

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie-technologie
obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv nanášení prášku na proces tisku

Autor: **Radek Kreps**

Vedoucí práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Radek KREPS**
Osobní číslo: **S19B0604P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Téma práce: **Vliv nanášení prášku na proces tisku**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh experimentu
4. Zhodnocení
5. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Bian, L., Shamsaei, N., & Usher, J. M. (2018). *Laser-based additive manufacturing of metal parts: Modeling, optimization, and control of mechanical properties*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Hatami, S., Lyckfeldt, O., Tönnäng, L., & Fransson, K. (2017). Flow properties of tool steel powders for selective laser melting – influence of thermal and mechanical powder treatments. *Powder Metallurgy*, 60(5), 353-362. doi:10.1080/00325899.2017.1344451.
- Kayacan, M. Y., Özsoy, K., Duman, B., Yilmaz, N., & Kayacan, M. C. (2019). A study on elimination of failures resulting from layering and internal stresses in powder bed fusion (PBF) additive manufacturing. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(13), 1467-1475. doi:10.1080/10426914.2019.1655151.
- Malekipour, E., & El-Mounayri, H. (2017;2018;). Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: A review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1-4), 527-550. doi:10.1007/s00170-017-1172-6.
- Spears, T. G., & Gold, S. A. (2016). In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 5(1), 16-40. doi:10.1186/s40192-016-0045-4.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Pavel Hanzl**
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2021**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

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

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Ing. Ivaně Zetkové, Ph.D za cenné rady, podnětné připomínky a trpělivost při zpracování této práce.

Dále děkuji Ing. Martinu Nozarovi, Ph.D. za rady ohledně parametrů pro tisk, Ing. Josefu Machovi a Ing. Josefu Volákovi Ph. D. za provedení rázové zkoušky vzorků.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kreps	Jméno Radek	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetková, Ph.D	Jméno Ivana	
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vliv nanášení prášku na proces tisku		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	53	TEXTOVÁ ČÁST	45	GRAFICKÁ ČÁST	8
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	Bakalářská práce se zaměřuje na analýzu současného stavu nanášení prášku při aditivní výrobě metodou DMLS. Praktická část je provedena pro tři různé nastavení dávkování prášku na zařízení EOS M290. Výsledkem je porovnání naměřených dat a následné ověření hypotézy.
KLÍČOVÁ SLOVA	3D tisk kovů, Aditivní výroba, DMLS, Nanášení prášku, EOS M290, Množství prášku, Dosing factor

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Radek	Name Kreps		
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetková, Ph.D	Name Ivana		
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	The influence of powder recoating on the printing process			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	53	TEXT PART	45	GRAPHICAL PART	8
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis contains an analysis of the current state of powder recoating during the DMLS additive manufacturing process. An experiment was performed on printing device EOS M290 for three different parameters of dosing factor. The main results are a comparison between measured data and hypothesis verification.
KEYWORDS	3D metal printing, Additive manufacturing, DMLS, Recoating, EOS M290, Amount of powder, Dosing Factor

Obsah

Obsah.....	7
Seznam použitých obrázků.....	8
Seznam použitých tabulek.....	8
Seznam použitých zkratek.....	9
1 Úvod.....	10
1.1 Cíl práce.....	10
2 Rozbor současného stavu	11
2.1 Aditivní výroba.....	11
2.2 Powder bed fusion	11
2.2.1 Direct metal laser sintering – DMLS	11
2.2.2 Selective laser sintering – SLS	12
2.2.3 Selective laser melting – SLM	12
2.2.4 Electron beam melting – EBM.....	12
2.3 Metoda DMLS.....	12
2.3.1 Používané materiály	13
2.3.2 Postup výroby.....	13
2.3.3 Proces tisku	13
2.3.4 Postprocessing.....	13
2.4 Nanášení prášku.....	14
2.5 Recoater.....	14
2.5.1 Válcový recoater	14
2.5.2 Břitový recoater.....	16
2.6 Tloušťka vrstvy.....	18
2.7 Vlastnosti prášku	19
2.8 Vliv rozmístění a orientace dílů.....	20
2.8.1 Rozmístění dílů	20
2.8.2 Orientace dílu	21
2.9 Mechanismus nanášení prášku	22
2.10 Množství nanášeného prášku	24
2.10.1 Dosing factor	24
2.10.2 Současný vývoj ve stanovení „dosing factor“	32
3 Návrh experimentu.....	33
3.1 Návrh zkušebního vzorku.....	33
3.2 Návrh rozložení na platformě	34
3.3 Použitý materiál MS - 1	34
3.4 Použité zařízení.....	36
3.5 Použité parametry pro tisk.....	36
3.6 Výsledky tisku	37
3.7 Postprocessing	38
4 Vyhodnocení mechanických vlastností	39
5. Závěr.....	42
Seznam použité literatury.....	43
Seznam příloh.....	45

Seznam použitých obrázků

Obr. 1 Ukázka možností tisku pomocí metody DMLS [8]	11
Obr. 2 Schématické znázornění metody DMLS [9]	12
Obr. 3 Používané druhy recoaterů a) břitový b, c) válcový [5].....	14
Obr. 4 Tříválcový recoater [5].....	15
Obr. 5 Kombinovaný pohyb válcového recoateru [5].....	15
Obr. 6 Princip vibrací při kontaktu recoateru se součástí [12].....	16
Obr. 7 Měkké recoatery – silikonový (průsvitný), materiál NBR (černý) [6]	17
Obr. 8 Recoater z uhlíkových vláken [6]	18
Obr. 9 Schodišťový efekt v závislosti na tloušťce vrstvy h [10].....	19
Obr. 10 Ukázka zrn nástrojové oceli H13 v původním stavu [2].....	19
Obr. 11 Ukázka zrn nástrojové oceli H13 po omílání [2]	20
Obr. 12 Vliv rozmístění dílů - vlevo nevhodné, vpravo doporučené [13]	20
Obr. 13 Vliv natočení dílů - vlevo nevhodné, vpravo doporučené [13].....	21
Obr. 14 Vliv orientace dílu – vlevo nevhodná, vpravo preferovaná	22
Obr. 15 Jev segregace při nanášení prášku [23]	22
Obr. 16 Výsledek simulace nanášení prášku v závislosti na vzdálenosti od vstupního zásobníku.....	23
Obr. 17 Znázornění poklesu spékané vrstvy	24
Obr. 18 Závislost velikosti „Dosing factor“ na velikosti spékané plochy	26
Obr. 19 Tvorba sypného kužele	28
Obr. 20 Schéma pro výpočet „dosing factor“	29
Obr. 21 Znázornění vlivu modulu QMcoating na zaplnění platformy [25]	32
Obr. 22 Znázornění průběhu hodnoty „dosing factor“ při použití modulu QMcoating[25]	32
Obr. 23 a) Zkušební vzorek pro zkoušku rázem v ohybu dle ISO 148-1 b) Tisknutý vzorek .	33
Obr. 24 Návrh podpůrných konstrukcí pod vzorky.....	33
Obr. 25 Návrh rozmístění vzorku na platformě	34
Obr. 26 Zařízení EOS M290 [27].....	36
Obr. 27 Platforma I. tisk - před vložením do žíhací pece.....	37
Obr. 28 Platforma II. tisk - po vyjmutí ze žíhací pece	38
Obr. 29 Platforma III. tisk - po vyžíhání a před oddělením vzorků od základní desky	38
Obr. 30 Proces rozpouštěcího žíhání pro ocel MS-1	39
Obr. 31 Vzorky z I. tisku- vlevo vzorek č. 5; vpravo vzorek č. 20	39
Obr. 32 Pohled na pracovní prostor stroje s výdechem ochranného plynu.....	41
Obr. 33 Porovnání nárazové práce	41

Seznam použitých tabulek

Tab. 1 Mechanické vlastnosti oceli MS-1 ve stavu bez vytvrzení [18]	35
Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli MS-1 ve stavu po vytvrzení [18].....	35
Tab. 3 Chemické složení oceli MS-1[18].....	35
Tab. 4 Parametry zařízení EOS M290 [28].....	36
Tab. 5 Naměřené a vypočtené hodnoty pro zkoušku rázem v ohybu.....	40

Seznam použitých zkratk

AM	Additive manufacturing
CAD	Computer aided design
DMLS	Direct metal laser
SLS	Selective laser sintering
SLM	Selective laser melting
EBM	Electron beam melting
STL	Stereolithography
SW	Software
FR	Forward rotation
CR	Counter rotation
DEM	Discrete element method
RTI	Regionální technologický institut

1 Úvod

Aditivní výroba nebo též AM je relativně nová technologie, jejíž počátky lze najít v 80. a 90. letech minulého století. Od té doby probíhá nepřetržitý vývoj jak ze strany výrobců, tak i výzkumných týmů, kteří neustále posouvají tuto technologii dopředu. Zároveň se ale technologie aditivní výroby stává více dostupná a otevírá nové možnosti jak v klasických odvětvích jako je automotive nebo letecký průmysl, tak i své využití nachází i v lékařství.

Aditivní výroba zahrnuje desítky metod, ale obecně je lze rozdělit do 3 základních skupin, a to Powder – bed fusion (bude popsáno v dalších státech), Flow – based deposition (materiál je nanášen nejčastěji již v roztavené formě) a Sheet lamination (materiál ve formě plechů je vrstven a spékán). Vstupní materiál má nejčastěji charakter prášku, drátu, popřípadě plechu a zásadně ovlivňuje užité vlastnosti. Zájemcům ohledně jednotlivých metod aditivní výroby lze doporučit řadu norem ISO 17296, které se danou problematikou zabývají.

Ačkoliv se na problematiku 3D tisku kovů soustředí mnoho výzkumníků a firem, zůstává mnoho aspektů i samotného procesu, které nejsou dostatečně prozkoumány. Z daného důvodu je nutné věnovat pozornost jak samotnému návrhu výsledného produktu, tak zejména přípravě a samotnému procesu tisku. V případě metod na principu Powder bed fusion velmi často ovlivňuje proces nanášení prášku na stavěcí platformu. Z tohoto důvodu je nutné se zaměřit na tuto problematiku.

Rozmach aditivní výroby ukazuje, jakým směrem se bude ubírat technologický vývoj, jak v průmyslu, tak i mimo něj, v následujících desetiletích. Omezujícím faktorem je v současné době cena výsledných produktů, ale lze očekávat, že s rostoucí poptávkou a dostupností technologie poklesnou i ceny.

1.1 Cíl práce

Cílem práce je zhodnotit současný stav technologie nanášení prášku a její důsledky na proces tisku metodou DMLS z hlediska homogenity materiálu a mechanických vlastností.

Na základě zjištěných poznatků bude navržen experiment za přispění poznatků z odborné literatury a podnětů ze strany odborníků ze Západočeské univerzity v Plzni, především Regionálního technologického institutu.

Cílem práce bude navrhnout spolehlivou hodnotu dávkování prášku potřebnou k nanesení homogenní vrstvy na stavební platformu. Vhodnost nastavení parametru bude posléze ověřena mechanickou zkouškou vytisknutých vzorků.

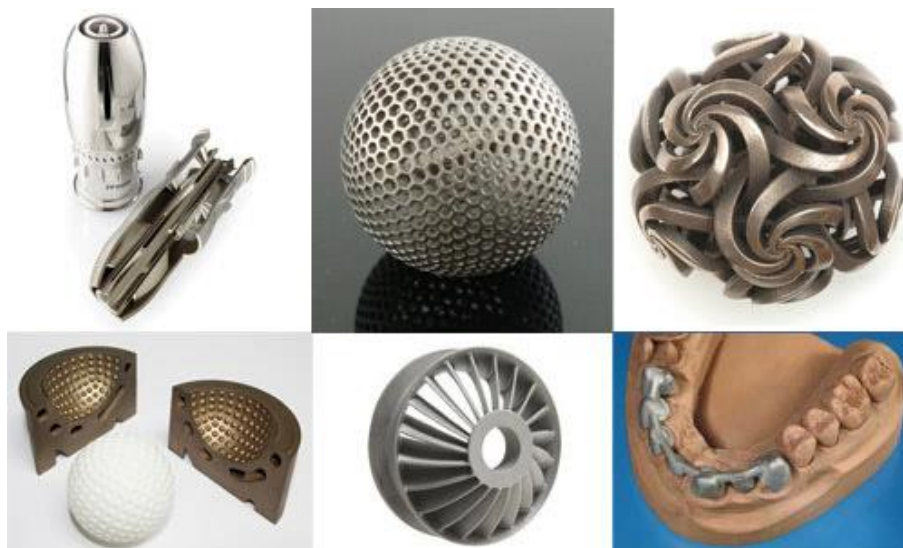
2 Rozbor současného stavu

2.1 Aditivní výroba

Aditivní výroba je progresivně se vyvíjející moderní technologie výroby součástí z různých materiálů, ať už kovových tak i nekovových. Tento způsob výroby skýtá mnohé možnosti a odstraňuje některá omezení typická pro konvenční metody. Namátkou lze uvést například tvorbu tvarově složitých tvarů, navzájem se překrývající prvky, úzké a hluboké otvory a dutiny, apod.

Hlavním podkladem pro výrobu je model v CAD softwaru, který může být vytvořen jak konstruktérem, tak i za použití reverzního inženýrství (laserové skenování). Celý CAD model je následně rozdělen na jednotlivé vrstvy s předefinovanou výškou. Nanesené vrstvy jsou spékány nebo taveny vrstvu po vrstvě za použití energetického zdroje (laser, elektronový paprsek, ...).

Aditivní výroba zahrnuje velké množství metod na základě principu tvorby a použitých materiálů. Vzhledem k tématu této práce budou blíže přiblíženy metody tzv. Powder-bed fusion.



Obr. 1 Ukázka možností tisku pomocí metody DMLS [8]

2.2 Powder bed fusion

Základní princip této metody je založen na postupném vrstvení kovového prášku. Jednotlivé vrstvy jsou spékány nebo taveny za použití výkonného zdroje energie. [1]

2.2.1 Direct metal laser sintering – DMLS

Metoda DMLS využívá prášku, který má chemické složení výsledného výrobku. Zařízení využívá při procesu tisku ochranou atmosféru dusíku nebo argonu. Hlavním zdrojem energie je laser, který spéká daný práškový materiál. Jako finální úkon je nutné provést postprocessing,

který sestává např. z tepelného zpracování, vytvrzování, tryskání, popřípadě i obrábění ... Použití této metody je vhodné pro široké spektrum materiálů. [1]

2.2.2 Selective laser sintering – SLS

Metoda SLS se řadí k nejstarším metodám 3D tisku. Vstupní prášek sestává z nízkotavitelné složky a materiálu, ze kterého bude finální produkt vytvořen. Při samotném procesu laser spéká složku s nízkou teplotou tavení a výsledné díly mají vysokou poréznost. Po samotném procesu tisku následuje tepelné zpracování za vysokých teplot, kdy dojde k vytavení pojící složky a zároveň spečení základního materiálu. Jako ochranná atmosféra při tisku slouží nejčastěji dusík. [1]

2.2.3 Selective laser melting – SLM

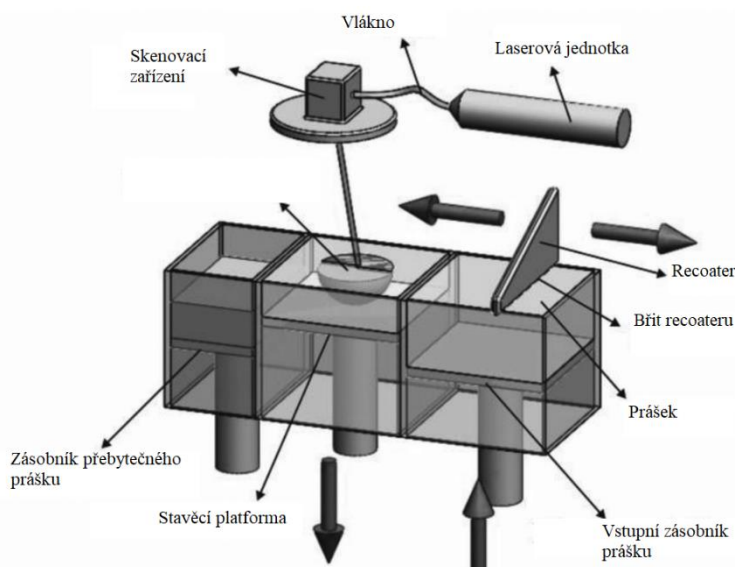
Tato metoda vychází z DMLS. Při použití SLM dochází ke kompletnímu roztavení kovového prášku a vzniklá struktura se vyznačuje nízkou pórovitostí. Z důvodu velkého teplotního gradientu je nutné zařadit do procesu předehřev materiálu a řízené dochlazování finálního produktu. [1]

2.2.4 Electron beam melting – EBM

Metoda EBM využívá usměrněného proudu elektronů k natavení práškového materiálu. V prostoru tisku je nutné vytvořit vakuum, aby nedocházelo ke zpomalování a rozptylování elektronového paprsku. Výsledný produkt z tisku má homogenní strukturu a řízeným ochlazováním lze dosáhnout vysokých užitečných vlastností. Tuto metodu lze použít pouze pro kovové materiály. [7]

2.3 Metoda DMLS

Tato metoda byla vyvinuta firmou EOS GmbH za přispění Rapid Product innovations v roce 1994 [1]. Ve své době se jednalo o revoluční počín, který umožnila i širší komerční využití. Nespornou výhodou byla možnost výroby kovových dílů v rámci jednoho technologického procesu.



Obr. 2 Schématické znázornění metody DMLS [9]

2.3.1 Používané materiály

Hlavní vstupní surovinou pro tisk jsou kvalitní kovové prášky, které dodává i samotná firma EOS. Vlastnosti prášku zásadně ovlivňují kvalitu výsledné součásti z hlediska drsnosti, přesnosti a mechanických vlastností. Nabídka využívaných materiálů je poměrně rozsáhlá. Najdeme zde nerezové oceli, nástrojové oceli, slitiny hliníku, titanu, niklu, mědi, ale i například chrom-kobalt. [1]

2.3.2 Postup výroby

- 1 V CAD softwaru je vytvořen model s přesně definovanou geometrií.
- 2 Tento model je převeden na STL soubor, který je dále zpracováván specializovaným softwarem.
- 3 V daném programu proběhne příprava souboru k tisku, především z hlediska orientace dané součásti. Na základě umístění je model nařezán na tenké vrstvy.
- 4 Jednotlivé vrstvy jsou nahrány do SW (obvykle EOSPRINT), ve kterém je nastavena orientace dílů vůči nanášecímu elementu a pozice dílu na stavěcí platformě
- 5 Data jsou nahrána do tiskárny, ve které je již připraven prášek, ochranná atmosféra a stavěcí platforma.
- 6 Je spuštěn proces tisku.
- 7 Postprocessing

2.3.3 Proces tisku

Metoda DMLS využívá prášku, který má chemické složení výsledného výrobku a zrnitost dle požadovaných mechanických vlastností. Při tisku je ze vstupního zásobníku tenká vrstva nanášena vrstva za pomoci nanášecího pravítka (často označovaného jako Recoater). Tloušťka vrstvy se odvíjí od použitého materiálu a požadované přesnosti výsledného produktu a pohybuje se v rozmezí 20 až 80 μm . Posléze dojde ke spečení prášku pomocí laserového paprsku pouze v místech, které zaujímá řez součástí v dané výšce tisku. V okamžiku, kdy je materiál kompletně spečen v dané vrstvě, poklesne stavěcí platforma níže o tloušťku jedné vrstvy a celý proces se opakuje. Zařízení využívá při procesu tisku ochranou atmosféru dusíku nebo argonu. Výběr vhodné atmosféry je v zásadě ovlivněn použitým spékáním materiálem a použitým zařízením [1].

2.3.4 Postprocessing

Nepostradatelnou součástí celého procesu je tzv. postprocessing, který zahrnuje široké spektrum operací. Po skončení tisku je přebytečný volný prášek odsát a lze ho po přesetí využít pro další tisk. Z povrchu vytištěné součásti je odstraněn veškerý nespěčený prášek. V některých případech je nutné použití dodatečného tepelného zpracování – žíhání, při kterém dojde k eliminaci vnitřního pnutí. Dle požadavků a materiálu lze rovněž provést vytvrzování. Při požadavku na vzhled povrchu pak mohou být zařazena operace, jako je například broušení,

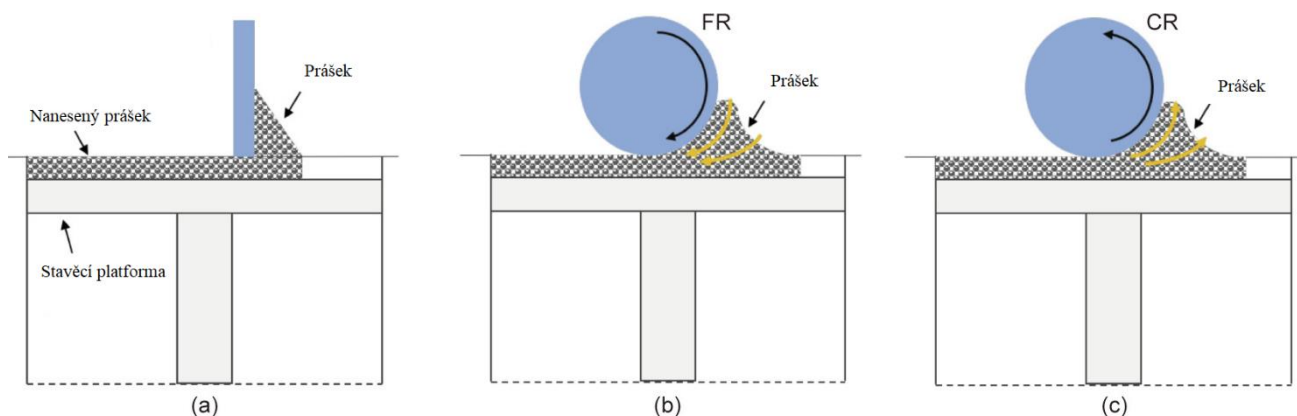
leštění, tryskání, elektrochemické čištění, Výsledné výrobky lze často i pokovovat chromem nebo niklem, čímž lze zvýšit odolnost vůči opotřebení a korozi. [1]

2.4 Nanášení prášku

Pro samotný proces tisku je zásadní rovnoměrné rozprostření prášku po stavěcí platformě. V praxi ale vznikají v takovémto povrchu různé nerovnosti, což může mít negativní vliv na proces tisku a finální produkt. V následujících statích budou nastíněny, některé aspekty ovlivňující nanášení prášku a tedy i samotný proces tisku.

2.5 Recoater

Recoater je podstatnou součástí všech Powder-bed fusion metod. V praxi se využívají několik mechanismů. Často jsou založeny na principu rotujícího válce nebo mají tvar břitu. Při pohybu recoateru je nutné zajistit dostatečné množství prášku, který se pohybuje před ním, což umožňuje vytvořit rovnoměrnou tloušťku vrstvy. Prášek se nemusí přesouvat ze vstupního zásobníku, ale může se přímo nasypávat před recoater. [5]



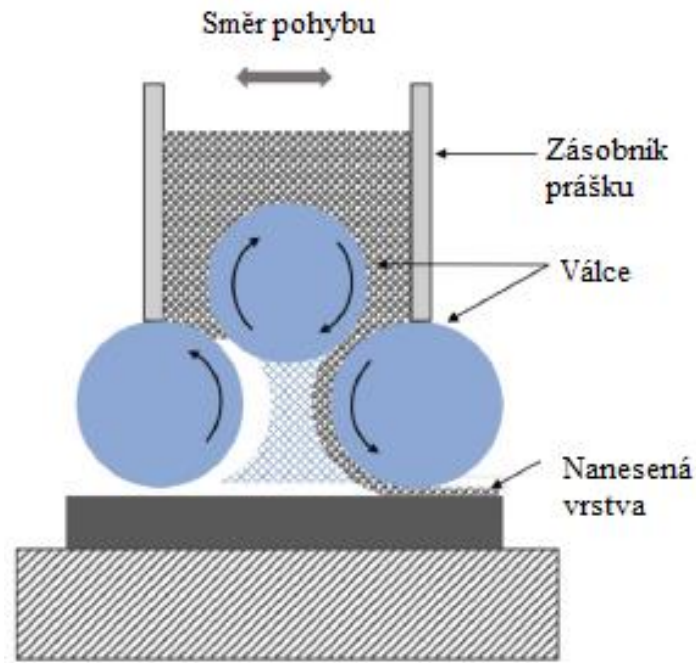
Obr. 3 Používané druhy recoaterů a) břitový b, c) válcový [5]

2.5.1 Válcový recoater

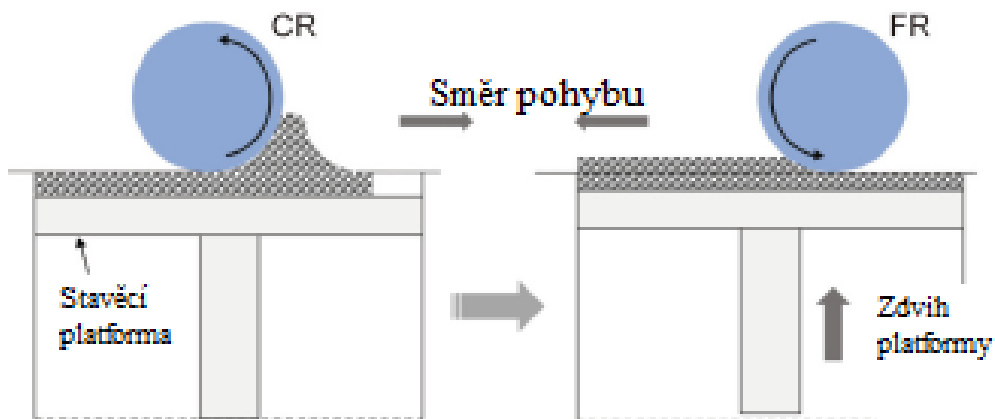
U této varianty v první řadě závisí na směru otáčení válce, viz obrázek 3. Jednou možností je rotace ve směru pohybu celého nanášecího zařízení, často označována v anglické literatuře FR (forward rotation). V daném případě dochází k vtahování prášku a k jeho zhutnění pod válcem. Takto vytvořená vrstva umožňuje tvorbu součástí s menší porézností. Nevýhodou je sklon k ulpívání zhutněného prášku na válci a následné tvorbě prohlubní v nanesené vrstvě. Ulpívání ve velké míře spjata s množstvím prášku, který se pohybuje před válcem. Druhou možností je rotace proti směru pohybu nanášecího zařízení, označovanou jako CR (counter rotation). V tomto případě nedochází ke zhutnění a tím spojenému ulpívání prášku.[5]

Hlavní nevýhodu rotace ve směru FR – ulpívání, se s úspěchem daří eliminovat implementací různých technických řešení. Jedná se například o spojení zásobníku prášku, kdy se pohybuje

společně s recoaterem, a nanáší definovaný objem materiálu. viz obrázek 4. Další metodou je použití smyslu rotace CR pro prvotní nanesení prášku. Při návratu válce do počáteční polohy dojde vlivem změny směru posuvu k pohybu ve smyslu FR. Při zpětném pohybu se stavěcí platforma přizvedne o velikost zhutnění nanesené vrstvy. viz obr. 5, čímž se výrazně eliminuje ulpívání na válci. [5]



Obr. 4 Tříválcový recoater [5]



Obr. 5 Kombinovaný pohyb válcového recoateru [5]

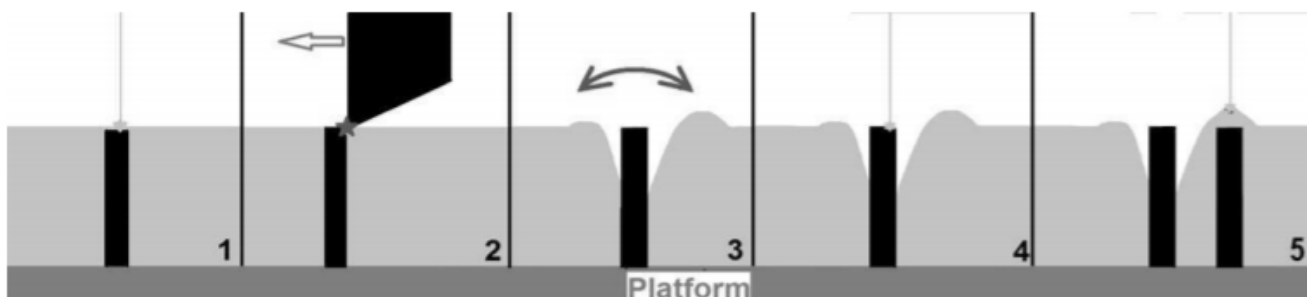
2.5.2 Břitový recoater

Břit má danou určitou pracovní geometrii, jež umožňuje kvalitní rozprostření prášku a zhutnění v povrchové vrstvě. V praxi firma EOS dodává dva základní typy břitových recoaterů – tvrdé a měkké. Při pohybu vzniká v prášku smykové napětí, které je často přenášeno i do předešlé spečené vrstvy. To může být odstraněno za pomoci poddajnějšího materiálu břitu.

Tvrdé recoatery

Tvrdé recoatery jsou dodávány jako standartní vybavení tiskáren a jsou na ně dimenzovány veškeré procesy, protože umožňují kvalitní a opakovatelný tisk při přednastavených parametrech. Geometrie břitu při pohybu břitu vytváří kompaktní vrstvu prášku, ale zároveň dochází k odstraňování rozstříku materiálu po spečení. Rozstřík je problematický z hlediska, nedostatečného propojení s podkladovou vrstvou. [6] Celý břit je koncipován jako monolitní s délkou větší, než je šířka stavěcí platformy. Pouze tak, lze zamezit nerovnoměrnému nanesení vrstvy prášku. [6]

Nespornou výhodou tvrdých recoaterů je jejich odolnost vůči opotřebení a zejména vůči abrazivnímu otěru. Jejich rozměrová a tvarová stálost je důležitým aspektem pro jejich použití. Tuhost je ale v některých případech zároveň nevýhoda, protože při kontaktu recoateru s tisknutým dílem může dojít k zdeformování dílu. K tomuto jevu nejčastěji dochází například v případě zborcení podpůrných konstrukcí nebo deformacemi z důvodu velkého množství vneseného tepla během tisku. V případě tisku tenkých dílů (např.: podpůrných konstrukcí) se objevují vibrace vyvolané kontaktem dílu s recoaterem. V tomto případě se výkmitem tisknuté součásti do stran vytvoří volný prostor okolo dílu a dojde ke zvětšení tloušťky vrstvy prášku v přilehlém prostoru. Se zvětšením tloušťky pak stoupá riziko nedostatečného spečení materiálu, a tedy vzniku vad. K odhalení problému, pak dojde často až během post – processingu. [12]



Obr. 6 Princip vibrací při kontaktu recoateru se součástí [12]

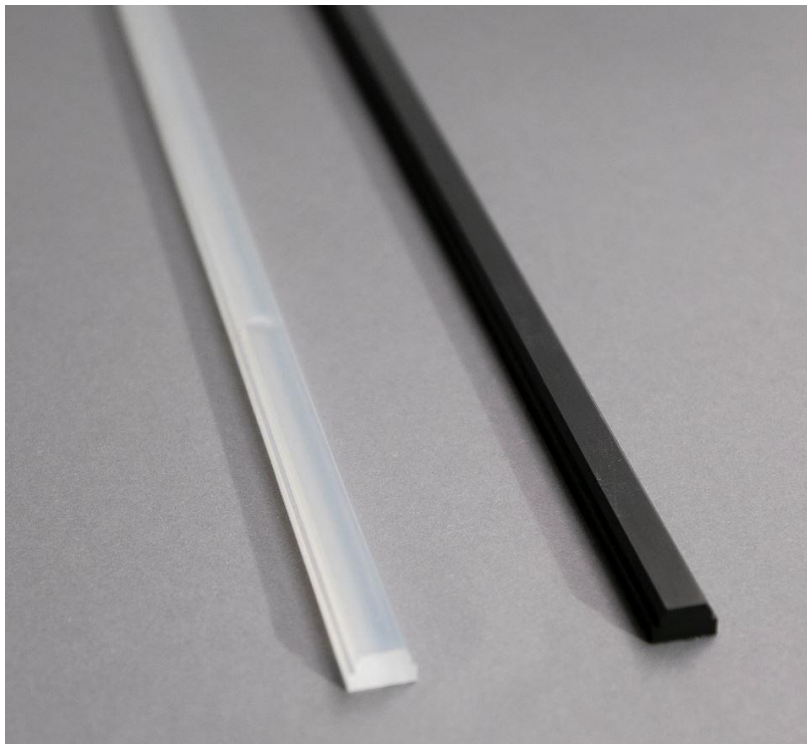
Břity tvrdých recoaterů jsou vyráběny z buď z rychlořezné oceli nebo oxidické keramiky ZrO_2 . Recoater z rychlořezné oceli má využití především u nemagnetických materiálů, což zamezuje ulpívání prášku na břitu. Výhodou rychlořezné oceli je výborný poměr mezi tvrdostí a houževnatostí. V případě poškození lze břit přebrousit. Keramické recoatery se používají především pro magnetické materiály.[6] Keramika se vyznačuje vysokou rozměrovou stálostí, chemickou odolností, a především vysokou tvrdostí. Vysoká tvrdost je ale spojena s nízkou houževnatostí, což má za následek náchylnost k vyštípnutí ostří. Takto vzniklý žlábek vytváří

„vlnku“, která by neměla zasahovat nad tisknutou část. Dle M. Wohlfarta je nutné břit v případě výrazného poškození vyměnit, protože broušení v daném případě není možné z důvodu vysoké křehkosti keramiky. [6]

Měkké recoatery

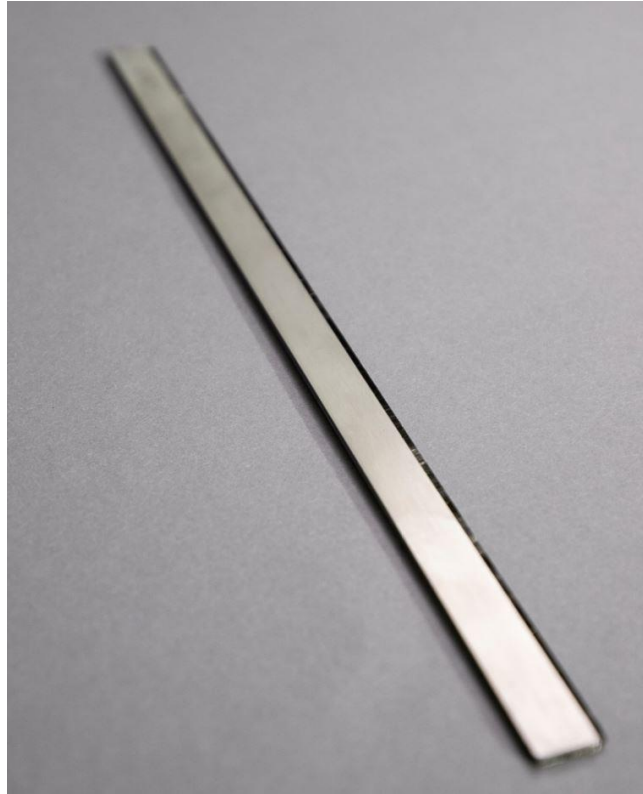
Předností měkkých recoaterů je zejména eliminování smykových sil při pohybu břitu. Používané materiály jsou většinou poddajné, takže se dokáží přizpůsobit různým nerovnostem. Flexibilita ale způsobuje, že nanášený prášek není zhutněn tak jako při použití tvrdých recoaterů.

Měkké recoatery nacházejí své uplatnění zejména u dílů s velkou štíhlostí. V případě kontaktu s obrobkem nevzniká riziko poškození tisknutého dílu. Místo toho ale poddajnost břitu způsobuje nekonzistentnost tloušťky nanesené vrstvy, což nemusí být vhodné z hlediska rozměrové přesnosti. Problematické je použití měkkých recoaterů v aplikacích, kde je vyžadována vysoká čistota vstupního prášku, a tedy i výstupního produktu. Při kontaktu břitu s práškem dochází k otěru, a tedy i ke kontaminaci materiálu. [6]



Obr. 7 Měkké recoatery – silikonový (průsvitný), materiál NBR (černý) [6]

Používané materiály pro měkké recoatery jsou uhlíková vlákna, silikon a NBR. Recoatery z uhlíkových vláken jsou dlouho používané a oproti ostatním materiálům nevynikají vyššími užitnými vlastnostmi, ale především jsou oproti polymerním recoaterům výrazně drahé. Použití NBR je omezeno maximální teplotou 80°C. Naopak silikon je vhodný i pro vyšší teploty. [6]



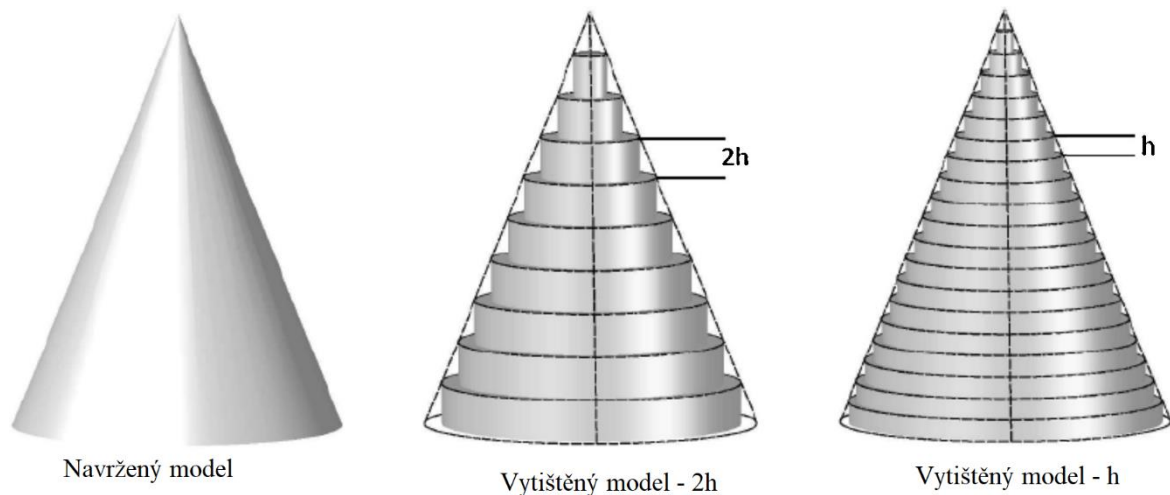
Obr. 8 Recoater z uhlíkových vláken [6]

2.6 Tloušťka vrstvy

Tloušťka vrstvy výrazně ovlivňuje nejen mikrostrukturu a mechanické vlastnosti, ale rovněž má dopad na rozměrovou a tvarovou přesnost finálního produktu. V zásadě se jedná o proměnlivý parametr, jehož volba se řídí především výrobcem s ohledem na různá hlediska pro dosažení co nejlepšího výsledku za přijatelný čas.

Na tloušťce materiálu je závislý tzv. schodišťový jev, který je dán již samotným principem výroby. S rostoucím rozměrem tloušťky h se výrazně mění přesnost povrchu vůči jmenovitému rozměru, což je znázorněno na obrázku 9.

Při výrobě pomocí DMLS se nanášená tloušťka prášku pohybuje v rozmezí 20 až 80 μm (lze ji v softwaru měnit před započítáním tisku dle potřeby). Tato hodnota není konstantní během celého tisku. Ve skutečnosti tento rozměr narůstá. Výsledkem je zvětšující se mohutnost vrstvy, kterou je nutné spéct. Tloušťka se postupně ustaluje na přibližně dvojnásobku původně nastavené hodnoty [11].

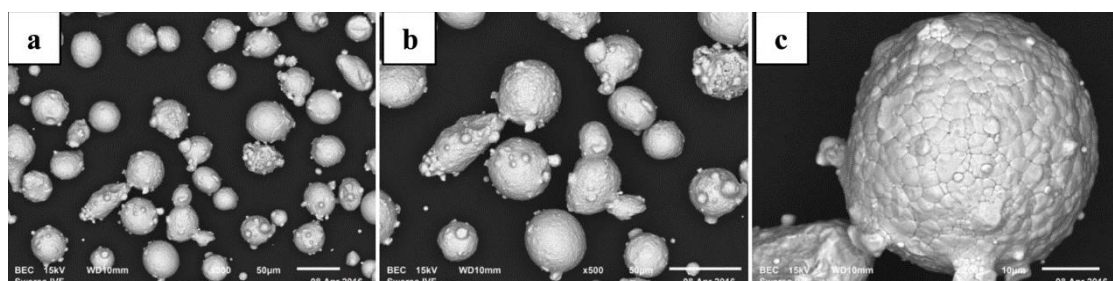


Obr. 9 Schodišťový efekt v závislosti na tloušťce vrstvy h [10]

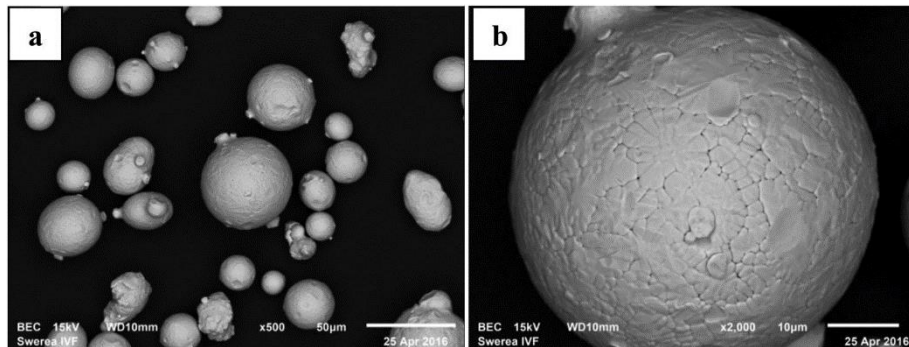
2.7 Vlastnosti prášku

Velikost zrna prášku a tvar částic ovlivňují především schopnost vytvořit kompaktní vrstvu při nanášení za pomoci bříty. V praxi výrobci udávají pro dodávané materiály rozmezí velikosti částic s předpokladem největšího podílu některé zrnitosti na základě pravděpodobnostního rozdělení. Nelze tedy úplně vyloučit přítomnost částic prášku, které mají větší rozměr než nanášená vrstva, což nejčastěji končí tvorbou rýh a drážek v nanesené vrstvě [2].

Často opomíjenou vlastností prášku je tzv. tekutost. Ta úzce souvisí s velikostí prášku, kdy jemnější částice se vyznačují vysokým součinitelem tření z důvodu velké styčné plochy mezi jednotlivými částicemi. Zlepšení tekutosti prášku lze docílit například omíláním popřípadě i žiháním prášku. Omílání má za následek vyhlazení povrchu částice a žihání pak vytvoří oxidickou vrstvu s nízkým součinitelem tření ale zhoršenou soudržností. Vzhledem k tomu, že autoři Hatami a Lyckfeldt v rámci experimentu použili k tisku metodu SLM, při níž prášek roztaven a tedy dochází k rozrušení oxidické vrstvy. Při metodě DMLS, ale nemusí být narušena tato vrstva, což může zapříčinit vznik vad uvnitř materiálu, čímž by došlo ke snížení mechanických vlastností. [2]



Obr. 10 Ukázka zrn nástrojové oceli H13 v původním stavu [2]



Obr. 11 Ukázka zrn nástrojové oceli H13 po omílání [2]

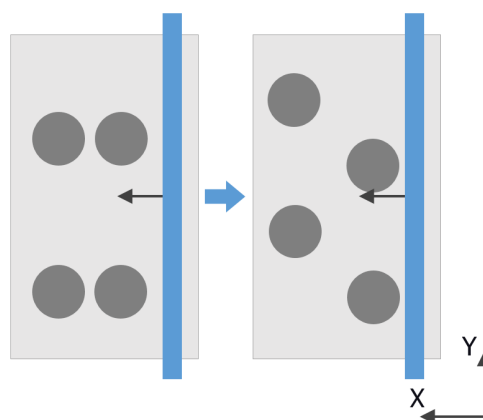
Další aspekt, který se projevuje při nanášení prášku, je koheze. Koheze je potřebná pro vytvoření kompaktní vrstvy. Podle výpočtů a pokusů C. Meiera [17] se koheze zvětšuje se zmenšující velikostí částic, která se ale nepříznivě projevuje na kvalitě spečené vrstvy. Koheze se rovněž uplatňuje při kontaktu s nanášecím pravitkem. Předpokladem je zamezení adheze k břítu recoateru, což lze provést optimalizací geometrie samotného pravitka. [17]

2.8 Vliv rozmístění a orientace dílů

Vhodné rozmístění dílů na stavební platformě výrazně ovlivňuje nejen samotný proces tisku, ale především kvalitu výsledného produktu. [13]

2.8.1 Rozmístění dílů

Při umístění dílů na platformu je nutné začínat, co nejbližší vstupnímu zásobníku, aby bylo zajištěno dostatečné pokrytí. Dále je nutné se vyvarovat vyřádkování dílů za sebou ve směru pohybu recoateru viz. obr. 12. V případě vyrovnání za sebou, se zvyšuje riziko, že poškození jedné součásti může vyústit k poškození více dílů [14] nebo může dojít k lokálnímu vyčerpání prášku – nedostatečné tloušťce vrstvy [20]

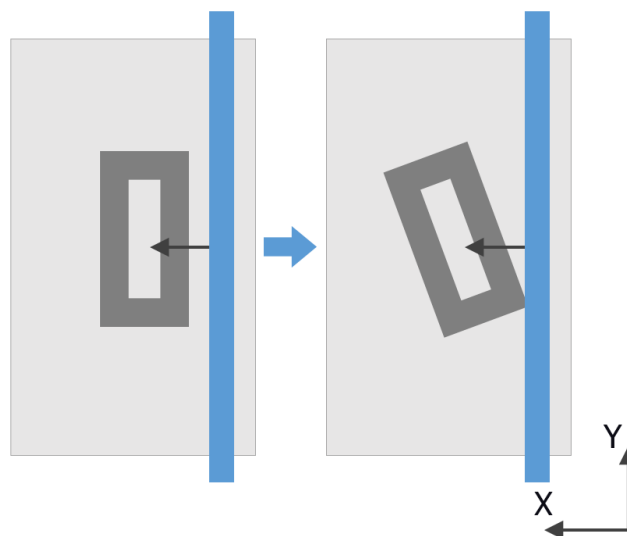


Obr. 12 Vliv rozmístění dílů - vlevo nevhodné, vpravo doporučené [13]

Při rozmístění dílů je rovněž nutné dbát na zajištění dostatečné vzdálenosti mezi jednotlivými prvky. Nejčastěji je doporučováno minimálně 0,5 mm. Malá vzdálenost ale sebou nese riziko, že může dojít vlivem deformací ke kontaktu dílů a ty následně nepůjdou oddělit.

Dále se v malé mezeře může ulpívat částečně spečený prášek, což stěžuje postprocessing. Špatný odvod tepla pak zvyšuje vnitřní pnutí v součásti, a tudíž i možnost vzniku výrazných deformací. Z těchto důvodů je doporučeno, kde je to možné co největší rozestupy mezi součástmi. [14, 16]

Při tisku součástí s rovinnými stěnami je nutné součást natočit minimálně 5° vůči recoateru. Důvodem je zmenšení vnášené smykové síly při nanášení prášku recoaterem. V případě paralelního uspořádání může dokonce dojít k poškození tisknuté součásti nebo i k zastavení recoateru. [13]



Obr. 13 Vliv natočení dílů - vlevo nevhodné, vpravo doporučené [13]

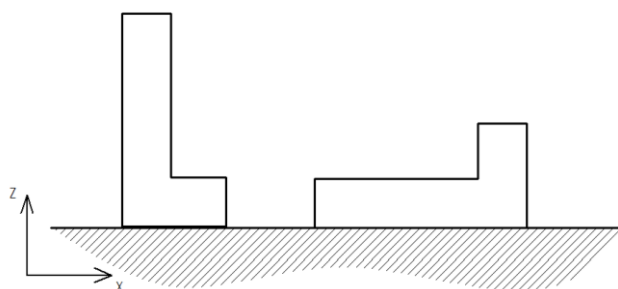
Tenké stěny je pak vhodné umisťovat kolmo vůči recoateru z důvodu eliminace vibrací, jak bylo popsáno v jedné z předešlých statí.

2.8.2 Orientace dílu

Orientace dílu v zásadě ovlivňují především technologické možnosti tisku. Při návrhu a především při přípravě je nutné dbát na určité technologické zásady, které mají zásadní vliv na úspěšnost tisku. Vhodnou orientací lze dosáhnout úspor nejen času, ale i materiálu. Zřetel by však měl být kladen na funkci součásti. V současné době je kladen důraz na nalezení optimálního poměru mezi dobou tisku a kvalitou výsledného povrchu.

2.8.2.1 Minimalizace výšky součásti

Jednou ze zásad je minimalizace výšky tisku, princip je znázorněn na obrázku 14. Výsledkem je redukce potřebného času pro tisk z důvodu efektivnějšího využití tiskového procesu. Nezanedbatelné je rovněž množství využitého prášku, který je potřebný k plnění platformy. [14]



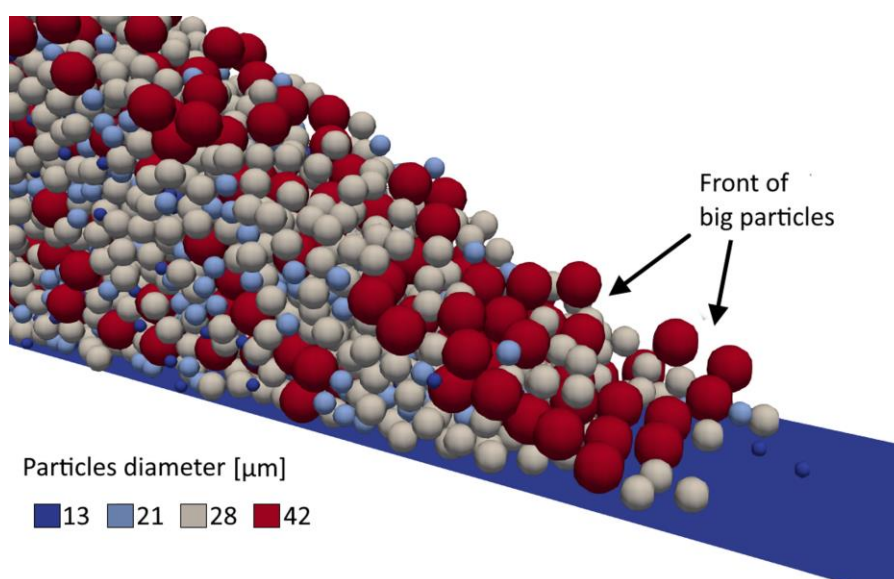
Obr. 14 Vliv orientace dílu – vlevo nevhodná, vpravo preferovaná

2.9 Mechanismus nanášení prášku

Proces nanášení prášku je stěžejní úkon pro tvorbu součásti, který avšak není zevrubně prozkoumán. Hlavní příčinou je velice složité a v některých případech i nemožné monitorování daného procesu v reálném čase. [23]

Jako velice účinnou pomůckou se uplatňuje různé matematické simulace, především metodou diskretních částic, často označovanou jako DEM. Tato metoda má simuluje chování jednotlivých částic v závislosti na jejich vzájemném působení, ale bere v potaz i působení vnějších faktorů (gravitace, vibrace, atd.). [24]

Simulace, jejíž výsledky byly prezentovány ve studii [23], byly provedeny pro dvě rychlosti nanášení, a to 20 a 100 mm/s, velikost částic pak odpovídala pravděpodobnostnímu rozdělení běžně dodávaných prášků. Jako první byl simulován proces v zásobník prášku, kdy bylo pozorován pokles množství zbytkového prášku v zásobníku až o 27% při vyšší rychlosti. Dále bylo zjištěno, že rychlost ovlivňuje dynamický sypaný úhel – větší rychlost recoateru má za následek větší úhel. S tímto zjištěním souvisí i tzv. segregace částic, která je vyobrazena na obrázku 15. Větší částice mají tendenci se zachytávat na čelní straně hromádky prášku. Tento

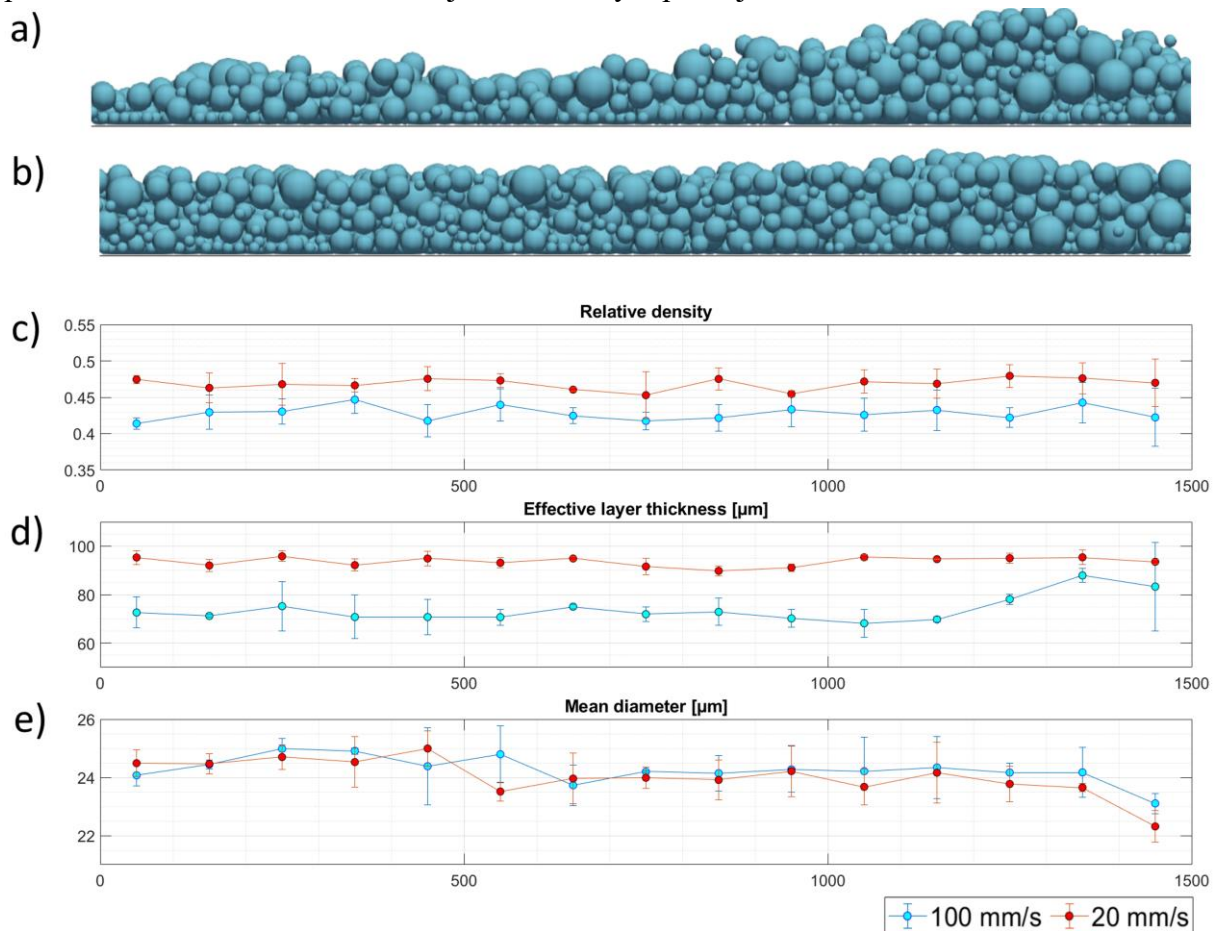


Obr. 15 Jev segregace při nanášení prášku [23]

efekt byl markantnější při menších rychlostech nanášení, kdy se výrazněji projevil vliv gravitace. [23]

Na obrázku 16 jsou vyobrazeny některé aspekty, které byly dále vyhodnoceny. V části a) a b) je zachycen stav při rychlosti nanášení 100 a 20 mm/s. Je patrné nahromadění materiálu v pravé části především při vyšší rychlosti. Tento jev byl pozorován v místech, kde se objevila nějaká pevná překážka (například hranice mezi platformou a zásobníkem přebytečného prášku). Některé částice, které uvíznou mezi touto překážkou a recoaterem, jsou vymrštěny vlivem vzniklých sil zpět na již nanesenou vrstvu prášku. Tento jev je potvrzen i na obrázku 16d), kdy je patrný nárůst efektivní tloušťky vrstvy. [23]

Na obrázku 16c) je znázorněn průběh relativní hustoty v závislosti na vzdálenosti od zásobníku. Je zřejmé, že při rychlosti 20 mm/s se vytvoří více rovnoměrná vrstva prášku, která poskytuje stabilní základ pro další proces spékání. Na druhé straně se dojde k výraznému prodloužení doby tisku. Na snímku e) pak je zjevný pokles středního průměru částice po celé délce nanášení. Autoři tento jev připisují především segregaci částic, kdy větší částice jsou nanášeny přednostně, zatímco menší částice jsou nanášeny v pozdějších fázích. [23]



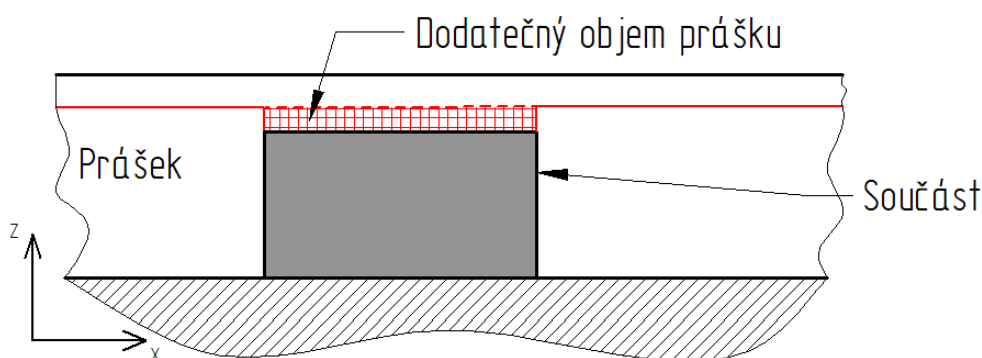
Obr. 16 Výsledky simulace nanášení prášku v závislosti na vzdálenosti od vstupního zásobníku

a) Nanosená vrstva při rychlosti 100 mm/s; b) Nanosená vrstva při rychlosti 20 mm/s; c) Relativní hustota v závislosti na vzdálenosti; d) Efektivní tloušťka vrstvy v závislosti na vzdálenosti; e) Střední průměr v závislosti na vzdálenosti

2.10 Množství nanášeného prášku

Množství nanášeného prášku je důležité z hlediska vytvoření rovnoměrné, kompaktní vrstvy na stavěcí platformě. Objem prášku, který je přenášen ze vstupního zásobníku, by měl být vyšší než objem nanášené vrstvy. Při rozmisťování na platformu platí doporučení: Vkládat nejobjemnější a nejvyšší součásti co nejbližší vstupního zásobníku. [11]

Přesun velkého množství prášku má rovněž vliv na vznik tzv. lavinového efektu, který způsobuje, že spečeniny a jiné nečistoty jsou unášeny na povrchu až do zásobníku přebytečného prášku. [11,12]



Obr. 17 Znárodnění poklesu spěkané vrstvy

Množství prášku se v průběhu tisku mění především s ohledem na velikosti spěkané plochy. Spečený prášek zaujímá menší objem, než prášek nespečený. Při nanášení další vrstvy pak je nutné ze zásobníku přenést větší množství prášku viz. obr. 17. Velikost dávky je potřebné v průběhu tisku měnit, což sebou může nést některá úskalí.

V případě velkého dávkování prášku vzniká riziko, že zásobník na přebytečný prášek bude přeplněn a celý proces bude zastaven. V další řadě může dojít k vyprázdnění veškerého materiálu ve vstupním zásobníku. Zde ale platí obecné doporučení: Zásobník by měl být naplněn do výšky rovnající se trojnásobku výšky tisknuté součásti. Velké množství využívaného prášku se rovněž nepříznivě projevuje na hospodárnosti celého procesu tisku, kdy pro samotnou tvorbu součástí použito malé procento prášku. [17]

Nízké dávkování prášku má především nepříznivý vliv na kvalitu finálního produktu. Při nedostatečném pokrytí vzniká riziko vícenásobného ozáření laserem při spěkání, což má za následek zhoršení kvality použitého materiálu. Dalším efektem je především zhoršení rozměrové a tvarové přesnosti součásti. [17]

2.10.1 Dosing factor

„Dosing factor“ označuje funkci v rámci softwaru výrobního zařízení, která reguluje velikost dávky. Z důvodu absence české terminologie se přidržím anglického označení, které používá firma EOS. Toto označení není ani mezi zahraničními autory odborných publikací sjednocené.

V literatuře [19,20] lze najít různá označení např. „Dose factor“, „Powder factor“, „Recoating factor“ apod. „Dosing factor“ umožňuje upravovat množství prášku v závislosti na poměru mezi celkovou plochou stavěcí platformy a spékanou plochou předcházející vrstvy. Vyjadřuje v procentech zvětšení vysunutí vstupního zásobníku vůči poklesu stavěcí platformy. Může nabývat hodnot mezi maximem a minimem. Matematické vyjádření hodnoty vysunutí zásobníku je dáno skutečností, že objem prášku na platformě V_{pl} zvětšený o hodnotu „dosing factor“ D je roven objemu prášku přenesenému ze zásobníku V_z .

$$V_{pl} \cdot D = V_z \quad (1)$$

Objem lze dále rozšířit jako součin plochy A a tloušťky vrstvy I .

$$V = A \cdot I \quad (2)$$

Dosazením tohoto vztahu do rovnice (1) lze získat tuto závislost:

$$A_{pl} \cdot I_{pl} \cdot \frac{D}{100} = A_z \cdot I_z \quad (3)$$

Následně lze vyjádřit inkrement vysunutí zásobníku I_z .

$$I_z = \frac{A_{pl}}{A_z} \cdot I_{pl} \cdot \frac{D}{100} \quad (4)$$

Ve vztahu (4) se objevuje člen $\frac{A_{pl}}{A_z}$, který má význam „převodového poměru“, proto zásobník i při nastavení proměnné „dosing factor“ na 100 % musí být vysunut výše, než je pokles stavěcí platformy.

Minimální „Dosing factor“ vyjadřuje stav, kdy plocha platformy není spečena laserem. Pro úplné zaplnění platformy by tedy měl postačovat hodnota 100%, ale v praxi se ukazuje, že hodnota je potřeba nastavit větší. Důvodem může být například nerovnoměrné zhutnění prášku v zásobníku při plnění nebo i ztráty vlivem nanášení nebo netěsnostmi okolo platformy.

Naopak maximální „dosing factor“ odpovídá situaci, kdy 100% plochy platformy je spečeno laserem. Tato hodnota se typicky nastavuje především na počátku procesu, kdy je potřeba zajistit rovnoměrné zaplnění platformy a především zaplnění netěsností mezi pohyblivými plochami. Hodnoty maxima „dosing factor“ se často pohybují v rozmezí 150 až 200%. [19]

Ostatní hodnoty „dosing factor“ pro různé velikosti spékaných ploch jsou interpolovány mezi minimální a maximální hodnotou.

2.10.1.1 Výpočet hodnoty „dosing factor“

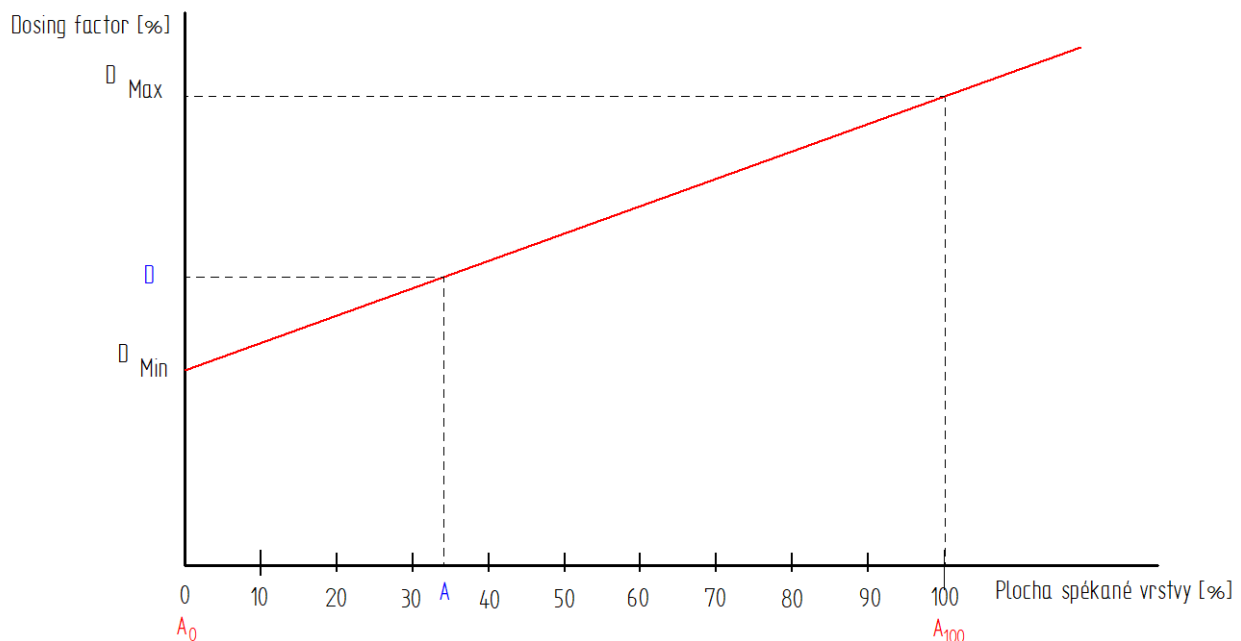
Při výpočtu se vychází z předpokladu, že velikost plochy A leží v intervalu $\langle A_0, A_{100} \rangle$, pak lze napsat základní vztah:

$$\frac{D_{max}-D_{min}}{A_{100}-A_0} = \frac{D-D_{min}}{A-A_0} \quad (5)$$

Dalšími matematickými úpravami lze vyjádřit interpolovanou hodnotu „dosing factor“ D.

$$D = D_{min} + (A - A_0) \frac{D_{max}-D_{min}}{A_{100}-A_0} \quad (6)$$

Grafická interpretace tohoto vztahu je zachycena na obrázku 18.



Obr. 18 Závislost velikosti „Dosing factor“ na velikosti spěkané plochy

D – Hledaná hodnota „dosing factor“

D_{min} – Minimální hodnota „dosing factor“

D_{max} – Maximální hodnota „dosing factor“

A – plocha součásti

A₀ – plocha platformy není spečena laserem

A₁₀₀ – plocha platformy je kompletně spečena laserem

Ze vztahu (6) vyplývá, že daná hodnota „dosing factor“ je nejvíce ovlivěna možným intervalem mezi minimem a maximem „dosing factoru“ a tedy i sklonem interpolační přímky. Volba parametru je klíčová především při rozměrných součástech s velkou spečanou plochou.

Proto je nutné porovnat teoretický maximální dosing factor s interpolovanou hodnotou. Výchozím předpokladem je rovnost objemu nanesené vrstvy na platformě s objemem prášku přeneseného ze zásobníku.

$$V_{pl} + V_{souč} = V_z \quad (7)$$

Rovnici (7) lze dále rozepsat jako součin plochy a tloušťky vrstvy. Tloušťka vrstvy součásti je shodná s tloušťkou nanášené vrstvy. Předpokladem je, že samotný proces tisku je ustálený, a tedy je nutné nad spékanou oblastí nanést 2 násobek jmenovité tloušťky vrstvy. [11,17]

$$(A_{pl} + A_{souč}) \cdot I_{pl} = A_z \cdot I_z \quad (8)$$

Do této rovnice lze následně dosadit za vztah (4):

$$(A_{pl} + A_{souč}) \cdot I_{pl} = A_z \cdot I_{pl} \cdot \frac{A_{pl}}{A_z} \cdot \frac{D}{100} \quad (9)$$

Dalšími úpravami je získán výsledný vztah:

$$D = \frac{A_{pl} + A_{souč}}{A_{pl}} \cdot 100 \quad (10)$$

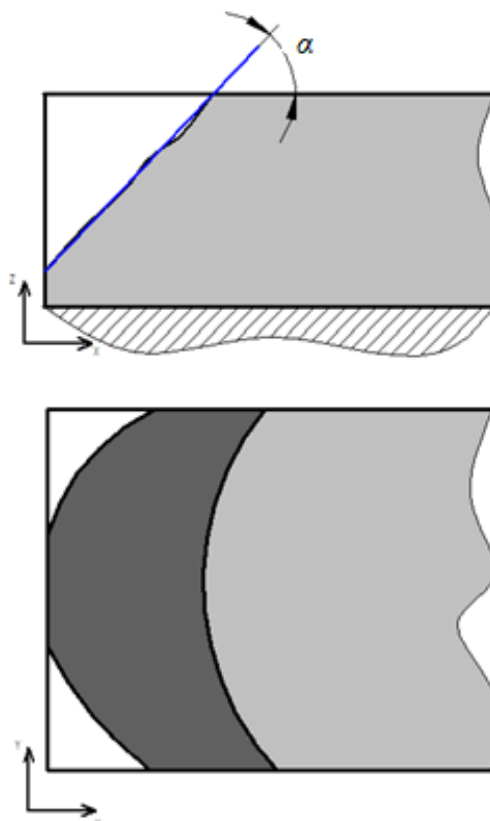
Tato rovnice pro „dosing factor“ má kontrolní význam, především pro největší spékanou plochu součásti, kdy pro dokonalé zaplnění platformy práškem je nutné nastavit minimálně tuto hodnotu. V okamžiku špatně položených mezí pro minimum a maximum, může vyjít hodnota diametrálně odlišná, což může vést ke zvětšení zmetkovitosti výsledného produktu.

2.10.1.2 Výpočet hodnoty „dosing factor“ pro neúplné plnění platformy

V předešlých statích byl naznačen způsob výpočtu pro případ úplného zaplnění stavěcí platformy. Funkce dosing faktoru ve výrobním zařízení může mít i jiný účel a to i úsporu prášku. Vzhledem ke zvyklostem v umisťování nejvyšších součástí co nejbližší k zásobníku, může někdy nastat situace, kdy není nutné zaplňovat platformu práškem na 100%. Tím lze dosáhnout nezanedbatelné úspory materiálu. [20]

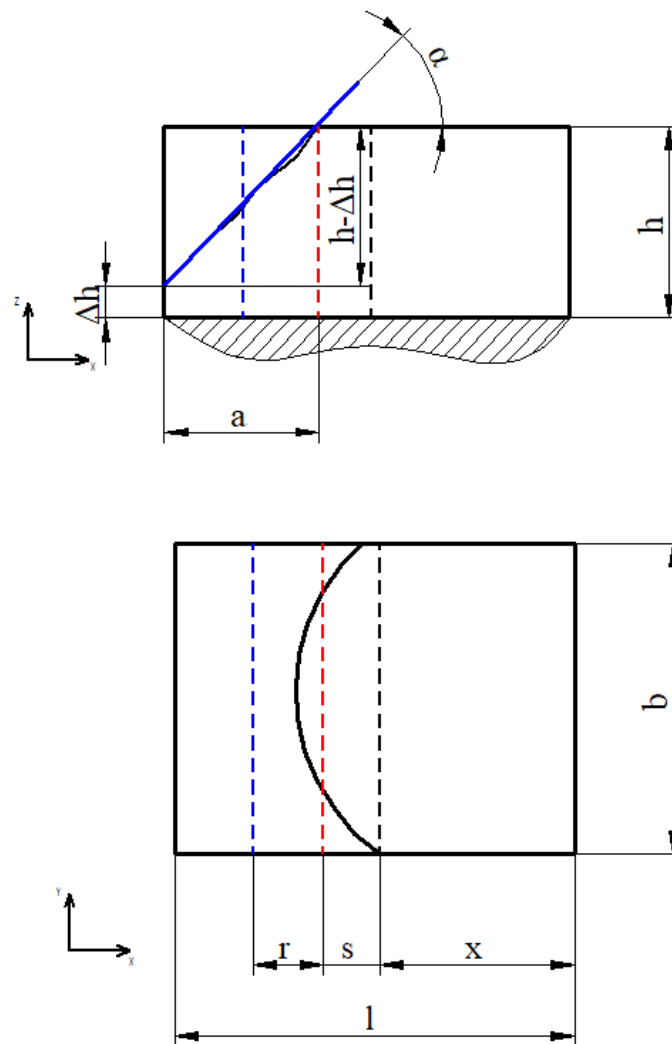
Zmenšování množství prášku, ale sebou nese významné riziko tvorby sypného kužele, viz obrázek 19. Kovový prášek není dostatečně koherentní, ale vykazuje rovněž jistou vazkost. Při nanášení prášku na platformu se před recoaterem vytvoří vlnu, která se směrem k jeho okrajům zmenšuje. Nanesená vrstva má tedy nerovnoměrné téměř „parabolické“ ukončení. Navíc tato hranice netvoří svislou stěnu, nýbrž vzniká sypný kužel. Jeho vliv se zvětšuje s rostoucí výškou tisknutých součástí. [20]

Takto vzniklý kužel je charakterizován sypným úhlem α (úhel mezi površkou myšleného povrchu a vodorovnou rovinou). Tento úhel je ovlivněn významně charakterem materiálu, záleží především na hustotě, vnitřním tření, velmi často i na velikosti zrn. Ve studiích [21,22] byla provedena měření práškové oceli od různých výrobců a bylo zjištěno, že sypný úhel se výrazně odlišuje dle velikosti částic. Hodnoty sypného úhlu se pohybovaly v rozmezí 35 až 40° s rozpětím okolo 5°.



Obr. 19 Tvorba sypného kužele

Výpočet „dosing factor“ se řídí stejnými zákonitostmi jako v předešlém případě. Největší rozdíl je ve stanovení minimální hodnoty. Zde je nutné si uvědomit, že tato hodnota musí zajistit tvorbu kompaktního objemu materiálu, který dosahuje do požadované vzdálenosti od recoateru. Jak bylo naznačeno dříve, ukončení vrstvy je výrazně nerovnoměrné a s velkým množstvím proměnných faktorů. Je proto zapotřebí přistoupit k některým zjednodušením, které umožní orientačně stanovit minimální hodnotu.



Obr. 20 Schéma pro výpočet „dosing factor“

l	[mm]	délka platformy
b	[mm]	šířka platformy
x	[mm]	požadovaná vzdálenost od recoateru
s	[mm]	dodatečná „bezpečná“ vzdálenost
r	[mm]	dodatečná vzdálenost nahrazující sypaný kužel
h	[mm]	požadovaná výška zaplněné platformy
a	[mm]	průmět sypané plochy
Δh	[mm]	výška zmenšení sypaného sypané plochy
α	[°]	sypaný úhel

Výpočet spočívá ve stanovení potřebné vzdálenosti od recoateru, kterou je potřeba pokrýt. Vzdálenost od recoateru x je zadaná hodnota dle požadavku na zaplnění platformy. Dodatečná vzdálenost s kompenzuje vliv nerovnoměrného ukončení hrany prášku, jedná se o volitelnou hodnotu. Vzdálenost r nahrazuje efekt sypané plochy a lze ji stanovit výpočtem. Z obrázku 20 vyplývají následující geometrické závislosti.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h-\Delta h}{a} \Rightarrow a = \frac{h-\Delta h}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (11)$$

$$l = x + s + a \Rightarrow a = l - x - s \quad (12)$$

Dosazením vztahu (12) do (11) lze získat následující rovnici:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h-\Delta h}{l-x-s} \quad (13)$$

Vyjádřením rozdílu výšky Δh dostaneme následující závislost:

$$\Delta h = h - \operatorname{tg} \alpha \cdot (l - x - s); \Delta h \geq 0 \quad (14)$$

Možná řešení je nutné omezit na nezáporné hodnoty, aby byl zachován fyzikální význam. Dále lze přistoupit ke stanovení vzdálenosti r . Tato vzdálenost se určí z náhrady objemu materiálu pod skloněnou plochou V_1 idealizovaným kvádrem o stejné výšce a objemu V_2 .

$$V_1 = V_2 \quad (15)$$

Za objem dosadíme vzorce pro elementární geometrické útvary:

$$a \cdot \Delta h \cdot b + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (h - \Delta h) \cdot b = r \cdot h \cdot b \quad (16)$$

Dalšími matematickými úpravami dostaneme závislost:

$$r = \frac{a \cdot \Delta h}{h} + \frac{a \cdot (h - \Delta h)}{2h} \quad (17)$$

Dosazením rovnice (11) vzniká finální tvar pro stanovení vzdálenosti r .

$$r = \frac{\frac{h-\Delta h}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot \Delta h}{h} + \frac{\frac{h-\Delta h}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot (h-\Delta h)}{2h} \quad (18)$$

Tato veličina je důležitá pro stanovení minima „dosing factor“, kdy je postup je analogický jako ve vztazích (7) až (10). Výchozím předpokladem je opět rovnost objemu nanesené vrstvy na platformě s objemem prášku přeneseného ze zásobníku.

$$V_{pl} = V_z \quad (19)$$

Rozšířením rovnice lze získat:

$$A \cdot I_{pl} = A_z \cdot I_z \quad (20)$$

Plocha nanosená na platformě je závislá na vzdálenosti naneseného prášku od zásobníku a šířce platformy:

$$A = (x + s + r) \cdot b \quad (21)$$

Dosazením rovnice (4) a (21) do (20) vzniká tento vztah:

$$[(x + s + r) \cdot b] \cdot I_{pl} = A_z \cdot I_{pl} \cdot \frac{A_{pl}}{A_z} \cdot \frac{D}{100} \quad (22)$$

Dalšími úpravami je získán výsledný vztah pro relativní hodnotu „dosing factor“:

$$D_{rel} = \frac{(x+s+r) \cdot b}{A_{pl}} \cdot 100 \quad (23)$$

Tato hodnota představuje hodnotu pro množství prášku, kterou by bylo nutné nanést na platformu. Software EOSprint v rámci nastavení intervalu „dosing factor“ neumožňuje použít minimální hodnotu menší než 100%.

Skutečný „dosing factor“ pak je determinován především velikostí spékané plochy. Výchozím předpokladem je opět rovnost objemu nanesené vrstvy na platformě s objemem prášku přeneseného ze zásobníku. Oproti vztahu (7), množství prášku na platformě je zmenšeno o množství, které je spečeno.

$$V_{pl} - V_{souč} = V_z \quad (24)$$

Další postup je zcela analogický jako ve vztazích (8) a (9). Pro zjednodušení je uveden výsledný vztah:

$$D_{skut} = \frac{A_{pl} - A_{souč}}{A_{pl}} \cdot 100 \quad (25)$$

Tento vztah reflektuje skutečnou hodnotu „dosing factor“, který je ovlivňován velikostí spečené plochy. Porovnáním relativní a skutečné hodnoty mohou nastat tyto 3 mezní stavy.

- $D_{skut} > D_{rel}$ – V dané vrstvě vzniká přebytek prášku, který tvoří vrstvu do větší vzdálenosti, než je požadováno. Minimální „dosing factor“ činí $D_{min} = 100\%$.
- $D_{skut} = D_{rel}$ – V dané vrstvě je dostatek prášku, který tvoří vrstvu do požadované vzdálenosti. Minimální „dosing factor“ činí $D_{min} = 100\%$.
- $D_{skut} < D_{rel}$ – V dané vrstvě je nedostatek prášku, který tvoří vrstvu do menší vzdálenosti, než je požadována, a proto je nutné v tomto případě hodnotu „dosing factor“ navýšit minimálně o hodnotu ΔD , kde:

$$\Delta D = D_{skut} - D_{rel} \quad (26)$$

Nastavovaná minimální hodnota dosing factoru následně činí

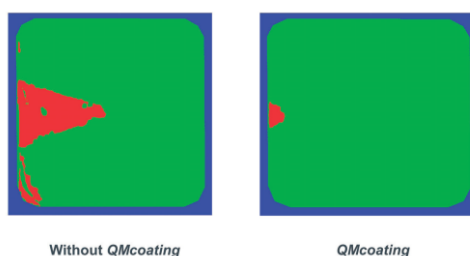
$$D_{min} = 100 + \Delta D \quad (27)$$

V tomto okamžiku má je výpočet potřebného dosing factoru totožný s postupem znázorněným v části 2.10.1.1.

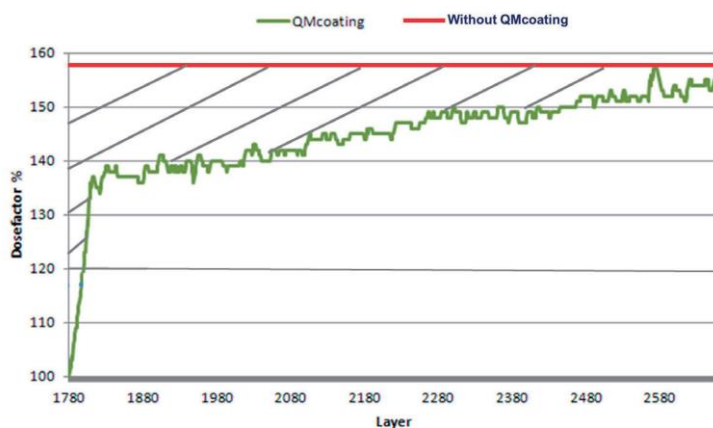
Pro názornost byl vytvořen kalkulátor v programu Excel, jenž umožňuje výpočet „dosing factor“ na základě vztahů uvedených v předešlých státech. Náhledy tohoto programu jsou přiloženy v příloze na konci práce.

2.10.2 Současný vývoj ve stanovení „dosing factor“

V současné době se objevují dva trendy pro určení potřebného množství prášku na platformě. Jedním z nich představuje například firma EOS v rámci softwaru EOSPRINT, který umožňuje výpočet aktuálního potřebného množství prášku v závislosti na umístění součásti na stavěcí platformě. [20] Druhým trendem je monitorování platformy při nanášení prášku, kdy software vyhodnocuje reálné zaplnění platformy a v případě potřeby umožňuje měnit hodnotu podle aktuálního využití. Firma Concept Laser představila modul QMcoating, který zajišťuje optimální množství prášku. Na obrázku 21 je patrné rovnoměrné zakrytí platformy při použití modulu, červená oblast představuje místo, kde potřebné množství prášku bylo větší než tolerance hodnoty „dosing factor“. Na obrázku 22 je znázorněn průběh tisku s patrnou úsporou nanášeného prášku.[25]



Obr. 21 Znáznornění vlivu modulu QMcoating na zaplnění platformy [25]



Obr. 22 Znáznornění průběhu hodnoty „dosing factor“ při použití modulu QMcoating[25]

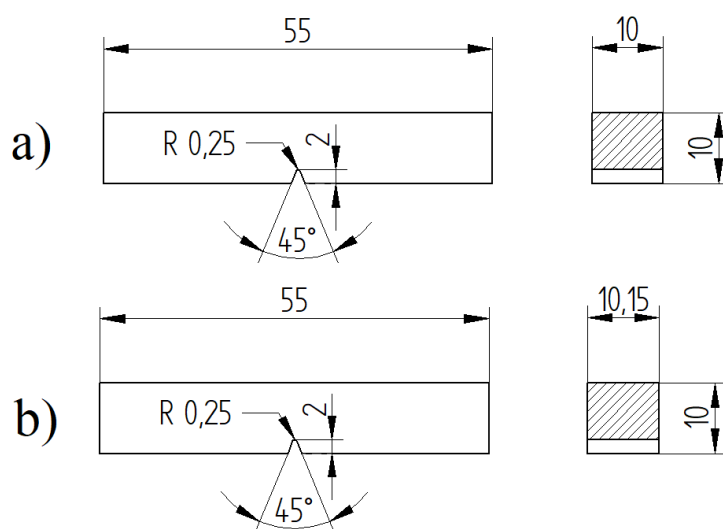
3 Návrh experimentu

Cílem experimentu je ověřit vliv nastavení hodnoty „dosing factor“ na mechanické vlastnosti tisknutých vzorků dle hypotézy. V rámci experimentu budou vytvořeny 3 sady zkušebních tyčí pro různé nastavení dávkování prášku. Pro vyhodnocení bude použito zkoušky rázem v ohybu dle Charpyho.

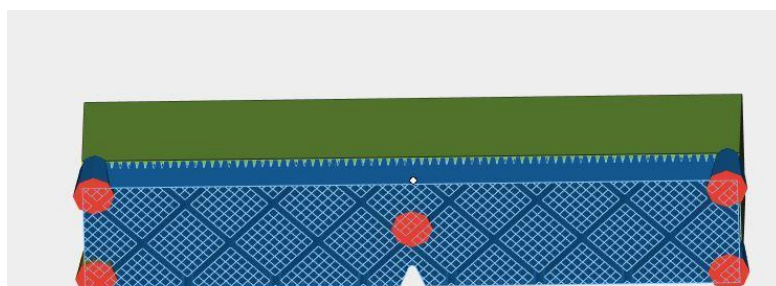
Hypotéza: Pro větší hodnoty nastavení „dosing factor“ dochází ke zlepšení mechanických vlastností.

3.1 Návrh zkušební vzorku

Jako zkušební vzorek pro tisk bude použit standardní vzorek s vrubem ve tvaru V do hloubky 2 mm, jak je popsáno v normě ČSN EN ISO 148-1 [26]. Vrub nebude obrobený, nýbrž bude ponechán v původním stavu. Rozměry vzorků na obrázku 23 jsou převzaty z normy. Vzorky jsou umístěny na podpůrné konstrukce, aby je bylo možné je snadno oddělit od platformy po vyhotovení. Návrh použitých podpůrných konstrukcí je ukázán na obrázku 24. Pro zajištění stability tisku a fixování vzorků je použito 5 zesilujících podpor o výšce 4 mm. Zbývající prostor mezi vzorkem a platformou je vyplněn strukturou typu „Block“. Při odstraňování podpor dochází k poškození povrchu součásti, proto je výška vzorku zvětšena o přídavek na broušení plochy (0,15 mm).



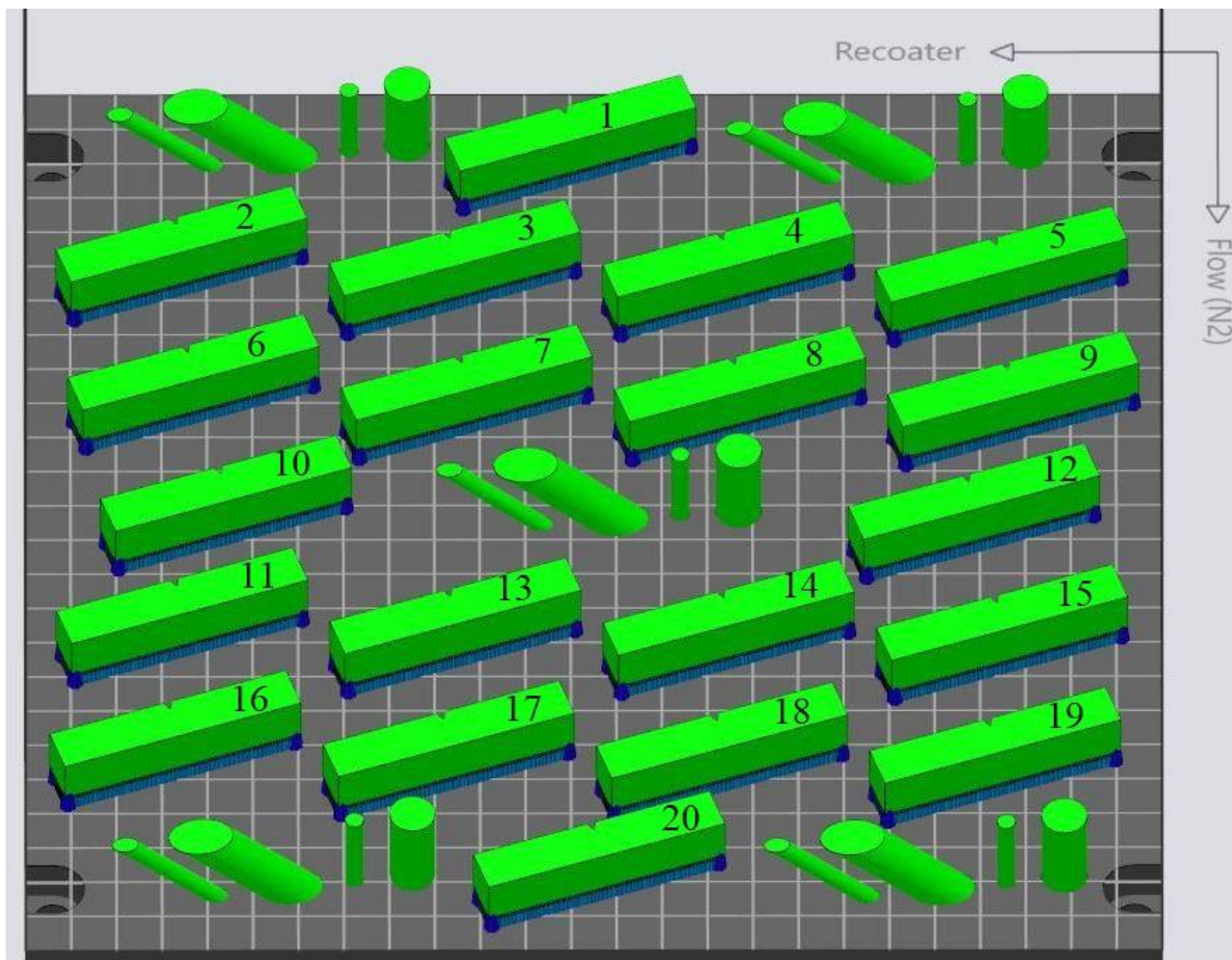
Obr. 23 a) Zkušební vzorek pro zkoušku rázem v ohybu dle ISO 148-1 b) Tisknutý vzorek



Obr. 24 Návrh podpůrných konstrukcí pod vzorky

3.2 Návrh rozložení na platformě

Na obrázku 3-3 je vyobrazeno rozmístění vzorků na platformě pro tisk. V rámci tisku byly rovněž umístěny sady vzorků pro jinou bakalářskou práci, které se nacházeli na 5 místech. Zbývající prostor byl zaplněn zkušebními tyčemi pro rázovou zkoušku. Celkem se na platformu rozmístilo 20 vzorků, které byly natočeny o úhel 20°, aby byl zajištěn dostatečný prostor mezi součástmi v kombinaci s dostatečným množstvím vzorků. Vrub je vždy orientován svisle k platformě. Horní strana po tisku má často horší kvalitu drsnosti, což by mohlo ovlivnit vrubové charakteristiky a tím i samotné výsledky rázových zkoušek.



Obr. 25 Návrh rozmístění vzorku na platformě

3.3 Použitý materiál MS - 1

Tento materiál odpovídá jakosti materiálu 1.2709 popřípadě X3NiCoMoTi 18-9-5, který dodává firma EOS GmbH ve formě prášku pro tisk metodou DMLS. Jedná se o martenzitickou nástrojovou ocel s vysokými mechanickými vlastnostmi (viz tabulka 1 a 2), kterých dosahuje při vytvrzování za pomoci stárnutí. Za povšimnutí stojí anizotropie mechanických vlastností této oceli, která je zapříčiněna samotnou technologií spékání jednotlivých vrstev. Údaje o chemickém složení se nachází v tabulce 3. [18]

Tab. 1 Mechanické vlastnosti oceli MS-1 ve stavu bez vytvrzení [18]

Mez pevnosti R_m	
v horizontálním směru (XY)	nejčastěji 1200±100 MPa
ve vertikálním směru (Z)	nejčastěji 1100±150 MPa
Mez kluzu $R_{p0,2}$	
v horizontálním směru (XY)	nejčastěji 1100±100 MPa
ve vertikálním směru (Z)	nejčastěji 930±150 MPa
Tažnost A	
v horizontálním směru (XY)	nejčastěji 12 ± 4 %
ve vertikálním směru (Z)	nevyhodnoceno
Tvrдост	nejčastěji 33 až 37 HRC

Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli MS-1 ve stavu po vytvrzení [18]

Mez pevnosti R_m	2080±100 MPa
Mez kluzu $R_{p0,2}$	2030±100 MPa
Tažnost A	2 ± 1 %
Tvrдост	50 až 56 HRC

Tab. 3 Chemické složení oceli MS-1[18]

Prvek	Fe	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	Cu	C	Mn	Si	P	S
Složení [wt %]	Vyrovnaný	17,0 ÷ 19,0	8,5 ÷ 9,5	4,5 ÷ 5,2	0,6 ÷ 0,8	0,05 ÷ 0,15	max 0,5	max 0,5	max 0,03	max 0,1	max 0,1	max 0,01	max 0,01

3.4 Použité zařízení

Pro tisk všech vzorků bylo využito tiskárny EOS M290 (na obrázku 26), která se v několika exemplářích nachází v laboratořích RTI. Základní technické parametry jsou v tabulce 4. Stroj je vybaven softwarem EOSPRINT a monitorovacími systémy EOS MeltPool a EOS Exposure OT. [27]



Obr. 26 Zařízení EOS M290 [27]

Tab. 4 Parametry zařízení EOS M290 [28]

Rozměry stavebního prostoru (d x š x v)	250 x 250 x 325 mm
Typ laseru	Yb – vláknový laser; 400 W
Optika	čočka F-theta; vysokorychlostní scanner
Scanovací rychlost	do 7 m/s
Ohniskový průměr	100 μ m
Napájení	400V / 32A
Spotřeba el. energie	max 8,5 kW/ průměrně 2,4 kW/ s vyhříváním do 3,2 kW
Stlačený vzduch	7 bar; 20 m ³ /h
Rozměry stroje (d x š x v)	2500 x 1300 x 2190 mm
Hmotnost	cca 1250 kg

3.5 Použité parametry pro tisk

V rámci přípravy tisku lze nastavit velké množství parametrů. Pro názornost budou uvedeny alespoň některé z nich, které byly doporučeny ze zkušeností odborníků z RTI.

Parametry spékání:

Podpůrné konstrukce:

Výkon laseru: 100W; scanovací rychlost: 850 mm/s

Samotný vzorek:

Výkon laseru: 285W; scanovací rychlost 960 mm/s

Parametry pro nanášení prášku:

Rychlost pohybu recoateru při nanášení: 150 mm/s

Rychlost recoateru při zpětném pohybu: 500 mm/s

Tloušťka vrstvy: 40 μ m

Minimální „dosing factor“: 100 %

Maximální „dosing factor“: 200 %

V rámci jednotlivých tisků byla změněna hodnota „dosing factor“, a to následujícím způsobem:

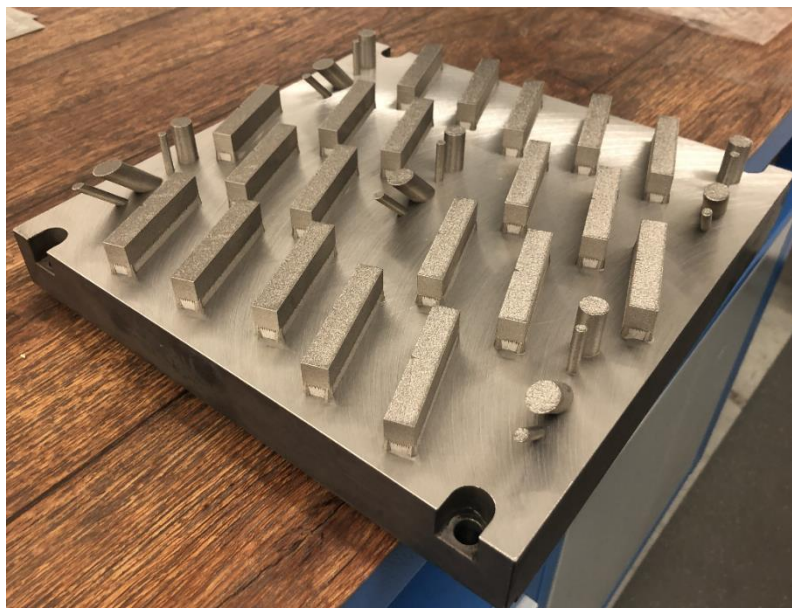
- I. V rámci prvního tisku byl ponechána automatická hodnota, která je měněna podle softwaru EOSPRINT v rámci mezí mezi minimem a maximem dle aktuálního rozložení součástí na ploše.
- II. Pro druhý tisk byla hodnota „dosing factor“ zvolena jako fixní a byla stanovena za pomoci vztahů uvedených ve stati 2.10.1.1, kde jako meze byly použity hodnoty pro minimum (110 %) a maximum (200 %). Z programu EOSPRINT, bylo určeno, že velikost spékané plochy v rámci objemu součástí činí 12 053,067 mm². Velikost platformy je 250 x 250 mm.
Příklad výpočtu:

$$D = D_{min} + (A - A_0) \frac{D_{max} - D_{min}}{A_{100} - A_0} =$$
$$= 110 + (12\,053,067 - 0) \cdot \frac{200 - 110}{(250 \cdot 250) - 0} = 127,35 \% \doteq 130 \%$$

- III. Pro třetí tisk byla opět zvolena fixní hodnota „dosing factor“, která činila 200%. V rámci této operace došlo k menšímu posunu vzorků z důvodu sloučení s další zakázkou pro tisk.

3.6 Výsledky tisku

Všechny 3 tisky proběhly bez výrazných problémů. Ve všech případech byla platforma zaplněna bez vzniku propadlých míst. Byl tedy splněn předpoklad rovnoměrného zaplnění platformy. Žádný ze vzorků nevykazoval viditelné vady ani poškození. Na fotografiích 27, 28 a 29 jsou zachyceny platformy v různých stádiích po vyjmutí ze stroje až po postprocessing.



Obr. 27 Platforma I. tisk - před vložením do žíhací pece



Obr. 28 Platforma II. tisk - po vyjmutí ze žíhací pece



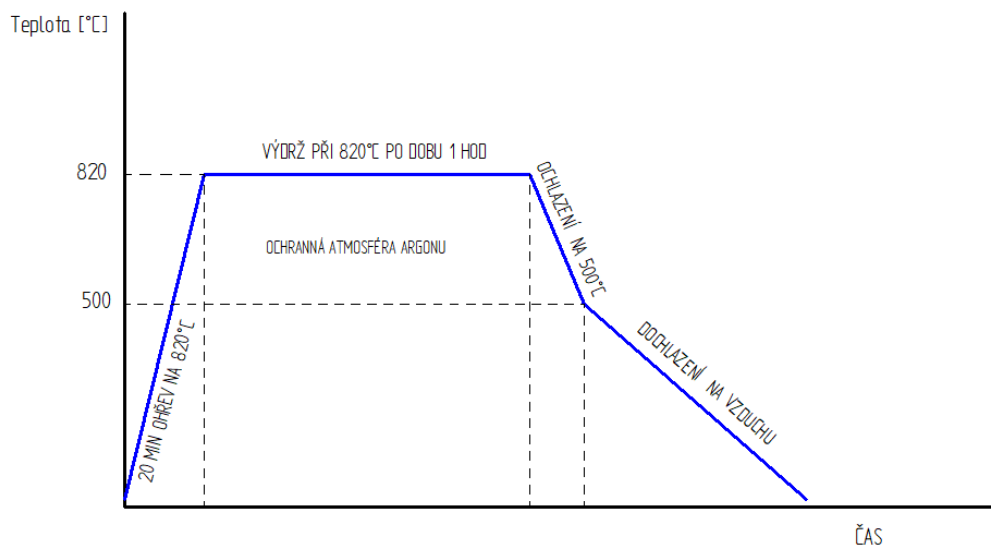
Obr. 29 Platforma III. tisk - po vyžihání a před oddělením vzorků od základní desky

3.7 Postprocessing

Postprocessing spočíval v několika krocích. Po dokončení tisku byl veškerý nespečený prášek odsát. V dalším kroku byla odčerpána ochranná atmosféra a celá platforma byla vyňata ze stroje a vložena do žíhací pece.

Na vzorcích bylo provedeno rozpouštěcí žihání, aby byly zajištěny dobré mechanické vlastnosti a odstranilo se vnitřní pnutí způsobené vysokým teplotním gradientem během tisku. Celý žíhací proces je zachycen na obrázku 30 a sestává z rychlého dvacetiminutového ohřevu na teplotu 820°C. Poté následuje výdrž po dobu jedné hodiny. Posléze je platforma prudce schlazena na

teplotu 500°C, všechny tyto úkony jsou prováděny v ochranné argonové atmosféře. Na závěr jsou součásti ponechány vychladnout na vzduchu.[11]



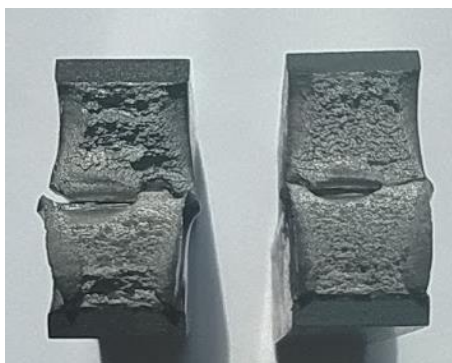
Obr. 30 Proces rozpouštěcího žhání pro ocel MS-1

Po vyžhání byly všechny vzorky odděleny od platformy a zbytky podpůrných konstrukcí byly nahrubo odstraněny za pomoci pásové brusky. Takto připravené zkušební tyče byly poté zabroušeny na rovinné brusce.

4 Vyhodnocení mechanických vlastností

Jak již bylo předesláno v úvodu předcházející kapitoly, pro vyhodnocení mechanických vlastností bylo použito zkoušky rázem v ohybu, která je zevrubně popsána v normách ČSN ISO 148 -1 a ČSN ISO 14 556. Jako zkušební stroj byl použit Zwick Roell RKP 450, který se nachází v mechanické zkušebně při RTI.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5. Při provádění zkoušky u 1. vzorku z I. tisku nedošlo k přeražení a tedy nárazová práce nemohla být vyhodnocena. U dalších vzorků bylo použito většího kladiva a problém se již neopakoval. Všechny vzorky vykazovaly vysokou houževnatost, což se projevilo na tvárném lomu vzorků. Lomová plocha pod vrubem je u všech vzorků výrazně nerovná, potrhaná, boky jsou výrazně zdeformované, viz obrázek 31.



Obr. 31 Vzorky z I. tisku- vlevo vzorek č. 5; vpravo vzorek č. 20

Vyhodnocením naměřených dat byla stanovena nárazová práce ze všech vzorků v rámci jedné platformy. Pro první tisk byla vypočten průměrná hodnota nárazové práce \bar{W} na 149 ± 15 [J], pro druhý tisk 148 ± 12 [J] a pro třetí tisk 144 ± 13 [J]. Tyto hodnoty jsou mezi sebou srovnatelné, ale vykazují velkou míru nejistoty měření. V příloze jsou pak přiloženy fotografie platformem s konkrétními hodnotami nárazové práce z tabulky 5.

Tab. 5 Naměřené a vypočtené hodnoty pro zkoušku rázem v ohybu

ČÍSLO VZORKU	1. TISK	2. TISK	3. TISK
	Automatika	130%	200%
	W [J]	W [J]	W [J]
1	nepřeraženo	174	154
2	146	156	135
3	158	152	161
4	163	168	155
5	186	153	149
6	155	156	137
7	160	151	157
8	158	158	164
9	150	154	151
10	159	144	149
11	153	144	134
12	159	140	151
13	142	149	145
14	144	149	148
15	146	145	142
16	142	145	131
17	127	133	126
18	132	135	128
19	146	133	138
20	114	116	118
\bar{W} [J]	149	148	144
σ [J]	15	12	13

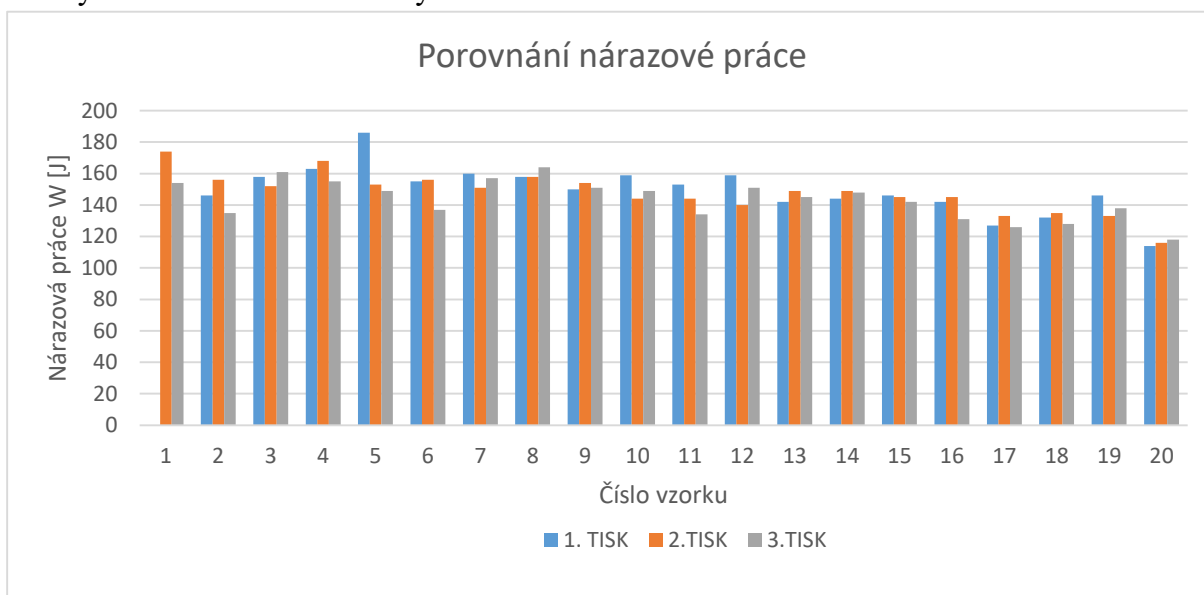
Na obrázku 32 je uveden sloupcový graf s vyvedenými hodnotami nárazové práce pro jednotlivé vzorky. Tyto hodnoty jsou srovnávány v rámci číselného umístění, jak bylo uvedeno na obrázku 25. V rámci tohoto porovnání lze vysledovat 2 různé trendy v naměřených hodnotách. Na první pohled je patrná výrazná rozkolísanost naměřených hodnot nárazové práce v rámci jednotlivých tisků, což potvrdily hodnoty průměrné nárazové práce vypsane výše. Nelze tedy s určitostí stanovit, které nastavení hodnoty „dosing factor“ má pozitivní přínos na mechanické vlastnosti. Z toho lze usuzovat, že hodnota „dosing factor“ má pouze minimální vliv a tedy hypotéza nebyla potvrzena.

Na druhé straně se projevil efekt, který způsobil, že došlo ke změně mechanických vlastností ve směru kolmém na pohyb recoateru. Z grafu je patrný pokles hodnoty nárazové práce mezi vzorkem umístěným co nejbližší hornímu okraji platformy a vzorkem umístěným na opačném

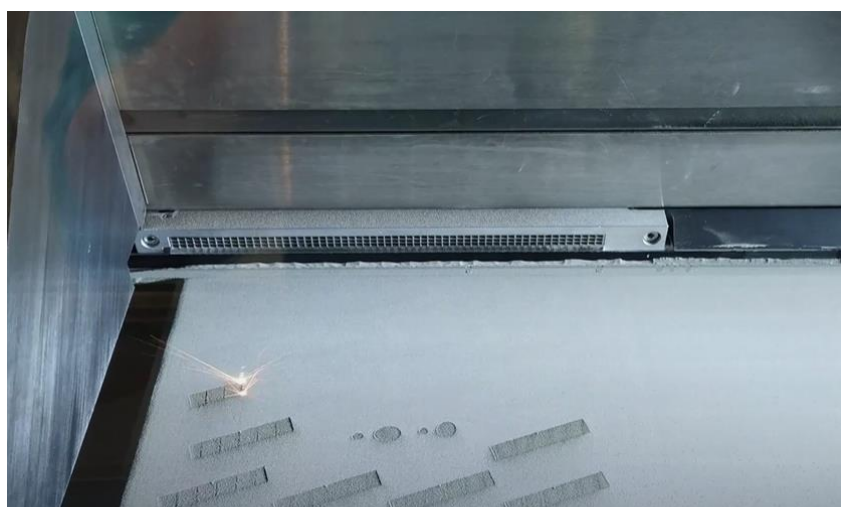
konci. Příčina této změny je nasnadě. Na obrázku 33 je zachycen pracovní prostor stroje, kde je vidět výstup ochranné atmosféry krytý kovovou mřížkou. Tímto místem je vháněn nad platformu ochranný plyn. Proud plynu strhává sebou částice rozstříklého kovu ze spékání, které vznikají během spékání kovu laserem. Tyto částičky dopadají k dolnímu okraji platformy a jsou následně spečeny společně s následující vrstvou, čímž negativně ovlivňují mechanické vlastnosti výsledného produktu a to především z hlediska dynamického namáhání.

Na základě výše uvedených zjištění lze dát následující doporučení:

1. Hodnota nastavení „dosing factor“ se neprojevila na mechanických vlastnostech zpracovaných zkušebních tyčí. Toto nastavení tedy má největší význam především z hlediska tvorby homogenní vrstvy prášku pro spečení.
2. Vzorky s největším požadavkem na mechanické vlastnosti je nutné umístit co nejbližěji výdechu ochranné atmosféry.



Obr. 33 Porovnání nárazové práce



Obr. 32 Pohled na pracovní prostor stroje s výdechem ochranného plynu

5. Závěr

Tato bakalářská práce je zaměřuje na proces nanášení prášku a jeho možné dopady v rámci technologie aditivní výroby metodou DMLS.

Teoretická část se zabývá rozbohem současného stavu, má za úkol seznámit čtenáře s různými aspekty ovlivňující nanášení. Pozornost byla věnována způsobu stanovení množství prášku na platformě tzv. „dosing factor“ pro 2 různé případy zaplnění. Bylo zjištěno, že v okamžiku nedostatečného plnění platformy, vzniká problém s charakterizací prášku v závislosti na rozložení velikosti částic, a tedy bylo přistoupeno k některým zjednodušením.

V rámci praktické části byla stanovena hypotéza, jež měla být ověřena. Jako experimentální vzorky byly vytisknuty zkušební tyče s V-vrubem pro zkoušku rázem v ohybu, a to pro tři různé hodnoty nastavení parametru „dosing factor“. Po vytisknutí bylo na vzorcích v rámci postprocessingu provedeno rozpouštěcí žíhání. Zkušební tyče byly následně přeraženy v rámci rázové zkoušky v ohybu metodou Charpy.

Na základě provedené zkoušky nebylo prokázáno, že by docházelo k ovlivnění mechanických vlastností při změně hodnoty parametru „dosing factor“. Na druhé straně se projevil negativní vliv ofuku ochranným plynem nad platformou. Na základě těchto zjištění byla dána doporučení, jež jsou uvedeny v kapitole 4.

Cíle práce stanovené v první kapitole byly naplněny. Ačkoliv se hypotéza nepotvrdila, tak tato práce může poskytnout vodítko pro další směřování zkoumání v rámci aditivní výroby metodou DMLS.

Seznam použité literatury

1. Bian, L., Shamsaei, N., & Usher, J. M. *Laser-based additive manufacturing of metal parts: Modeling, optimization, and control of mechanical properties*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group., 2018.
2. Hatami, S., Lyckfeldt, O., Tönnäng, L., & Fransson, K. Flow properties of tool steel powders for selective laser melting – influence of thermal and mechanical powder treatments. *Powder Metallurgy*. Říjen 2017, Roč. 60, 5, stránky 353-362.
3. Kayacan, M. Y., Özsoy, K., Duman, B., Yilmaz, N., & Kayacan, M. C. A study on elimination of failures resulting from layering and internal stresses in powder bed fusion (PBF) additive manufacturing. *Materials and Manufacturing Processes*. 2019, Roč. 34, 13, stránky 1467-1475.
4. Spears, T. G., & Gold, S. A. In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*. 2016, Roč. 5, 1, stránky 16-40.
5. Nagarajan, B., Hu, Z., Song, X., Zhai, W., & Wei, J. Development of micro selective laser melting: The state of the art and future perspectives. 2019, Roč. 5, 4, stránky 702-720.
6. Wohlfart, Michael. Use-cases of different recoater configurations for DMLS®. <https://www.linkedin.com/>. [Online] 30. 6 2020. [Citace: 15. 11 2020.] Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/use-cases-different-recoater-configurations-dmls-michael-wohlfart/>.
7. EBM: High productivity in a powerful beam. <https://www.ge.com/>. [Online] [Citace: 15. 11 2020.] Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/ebm>.
8. Moulds.asia: Direct Metal Laser Sintering [Online]. [cit. 15. 11 2020.] Dostupné z: <http://www.moulds.asia/whats-new/dmls-direct-metal-laser-sintering/>
9. Longhitano, G. A., Larosaa, M. A., Munhoza, A. L. J., De Carvalho Zavagliaa, Cecília Amélia, & Ierardia, M. C. F. Surface finishes for Ti-6Al-4V alloy produced by direct metal laser sintering. *Materials Research*, červenec 2015, Roč.18(4), stránky 838-842.
10. Zhenzhen Quan, Amanda Wu, Michael Keefe, Xiaohong Qin, Jianyong Yu, Jonghwan Suhr, Joon-Hyung Byun, Byung-Sun Kim, Tsu-Wei Chou, *Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites: opportunities and challenges*, *Materials Today*, Roč. 18, 9, November 2015, stránky 503-512.
11. ZETKOVÁ, Ivana. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 28.11.2020]. Disertační práce. Západočeská univerzita, Fakulta strojní, doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/PagesDispatcherServlet?pp_destElement=%23ssSouboryStudentuDivId_3079&pp_locale=cs&pp_reqType=render&pp_portlet=souboryStudentuPagesPortlet&pp_page=souboryStudentuDownloadPage&pp_nameSpace=G602506&soubidno=115839

12. Daňa, M., Zetková, I., & Hanzl, P. (2019). The influence of a ceramic recoater blade on 3D printing using direct metal laser sintering. *Manufacturing Technology*, Roč.19(1), stránky 23-28.
13. PRAET, Kirsten Van. Tips and Tricks for Metal 3D Printing: Recoaters. *Materialise* [online]. 21. 7. 2017. [Citováno 20.12. 2020]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/blog/metal-3D-printing-recoaters>
14. Kranz J., Herzog D. & Emmelmann C. Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl₆V₄. *Journal of Laser Applications*, č.27, Prosinec 2014.
15. UTLEY, Eric. An Introduction to Designing for Metal 3D Printing. <https://blogs.solidworks.com/> [Online]. 12.6.2017 [Citace: 21. 12. 2020.] <https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2017/06/introduction-designing-metal-3d-printing.html>.
16. Design Guide: DirectMetal Laser Sintering (DMLS). <https://xometry.com/> [Online]. 25.9.2020 [Citace: 21. 12. 2020.] <https://xometry.de/en/design-tips-for-direct-metal-laser-sintering-3d-printing/>
17. Meier Ch., Weissbacha R., Weinberga J., Wallb W. A., Hart A. J.. Critical influences of particle size and adhesion on the powder layer uniformity in metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Tech.*. 2019, Svazek č. 266, stránky 484-501.
18. Material data sheet – FlexLine EOS MaragingSteel MS1 <https://www.eos.info/> [Online]. duben 2017 [Citace: 31. 3. 2021.] Dostupné z: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/werkzeugstahl_ms1_cx/ms1/ms-ms1-m400_material_data_sheet_eng.pdf
19. Li Yang, Keng Hsu, Brian Baughman, Donald Godfrey, Francisco Medina, Mamballykalathil Menon, Soeren Wiener. *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Springer International Publishing AG; 2017.
20. Interní školící materiál firmy EOS GmbH
21. DAVID CORREA ZAPISOTSKI, MARTIN WALLHED. *Characterizing flowability of metal powders* [online]. Stockholm, Sweden, 2019 [cit. 31.3.2021]. EXAMENSARBETE INOM TEKNIK, GRUNDNIVÅ, Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1335126/FULLTEXT02>
22. Escano, L.I., Parab, N.D., Xiong, L. *et al.* Revealing particle-scale powder spreading dynamics in powder-bed-based additive manufacturing process by high-speed x-ray imaging. *Sci Rep* 8, 2018, 15079. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33376-0>

23. Lampitella, V.; Trofa, M.;Astarita, A.; D'Avino, G. Discrete Element Method Analysis of the Spreading Mechanism and Its Influence on Powder Bed Characteristics in Additive Manufacturing. *Micromachines* 2021, 12, 392. <https://doi.org/10.3390/mi12040392>

24. Discrete element method <https://abaqus-docs.mit.edu/> [Online]. 2017 [Citace: 1. 5. 2021]
Dostupné z: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEANLRefMap/simaanl-c-demanalysis.htm>

25. Florian Bechmann, Changing the future of additive manufacturing,
Metal Powder Report, 2014, Roč. 3, 69, Strany 37-40, [https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(14\)70135-3](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(14)70135-3).

26. ČSN ISO 148-1. *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017

27. METAL AM LASER POWER BED (EOS M290) <https://www.a-star.edu.sg/> [online]. 30. 9. 2020. [Citováno 24. 5. 2021]. Dostupné z: [https://www.a-star.edu.sg/Collaborate/programmes-for-smes/tech-access/additive-manufacturing/metal-am-laser-power-bed-\(eos-m290\)](https://www.a-star.edu.sg/Collaborate/programmes-for-smes/tech-access/additive-manufacturing/metal-am-laser-power-bed-(eos-m290))

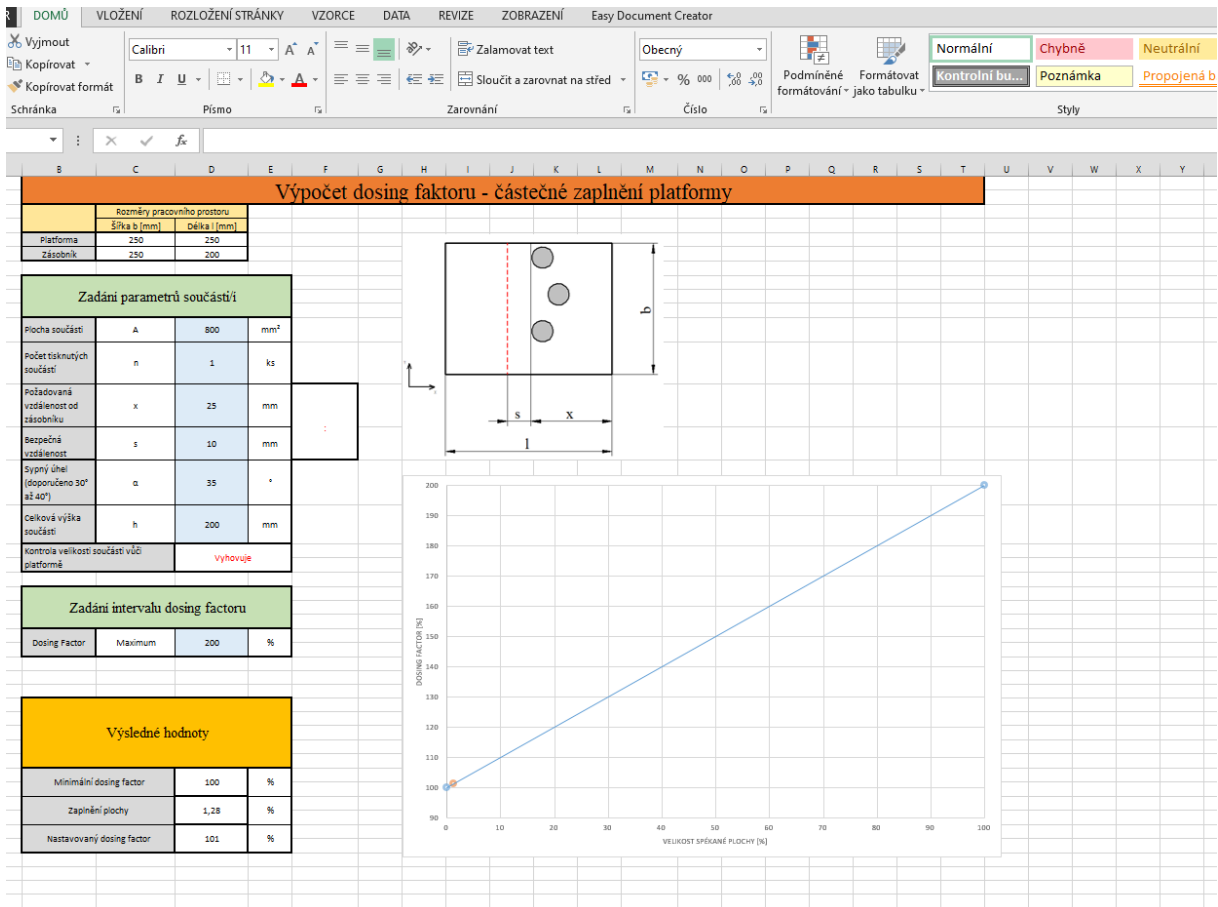
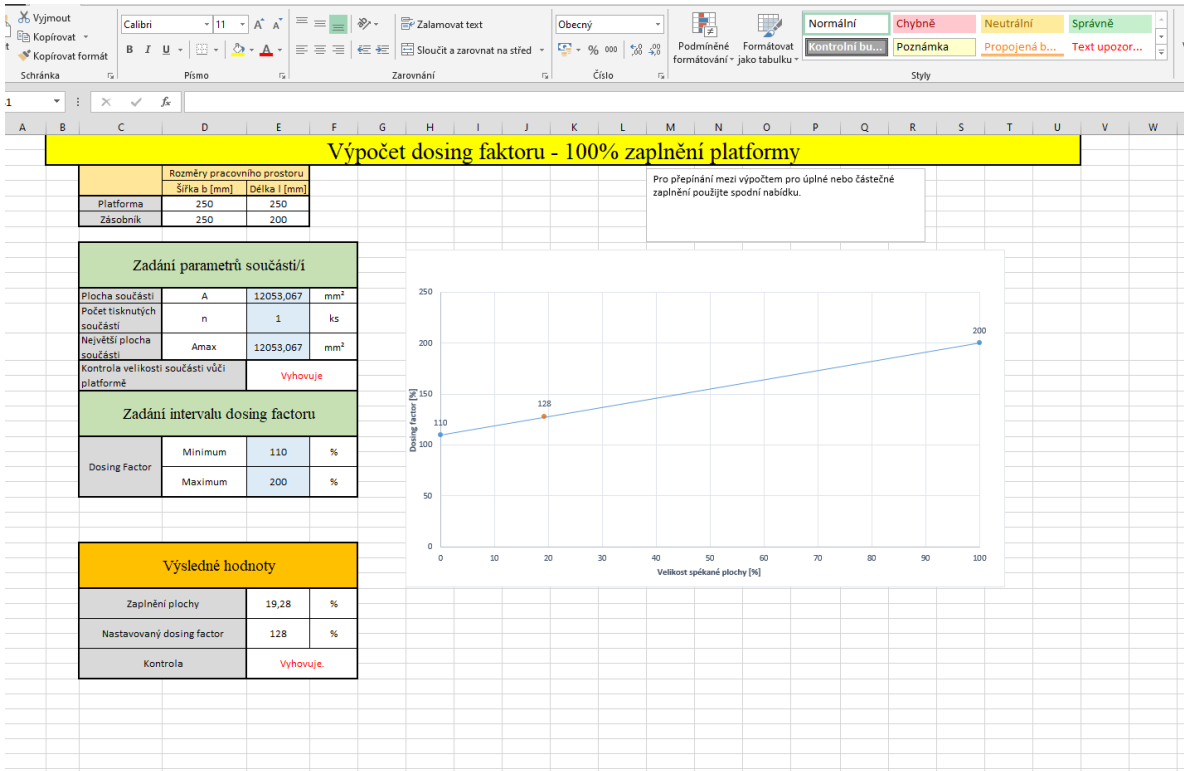
28. EOS M 290 <https://www.eos.info/> [Online]. leden 2019 [Citace: 20. 5. 2021.]
Dostupné z: https://www.eos.info/03_system-related-assets/system-related-contents/_pdf_system-data-sheets/eos_system_data_sheet_eos_m_290_en.pdf

Seznam příloh

- PŘÍLOHA č. 1 – Náhled kalkulátoru v programu Excel
- PŘÍLOHA č. 2 – Platforma I. tisk – automatický dosing factor
- PŘÍLOHA č. 3 – Platforma II. tisk – 130 % dosing factor
- PŘÍLOHA č. 4 – Platforma III. tisk – 200 % dosing factor

PŘÍLOHA č. 1

Náhled kalkulátoru v programu Excel



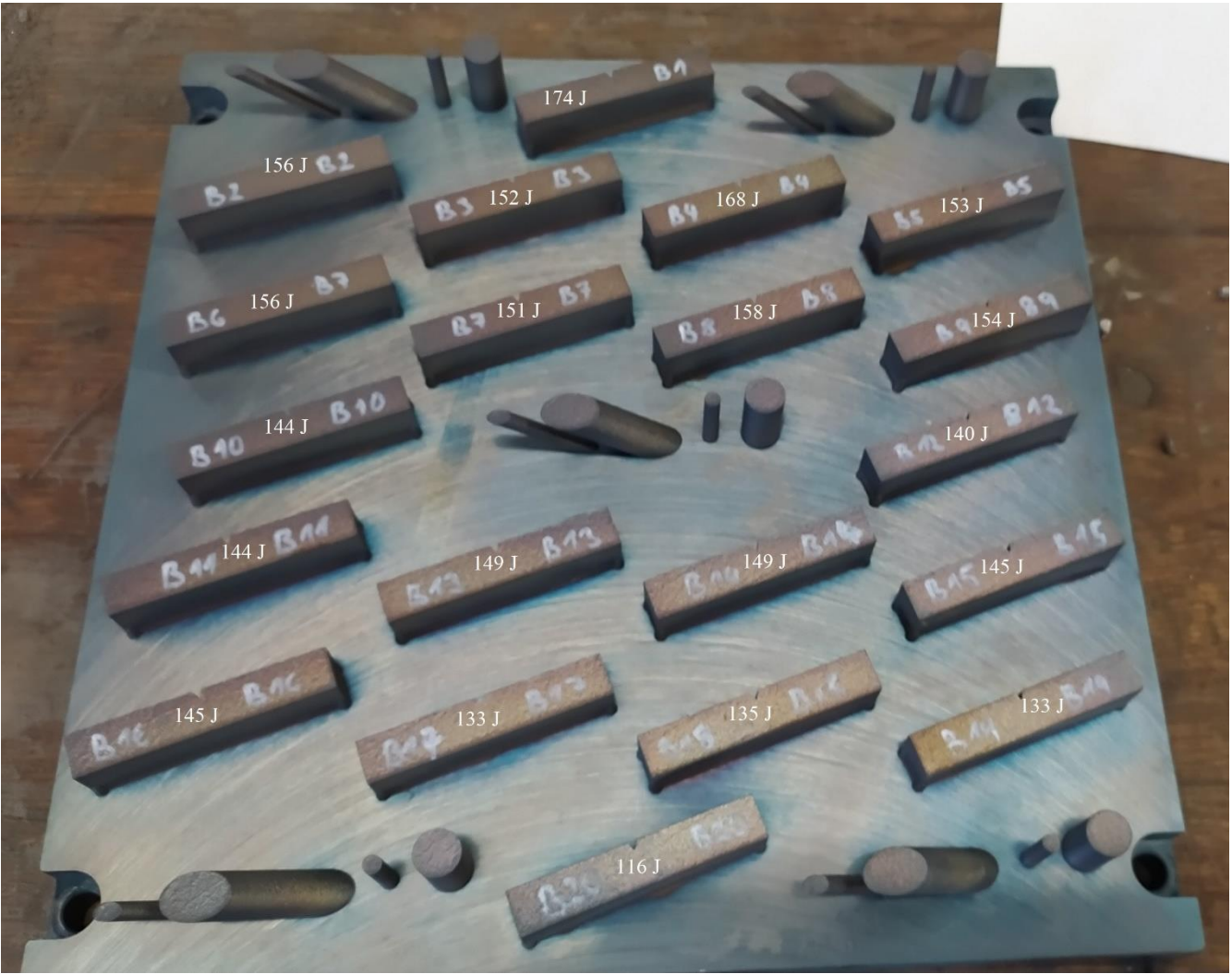
PŘÍLOHA č. 2

Platforma I. tisk – automatický dosing factor



PŘÍLOHA č. 3

Platforma II. tisk – 130 % dosing factor



174 J B1

156 J B2

B3 152 J B3

B4 168 J B4

B5 153 J B5

B6 156 J B7

B7 151 J B7

B8 158 J B8

B9 154 J B9

B10 144 J B10

B11 140 J B12

B14 144 J B14

B13 149 J B13

B14 149 J B14

B15 145 J B15

B16 145 J B16

B17 133 J B17

B18 135 J B18

B19 133 J B19

B20 116 J B20

PŘÍLOHA č. 4

Platforma III. tisk – 200 % dosing factor

