášek propaguje jako EOS Maragingsteel MS1. Další firmy, které tento materiál poskytují, jsou Concept Laser (CL 50WS) a LPW (M300-1). Dle specifikací výrobce EOS se jedná o vysokopevnostní ocel, která odpovídá evropské klasifikaci 1.2709 (W.Nr). Z převodních tabulek byl zjištěn ekvivalent v české normě, jenž má označení 19 902 PH. [10] Tento druh ocele se obvykle vyznačuje velmi vysokou pevností v kombinaci s vysokou houževnatostí a totéž platí pro laserově spečené díly. Po vytisknutí se dobře opracovává a lze ji snadno martenziticky vytvrdit až do 55 HRC a zvýšit její pevnost v tahu nad hranici 1900 MPa jednoduchým tepelným stárnutím. V praxi se tato ocel používá pro vysoce namáhané nástroje a strojní díly, jako jsou vstřikovací formy pro plastové prvky, které dokážou vydržet i několik milionů pracovních cyklů. V kapitole: 3 *Využití pro praxi*, bude věnována pozornost soustružnickému noži, který byl vyroben z materiálu EOS Maragingsteel MS1 metodou DMLS. [7], [12]

Další variantou pro výrobu řezných nástrojů se jeví nástrojová ocel H13 značená dle normy AISI, tato ocel odpovídá evropské klasifikaci 1.2344 (W.Nr.), ekvivalentem v české normě je ocel ČSN 19 554.[10] Výrobní prášky z tohoto materiálu dodávají pro svá výrobní zařízení například firmy Arcam nebo LENS. Tato ocel se běžně používá na protahovací trny lehkých slitin za tepla a na velmi namáhané formy pro tlakové lití slitin hliníku a zinku. Je vhodná také na nástroje pro tváření za tepla, jako jsou malé zápustky, čelisti a razníky. Je charakteristická vysokou pevností za tepla a odolností proti popuštění i oťeru. [8] Popouštěním se dá její tvrdost zvýšit až na 56 jednotek HRC a povrch materiálu lze nitrací vytvrdit až na 1000-1250 HV. Tabulka 1 přináší chemické složení výše jmenovaných materiálů, jsou jimi MS1 a H13. [11]

Tabulka 1 - Chemické složení MS1 (18Ni-300) a H13 (W.Nr. 1.2344) [12][13][14]

Wt[%]	Ni	Cr	Fe	Mo	Ti	Al	Co
MS1	17-19	<0.5	zbytek	4.5-5.2	0.6-0.8	0.05-0.15	8.5-9.5
H13	0.3	5.2	zbytek	1.5	----	----	----
Wt[%]	Mn	P	S	V	Si	C	
MS1	<0.1	<0.01		----	<0.1	<0.03	
H13	0.4	----	0.03	1.0	1.0	0.4	

2.4 Možnosti konstrukce řezných nástrojů

Jelikož RP vytváří díly po vrstvách o tloušťce v řádech desítek micrometrů z CAD modelu, má metoda potenciál tisknout složité tvary, které by nebylo možné vyrobit žádnou jinou technologií. Tudiž v případě koncepce řezných nástrojů není tvar řezného nástroje pro výrobu téměř limitující. RP lze vyrobit monolitické nástroje nebo vyměnitelné břitové destičky (VBD). Avšak na základě rešerše, lze usuzovat, že konvenčním slinováním VBD destiček se dosáhne lepších mechanických vlastností. Tudiž se RP jako technologie výroby vyměnitelných břitových destiček příliš nehodí. V budoucnu se však toto tvrzení může stát nepravdivým. Z dostupných materiálů je zatím zřejmé, že pro monolitické nástroje nebo těla pro VBD najde 3D tisk uplatnění. Tvrdost a zřejmě i tuhost výše popsaných materiálů jsou dostačující. S možností nepřeborného kombinování chladících kanálků je tato technologie více než dostačující pro řezné nástroje. Konstruktorovi nástroje se poté otevrou nové možnosti tvarů a funkcí, které může uplatnit. Mohou se zvýšit řezné rychlosti a obecně zvýšit náročnost řezných podmínek, které budou působit na nástroj, protože bude například možné lépe vyplavovat třísku a chladit materiál komplikovaně navrženými odtokovými kanálky. Navíc čím je výrobek složitější, tím se stává výroba nákladově efektivnější. Těla nožů se dají odlehčit porézním kovem, což je například obdoba vnitřní struktury lidských kostí. Tyto porézní struktury se však mohou lišit od té kostní. Jejich dobré mechanické a fyzikální vlastnosti jsou vhodné pro toto použití. Jsou charakteristické vysokou tepelnou vodivostí, pevností při malé váze a jsou ekonomickou náhradou za plně výplně všech druhů těles, jelikož se dosáhne úspory kovového prášku a energie. [15]

2.5 Mechanicko-fyzikální vlastnosti

Rozhodující pro úspěch zavedení AM do výroby kovových součástí je rozsah, ve kterém se vlastnosti laserem spečeného dílu ztotožňují s vlastnostmi dílů vyrobených běžnou metodou, a do jaké míry mohou být produkovány vlastnosti, které nejsou k dispozici od konvenčních postupů. Potom je teprve možné nahradit běžné díly produktem AM v příslušných aplikacích. [7]

Vzhledem k tomu, že různé výrobní metody obecně produkují díly s odlišnými vlastnostmi, lze očekávat, že i laserem spečené díly se budou lišit od dílů vyrobených jinou metodou v příslušném materiálu. Tyto rozdíly v chování jsou někdy předvídatelné a jindy překvapující. Ovšem zda je odlišnost ve vlastnostech vítaná, či nežádoucí, závisí individuálně na případu nebo použití. Proto se můžou otevírat nové možnosti pro výrobu a koncepci produktů. [7]

Kovové části vyrobené AM mají často mnohem jemnější zrnitost než tvářené nebo lité struktury. Obecně je to přisuzováno velmi rychlé rekrystalizaci laserem ohřátého materiálu vlivem rychlého vedení tepla z roztavené zóny do okolního kovu a tyto vysoké rychlosti ochlazování, můžou vést k tvorbě nerovnovážných krystalických fází. Kromě toho plynové výpary a inkluze oxidů mohou být zachyceny při tuhnutí v materiálu z různých příčin. Příklad takovéto struktury je na obrázku 4, který ukazuje mikrografii vzorku EOS CobaltChrome MP1 v různém zvětšení. Vzorek byl postavený na systému EOSINT M270 za použití standardních parametrů. Na nejvyšším rozlišení 5000x SEM (rastrovací elektronový mikroskop), je možné vidět, že zrna mají velikost přibližně 0,3 až 0,6 μm . Materiál nevykazoval žádné plynové bubliny. [7]



Obrázek 4 - EOS CobaltChrome- MP1, Vlevo: 10x zvětšený. Střed: 1000x SEM Vpravo: 5000x SEM [7]

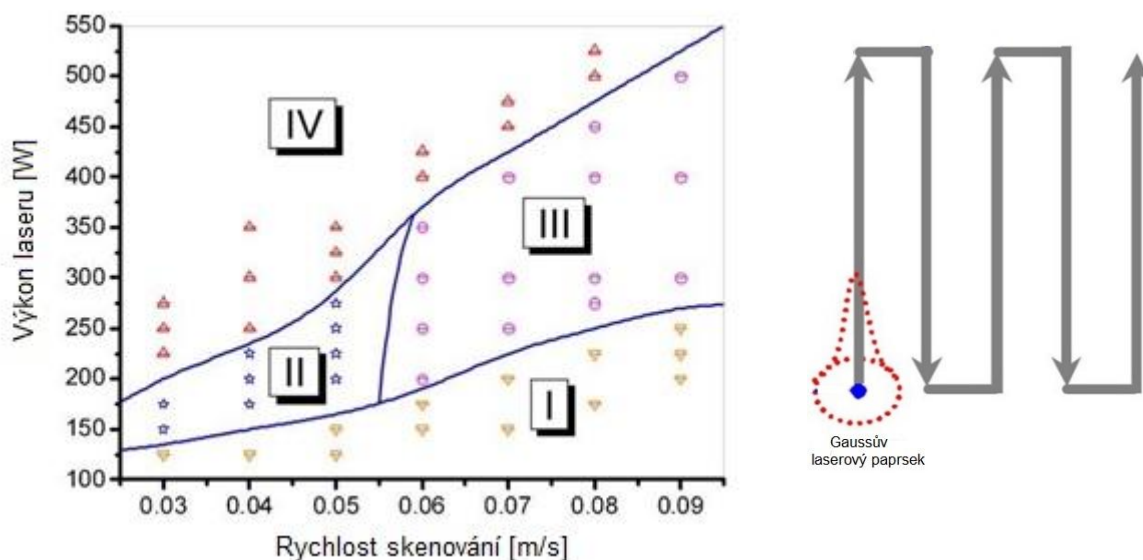
Při vrstvení dílu jsou postupně taveny a rekrystalovány jednotlivé řádky materiálu, proto by se dalo očekávat, že výsledná struktura bude ve všech případech AM jemnozrná a obdobná struktuře na obrázku 4. Nicméně příklad laserem spečeného dílu Ti6Al4V nevykazuje žádnou takovou jemnozrnou strukturu. Dendritické krystaly se obecně u metod AM přednostně orientují kolmo k nanesené vrstvě a krystaly mají na výšku aspoň velikost jedné vrstvy. Struktura Ti6Al4V měla rovněž takto orientované krystaly, které měly mnohem vyšší rozměr, než je tloušťka jedné vrstvy. Tento jev je vysvětlen tak, že laserová energie byla natolik velká, že znova přetavila spodní vrstvy vyráběného (spékaného) dílu, tím se odstranily zjevné hranice a opětovnou rekrystalizací se umožnil růst krystalů přes vrstvy. [7]

Z těchto poznatků lze vyvodit, že struktura a vlastnosti materiálu závisí na zvolených parametrech výroby a attributech spékaného prášku.

2.5.1 Vliv výkonu paprsku (laser power) a rychlosti skenování (scanning speed) na strukturu materiálu

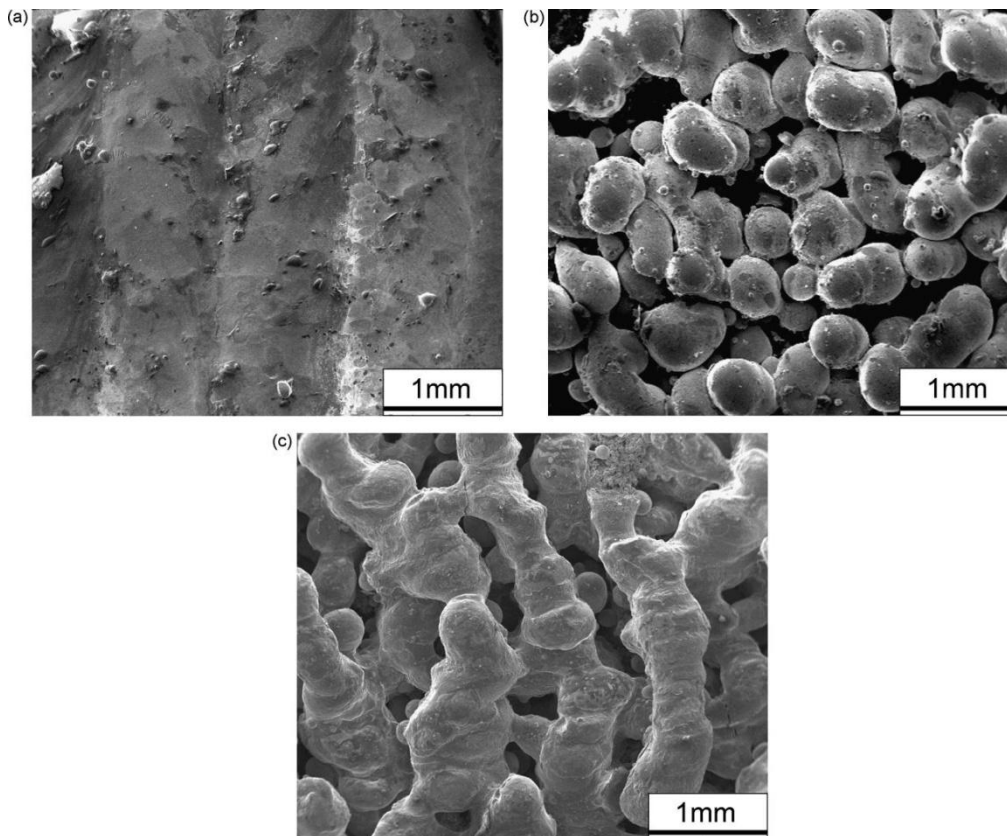
Množství kapalné složky v tavenině závisí na teplotě spékání, která je ovlivněná energií předané do prášku. Hlavní parametry, které ovlivňují zmíněnou energii, jsou výkon laseru a rychlost skenování. Za účelem stanovení vlivu různých výkonů paprsků a rychlostí skenování byly v práci Dongdonga Gua a Yifa Shena [16] uvedeny různé kombinace, demonstrovány na nerezové oceli 316L o tloušťce vrstvy 20 μm . Skenování postupovalo jednoduchým lineárním rastrovým skenováním dle obrázku 5. Postřehy ze zkoumaných závislostí byly následující případy:

1. Žádné natavení: Dodaná energie paprsku byla nedostačující pro natavení prášku, takže velké množství prášku po výrobním procesu zůstalo ve výchozím stavu.
2. Parciální natavení: Střední výkon paprsku v kombinaci s nízkou skenovací rychlostí ($<0,06$ m/s) vytvářela na povrchu částic kapalnou fázi, která po krystalizaci spekla dohromady částice prášku do velkých kuliček přibližně o průměru paprsku. Tento povrchu, vykazuje balling jev 1. druhu (viz podkapitola Balling). [17]
3. Spékání s balling jevem: Při vysokém laserovém výkonu a vysoké rychlosti skenování ($\geq 0,06$ m/s) byly na povrchu patrné dlouhé, tenké a válcovité tvary, které se následně rozešly do řad hrubých kuliček jako výsledek snížení povrchového napětí.
4. Kompletní natavení: energie laseru byla natolik velká, aby byla schopná vytvořit trvalé stopy roztaveného kovového materiálu, které tvořily spojité slinuté linky a plně tuhý celistvý povrch. [16]



Obrázek 5 - Vpravo: Závislost struktury na procesních parametrech;
Vlevo: Postup skenování prášku laserem [16]

Na obrázku 5 jsou graficky vyneseny procesní parametry pro výše zmíněné typy struktur, na osách jsou vyneseny hodnoty výkonu laseru a rychlosti skenování. Na obrázcích 6 jsou uvedené morfologické struktury povrchů jednotlivých případů. Při výkonu laseru 300 W a skenovací rychlosti 0,05 m/s vznikl plně konzistentní spečený povrch (obr. 6a) typický pro případ 4. Nicméně při zvýšení skenovací rychlosti na 0,08 m/s a zachování stejného výkonu vznikala typická struktura pro případ 3, tato struktura sestávala z hrubých jednotlivých shluků kulovitého tvaru (obr. 6b), které jsou příznačné pro jev zvaný „balling“, který se poprvé začal objevovat v tomto seskupení výrobních podmínek. Vzorek při snížení výkonu laseru na 250 W a rychlosti skenování 0,05 m/s vykazovala pórovitou strukturu, která má otevřené póry v povrchu vzorku (obr. 6c). Kromě toho se spečený povrch skládal z velice dlouhých podélných struktur v uskupení jakési mřížky, která neměla podobu kulových aglomerátů. Vkládaná energie paprskem byla totiž natolik velká, že spojila jednotlivé aglomeráty silnými můstky k sobě. Proto konstrukce vzorku nevykazovala křehkost, která je charakteristická pro materiály vykazující balling. Tento případ je znázorněn na obrázku 5 jako oblast dotyku oblastí 2 a 4. [16]



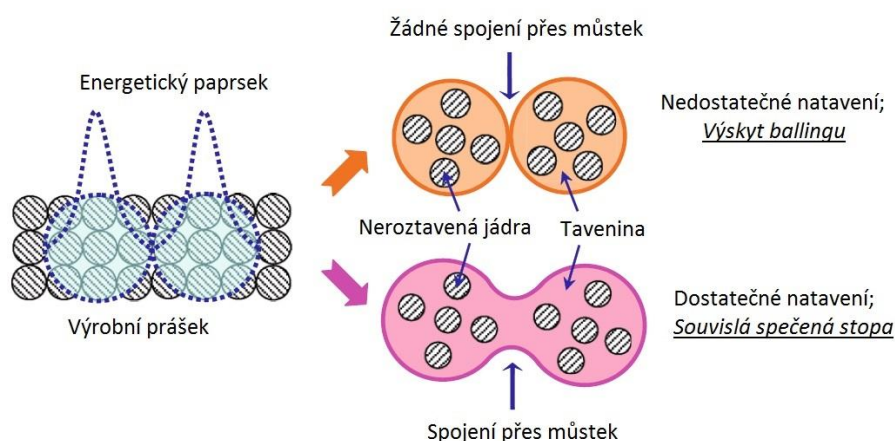
Obrázek 6 - Struktury spečených materiálů [16]

- a) plně konzistentní povrch**
- b) balling**
- c) pórovitá struktura**

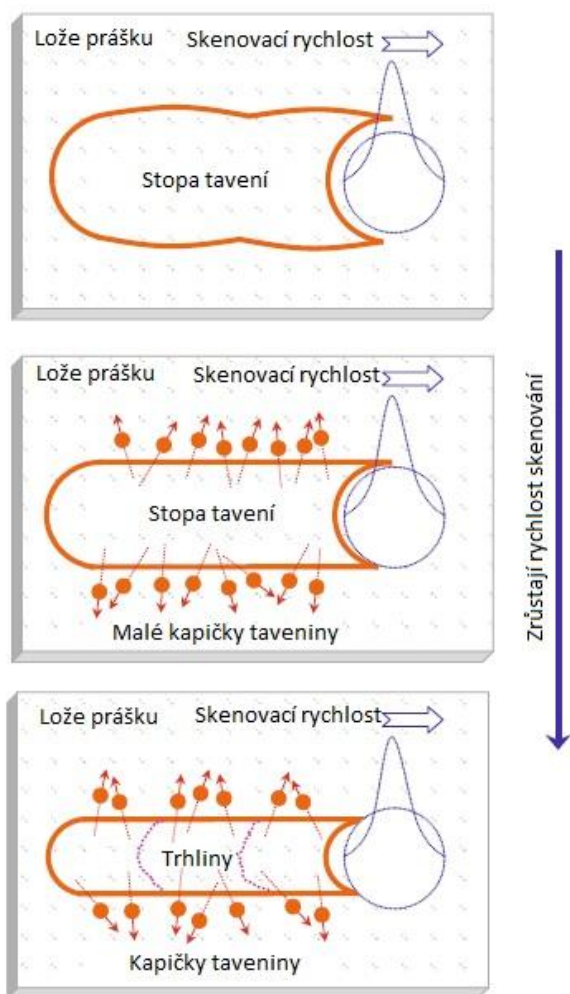
2.5.2 Balling

Aditivní výroba (AM) je komplexní fyzikální metalurgický proces a kvůli své složité povaze stále existují mnohé překážky k dosažení vysoce kvalitních kovových dílů s příznivými mikrostruktury. Typické vady spojené s AM jsou například nežádoucí pórovitost, delaminace (separace vzájemně propojených vrstev [18]), zkreslení, ale asi nejvýznamnější je jev balling. Jedná se o nepříznivý jev, který významně ovlivňuje termodynamické a kinetické vlastnosti v průběhu spékání. Vzhledem k tomu, že laserové spékání se provádí řádek po řádku, může balling vést k navzájem nespojeným řádkům. Protože o úroveň výše ve výrobním procesu se aditivní výroba uskutečňuje vrstva po vrstvě, je balling závažnou překážkou pro nanášení nového nespečeného prášku na již spečenou vrstvu. Má také tendenci způsobovat pórovitost a dokonce delaminaci vyvolanou špatným přitavením vrstev k sobě v kombinaci s tepelným namáháním. Proto dojde-li při AM k tvorbě ballingu, silně se degradují vlastnosti výrobku. [17]

Rozlišujeme dva druhy ballingu. Při použití nízkého výkonu energetického paprsku, vzniká první druh ballingu v důsledku natavení povrchu zrn a jejich spojení do aglomerátů přibližně o průměru energetického paprsku. Aglomeráty nejsou k sobě pevně spojeny nebo jsou spojeny pouze tenkými můstky, jak je znázorněno na obrázku 7. Ovšem pokud je vložena energie ještě o něco větší, než je třeba na vznik aglomerátů a tenkých můstků mezi nimi, tak se tyto aglomeráty spojí přes silné můstky a vzniká tak souvislá spečená stopa, která nevykazuje přítomnost ballingu. Druhý typ se vyznačuje velkým množstvím kulovitých útvarů na již spečeném povrchu v důsledku vysokého výkonu (400 W) a rychlosti skenování (obvykle větší než 0,07 m/s). Se zvyšující se rychlostí skenování lineární hustota energie klesá, což má za následek snížení pracovní teploty a tedy zúžení roztaveného řádku, což je znázorněno na obrázku 8. Nestabilita taveniny v důsledku toho výrazně roste. V tomto stavu má množství malých kapiček taveniny tendenci stříkat do okolí, aby se snížila povrchová energie taveniny. Což vede k ballingu druhého druhu, jehož struktura je vidět například na obrázku 9e. Při zachování vysokého výkonu paprsku a zvýšení skenovací rychlosti nad 0,10 m/s se začínají mimo zjevného ballingu objevovat ve stopě taveniny praskliny (viz obr. 9f, 9d). [17]

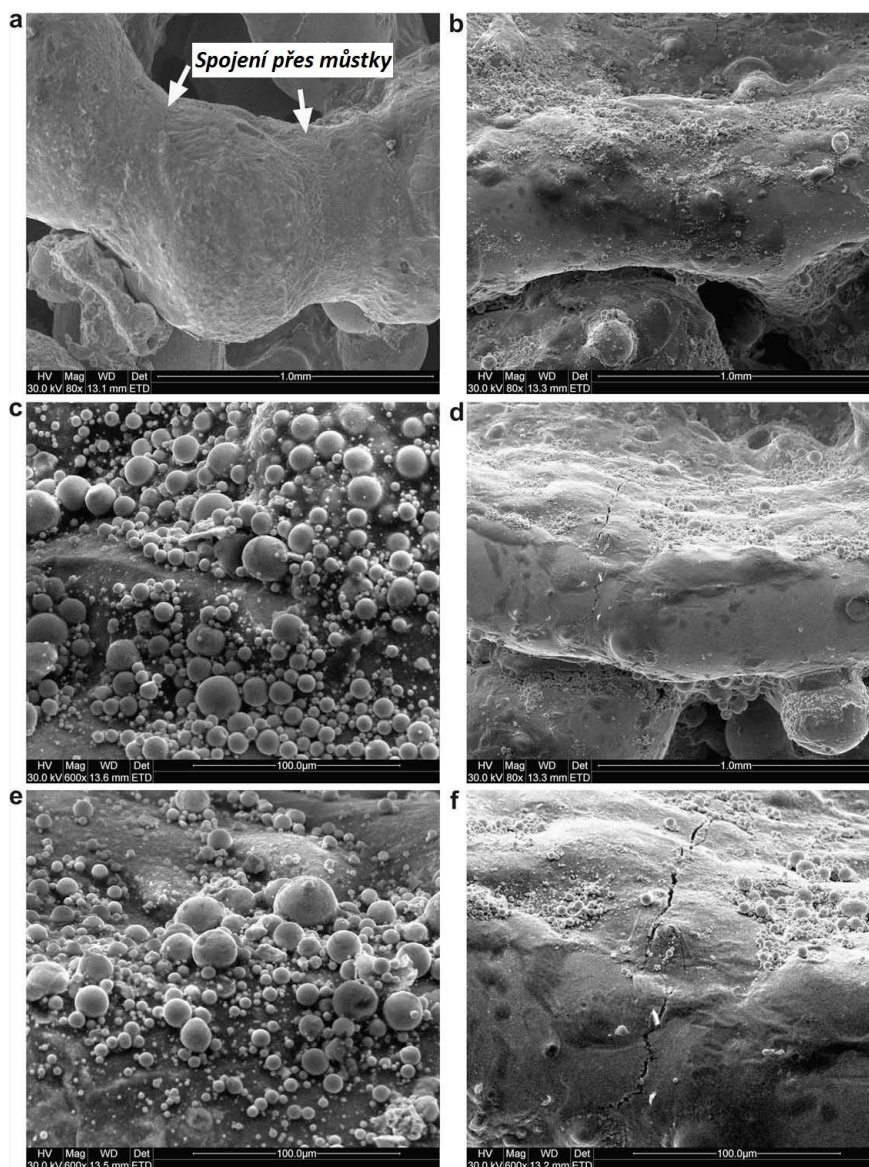


Obrázek 7 - Schéma prvního druhu balling jevu, vznik hrubých kulových aglomerátů, způsobené nízkou tvorbou taveniny. [17]



Obrázek 8 - Schéma druhého druhu balling jevu, který je charakterizován malými kuličkami na spečeném povrchu. [17]

Vliv skenovací rychlosti na morfologii při aditivním spékání ocele 316 L je odhaleno v obrázku 9. Při nižší rychlosti skenování 0,05 m/s, je patrná kontinuální slinutá skladba, která spojuje aglomeráty dostatečně silnými můstkami. Není zde žádný zjevný výskyt ballingu (obr. 9a). Se zvyšující se rychlostí skenování na 0,07 m/s začíná být spečený povrch značně hrubý, i když vazby mezi spečenými aglomeráty jsou stále bez známek porušení (obr. 9b). Při vysokém zvětšení se ukazuje, že na povrchu se vyskytuje velké množství malých kulovitých útvarů ve velikosti přibližně $\sim 10 \mu\text{m}$ (obr. 9c). Tyto útvary na povrchu, již mohou ovlivňovat dokonalé spečení blízkých vrstev. Protože tyto kulovité útvary nejsou pevně spojené s podkladem. Při ještě vyšší skenovací rychlosti 0,10 m/s jsou na povrchu viditelné větší kulovité útvary jako v předešlém případě (obr. 9d, 9e). Zároveň vzorek vykazuje úzké a hluboké trhlinky (obr. 9f). [17]



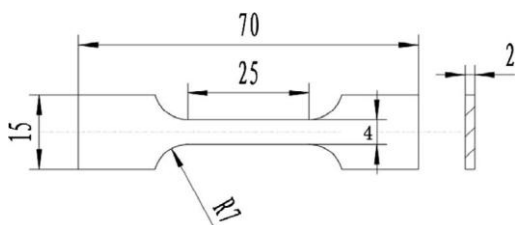
Obrázek 9 - SEM charakterizace laserových spečených stop při různých skenovacích rychlostech: (a) $v = 0,05 \text{ m/s}$, (b) $v = 0,07 \text{ m/s}$, (d) $v = 0,10 \text{ m/s}$, (c) je místní zvětšení (b), (e) a (f) místní zvětšení (d). $P = 400 \text{ W}$ a $d = 0,25 \text{ mm}$ jsou konstantní [17]

2.5.3 Vliv tloušťky vrstvy na mechanické vlastnosti

Předpoklad je, že tahové vlastnosti materiálu budou degradovat s rostoucí tloušťkou vrstvy. Ale je snaha zvětšovat tloušťku vrstvy, jelikož tím se krátí doba výroby dílu a snižují se provozní náklady. Proto se v praxi hledá kompromis mezi tloušťkou vrstvy a výslednými mechanickými vlastnostmi. V práci Kaia Guana a spol. [20] je zkoumaná závislost mechanických vlastností na tloušťce prášku ocele 304, která je spékaná technologií SLM. Tloušťky vrstev byly 20, 30 a 40 μm , ze kterých se vyrobily tahové vzorky (viz obr. 10). Ty byly zhotoveny za stejných pracovních hodnot: laserový výkon 200 W, rychlost skenování 0,25 m/s, velikost překrytí 40 %, úhel skenování 90° a odklon stavění od normály k platformě 0°. Tahové vlastnosti těchto vzorků jsou uvedeny v tabulce 2. Je zřejmé, že tažnost a pevnost v tahu jsou nezávislé na tloušťce vrstvy. Ukázalo se, že vzorky SLM mají vyšší hodnotu $R_{p0.2}/R_m$ než vzorky standartu ANSI⁴. [19]

Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti SLM vzorků různých tloušťek vrstvy [19]

Tloušťka vrstvy (μm)	$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	$R_{p0.2}/R_m$
20	530-551	696-713	32.4-43.6	0.77
30	519-533	666-687	40.8-41.8	0.78
40	541-545	694-703	39.0-42.3	0.78
ANSI	≥ 205	≥ 520	≥ 40	0.39



Obrázek 10 - Geometrie tahového vzorku [19]

Pro daný výkon laseru, je maximální hodnota tloušťky řezu 40 μm , aby bylo zajištěno, že každá vrstva prášku je plně roztavená. Je-li tloušťka řezu dále zvyšována, není energie dostačující k roztavení vrstvy prášku a dochází k jevu balling. V mikrostruktuře velikosti zrna a orientace krystalů u těchto tloušťek jednotlivých vrstev 20, 30 a 40 μm nebyly zpozorovány téměř žádné zřetelné rozdíly. Z toho se usoudilo, že tloušťka vrstvy nemá žádný zřetelný vliv na tahové vlastnosti při totožných výrobních parametrech, ovšem drsnost povrchu vzorků se může lišit. Drsnosti výchozích produktů SLM metod se pohybují běžně v rozmezí Ra10 až Ra12. [19], [20]

⁴ American National Standards Institute jedná se o neziskovou organizaci, která vytváří průmyslové standardy ve Spojených státech.[26]

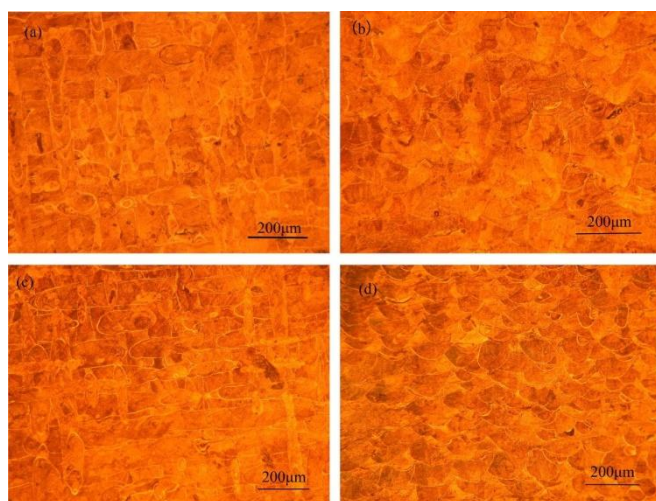
2.5.4 Vliv velikosti překrytí (overlap rate)

Velikost překrytí je vyjádřena v procentech a vyjadřuje, na jak velkou plochu již spečeného řádku působí znova energetický paprsek. Tento atribut působí na drsnost povrchu, pórovitost a celkově tedy na mechanické vlastnosti. Obecně platí, že vyšší míra překrytí laserového paprsku umožní dobrou povrchovou drsnost, nízkou pórovitost a dobré mechanické vlastnosti, zatímco se zvýší časová náročnost na výrobu. Na deseti vzorkách, které byly vyrobeny s přesahy 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % a 50 %, se zkoumala závislost různých překrytí na výsledných vlastnostech materiálu, zatímco ostatní parametry zůstaly konstantní (výkon laseru: 200 W, rychlost skenování 0.25 m/s, tloušťka řezu: 20 μm , úhel skenování: 90°, směr stavění 0°). [19]

Tabulka 3 udává chování v tahu těchto vzorků. Je možné si všimnout, že SLM vzorky mají mnohem vyšší hodnoty $R_{p0,2}$ a R_m , ale nižší tažnost než standardní vzorky ANSI. Tahové vlastnosti jsou relativně závislé na konzistentním materiálu bez pórovitosti. Na obrázku 11 je mikrostruktura téměř plně konzistentní bez pórů, i když v prvním případě je hodnota překrytí nulová. To je přisuzováno nastavenými parametry výroby, jelikož dopadající energie je natolik velká, že nastávají dobré spékající podmínky i pro 0% překrytí. [19]

Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti SLM vzorků různých velikostí překrytí [19]

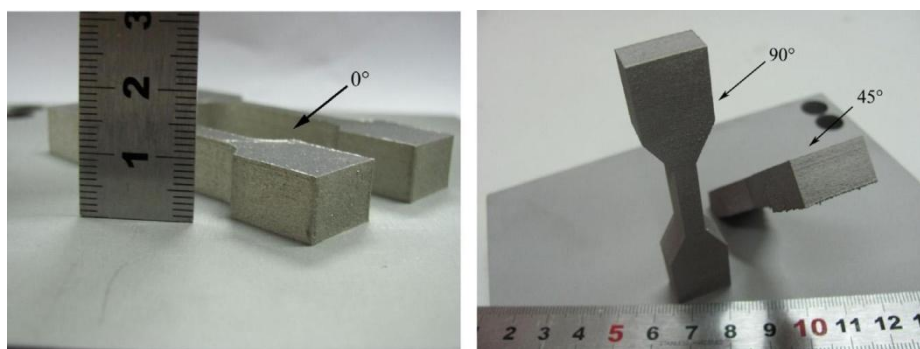
Velikost překrytí [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	$R_{p0,2}/R_m$
0	531-541	682-704	40.1-43.6	0.77
10	525-561	685-690	36.0-38.0	0.79
20	547-556	682-697	38.0-39.2	0.80
30	525-569	666-713	35.8-38.0	0.80
40	530-551	696-713	32.4-43.6	0.77
50	519-561	651-700	31.2-37.2	0.80



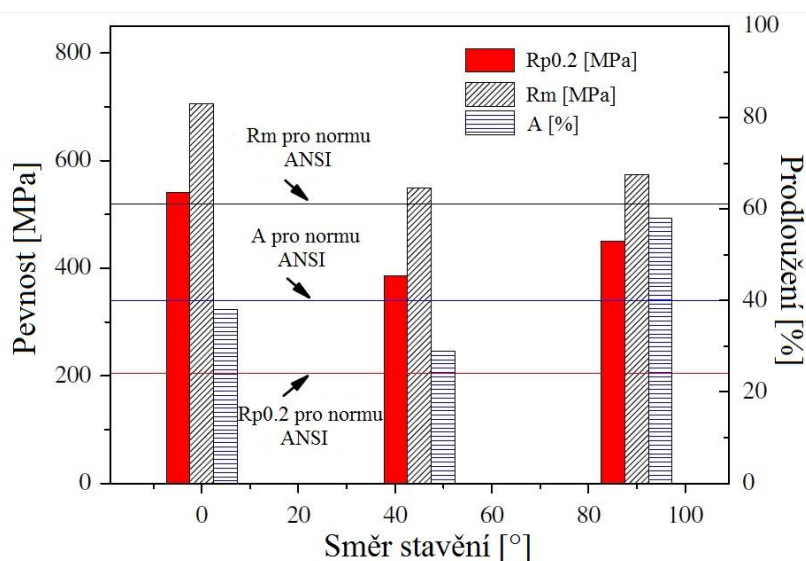
Obrázek 11 - Mikrografie SLM vzorků s hodnotou překrytí 0 % (a),(b) a 50 % (c),(d) [19]

2.5.5 Vliv orientace tisku (building direction) zkušební vzorku na mechanické vlastnosti

Anizotropii mechanických vlastností, což znamená nestejnsměrné mechanické vlastnosti v různých směrech souřadnicového systému, byla věnována v posledních letech velká pozornost v oblasti AM. Zejména jak směr stavění, který je definován jako ostrý úhel mezi podélnou osou vyrobeného vzorku a vodorovnou osou, ovlivňuje vlastnosti tahových vzorků. V práci Kaia Guana a spol. [19], ve které se zkoumala tato závislost, byly vzorky postavené stavebním směrem 0° , 45° , 90° podrobeny tahovým zkouškám, jak je znázorněno na obrázku 12. Podmínky, za kterých byly vzorky postavené z materiálu nerezové ocele 304, byly následující: laserový výkon 200 W, skenovací rychlost 0.25 m/s, tloušťka vrstvy $20\ \mu\text{m}$, úhel skenování 90° a velikost překrytí 40 %. Na obrázku 13 jsou graficky vyneseny naměřené závislosti mechanických vlastností vzorků. Tyto hodnoty potvrdily přítomnost silné anizotropie. Horizontální vzorky mají vyšší pevnost v tahu. Svislé vzorky vykazují optimální kombinaci pevnosti a tažnosti. Vzorek postavený pod 45° úhlem měl mechanické vlastnosti ve všech zkoumaných parametrech nejhorší. V jiném výzkumu ovšem došli k jinému závěru [21], že mechanické vlastnosti jsou přibližně lineární v závislosti se směrem stavění. [19]



Obrázek 12 - SLM vzorky postavené pod směrovými úhly: 0° , 45° a 90° [19]



Obrázek 13 - Tahové vlastnosti SLM vzorků při různých stavebních směrech [19]

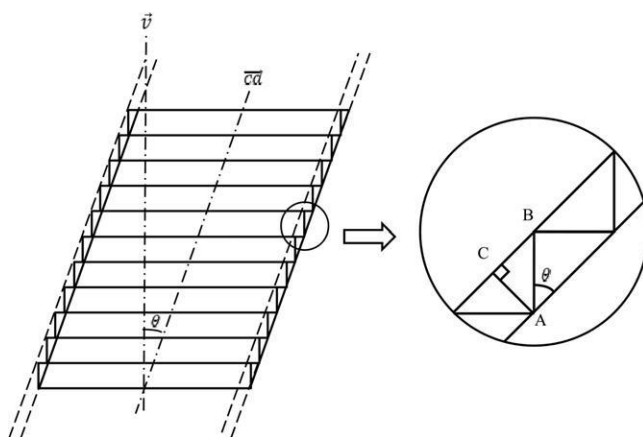
Došlo se k závěru, že tahové vlastnosti SLM vzorků byly ovlivněny stavebním směrem, na kterém závisí spékání sousedních vrstev materiálu. Tímto směrem jsou orientovány i podlouhlá zrna mikrostruktury materiálu. Proto se vzorky chovaly odlišně při zatížení tahového zatížení, které způsobilo napětí v ose každého vzorku. [19]

Ovšem firma EOS (DMLS) ve své studii na plochých a válcových vzorcích zjistila, že jsou výsledky neprůkazné. Dobrala se závěru, že účinek orientace je závislý spíše na druhu materiálu než na geometrii vzorku. V tabulce 4 jsou některé naměřené výsledky ze srovnání svisle a vodorovně vyrobených vzorků. Z tabulky 4 vyplývá, že MS1 má o něco málo lepší vlastnosti u horizontálně vyrobeného vzorku než u vertikálně postaveného vzorku. V případě Ti64 je lepší mez kluzu a poměrné prodloužení ve vertikálním směru. Rozdíly jsou ovšem poměrně malé. [22]

Tabulka 4 - Porovnání horizontálně a svisle vystavěných vzorků. [22]

		<i>EOS MaragingSteel MS1</i>		<i>EOS Titanium Ti64</i>	
		horizontálně	vertikálně	horizontálně	vertikálně
Modul pružnosti	[GPa]	172	160	112	111
Mez kluzu	[MPa]	1085	1076	1043	1088
Mez pevnosti	[MPa]	1188	1140	1248	1201
Pom. prodloužení	[%]	13,3	10,0	8,5	10,6

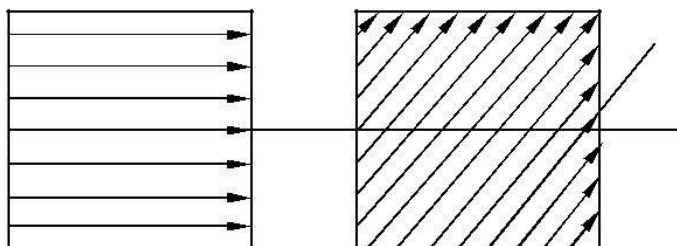
Pozn. Vliv orientace směru tisku neovlivňuje pouze mechanické vlastnosti, ale i tvarové. Příkladem může posloužit obr. 14, na kterém je vyobrazena chyba válcovitosti. Tato chyba je způsobena nevhodným určením směru tisku, vzhledem ke geometrii válce.



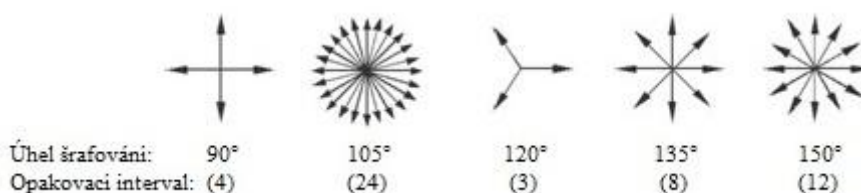
Obrázek 14 - Chyba válcovitosti u AM. [3]

2.5.6 Vliv úhlu skenování (Hatch angle)

Úhel skenování θ je definován jako natočení nataveného řádku materiálu, vůči řádku postaveného ve vrstvě o jednu pozici níže, jak je znázorněno na obrázku 15. Například úhel skenování 90° znamená, že po čtyřech vrstvách depozice bude orientace spékáných řádků shodná s řádky v první vrstvě. Anizotropii mechanických vlastností je obtížné odstranit, je-li zvolen špatný úhel skenování, jelikož tento parametr ovlivňuje výkonnost vyrobených dílů. Ale toto tvrzení není zatím jednoznačné, uvedu příklad. C. P. Paul poukázal na to, že u vzorku spečeného z inconelu 625 nebyly ovlivněny úhlem skenování tahové vlastnosti materiálu. [23] Nicméně práce Kaia Guana a spol. [19] se také zabývala touto problematikou. Zkoumaly se vzorky z materiálu nerezové oceli 304, ty byly postaveny za stejných procesních podmínek (výkon laseru 200 W, rychlost skenování 0.25 m/s, tloušťka řezu 20 μm , hodnota překrytí 40%, směr stavění 0°). Odlišnost jednotlivých vzorků byla v použitém úhlu skenování 90° , 105° , 120° , 135° , 150° . Na obrázku 16 je uvedeno po kolika vrstvách se bude směr spékání řádku shodovat se směrem řádku v počáteční vrstvě v závislosti na zkoumaných úhlech skenování. [19]



Obrázek 15 - Znázornění natočení řádků v sousedních rovinách. [19]



Obrázek 16 - Schéma intervalů při různých úhlech skenování. [19]

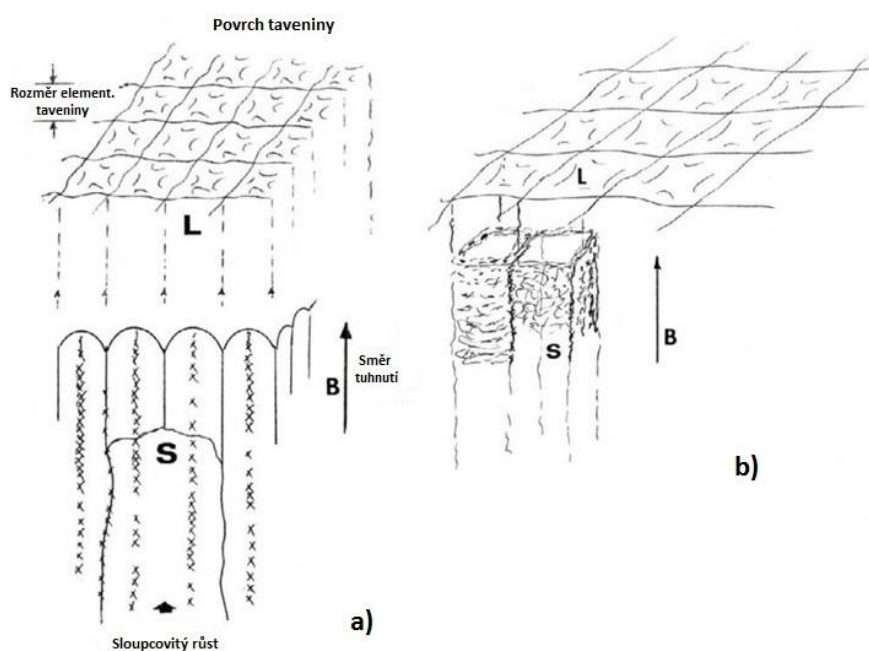
Tahové vlastnosti zkoumaných vzorků jsou uvedeny v tabulce 5, ze které vyplývá, že vzorky vyrobené úhlem skenování 105° mají nejspokojivější mechanické vlastnosti v řadě použití. Jinak všechny vzorky SLM spékáním mají vyšší hodnoty $R_{p0.2}/R_m$ než ty standardu ANSI. Byla nalezena souvislost mezi počtem vrstev, po kterých je směr tavby řádku totožný, a mechanickými vlastnostmi, které se zlepšují právě tímto počtem, a zmenšuje se anizotropní chování mechanických vlastností. Například také tuto závislost potvrdili Ensz et al., kteří zavedli do procesu výroby technologií LENS jakousi nahodilost úhlu skenování a zlepšila se integrita spojení vrstev vzorků. [24] Tudiž s vyššími intervaly do opakování směru tavení vrstev se zvyšuje pravděpodobnost odstranění vad či anizotropie. [19]

Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti SLM vzorků v závislosti na úhlu skenování. [19]

Úhel skenování [°]	Rp0.2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Rp0.2/Rm
90	530-551	696-713	32.4-43.6	0.77
105	566-570	714-717	40.6-42.8	0.79
120	540-545	682-685	36.5-37.9	0.79
135	541-556	691-693	36.6-38.4	0.79
150	534-555	698-703	39.6-40.4	0.78

2.5.7 Výsledná mikrostruktura zrn

Obrázky 17a a 17b znázorňují dva různé schematické pohledy vytvořené mikrostruktury materiálů, které jsou postupně tvořené ze samostatných polí taveniny, které jsou tavené skenováním v xy rovině paprskem EBM (elektronového paprsku) a SLM (laserového paprsku). Rozměry těchto polí taveniny závisí na zaměření paprsku a rychlosti skenování. Rozdíl ve výkonu spékající energie elektronů a fotonů je 60 kV v komplexním způsobu měření, ale pomalejší skenovací elektronový paprsek produkuje větší elementární rozměry taveniny než rychlejší laserový. Obrázky 17a a 17b ukazují sloupcovitý růst zrna v blízkosti centra dílčí taveniny, tvar hranice zrna připomíná válcovitou mikrostrukturu. Směr této struktury odpovídá teplotnímu gradientu. Směrová mikrostruktura mezi dvěma dílčími plochami je ovlivněna rozdílnými teplotními gradienty na rozhraní taveniny a pevné látky. Vzniklé mikrostruktury zrna nemusejí být pouze sloupcovitého typu (obr. 17a), ale mohou vyznačovat jakousi orientovanou texturu (obr 17b), nebo se může v zrně vyskytovat i jiná směrová mikrostruktura. V závislosti na specifických termo-kinetických veličinách se mohou přednostně tvořit precipitace a příbuzné transformační děje v elementárních taveninách nebo v přechodných dílčích oblastech působnosti paprsku jak je ukázáno na schematických obrázcích 17a a 17b. [25]



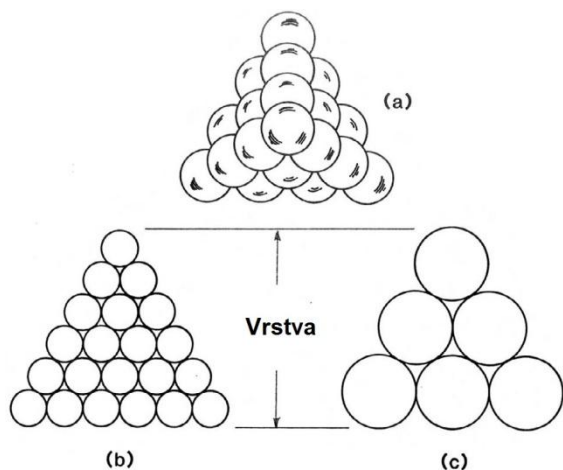
Obrázek 17 – Pole [25]

a) Sloupcovitý růst zrn

b) Orientovaná textura

2.5.8 Struktury a velikost zrn výrobního prášku

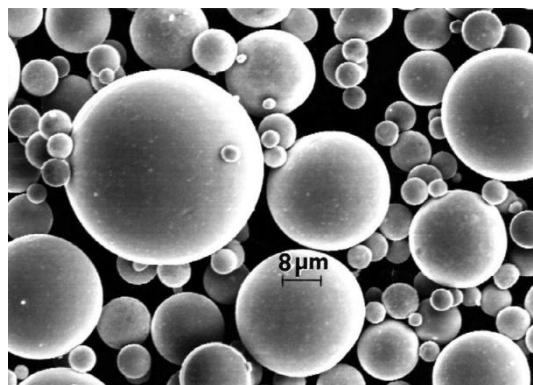
V obou případech jak v EBM, tak SLM je velice důležité zajistit konstantní tloušťku prášku. Tato tloušťka se určuje z procesních parametrů a druhu prášku. Splnění těchto podmínek a vlastnosti samotného prášku ovlivňují výsledný výtisk. U vlastností materiálu se nezkoumají jenom konečné mechanické vlastnosti, ale i jeho chování při procesu výstavby dílu. Zásadní je tekutost prášku při tavně, je to rozsáhlá problematika, pro účely této práce bude postačující zmínit, že tekutost ovlivňuje hustota, kohezní pevnost stěn při tření, povrchové napětí, velikost zrn prášku a další. Tekutost výrazně zlepšuje kulovitost zrn prášku a naopak nepravidelnost ji zhoršuje. Prášky většinou fungují lépe při menších velikostech zrn stejné hrubosti. Zatímco prášky složené ze dvou velikostí zrnitosti můžou podněcovat lepší vyplňování a zhušťování vrstev, které zlepšuje účinnost spékání. [25]



Obrázek 18 - Idealizovaná velikost zrnitosti prášku [25]

- a) Prášek ze dvou hrubostí zrn
- b) Menší hrubost zrn
- c) Větší hrubost zrn

Obrázek 19 - Ukázka ideálního měděného prášku se dvěma velikostmi hrubosti [25]



Jak je znázorněno na obrázku 18, u rozměrných stejně velkých částic vznikají velmi významné intersticiální dutiny, které mohou být vyplněny menšími částicemi, a tak zlepšit zaplnění vrstvy materiálem. Nejhorší stavbu má varianta c), ve které jsou významné prázdné intersticiální prostory, což není vhodné pro samotný proces spékání. V porovnání varianta b) má také nevyplněné prostory, avšak o menším celkovém objemu. Proto je prášek přívětivější pro proces spékání a vrstva po spečení nemění tolik svůj výšku. U varianty a) je prášek složen ze dvou hrubostí částic, menší částice vyplňují jinak prázdný prostor mezi většími částicemi, tento prášek je vyobrazen na obrázku 19 a jeho spékavost a tavení je nejsnadnější. [25]

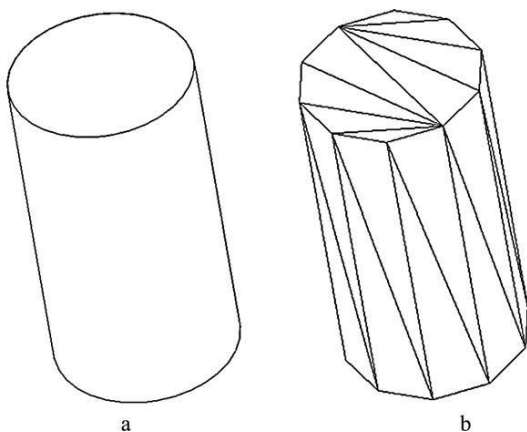
Po procesu výroby se neroztavený prášek recykluje a může se použít pro budoucí tisk. Odstranění prášku ze složitých dílů je obvykle prováděno tryskáním vzduchem o vysokém tlaku, vibračními postupy, nebo jejich kombinací. Z důvodu tloušťky vrstvy a velikosti plochy expozice tavícího paprsku existují omezení ve velikosti prvku a jeho přesnosti: zhruba tloušťky vrstvy pro rutinní zpracování EBM je ~100 μm . [25]

2.5.9 Ovlivnění fyzikálních vlastností (přesnosti) výrobku výrobou AM

Mezi parametry, které zejména ovlivňují výslednou přesnost výrobku kromě druhu zařízení a zvolené hrubosti prášku, jsou operace:

- 1) Krájení se vztahuje k rozřezání dílu na vrstvy. Krájení může být provedeno rovnoměrně, tedy jednotlivé vrstvy jsou stejné výšky, nebo adaptivním způsobem kdy jsou vrstvy nakrájeny na různé výšky.
- 2) Podpěry jsou materiál navíc, které se přidávají během výroby k podpěře převislých částí apod.
- 3) Geometrická cesta spékající konzole je definována plánováním.

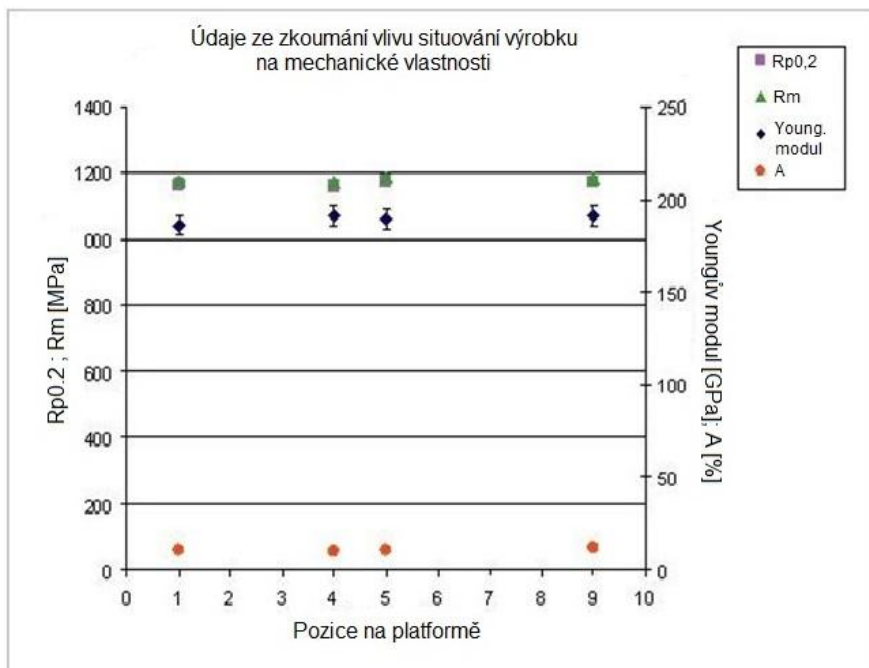
Jelikož všechny stroje obvykle používají soubory STL jako vstup, tak stanovení těchto procesních parametrů vychází z STL dat. Ovšem STL data jsou vytvořena převodem 3D modelu standardní teselací na nepravidelnou trojúhelníkovou síť (STL-Standard Tessellation Language), proto data STL jsou méně přesná než CAD model a zanáší se do dat rozměrová chyba, která je v řádech jednotek setin milimetru. Na obrázku 20 je znázorněn CAD model válce a) a jeho struktura po převodu na STL model b). [3]



Obrázek 20 - (a) CAD model válce; (b) STL model válce [3]

2.5.10 Vliv situování výrobku při výrobě

Je třeba uvažovat, že procesní podmínky výroby se budou mírně lišit v závislosti umístění výrobku ve stavěcí platformě. Například z naměřených hodnot firmy EOS, která se touto problematikou zabývala, vyplývá, že při 3D tisku má situování výrobku minimální vliv na mechanické vlastnosti. Výsledky jsou znázorněny na obrázku 21, kde se porovnávají mechanické vlastnosti svisle postaveného vzorku z materiálu EOS StainlessSteel PH1 v různých lokacích stavěcí platformy. [22]

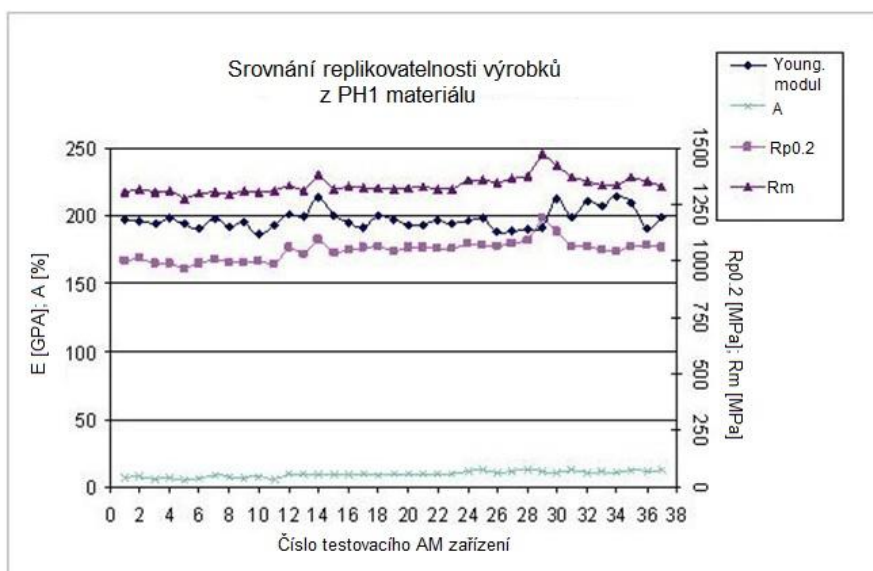


Obrázek 21 - Porovnání mechanických vlastností EOS PH1 [22]

- 1- levý zadní bok**
- 4- střed levého okraje**
- 5- centrum**
- 9- přední pravý roh**

2.5.11 Reprodukovatelnost

Je velice důležité, aby byla umožněna reprodukce stejných dílů, které jsou vyrobené na jiném stroji v jiném období. Proto EOS vytiskla 37 tahových vzorků vyrobených po sobě na stroji EOSINT M 270. Vzorky byly z materiálu EOS CobaltChrome MP1. Na obrázku 22 je porovnání jejich mechanických vlastností. Z naměřených hodnot je patrné, že všechny vzorky vykazují dobrou reprodukovatelnost. [22]



Obrázek 22 - Mechanické vlastnosti vzorků postavených z PH1 na různých pracovištích EOSINT M 270 [22]

2.5.12 Mechanické vlastnosti vysokopevnostní ocele [12]

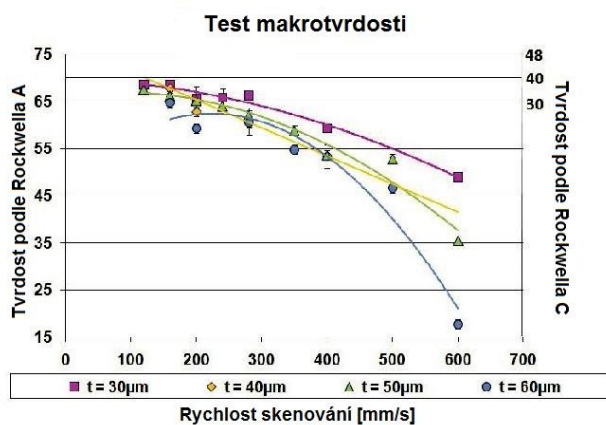
Vysokopevnostní ocele mají dobré materiálové vlastnosti jako je vysoká pevnost a houževnatost, dobrá svařitelnost a rozměrová stabilita při tepelném stárnutí. Tyto ocele vytvrzené tepelným stárnutím se hojně vyskytují v leteckém průmyslu, ve kterém jsou kladeny nároky na vynikající mechanické nároky a svařitelnost materiálu. Další typické uplatnění je v nástrojových aplikacích, kde se vyžadují vysoké nároky na obrobiteľnosť. [12]

Procesní podmínky

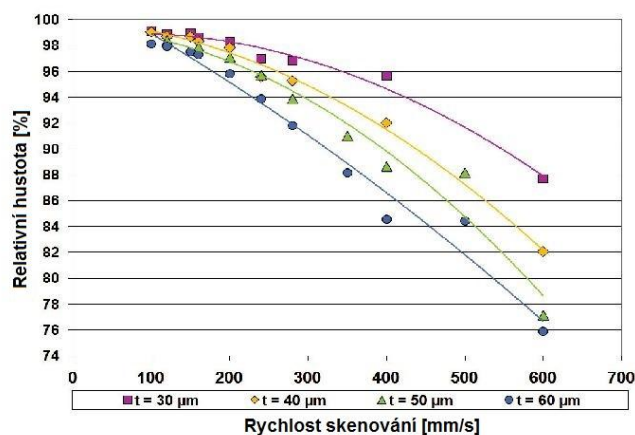
Pro zhotovení vzorků byl použit výrobní systém od Concept Laser M3 Linear. Tento přístroj používá laser o vlnové délce 1,064 nm a průměru laseru 180 μm , který dosahuje maximálního výkonu cca 100 W. Procesní podmínky byly následující: tloušťka vrstvy 30 μm , rychlost skenování 0,15 m/s a velikost překrytí 62 % (rozteč 112 μm). Práškový materiál pro výrobu dílu byl dodán firmami Concept Laser (CL 50WS) a LPW (M300-1). Vzorky byly tepelně zpracovány v atmosféře N_2 a ochlazené na vzduchu. [12]

Vliv procesních parametrů na tvrdost a mikrostrukturu

Vliv tloušťky vrstvy v rozmezí 30 až 60 μm a rychlosti skenování 120-600 mm/s na makrotvrdost je zanesena do obrázku 23a. Oba tyto parametry mají významný vliv na makrotvrdost, jelikož ovlivňují hustotu materiálu části. Relativní hustota (celistvost) části je uvedena na obrázku 23b.



a)

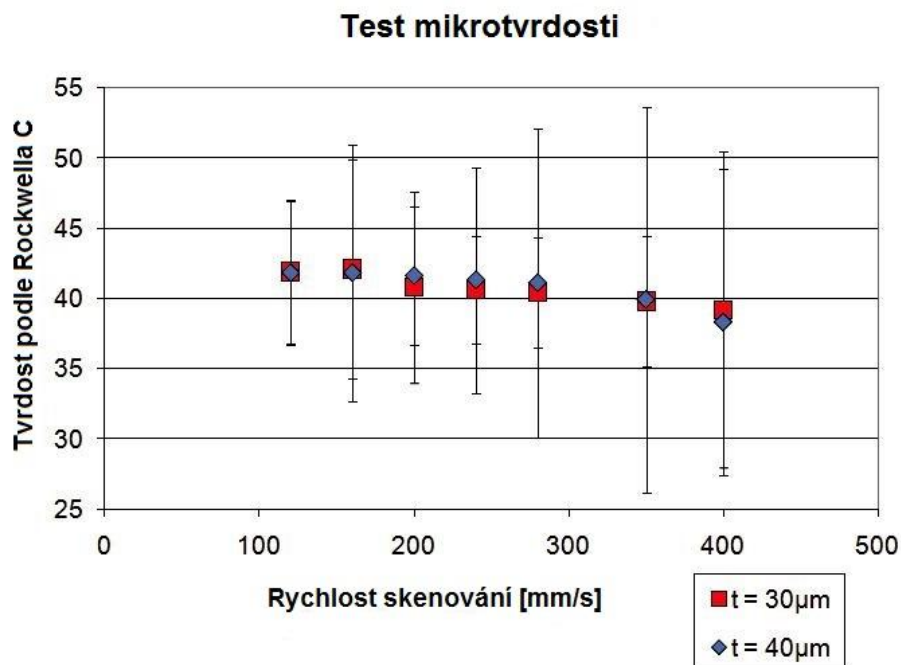


b)

Obrázek 23 - a) Tvrdost vzorků o různých tloušťkách vrstev a rychlosti skenování

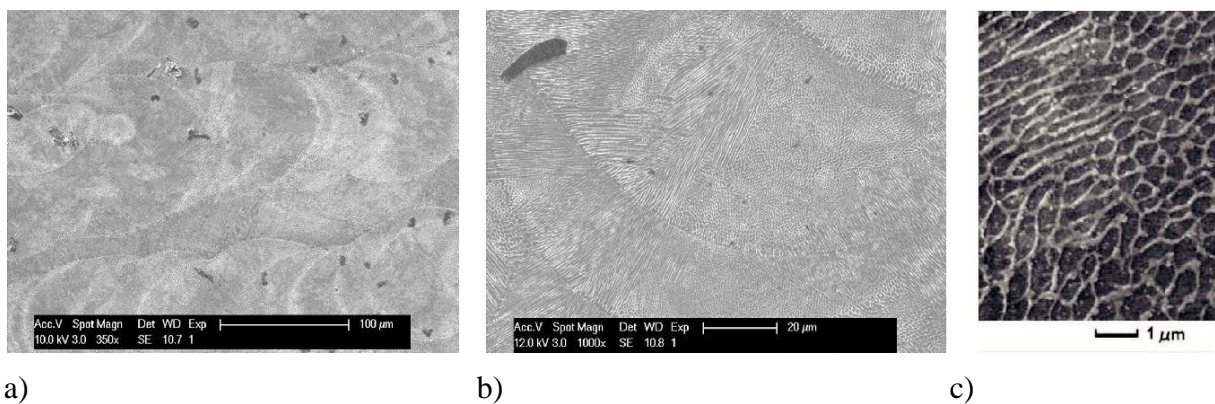
b) Relativní hustota vzorků různých rychlostí skenování a tloušťek vrstev [12]

Na následujícím obrázku 24 je znázorněna závislost tvrdosti na rychlosti skenování. Z grafu na obrázku je patrné, že rychlost ani tloušťka vrstvy nemají téměř žádný význam na mikrotvrdot. Zvětšující rozptyl hodnot měření se zvětšující se rychlostí a snížení tvrdosti je důsledkem obtíží při měření velmi porézních vzorků. [12]



Obrázek 24 - Mikrotvrdot vzorků různých rychlostí skenování a tloušťek [12]

Horní a boční průřezy vzorků byly pozorovány SEM, viz obr 25. Tyto vzorky byly vyrobené skenovací rychlostí 120 mm/s při tloušťce jedné vrstvy 60 μm . Jejich mikrofotografie na levé straně (obr. 25a) znázorňuje obousměrné skenovací spečené stopy. Mikrofotografie 25b ukazuje morfologii dendritického tuhnutí a epitaxního růstu zrn, ten potvrzuje předešlý poznatek, že zrna roste kolmo k ploše xy souřadnicového systému, kde směr z nabývá počtem spečených vrstev. Na obrázku 25c je znázorněna jemnozrnné krystalografické seskupení, jenž je příčinou rychlého tuhnutí, které zabraňuje tvorbě martenzitických lamel. Velikost zrna není větší jak 1 μm , což přispívá k výborné pevnosti a tvrdosti. Tyto poznatky byly ověřeny i u materiálu spečeného na stroji EOS. Na obrázku 4b si lze všimnout tmavé skvrny, z analýzy EDX byla kvalifikována tato skvrna jako kombinovaný oxid titanu a hliníku ($\text{TiO}_2\text{:Al}_2\text{O}_3$). V materiálu byly nalezeny také i jiné oxidy Ti, Mo, Al a Si.



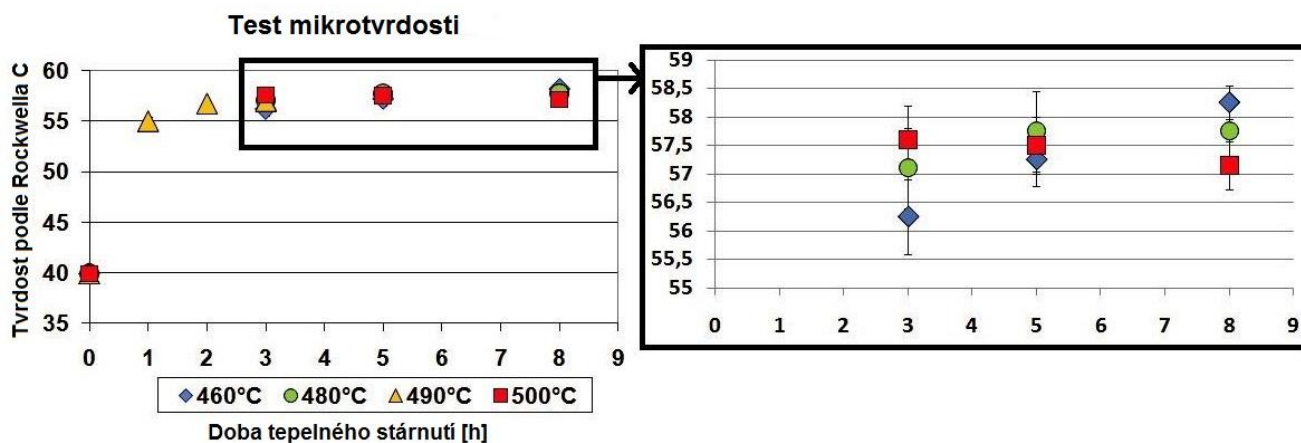
Obrázek 25 - Mikrofotografie vzorků nástrojové ocele 18Ni-300

- a) *Horní pohled průřezu vzorku*
- b) *Pohled z boku na vzorek (bokorys)*
- c) *Jemná dendritická struktura v důsledku rychlého tuhnutí [12]*

Stárnutí vysokopevnostní ocele

Vysokopevnostní ocele tvrzené stárnutím vynikají dobrou pevností a houževnatostí. Proto je do procesu jejich výroby standardně řazeno tepelné stárnutí, které způsobuje v martenzitické matici rovnoměrné rozložení intermetalických precipitátů bohaté na jemný nikl. Tyto precipitáty zpevňují martenzitickou matici.

Ve studii K. Kempena a spol. [12] se testoval vliv změny doby a teploty během procesu stárnutí na mechanické vlastnosti, získané závislosti jsou na obrázku 26. Z těchto získaných závislostí vyplynuly následující postřehy. Je-li maximální teplota stárnutí 460 °C, tvrdost lineárně roste v závislosti na čase. Nicméně pro vyšší teploty s delší dobou stárnutí tvrdost začne mírně klesat, protože se martenzit začne navracet do metastabilní podoby a nastane hrubnutí intermetalických precipitátů. Tepelné stárnutí při 480 °C a době 5 hodin se jeví jako nejvhodnější podmínky pro dosažení nejvyšší tvrdosti, pokud se bere ohled na energetické nároky. [12]



Obrázek 26 - Mikrotvrdost vzorků se stejnými výrobními parametry a různou dobou tepelného stárnutí [12]

Mechanické vlastnosti

U vzorků pro mechanické zkoušky je každá vrstva znovu roztavena, aby se dosáhla maximálně celistvá struktura materiálu. V tabulce je srovnání mechanických vlastností spečeného dílu SLM metodou a vzorkem vyrobeným kováním.

Tabulka 6 - Mechanické vlastnosti nástrojové ocele 300 [12]

	E [GPa]	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	ε [%]	HRC
SLM	163±4.5	1214±99	1290±114	13.3±1.9	39.9±0.1
SLM+stárnutí (5h, 480°C)	189±2.9	1998±32	2217±73	1.6±0.26	58±0.1
Kovaný	180	760-895	1000-1170	6-15	35
Kovaný+stárnutí	190	1910-2020	1951-2041	11	54

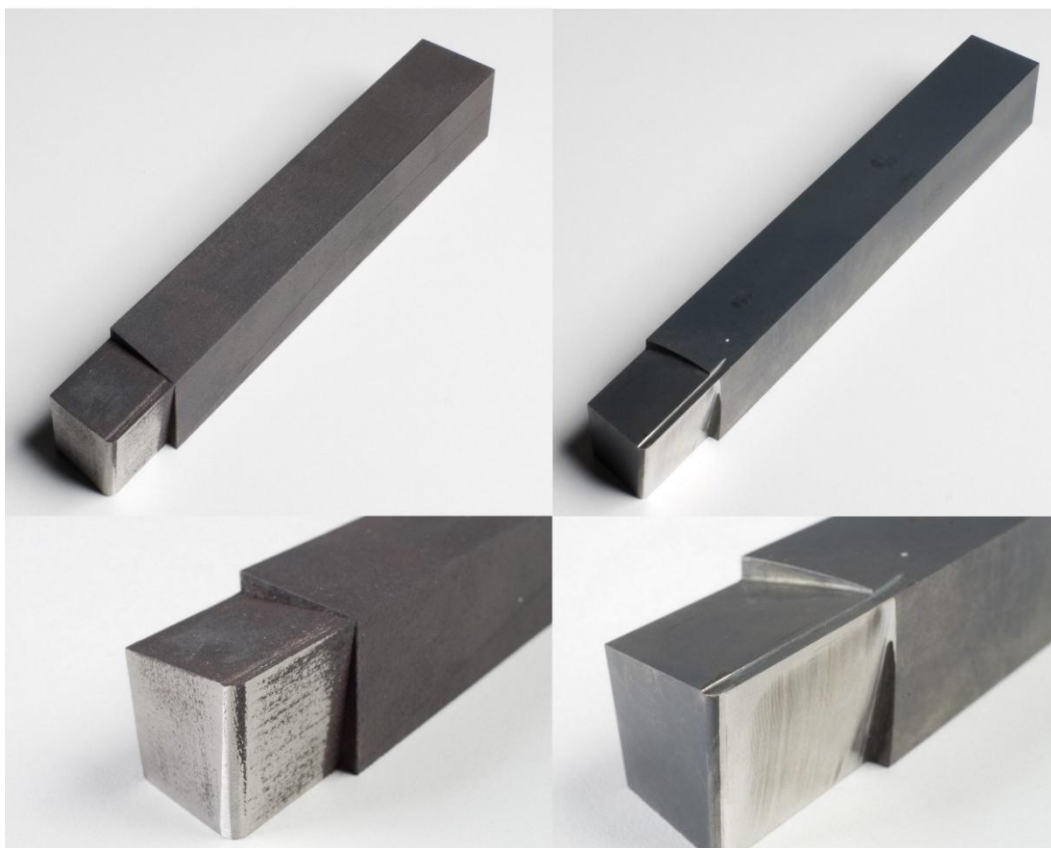
Zkouška rázem v ohybu byla provedená na vzorcích s platnou normou ASTM E32 standard. Tyto vzorky byly vyrobeny SLM technologií a byly pískované. Velikost vzorků byla 10 x 10 x 55 mm se stejným vrubem. Výsledek prokázal snížení vrubové energie vytvrzeného vzorku (480 °C; 5 hodin) o přibližně 35 J v porovnání se vzorkem, který nebyl tepelně upraven, který měl absolutní hodnotu vrubové energie cca 42 J. [12]

3 Využití pro praxi

Následující kapitola se věnuje praktické části bakalářské práce, v níž je zkoumán soustružnický nůž, jenž byl vytištěn výrobním zařízením typu EOSINT M 270 od firmy EOS. Nůž je zhotoven z materiálu EOS Maragingsteel MS1, který je popsán blíže v podkapitole: *2.3 Možnosti využití materiálů pro konstrukci řezných nástrojů*. Pro porovnání je uveden soustružnický nůž z nástrojové ocele 19830 dle normy ČSN 42 0002 téže geometrie, který byl vyroben tvářecí metodou.

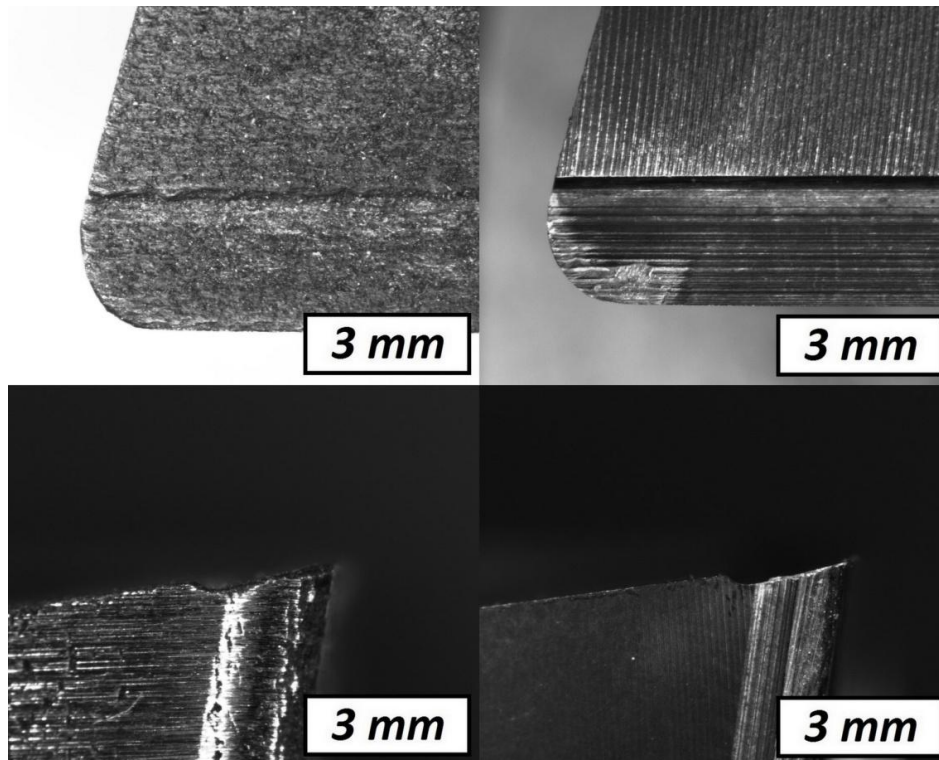
3.1 Geometrie řezného nástroje

Geometrie řezného nástroje odpovídá geometrii CAD modelu, přičemž na výtisku je přidán na všechny plochy offset 0,3 mm. Tento offset slouží jako přídavek na zbroušení ploch, aby se dosáhla požadovaná povrchová drsnost funkčních ploch. U nezbroušeného výtisku se povrchová drsnost pohybuje v tolerančním rozmezí Ra10 – Ra12. Na obrázku 27 je na levé části zobrazen 3D výtisk nože a na pravé straně je pro porovnání soustružnický nůž, který byl vyroben tvářecí metodou. Na obrázku je možné pozorovat, že u AM výrobku jsou některé plochy zabroušeny, čelo nástroje a utvařeč třísky jsou nezbroušeny. U nástroje na pravé straně bylo přeostřeno hlavní ostří nástroje.



Obrázek 27- Pohled: napravo vytisknutý nůž a nalevo tvářený nůž

Detail na břity nástrojů ve stejném rozložení je ukázán na obrázku 28. Přičemž si lze všimnout značné drsnosti u AM výtisku po levé straně. Na pravé straně při pohledu na čelo tvářeného nože (vpravo nahoře) je vidět lehké opotřebení z předešlého obrábění nože, ovšem rozměrová přesnost geometrie nože je stále vyhovující pro srovnání v této bakalářské práci.



Obrázek 28 - Zvětšený pohled na nože; napravo vytisknutý nůž, nalevo tvářený nůž

3.2 Tvrdost řezného materiálu

Materiál, z něž je vyroben řezný nástroj, spadá do kategorie kovů, které lze martenziticky vytvrdit. Proto je vhodné pro zlepšení mechanických vlastností k danému účelu zařadit tepelné stárnutí. Toto tepelné stárnutí je provedeno za pozvolného ohřátí soustružnického nože po dobu 6 hodin v inertní atmosféře na 500 °C. Na této teplotě je ponechán 3D výtisk po dobu 6 hodin a následné ochlazení je pozvolné při chladnutí v peci. V tabulce 7 jsou uvedeny změřené tvrdosti před a po tepelném zpracování. Měření tvrdosti bylo provedeno na tvrdoměru Wolpert Wilson 432SVD.

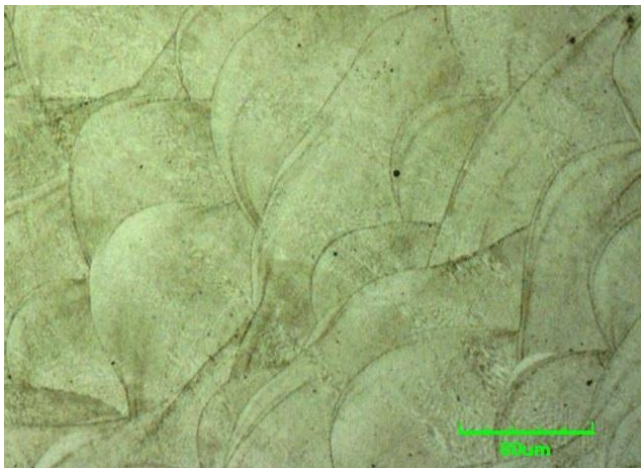
Tabulka 7 - Tvrdost před a po tepelném zpracování

	HV10	HV30
Nástroj před TZ	378-379 (38,7 HRC)	376-379 (38,7 HRC)
Nástroj po TZ	611-616 (56,2 HRC)	605-607 (55,7 HRC)

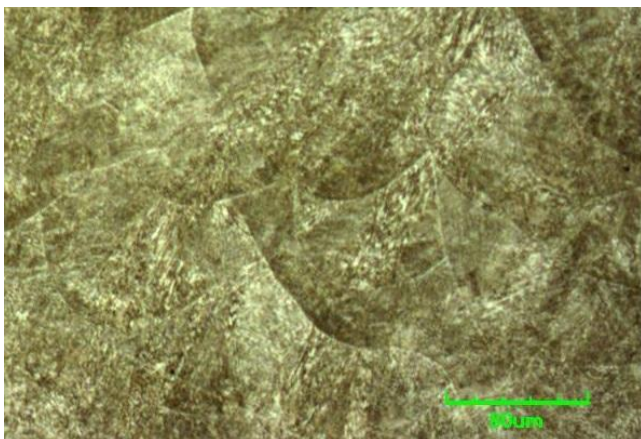
Naměřené tvrdosti nejsou v rozporu s již uvedenou závislostí tepelného zpracování na tvrdosti 3D výtisku martenzitické oceli EOS Maragingsteel MS1 v podkapitole: 2.5.12 *Mechanické vlastnosti vysokopevnostní ocele [12]*. Soustružnický nůž z ocele 19830, lze tepelně zpracovat na tvrdost 65 HRC.

3.3 Mikrografie vzorků

Mikrografie vzorků aditivně vyrobeného nože před a po tepelném stárnutí je uvedena na obrázcích 29 a 30. Snímky byly pořízeny na konfokálním mikroskopu Olympus Lext OLS3000XL ve světelném módu. Rovina řezu těchto vzorků je rovnoběžná s boční rovinou P_f nástroje. Přičemž řezný nástroj byl situován při výstavbě tak, že nástrojová rovina zadní byla rovnoběžná se stavěcí platformou AM zařízení. Mikrografie vzorku na obrázku 29 před tepelným zpracováním je typická pro kovové výrobky AM. Po tepelném zpracování je patrné, že se struktura změnila vlivem rozpadu přesyceného tuhého roztoku (viz obrázek 30).



Obrázek 29 - Mikrografie vzorku před tepelným zpracováním



Obrázek 30 - Mikrografie po tepelném zpracování

4 Závěr

Cílem této práce bylo zjistit, zda lze aditivní výrobou (AM) vyrobit řezný nástroj, který by měl porovnatelné vlastnosti s řezným nástrojem vyrobený z tyčového (tvářeného) polotovaru. Jelikož aditivně postavený nůž byl dodán těsně před termínem odevzdání této práce, nebylo možné provést testy řezivosti a byly provedeny pouze testy tvrdosti a byla zkoumaná mikrografická struktura. Závěry tedy lze vyvodit pouze z těchto dílčích výsledků.

Výsledky měření tvrdostí obou porovnávaných nožů, naznačují, že aditivní výrobou pravděpodobně nelze v dnešní době vytisknout řezný nástroj, který by měl podobné mechanické vlastnosti jako řezný nástroj vyrobený tvářecí metodou. Tvrdost aditivně postaveného tepelně zpracovaného nástroje dosahovala 56 jednotek HRC, přičemž nůž vyrobený klasickou metodou po tepelném zpracování měl tvrdost 65 HRC. Podle poznatků z teorie obrábění, je možné obrábět materiály, které jsou o 5 – 6 HRC měkčí jak řezný nástroj. Proto by se tímto vytištěným nožem mohly nejspíše obrábět pouze materiály do maximální tvrdosti 50 HRC. Do budoucna bude potřebné provést i praktické zkoušky, které tyto předpoklady mohou potvrdit nebo vyvrátit. V neprospěch pro použití AM pro výrobu řezných nástrojů jsou i výrobní náklady, které jsou stále vyšší než u řezných nástrojů klasických metod.

Aditivní výroba z kovu však nachází uplatnění v řadě odvětví, v kterých se již používá s výhodami. V blízké budoucnosti se nejspíše rozšíří ve značné míře ve zdravotnictví, kde se využije nejen její schopnost výroby porézních struktur.

Jako zajímavý směr dalšího výzkumu se jeví spojení aditivní výroby a chemicko – tepelného zpracování, které by mohlo zlepšit mechanické vlastnosti. Zmíněnou problematiku by autor bakalářské práce rád zkoumal v navazujícím studiu.

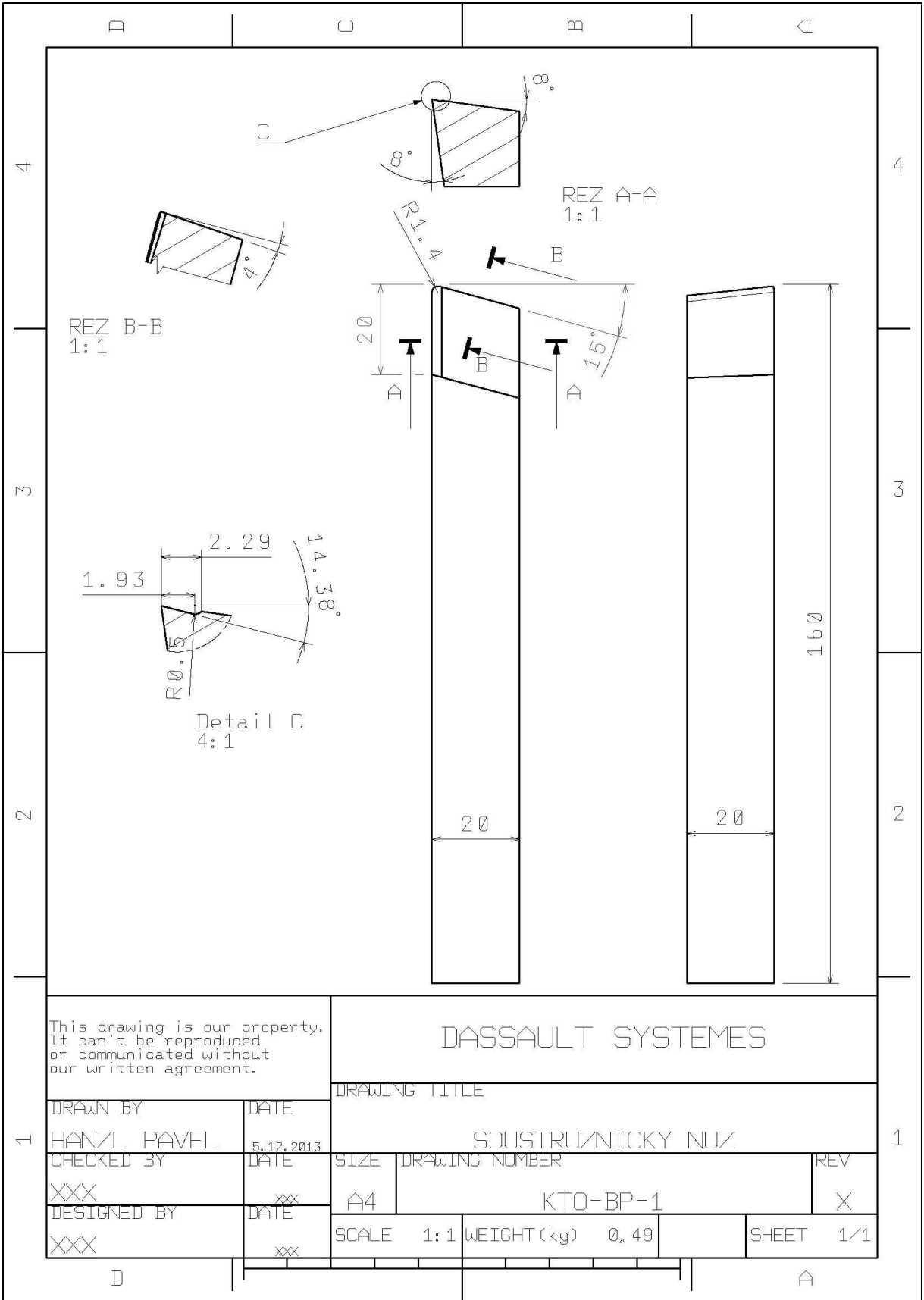
5 Seznam použité literatury

- [1] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B. (2010) Additive Manufacturing Technologies: Generalized Additive Manufacturing Process Chain. Springer
- [2] Selective Laser melting. *Wikipedia* [online]. [cit. 2014-04-01]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting
- [3] Paul, R., Anand, S. (2011) Optimal part orientation in Rapid Manufacturing process for achieving geometric tolerances
- [4] Shellabear, M., Nyrhilä, O. (2004) DMLS-Development History And State Of The Art
- [5] Hinduja, S., Li, L. (2012) Proceedings of the 37th International MATADOR Conference: Comparison of theoretical and practical studie sof heat input in laser assisted additive manufacturing of stainless steel. Springer
- [6] Software. *EOS* [online]. [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: http://www.eos.info/systems_solutions/software
- [7] Shellabear M., Nyrhilä O. (2004) Advances materials and properties of direct metal laser-sintered parts
- [8] *JKZ Bučovice a.s.* [online]. [cit. 2014-01-14]. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/printpdf/produkty/nastrojova-ocel-13343>
- [9] *ARET STEEL – hutní materiál* [online]. [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://www.aretsteel.com/19830>
- [10] Převodní tabulky ocelí. *Tumlikovo* [online]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/prevodni-tabulky-oceli/>
- [11] H13 Tool Steel. *West Yorkshire Steel* [online]. [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: <http://www.westyorkssteel.com/tool-steel/h13/>
- [12] Kempen K. all et. (2011) Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel.
- [13] Sanz, C., Navas, V. G. (2013) *Journal of Materials Processing Technology*
- [14] Xie, J.W., Fox, P., O'Neill, Sutcliffe C.J. (2005) Effect of direct laser re-melting processing parameters and scanning strategies on the densification of tool steels
- [15] Čapková, V. (2013) Technologické aspekty stavby kovových součástí metodou rapid prototyping

- [16] Gu, D., Shen, Y. (2008) Processing conditions and microstructura features of porous 316L stainless steel components by DMLS
- [17] Gu, D., Shen, Y. (2008) Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and kontrol methods
- [18] Delaminace. *ABZ slovník cizích slov* [online]. [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://slovník-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/delaminace>
- [19] Guan, K., Wang, Z. all et. (2013) Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel
- [20] *Innomia* [online]. [cit 2014-02-01]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/sluzby/kovove-prototypy>
- [21] Meier, H., Haberland, Ch. (2008) Experimental studies on selective laser melting of metallic parts. *Materialwiss Werkstofftech* 2008;39:665-70
- [22] Frey, M., Shellabear, M., Thorsson, L. (----) Mechanical Testing of DMLS Parts
- [23] Paul, C. P., Ganesh, P., Mishra, S. K., Bhargava, P., Negi, J., Nath, A. K. (2007) Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components. *Opt Laser Technol* 2007;39:800-5
- [24] Ensz, M. T., Griffith, M. L., Harwell, L. D. (1998) Software development for laser Engineered Net Shaping. In: *Solid Freeform Fabrication Proceedings*
- [25] Murr, L. E., Martinez, E. all et. (2012) Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science
- [26] ANSI. *Wikipedia* [online]. [cit. 2014-04-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/American_National_Standards_Institute
- [27] EOS MaragingSteel MS1. *EOS* [online]. [cit. 2013-12-14]. Dostupné z: <http://www.eos.info/material-m>
- [28] Direct Metal Sintering. Custom Part Net [online]. [cit. 2013-11-14]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
- [29] Additive Manufacturing [online]. [cit. 2014-01-17]. Dostupné z: <http://additivemanufacturing.com/2013/04/13/eos-dmls-economic-precise-and-digital-additive-manufacturing-am-of-removable-partial-dentures-rpd/>
- [31] Staněk, J., Němec, J. (2005) Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací.

PŘÍLOHA č. 1

Technický výkres soustružnického nože



This drawing is our property.
It can't be reproduced
or communicated without
our written agreement.

DASSAULT SYSTEMES

DRAWING TITLE

SOUSTRUZNICKY NUZ

DRAWN BY	DATE
HANZL PAVEL	5.12.2013
CHECKED BY	DATE
XXX	xxx
DESIGNED BY	DATE
XXX	xxx

SIZE	DRAWING NUMBER	REV
A4	KTO-BP-1	X
SCALE	WEIGHT (kg)	SHEET
1:1	0,49	1/1

PŘÍLOHA č. 2

Souhrn mechanických vlastností EOS MaragingSteel MS1

Souhrn mechanických vlastností EOS MaragingSteel MS1 [27]

	výchozí	po vytvrzení
Mez pevnosti		min. 1930 MPa
-horizontálně	1100 ± 100 MPa	2050 ± 100 MPa
-vertikálně	1100 ± 100 MPa	
Mez pružnosti Re0,2		min. 1862 MPa
-horizontálně	1050 ± 100 MPa	1990 ± 100 MPa
-vertikálně	1000 ± 100 MPa	
Modul pružnosti		
-horizontálně	160 ± 25 GPa	180 ± 20 GPa
-vertikálně	150 ± 20 GPa	
Poměrné prodloužení		min. 2%
-horizontálně	10 ± 4 %	4 ± 2 %
-vertikálně	10 ± 4 %	
Tvrдость	33 - 37 HRC	50 - 56 HRC
Únava (Charpyho kladivo)	45 ± 10 J	11 ± 4 J