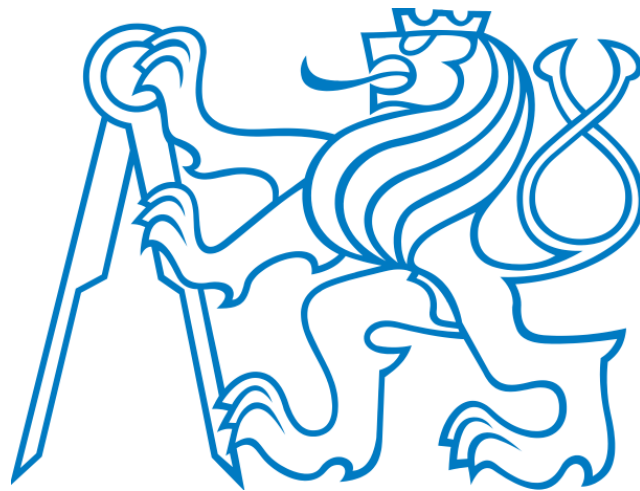


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Fyzikální jevy probíhající při technologii DMLS

Autor práce: Matěj Černý

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pelikán

Praha 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci vypracoval samostatně. Veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal informace, jsou uvedeny v seznamu použité literatury a citovány v textu podle normy ČSN ISO 690.

V Praze dne 29. 7. 2022

.....

Jméno a příjmení studenta

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Černý** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **492483**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Fyzikální jevy probíhající při technologii DMLS

Název bakalářské práce anglicky:

Physical phenomena in DMLS technology

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do technologie DMLS
2. Tepelné působení při procesu spékání v technologii DMLS
3. Postprocessing dílů vyrobených technologií DMLS
4. Vliv parametrů tisku na výsledné vlastnosti dílu

Seznam doporučené literatury:

.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Pelikán ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

.

Datum zadání bakalářské práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Lukáš Pelikán
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Lukáši Pelikánovi za ochotu a odborné vedení při zpracování bakalářské práce. Jeho zkušenosti a rady mi byly cennou pomocí k jejímu vytvoření.

Anotace

V této práci jsou čtenáři vysvětleny nejdůležitější aspekty výroby dílů vyrobených pomocí technologie DMLS. Tyto aspekty vysoce ovlivňují výslednou kvalitu a spolehlivost součástí. Jedná se zejména o vliv různého nastavení parametrů tisku, tepelného působení při procesu tisku, nejčastější vady dílů vyrobených technologií DMLS a následné zpracování součástí. Tato práce také čtenáře uvede do technologie DMLS a nastíní mu možnosti využití a nesporné výhody oproti konvenčním technologiím.

Klíčová slova

kovový 3D tisk, DMLS, tepelné působení, parametry tisku, vady

Annotation

In this work, the reader is explained the most important aspects of the production of parts manufactured using DMLS technology. These aspects highly influencing the final quality and reliability of the components. This is mainly the effect of different settings of printing parameters, thermal effects during the printing process, the most common defects of parts subsequently produced by DMLS technology and the processing of components. This work will also introduce the reader to DMLS technology and outline its uses and indisputable advantages over conventional technologies.

Key words

metal 3D print, DMLS, thermal action, print parameters, defects

Obsah

Seznam použitých zkratk	8
Úvod	9
1 Technologie DMLS	10
1.1 Historie DMLS	10
1.2 Princip tisku DMLS	11
1.3 Porovnání 3D tisku s konvenčními technologiemi	11
1.4 Využití kovového 3D tisku v praxi	13
1.4.1 Kovový 3D tisk použitý pro rekonstrukci veteránů	13
1.4.2 Využití kovového 3D tisku při údržbě létajících strojů	14
1.4.3 Konformní chlazení forem pro vstřikování plastů a lití kovu	14
1.5 Pracovní prostředí	15
1.6 Materiály pro DMLS	16
1.6.1 Důsledky tvaru a velikosti prášků	17
1.6.2 Úprava prášků	19
1.6.3 Legování prášků	20
2 Tepelné působení při technologii DMLS	21
2.1 Vnesení tepla	21
2.2 Tavná lázeň	23
2.3 Mikrostruktura	24
2.4 Zbytkové napětí	26
2.4.1 Vliv strategie skenování na zbytkové napětí	27
2.4.2 Vliv orientace dílu na zbytkové napětí	28
3 Post processing dílů vyrobených technologií DMLS	29
3.1 Odstranění podpěr z dílu a výtisku z platformy	29
3.2 Úpravy povrchu	30
3.3 Úprava vnitřních vad	31

3.4	Tepelné zpracování dílů vyrobených technologií DMLS	32
4	Vady dílů vyrobených technologií DMLS.....	32
4.1	Pórovitost	33
4.2	Zbytkové napětí a delaminace.....	35
4.3	Vada balling	36
4.4	Anizotropie.....	38
5	Vliv parametrů tisku	39
5.1	Vliv výkonu laseru	39
5.2	Vliv rozteče skenovacích drah	41
5.3	Vliv rychlosti skenování	41
5.4	Vliv tloušťky vrstvy	42
5.5	Vliv skenovací strategie	43
	Závěr	45
	Bibliografie	47
	Seznam použitých obrázků	54
	Seznam tabulek	56

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Jednotka	Popis
3D		Trojdimenzionální
DMLS		Přímé kovové laserové spékání
Rm	MPa	Pevnost v tahu
Rp	MPa	Mez kluzu
E	GPa	Youngův modul pružnosti v tahu
A	%	Tažnost
Tt	°C	Teplota tavení
P	W	Výkon laseru
Ra	μm	Průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti
Al		Hliník
Cr		Chrom
Mo		Molybden
Ti		Titan
TZ		Tepelné zpracování

Úvod

Aditivní technologie jsou v dnešní době hojně využívány v mnoha odvětvích, jako je letectví, biomedicínské aplikace, automobilový průmysl a další. Proto jsou aditivní technologie předmětem mnoha výzkumů a pozorování. Cílem těchto výzkumů je tyto technologie zdokonalit pro výrobu kvalitnějších součástí. [2] [24]

Tato práce je zaměřena právě na jednu z aditivních technologií. Jedná se o technologii Přímého Laserového Spékání Kovů (z anglického překladu Direct Metal Laser Sintering) – většinou nalezneme pod zkratkou DMLS.

S rostoucí poptávkou po této technologii rostou také nároky na spolehlivost a kvalitu daných součástí tímto procesem vyrobených. Tento fakt úzce souvisí s nutností pochopení celého procesu do nejmenších detailů. Počínaje výrobou prášku přes samotný děj tisku až po finální zpracování. Tato práce je zaměřena právě na tyto procesy, protože pokud na základě výzkumů a pozorování budeme schopni tyto děje podrobně popsat, dostane se nám možnost pochopit, vylepšit a optimalizovat celý proces k co možná nejefektivnějšímu využití.

V práci budou vysvětleny hlavní části výroby, které mají největší dopad na výsledné vlastnosti součástí. Cílem práce bude čtenáři popsat jevy, které se odehrávají při tepelném působení v procesu DMLS. Dále s tím jsou úzce spojené defekty těchto součástí, které budou v práci také popsány a v několika případech budou nastíněny jejich možnosti eliminace. Nedílnou částí, která významně ovlivňuje výsledné vlastnosti dílů, jsou parametry tisku, proto budou v práci vysvětleny a objasněny jejich vlivy na výslednou kvalitu. V závislosti na faktu, že většina dílů je ve stavu as-built (stav bez následného zpracování) stále nevyhovující pro příslušné aplikace, bude v práci sepsáno několik metod následného zpracování. V neposlední řadě bude také technologie DMLS čtenáři představena a porovnána s konvenčními technologiemi pro snadnější pochopení jejich výhod.

I přesto, že bylo v posledních letech provedeno mnoho experimentálních a výpočetních výzkumů pracujících se složitými matematickými modely, nejsou všechny procesy výroby zcela pochopeny.[2] [22] [24] [34] [46]

1 Technologie DMLS

Technologie DMLS je způsob výroby součástí, kdy se daný 3D model tvoří spékáním kovového prášku vrstvu po vrstvě. To má za důsledek stěžejní výhodu této technologie. Jedná se o možnost vyrobit tvarově velmi složité součásti bez potřeby několika strojů a nástrojů. Při vhodném použití pro nás může být tato technologie velmi přínosná a hospodárná v několika oblastech průmyslu, avšak jako každá technologie má i své slabé stránky, proto je třeba zvážit možnosti a omezení této technologie a následně je porovnat s různými technologiemi pro nalezení nejlepšího řešení. [34]

1.1 Historie DMLS

První významný moment při vzniku technologie DMLS sahá až do roku 1984, kdy Chuck Hull podrobně popsal metodu a aparát pro stavbu trojrozměrných dílů pomocí nanášení vrstvy po vrstvě, avšak v tomto patentu nebyla žádná zmínka o prášku jako vstupním materiálu.

Zásadní krok nastal v říjnu 1986, kdy student magisterského studia na Univerzitě v Texasu (UT) Carl Deckard vyvinul experimentální přístroj, který byl schopen laserového spékání kovů se vstupním materiálem v podobě prášku. Tuto technologii následně patentoval. V závislosti na tomto úspěchu založil firmu NOVA Automation, pozdější DTM Corporation.

V roce 1994 byla německé firmě Electro Optical System GmbH (EOS GmbH) udělena patentová licence a došlo ke spolupráci s firmou Electroluxu Rapid Development (ERD), která poskytla kovový prášek potřebný pro DMLS. Ve stejném roce byl systém vyzkoušen a o rok později v roce 1995 vyvinuli první komerční systém EOSINT M 250. Postupem let se systém několikrát vylepšil a byly také vyvinuty nové prášky, které zapříčinily u výrobků větší přesnost, porozitu a pevnost.

Roku 2002 společnost Trumpf AG uzavřela spolupráci s firmou EOS. V návaznosti na to přišel další velký krok v roce 2004, kdy byl představen nový systém EOSINT M 270, který už byl opatřen vláknovým laserem. Ve stejném roce získala firma EOS licenční smlouvu se společností 3D Systems, a tím si zajistila práva na patenty od 3D Systems, DTM a UT. Společnost EOS je dodnes lídrem v technologii DMLS. [2] [25]

1.2 Princip tisku DMLS

Proces výroby dílů pomocí DMLS je založený na stavbě dílu vrstvu po vrstvě. Stejně jako u jiných aditivních technologií se prvotně v příslušném programu vytvoří 3D model, který se následně počítačovým softwarem rozřeže do daných vrstev a je vytvořen kód, který je vložen do řídicího systému tiskárny DMLS. Do komory je umístěna platforma, na které se bude díl stavět a také se k ní vážou přídatné podpěry. Také se naplní násypka/zásobník požadovaným kovovým práškem a přečne se na platformu první vrstva. Před skenováním je nejdříve důležité ohřátí pracovního prostoru a prášku na požadovanou teplotu pro snížení teplotního gradientu mezi jednotlivými vrstvami a stavební platformou. Tato teplota se pohybuje mírně pod teplotou slinování daného prášku. Při celém tomto procesu je kovový prášek chráněn inertní atmosférou z důvodu možné oxidace prášku. V tomto okamžiku může začít laser působit na kovový prášek na předem definovaném obrazci, a to formou po skenovacích drahách předem určených skenovací strategií. V místě působení laseru se vytvoří tavná lázeň a prášek následně tuhne do homogenní soustavy. V průběhu procesu se platforma posunuje dolů vždy o předem danou výšku vrstvy. Po každém posunutí platformy je rovnoměrně speciálním přečnovacím nožem přečrnut kovový prášek a celý proces se opakuje do doby, dokud není vyhotoven požadovaný díl.

Po dokončení poslední vrstvy se díl nechá vychladnout a očistí se od nespečeného prášku, který je možno recyklovat (znovu použít). Celý díl se i s platformou vyjme z pracovního prostoru a dochází k odstranění podpěr, nebo pokud to součást vyžaduje, je podroben celý kus tepelnému zpracování. Většinou na odstranění zbytkového pnutí. Déle se díl, pokud to vyžaduje, zpracovává dalšími technologiemi, jako je například obrábění nebo broušení.

Tímto způsobem dokáže technologie DMLS za několik hodin vyhotovit funkční prototypy, implantáty či nástroje a mnoho další prvků. [22] [2] [23] [24]

1.3 Porovnání 3D tisku s konvenčními technologiemi

Zásadní rozdíl najdeme při samotném procesu výroby. Princip technologie 3D tisku je založený na budování součástí pomocí přidávání materiálu vrstvu po vrstvě, kdežto konvenční technologie materiál odebírají. Díky možnosti recyklovat zbylý prášek a opakovaně ho používat se stává proces velmi úsporný z hlediska využití materiálu.

Při vhodném využití 3D tisku jsou další výhodou časové a finanční úspory na odpadajících částech celého procesu výroby produktu od návrhu po výrobu finálního výrobku. U návrhu a následného zpracování dílu pomocí konvenčních technologií najdeme části výroby, které u 3D tisku vůbec nejsou. Jedná se například o přípravu výroby, příslušné části výkresové dokumentace, výroby forem, objednávky materiálu a nástrojů (s tím spojené dodací lhůty), montáže, nákladného zpracování prototypů a vynaložení velkých finančních prostředků při výrobě tvarově složitých dílů.

Hlavní výhodou 3D tisku je možnost výroby tvarově složitých součástí, které nelze, nebo by bylo velmi nákladné je vyrobit konvenčními technologiemi. Výroba tvarově složitých součástí nám dává možnost spojit více součástí dohromady, a tím ušetřit čas na montáži dílů nebo také na následných technologiích spojování dílů pomocí svařování, lepení atd.

Tisk tvarově složitých dílů umožňuje použití topologické optimalizace, které na základě algoritmů vytvoří nejvhodnější konstrukci, avšak tvarově velmi složitou. Použití topologické optimalizace by bylo ve spojení s konvenčními technologiemi velmi finančně nákladné a časově náročné. Hlavě z důvodu složitých programů, postupů při obrábění a také nutnosti použití speciálních upínacích přípravků či nástrojů.

Možnost výroby tvarově složitých součástí je také velmi prospěšná pro konstruktéra při návrhu příslušného dílu, a to z hlediska menší složitosti výroby, postupu montáže nebo předepisování tolerancí dílům, které mají být spolu spojeny (z několika dílů vznikne jeden).

Vzhledem k snadné výrobě dutin se 3D tisk velmi uplatnil u dílů, které díky možnosti mít ve své struktuře chladicí kanálky či mřížku zefektivnily svoji funkčnost, nebo dokonce se rozšířilo pole použití těchto dílů. Například chladicí kanálky ve formách na odlitky zapříčinily rychlejší tuhnutí odlitku a tím pádem kratší čas procesu odlévání a hospodárnější výrobu.

Rozdíl nalezneme také v mechanických vlastnostech součástí ze stejného materiálu, avšak s různými technologiemi výroby. Součást vyrobená kovovým 3D tiskem vykazuje vyšší hodnoty pevnosti v tahu a tvrdosti než součást vyrobená ostatními technologiemi. Také tažnost může dosahovat lepších hodnot při správném nastavení parametrů tisku, vhodné orientaci dílu na platformě a za použití příslušného tepelného zpracování.

3D tisk v aktuálním stádiu vývoje není schopen konkurovat konvenčním technologiím při výrobě jednoduchých dílů nebo při hromadné výrobě. V tomto ohledu jsou konvenční technologie časově mnohem rychlejší a finančně hospodárnější. Mezi hlavní nevýhody 3D tisku oproti konvenčním technologiím patří rozměrová přesnost, která se pohybuje v řádech desetin milimetru a také kvalita povrchu, která je kolem 8 $\mu\text{m Ra}$. To znamená, že funkční plochy je potřebné po vytištění ještě obrábět nebo brousit. Další nevýhodou je časová náročnost výroby. To velmi zužuje pole působnosti 3D tisku a spíše ho směřuje na výrobu kusových dílů, kde se časová náročnost tolik neprojeví. Dále je u kovového 3D tisku užší škála materiálů než u konvenčních technologií.

V neposlední řadě je také u dílů pozorována anizotropie z důvodu samotné podstaty výroby, a to vrstvení. Ta má za příčinu odlišné mechanické vlastnosti v různých směrech příslušné součásti, avšak při vhodném nastavení parametrů tisku ji můžeme značně minimalizovat.

Pokud chceme maximálně využít potenciál a možnosti 3D tisku na zvýšení hospodárnosti ve výrobě či její zefektivnění, musíme si plně uvědomovat její výhody nad ostatními technologiemi a snažit se tyto výhody plně aplikovat při zdokonalování technologických procesů nebo rozšiřování možností použití právě této technologie DMLS. [2] [22] [23] [27] [28] [30] [34] [35]

1.4 Využití kovového 3D tisku v praxi

Možnosti využití kovového 3D tisku jsou v dnešní době již velmi rozsáhlé. Jejich výpis by byl velmi zdlouhavý a pro tuto práci zbytečný. Proto zde jsou vybrány pouze tři konkrétní příklady, které dohromady popisují největší výhody kovového 3D tisku a zároveň poukazují na možnost použití v několika různých průmyslech.

1.4.1 Kovový 3D tisk použitý pro rekonstrukci veteránů

Při rekonstrukcích starých veteránů jsou častým problémem rozbité a nefunkční součásti, které již dávno nejsou k sehnání a nemají výrobní dokumentaci. Možností je vyrobit novou součást za pomoci konvenčních technologií, avšak často se jedná o tvarově komplikované díly, které nelze vyrobit tradičními metodami. Tento problém můžeme řešit za použití 3D tisku, kdy si chybějící části můžeme vyrobit.

Jasným příkladem právě tohoto využití je firma SKODAMOTOR, kde se rekonstrukcí veteránů zabývají už čtvrt století. Konstruktor Štěpán Berný pracující ve

SKODAMOTOR viděl 3D tisk prvně na veletrhu v zahraničí. Technologie ho zaujala hlavně z důvodu rychlosti prototypování a hospodárného využití právě u výroby nových dílů oproti konvenčním technologiím. Výhodou byla také možná kombinace 3D tisku a následného obrábění. Konstruktor Štěpán Berný si rychle uvědomil, že právě tato technologie by mohla velmi zefektivnit práci ve SKODAMOTOR. Proto byla do firmy pořízena kovová 3D tiskárna, která je od té doby nedílnou součástí při výrobě dílů pro veterány. [29]

1.4.2 Využití kovového 3D tisku při údržbě létajících strojů

Nizozemské letectvo má ve svém arzenálu nejrůznější druhy létajících strojů. Tyto stroje jsou z velké části vyrobené z ojedinělých dílů, které nemohou být udržovány pomocí běžně dostupných nástrojů. V závislosti na tomto problému začali technici ze základny ve Woensdrechtu (centrála údržby Nizozemského královského letectva) tisknout vlastní nástroje přesně na míru, a to při potřebě v řádech hodin.

3D tisk tak pomáhá technikům při servise zkrátit doby opravy, snížit náklady a inovativně řešit přicházející problémy spojené s údržbou v letectví.

Konkrétním příkladem byla výroba speciálních krytek pro otvory tryskového motoru na letounu F16. Tyto krytky se daly zakoupit pouze u externího dodavatele. Byly velmi nákladné a měly dlouhé dodací lhůty.

Po osvědčení 3D tisku jej začalo Nizozemské letectvo rozšiřovat do všech svých pracovišť údržby. Následně jsou díky tomu schopní zasílat 3D modely a poskytovat technickou podporu dalším pracovníkům na dálku. [31]

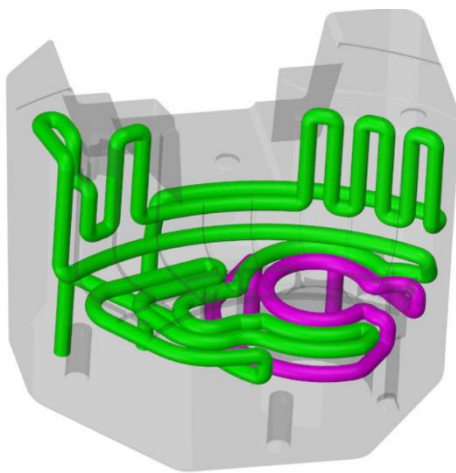
1.4.3 Konformní chlazení forem pro vstřikování plastů a lití kovu

Běžně se formy pro lití kovu či vstřikování plastu vyráběly s vrtanými chladicími kanály. Bohužel pomocí této technologie je poměrně obtížné zajistit vhodné řešení chlazení příslušné formy nebo to může být v některých případech zcela nemožné. Výsledná forma tak není ideálně chlazená. To může způsobit různé vady, rozměrové nepřesnosti a celý proces výroby trvá déle z důvodu delšího chladnutí.

Česká firma Innomia se touto problematikou zabývá a řeší ji pomocí technologie DMLS. Díky možnosti vyrábět ve formách kanály s různými tvary a v podstatě neomezeným umístěním je technologie DMLS vhodná pro výrobu forem se složitějšími chladicími

soustavami s vysokou účinností chlazení. Příklad takovéto chladicí soustavy ve formě je vidět na obr. 1. Mimo jiné se také zabývají opravou stávajících forem.

Firma sama dokládá fakt, že u forem s kanály kopírujícími povrchový tvar vylisku či odlitku se chlazení stává velmi efektivní a může ušetřit čas na chladnutí až o 50 %. Tím se stávají tyto formy velmi žádané, protože jsou pro výrobu mnohem hospodárnější. [38]



Obrázek 1 – konformní chlazení [38]

1.5 Pracovní prostředí

Přítomnost reaktivních plynů z okolního vzduchu, by znamenala chemické ovlivnění tavné lázně, a tedy změnu mechanických vlastností výrobku a vznik vad ve struktuře materiálu. Proto pro dosažení kvalitního výtisku je nutná inertní atmosféra. Běžně se používá argon nebo dusík.

I extrémně malé změny obsahu kyslíku mohou zhoršit mechanické nebo chemické vlastnosti slitin citlivých na kyslík, jako je titan nebo hliník, a mohou ovlivnit složení konečného produktu, což má za následek negativní fyzikální vlastnosti, jako je špatná odolnost proti únavovému lomu.

Při tisku je důležité si uvědomit, že některé materiály mohou s danou atmosférou nevhodně reagovat, a proto je potřeba zvolit správný inertní plyn.

Některé materiály lépe fungují s argonem, jiné s dusíkem, některé lze tisknout s obojím (pokaždé minimální jiné vlastnosti vzniklého materiálu), některé materiály (titan) lze tisknout výhradně jen s argonem.

Funkce jako ochrana tavné lázně a zároveň odvádí spaliny z pracovního prostoru. Inertní plyn je důležitý také pro skladování prášku pro 3D tisk. Kvalita vstupujícího prášku je vysoce důležitá a na jeho stárnutí má vliv vlhkost a také oxidace prášku jako důsledek reakce s okolním vzduchem. [3] [19] [44]

1.6 Materiály pro DMLS

Pro technologii DMLS lze použít hned několik materiálů počínaje lehkými slitinami přes oceli až po superslitiny. Jejich výběr je dán hlavně příslušnou aplikací a finanční dostupností. Srovnání vlastností je v tab. 1 Podrobněji zde budou popsány jenom nejpoužívanější slitiny, ačkoli jejich seznam je mnohonásobně delší. [23] [32] [35] [46]

AlSi10Mg – tato hliníková slitina je poměrně lehká. To je způsobeno převážně samotným hliníkem, který má nízkou hustotu. Disponuje dobrými legovacími možnostmi, dobrou zpracovatelností (odlévání, obrábění, svařitelnost a lisování atd.) a vykazuje dobrou elektrickou vodivost. Tuto slitinu je možno precipitačně vytvrdit při zachování mechanických vlastností. Je hojně využíván v automobilovém průmyslu, ale také se objevuje i v aerospace. [23] [35]

Nerezová ocel 17-4 – díky tomu, že je tato ocel precipitačně vytvrditelná, má vysokou pevnost a tvrdost. Další užitečné vlastnosti této nerezové oceli jsou odolnost proti korozi, výborná obrobitelnost, zaručená svařitelnost a dobrá tažnost. Díky svým dobrým mechanickým vlastnostem je pole použití tohoto materiálu poměrně široké. Zejména se používá v ropném průmyslu, plynárenství, letectví a lékařství. [23] [35]

Inconel 625 a 718 – jsou precipitačně tvrditelné slitiny na bázi niklu a chromu, které jsou ve velké míře používány v leteckých motorech. Důvodem jejich vynikající pevnost až do 700 °C. Tyto slitiny mají také vysokou pevnost a výbornou svařitelnost zahrnující odolnost proti praskání po svaření. Mimo letectví jsou využívány pro výrobu nástrojů a zápusťek. [23] [35]

TiAl6V4 – je slitina na bázi titanu disponující hlavně vynikající odolností proti korozi a skvělými mechanickými vlastnostmi. Materiál se velké míře používá v lékařství díky své biokompatibilitě. Další odvětví, kde se tento materiál nachází, je letectví. Materiál zde plně uplatní své vlastnosti, jako je vysoká pevnost při nízké hustotě 4,54 g/cm³ a vysoká teplota tání 1 677 °C. [23] [35]

Tabulka 1 – materiály pro DMLS [35], přeloženo a upraveno pro BP

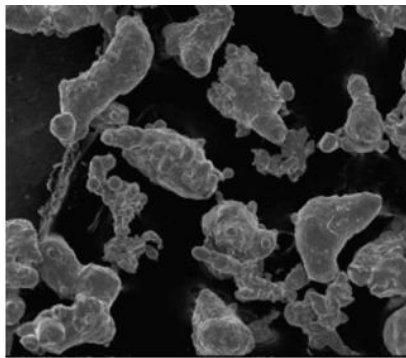
MATERIÁL	PEVNOST R_m [MPa]	MEZE KLUZU $R_{STR0,2}$ [MPa]	TAŽNOST A[%]	E- MODUL Σ [GPa]	TVRDOTA PODLE VICKERS [HV10]	DRSNOST POVRCHU R_A [mm]
17-4 ¹	832 ± 87	572 ± 25	31 ± 3	155 ± 22	221 ± 4	9 ± 2
AlSi10Mg ²	397 ± 11	227 ± 11	6 ± 1	64 ± 10	117 ± 1	7 ± 1
Inconel 625 ¹	961 ± 41	707 ± 41	33 ± 2	182 ± 9	285 ± 3	8 ± 1
Inconel 718 ¹	994 ± 40	702 ± 65	24 ± 1	166 ± 12	293 ± 3	7 ± 2
316L ¹	633 ± 28	519 ± 25	30 ± 5	184 ± 20	209 ± 2	10 ± 2
Moderátor ¹	1101 ± 78	720 ± 18	10 ± 4	194 ± 9	375 ± 2	10 ± 1
TiAL6V4 ¹	1286 ± 57	1116 ± 61	8 ± 2	111 ± 4	384 ± 5	12 ± 1

1.6.1 Důsledky tvaru a velikosti prášků

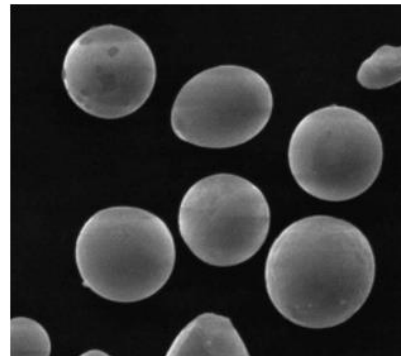
Tvar a velikost kovových prášků je dán výrobními technologiemi. Dva základní druhy výroby prášku jsou mechanickým způsobem mletím a rozprašováním nataveného kovu pomocí proudění natlakovaného inertního plynu či jiného média nebo chemickým způsobem. Částice prášku vytvořeného mletím vidíme na obr. 2. Jsou větší než u prášku vyrobeného rozstříkem a také mají nepravidelný tvar. Vzhledem k tomu má nižší hustotu. Nevýhodou metody mletí je, že ve výsledném produktu se mohou vyskytovat i částice materiálu použitého k rozemletí prášku. Tudiž není zajištěna 100 % čistota prášku. Zato částice prášku vyrobeného rozstříkem jsou v průměru menší zhruba 4 až 5krát a mají sférický tvar, obr. 3. U metody výroby prášku rozstříkem za pomoci inertního plynu může dojít k zachycení inertního plynu roztavenými částicemi. Při procesu tisku se prášek znovu roztaví a plyn zachycený při výrobě začne unikat do tavné lázně. To způsobuje bublinky v tavné lázni, které nejsou všechny schopné odejít. Ve výsledku to má vliv na kvalitu součásti. Zejména pak na jeho pórovitost. [3] [37] [44] [45] [48]

Tvar a velikost prášků má významný vliv na jeho hustotu, která zásadním způsobem ovlivňuje kvalitu výtisku. S nižší hustotou je v prášku obsaženo větší množství mezer, a to v přímém důsledku způsobuje pórovitost výtisků. Protože větší množství bublinek

plynu, které se při vzniku tavné lázně vytvoří, nestihne včas odejít, než materiál zatuhne. S jemnějším práškem roste také hustota, a to má příznivý vliv na růst měrné plochy, poréznost výtisku a účinnost přenosu energie (prášek se lépe protaví a spojí). Nevýhody jemnějšího prášku jsou zvýšené tření mezi částicemi, negativní vliv na tekutost, zvyšuje se riziko vzniku „mostů“ (prášek se nežádaně spojuje) a v neposlední řadě se zvyšuje rychlost oxidace prášku. S jemnějším práškem si také můžeme dovolit tisknout v tenčích vrstvách. Díky tomu budou výtisky přesnější po rozměrové stránce a taky bude pozorována menší drsnost povrchu.[3] [4] [26] [37] [44]

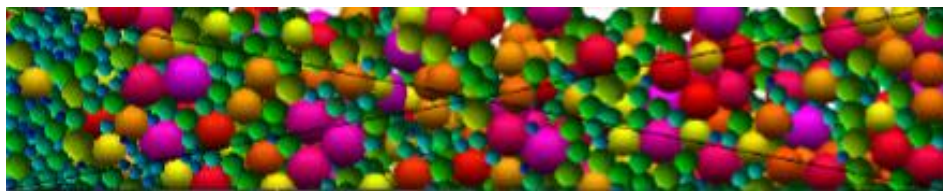


Obrázek 2 – prášek 316L SS – nepravidelný tvar velikost č. 42-155 μm [4]



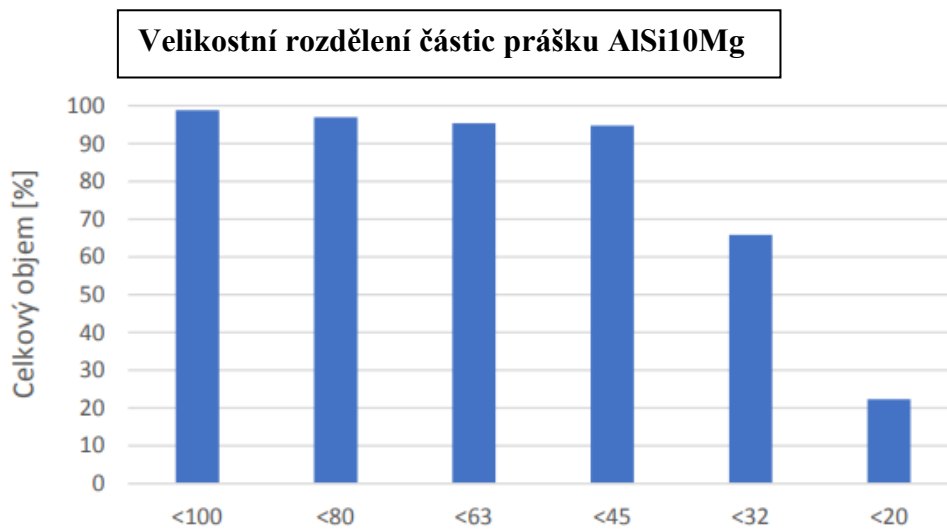
Obrázek 3 – prášek 316L SS – pravidelný kulovitý tvar, velikost č. 6-38 μm [4]

Je žádoucí, aby částice prášku nebyly stejně velké, protože menší částice prášku vyplní mezery mezi většími částicemi, jak je vidět na obr. 4. Tento efekt způsobuje vyšší hustotu prášku. Ta má pro nás kladné účinky uvedené výše.



Obrázek 2 – rozložení částic prášku

V grafu je nastíněno velikostní rozdělení částic prášku slitiny AlSi10Mg, která se hojně využívá v technologii DMLS.



Obrázek 3 – graf velikostního rozdělení částic prášku AlSi10Mg [45]

1.6.2 Úprava prášků

Pro úpravu prášků se používá několik procesů, které zajistí ty správné vlastnosti, díky kterým jsme schopni vyrobit kvalitnější tištěné díly. Zde si popíšeme tři procesy.

- **Žihání**

Žihání se používá na odstranění oxidické vrstvy, která mohla vzniknout při výrobě prášku nebo manipulaci. Provádí se v atmosféře vodíku nebo ve štěpném plynu s NH_3 .

U prvků jako je Al, Cr, Mo, Ti je nemožné použít tento proces pro odstranění oxidické vrstvy, proto je nutné zabránit oxidaci již při výrobě prášku. [47] [48]

- **Homogenizace prášku**

Po rychlém ochlazení dochází ke vzniku různých nestabilních struktur, proto se využívá procesu homogenizace, který vyrovná chemické nestejnorodosti v prášku. [47] [48]

- **Míchání**

Míchání se využívá za účelem dosažení určitého granulometrického složení (jak bylo zmíněno výše, není žádané mít stejně velké částice). Dále pro dosažení konkrétních výsledných technologických vlastností.

Mícháním dosáhneme homogenizace prášku, kterou docílíme lepší reprodukovatelnost. [47] [48]

1.6.3 Legování prášků

Legování prášků je metalurgický proces používaný ke zlepšení výsledných vlastností vstupního materiálu. U legování prášku jsou známy tři druhy.

Předlegované – už v procesu výroby prášku má tavenina finální požadované chemické složení, tím pádem i jednotlivá zrna jsou si chemicky podobná. Obr. 6. [48]



Obrázek 6 – předlegovaný prášek

Částečně legované – v tomto případě je pomocí difuze vytvořen legovaný prášek. To znamená, že legující částice jsou pevně spojeny s původními zrny a omezuje se tak segregace (oddělení) legur během procesu spékání. Obr. 7. [48]



Obrázek 7 – částečně legovaný prášek

Směsné – jde o smíchání prášku s legurami, takzvané dolegování před spékáním. Tento typ legování je náročný pro zachování homogenní směsi. Obr. 8. [48]



Obrázek 8 – směsný prášek

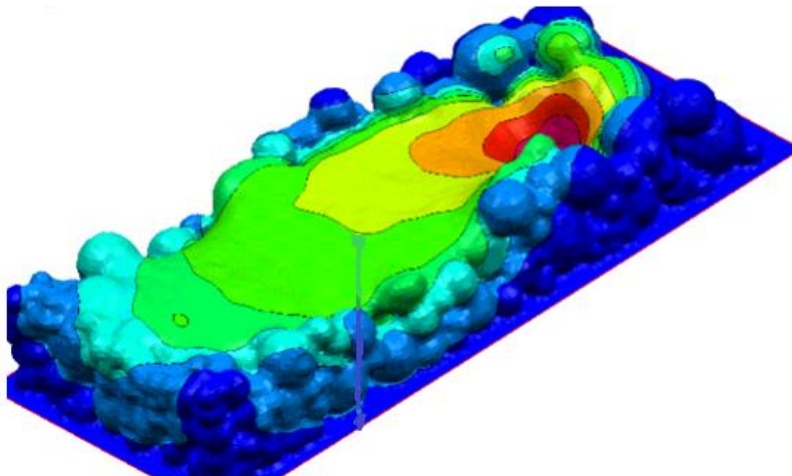
2 Tepelné působení při technologii DMLS

2.1 Vnesení tepla

Proces výroby součásti v technologii DMLS patří k vysoce teplotním. Vznik homogenní struktury zajišťuje vysoce výkonný vláknový laser. Je potřebné znát mechanismy těchto tepelných procesů, protože zapříčiňují pnutí a napětí v dílu. To ve svém důsledku má nepříznivý dopad na kvalitu výtisku, jako je například jeho rozměrová přesnost, vzniklé deformace, drsnost a mechanické vlastnosti. Teplota v procesu tištění může způsobit namáhání dílu takovým způsobem, že se ohne i stavební platforma nebo se díl dokonce odtrhne od platformy.

V procesu vytváření tepla pomocí laseru nalezneme tři typy tepla. Jedná se o konvekci (šíření tepla prouděním), vedení a záření.

V prášku jsou plynové mezery. Vedení tepla je tedy menší než v plném materiálu. Proto pozorujeme větší akumulaci tepla při tisku na okraji stavebního prostoru. Také dochází k postupnému stoupání teploty celého lože s nabývajícím počtem vrstev. Již slinutý materiál je více homogenní a lépe vede teplo. [1] [3] [7] [15] [17]

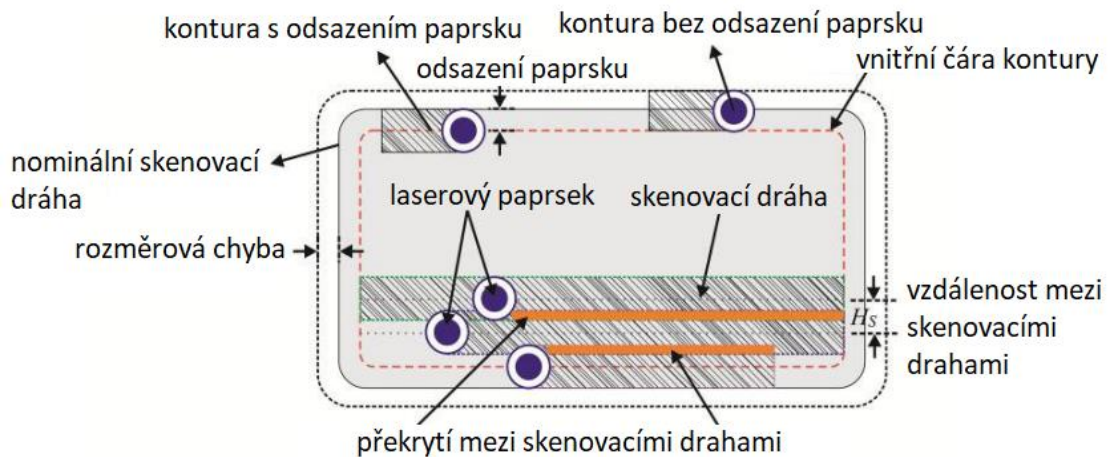


Obrázek 9 – zobrazení vnesení tepelné energie v simulačním programu

Každý materiál má jiný bod tání, proto výkon laseru a tím pádem vnesené teplo je dané právě použitým materiálem. Laserový paprsek propaluje nejen aktuální vrstvu, ale i vrstvy další, přičemž v každé další vrstvě je intenzita paprsku nižší. Vedlejší vrstvy z důvodu překrytí jsou také při tisku po vedlejší dráze ohřáty znovu. Můžeme tedy

konstatovat fakt, že tisknutý materiál je teplotně ovlivněn více než jednou. Překrytí je použito, protože laser nemá na svém okraji takovou intenzitu jako v jeho středu, tudíž neprotaví prášek zcela dokonale. Při překrytí se tedy vykompenzuje nedokonalé protavení prášku při předešlé dráze a materiál se stává více homogenní.

Z obrázku 10 jsou patrné překryté skenovací dráhy a také je pomocí mezikruží znázorněna různá intenzita laseru v jeho středu a na jeho okraji (to je blíže specifikováno na obrázku 11). Na obrázku je znázorněno více paprsků. To je pouze pro ilustrativní účely. [1] [3] [7] [11] [15] [17] [36]



Obrázek 10 – skenovací dráhy [36] přeloženo a upraveno pro BP

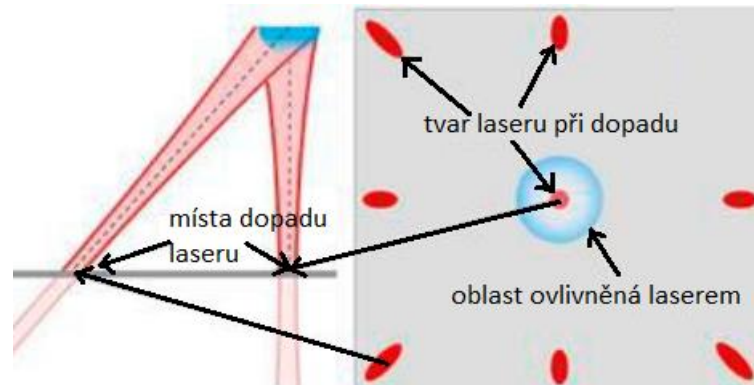
průměr paprsku zahrnující i mezikruží se slabší intenzitou paprsku



průměr paprsku se silnou intenzitou

Obrázek 11 – znázornění intenzity laseru [36],
přeloženo a upraveno pro BP

Průměr laseru je přímo úměrný použitému výkonu. Laser je distribuován do práškového lože z jednoho místa, proto je tvar laseru dán i jeho úhlem dopadu. Z obrázku 12 je viditelné, že k největšímu eliptickému zkreslení dochází v krajních oblastech stavební platformy. [3] [5] [36]

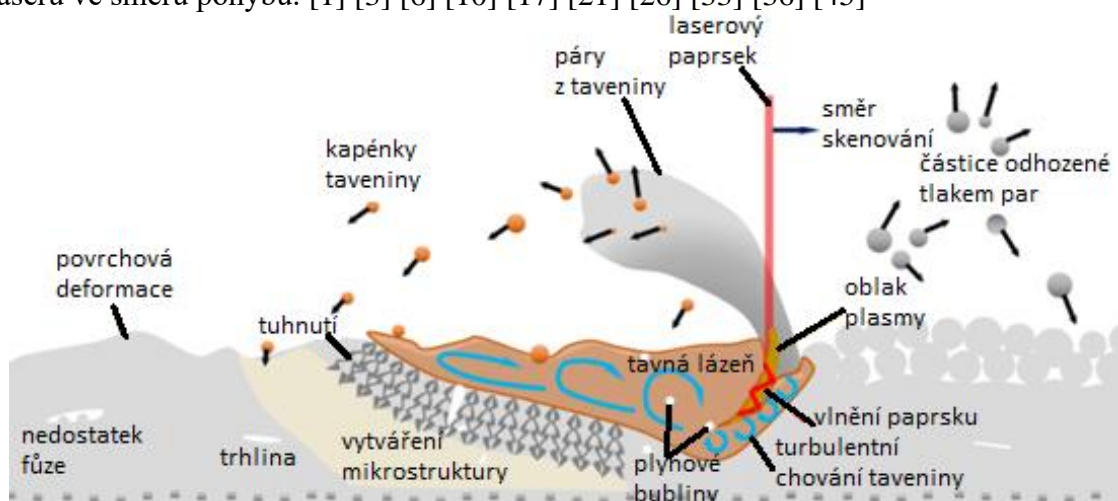


Obrázek 12 – dopad laseru pod úhlem, přeloženo a upraveno pro BP

2.2 Tavná lázeň

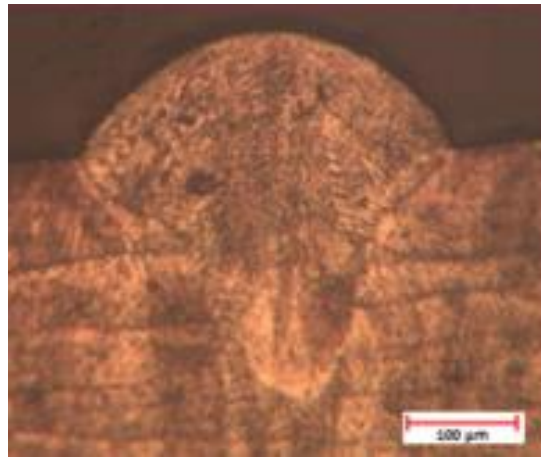
Tavná lázeň připomíná v příčném řezu tvar gaussovského kužele a proniká 1 – 5 vrstev hluboko (to je dáno nastavením tisku). Průměr tavné lázně je větší než průměr laseru. Velikost tavné lázně se pohybuje v řádech mikronů a je vytvořena v daném místě jen na desítky milisekund. To činí tuto oblast z pohledu tepelných a mechanických procesů velmi náročnou na pozorování. S vyšším protavením vrstev se zvětšuje i tavná lázeň. To zapříčiní rozměrové nepřesnosti a větší ovlivnění okolního materiálu. Není tedy žádoucí vždy protavit několik vrstev.

Nejvyšší teplota v lázni není ve středu laseru nýbrž těsně za středem vlákna dopadajícího laseru ve směru pohybu. [1] [3] [6] [10] [17] [21] [26] [33] [36] [45]



Obrázek 13 – schéma tavné lázně [46], přeloženo a upraveno pro BP

Na obrázku 13 je znázorněna tavná lázeň s příslušnými procesy a vadami v technologii DMLS. Je vidět, že vstupující laserový paprsek vytváří taveninu. Paprsek není v tavenině stále přímý, nýbrž se částečně vlní z důvodu odrazů. Vstup energie do tavné lázně vytváří turbulentní chování taveniny. Také jsou na obrázku znázorněné plynové bubliny, které se v tavenině vytvořily. Bubliny, které zatuhnou v mikrostruktuře, nazýváme póry. U taveniny je viditelný oblak páry, který vznikne v důsledku roztavení kovu. Z tavné lázně odlétají částice roztaveného kovu, které tvoří vadu balling (ta je přesněji specifikována níže). Šedé neroztavené kuličky, které vidíme na obrázku, jsou částice prášku odhozené tlakem par. Po ztuhnutí materiálu vidíme vady, jako jsou trhliny způsobené vnitřním pnutím a dutiny způsobené nedostatkem protavení prášku.



Obrázek 14 – řez tavnou lázní [7]

Na tomto obrázku (obr. 14) je dobře vidět stopa po tavné lázni. Jak již bylo řečeno výše, tvarem připomíná kužel a kořen tavné lázně zasahuje i přes spodní vrstvy. Také můžeme vidět vyvýšení vrcholu tavné lázně. Je důležité správně nastavit množství materiálu na přehrnutí další vrstvy, aby vhodně vyplnil a zakryl nově vzniklý povrch. [1] [3] [6] [10] [17] [21] [26] [33] [45]

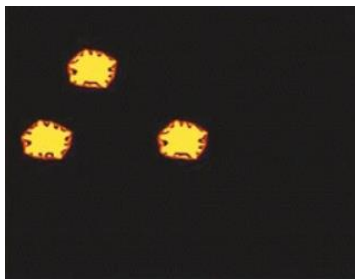
2.3 Mikrostruktura

Zkoumání tvorby mikrostruktury je velmi důležité pro dosažení požadované mikrostruktury a mechanických vlastností. Vzhledem k povaze technologie DMLS dosahují výrobky různých mikrostruktur (lamelární, ekviaxiální nebo bimodální). Tyto mikrostruktury mají také různé mechanické vlastnosti, proto požadovaná mikrostruktura a výsledné mechanické vlastnosti jsou závislé na aplikaci dílu.

Například u leteckých dílů, které vyžadují vysokou pevnost a lehké konstrukce, může být martenzitická mikrostruktura nejvhodnější pro získání požadovaných vlastností.

V případě biomedicínských implantátů může být vyžadována zlepšená únavová výkonnost, což vyžaduje rovnovážnou strukturu. [3] [4] [14] [15]

Teplotní gradient hraje důležitou roli v procesu tuhnutí spolu s časem růstu zrn. Tento fakt dokládají obrázky 15 a 16 s odlišným teplotním gradientem. Změna teplotních gradientů přímo ovlivňuje vývoj mikrostruktury, tvorbu dendritů a jejich špiček. [15] [45]

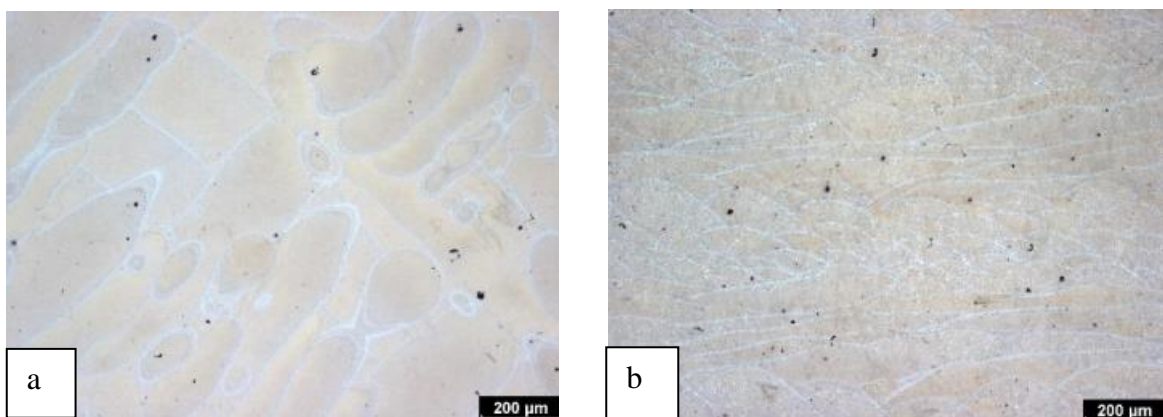


Obrázek 15 – fázový profil více částic Al-Si-10Mg při teplotním gradientu 362,66 K/mm [15]



Obrázek 16 – fázový profil více částic Al-Si-10Mg při teplotním gradientu 263,33 K/mm [15]

Mikrostruktura dílů vyrobených kovovým 3D tiskem je specifická viditelnými oválnými obrazci v příčném řezu a), které jsou vytvořeny jednotlivými tavnými lázněmi překrývajícími se přes sebe. V podélném řezu b) vidíme vrstvy sestavené z jednotlivých tavných lázní. Této struktuře se říká „fish scale“.[37] [45]



Obrázek 17 – mikrostruktura tištěných dílů ze slitiny AlSi10Mg a) v řezu směru vrstev b) v řezu směru stavby [45]

Součásti zpracované pomocí DMLS vykazují jinou mikrostrukturu i mechanické vlastnosti než součásti vyrobené například odléváním, a to za použití stejného materiálu. Vliv na tento jev mají nesporně různé tepelné procesy v těchto technologiích a také jiné rychlosti tuhnutí roztaveného materiálu.

V procesu DMLS pozorujeme větší rychlosti tuhnutí. Díky tomu dostaneme homogennější mikrostrukturu. Při vyšších rychlostech tuhnutí se v mikrostrukturu lépe rozpouštějí nečistoty a legující prvky. Oproti odlévání vykazuje pak mikrostruktura menší výskyt defektů a jsou eliminovány sraženiny. [3] [4] [14] [15] [18] [45]

2.4 Zbytkové napětí

S tepelným působením je velmi úzce spjata zbytkové napětí, proto zde budou popsány mechanismy vzniku a také možnosti snížení zbytkového pnutí.

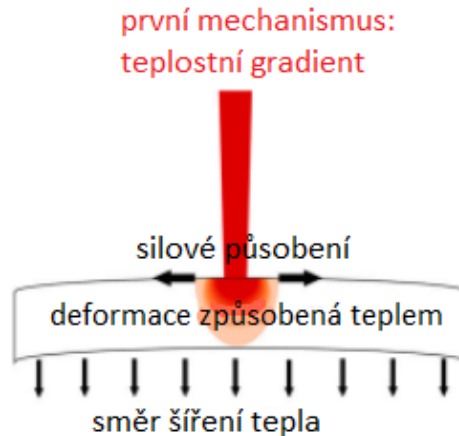
Napětí, které zůstává uvnitř tělesa v rovnováze, je známé jako zbytkové napětí. Hlavním důvodem, proč se zbytkové napětí objevuje u dílů vyrobených pomocí technologie DMLS, je agresivní roztavení materiálu pomocí lokálního působení energie za vysokých teplot a chladnutí materiálu ve velmi krátkém časovém úseku. Zbytkové napětí je považováno za hlavní nedostatky a nevýhody v aditivní výrobě. Toto napětí podporuje deformace, změnu tvaru, šíření trhlin a zhoršuje mechanické vlastnosti. Pnutí způsobené tepelnými procesy v součásti můžeme eliminovat vhodným navržením podpěr a následným tepelným zpracováním. [10] [33] [44]

Jsou známé dva různé mechanismy zbytkového napětí:

a) Mechanismus teplotního gradientu

V důsledku rychlého nárůstu teploty nejvyšší vrstvy se vytváří silný teplotní gradient.

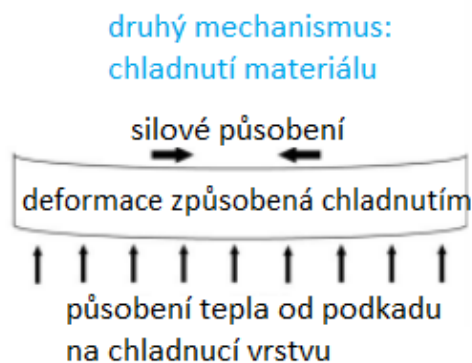
Tento mechanismus vzniku zbytkového napětí je viditelný na obr. 18. [10]



Obrázek 18 – první mechanismus vzniku zbytkového napětí [33]
přeloženo a upraveno pro BP

b) Chladnutí roztaveného materiálu v horní vrstvě

Horní vrstva se začne smršťovat kvůli tepelné kontrakci a spodní vrstvy zůstávají stále ohřáté a roztažené. Vlivem toho působí silné vzájemné napětí. Tento mechanismus vzniku zbytkového napětí je viditelný na obr. 19. [10]

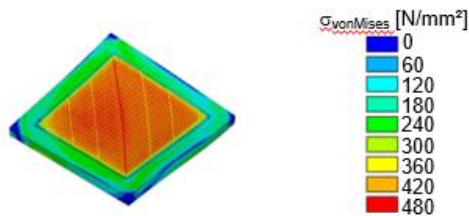


Obrázek 19 – druhý mechanismus vzniku zbytkového napětí [33], přeloženo a upraveno pro BP

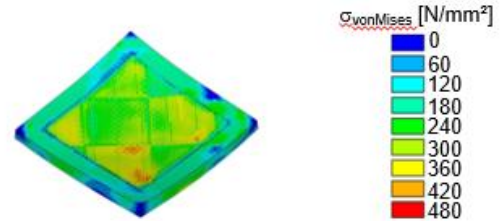
2.4.1 Vliv strategie skenování na zbytkové napětí

Délka drah skenování má přímý vliv na velikost zbytkového napětí. Zvolením vhodné strategie zkrátíme délku skenovacích vektorů. Tím ve svém důsledku dojde ke snížení zbytkového napětí, a to má přímý vliv na delaminaci, tvorbu trhlin a lze dosáhnout homogennější strukturu. Také je možné v další vrstvě otočit šrafy o příslušný úhel. Tím

dosáhneme rozdělení napětí do více rovin a napětí se pak nesčítají v jednu směru. Pro snížení zbytkového pnutí je dobré předeřhřát pracovní prostor na požadovanou teplotu. Na obrázcích 20 a 21 vidíme rozdíl zbytkového pnutí při zvolení různých druhů skenovací strategie.[6] [10] [20] [33] [42] [44]



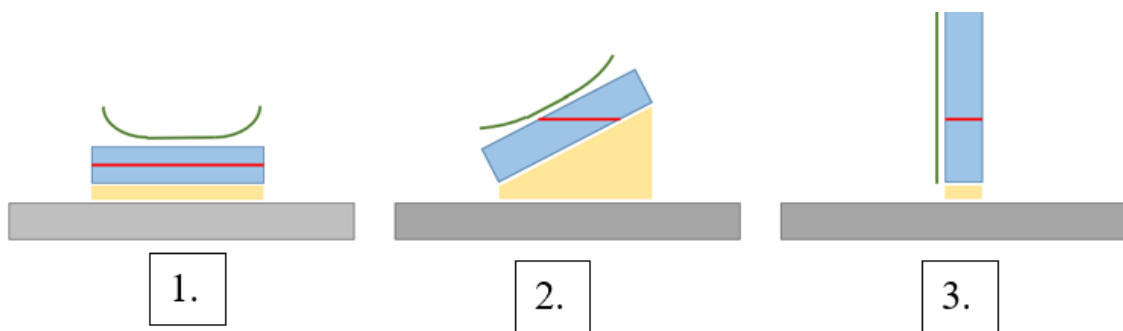
Obrázek 20 – strategie „tam a zpět“



Obrázek 21 – strategie šachovnice

2.4.2 Vliv orientace dílu na zbytkové napětí

Orientace dílu na paletě ovlivňuje velikost exponované plochy v jednotlivých řezech. Velká exponovaná plocha v jedné vrstvě má za následek především ve spodních vrstvách vnesení velkého množství tepla do v tu dobu tenkého dílce a jeho značnou deformaci. Vhodnou orientací lze zmenšit exponovanou plochu v jedné vrstvě, ale také umožnit lepší odvod tepla do podpěr nebo do okolního materiálu. Orientace dílu s ohledem na rozvod tepla je extrémně důležitá, existuje mnoho pravidel a příkladů, jak lze orientací dílu zlepšit odvod tepla a snížit následné deformace.



Obrázek 22 – exponovaná plocha při různé orientaci

Na obrázku 22 máme znázorněny tři možnosti orientace příslušného dílu. Vidíme, že v případě č. 1 je exponovaná plocha největší, ale zase máme možnost tuto součást silně uchytit pomocí podpěr. U příkladu č. 3 je exponovaná plocha nejmenší, avšak součást je uchycena malými podpěrami, které proto špatně odvádějí teplo. U případu č. 2 je nastíněn kompromis mezi případem 1 a 3. Exponovaná plocha je menší při zachování vhodného řešení podpěr.[5] [6] [10] [20] [33] [42] [44]

3 Post processing dílů vyrobených technologií DMLS

Post processing neboli následné zpracování zahrnuje několik dodatečných procesů úpravy hotové součásti. Post processing dílů je často žádaný a u většiny dílů nevyhnutelný pro dosažení vlastností dílu k příslušné aplikaci. Díly vyrobené pomocí DMLS vykazují po vytištění několik vlastností a vad, které se často musejí upravit či odstranit. Jedná se zejména o smršťení, vnitřní pnutí, porozitu, nedostatečnou drsnost povrchu. Post processing těchto dílů zahrnuje hlavně tepelné zpracování (většinou pro odstranění vnitřního pnutí) a různé úpravy povrchu od mechanických po chemické způsoby. Za post processing bychom také mohli považovat odříznutí součásti od stavební platformy a odstranění podpěr. [40] [41] [43] [44]

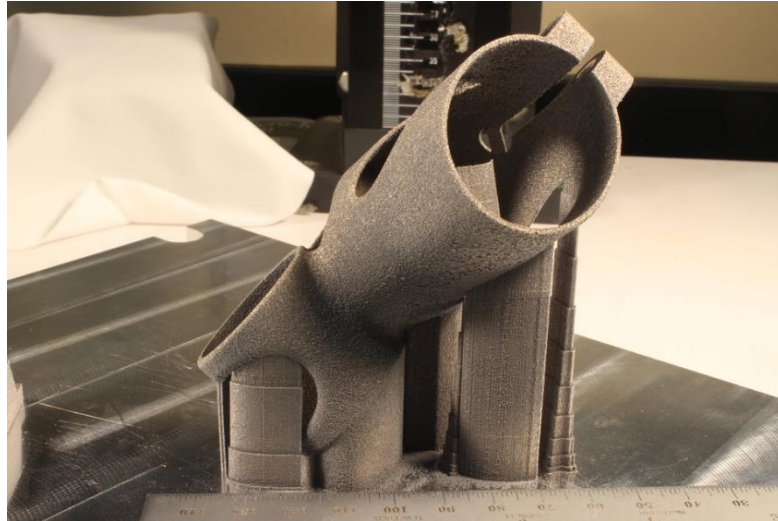
Z výpisu metod post processingu vidíme, že jejich množství je poměrně velké, avšak popsány budou jen ty, které se nejvíce pojí s aditivně vyrobenými díly.

Seznam metod post processingu:

- Izostatické lisování za tepla
- Tepelné izostatické lisování
- Dokončování pomocí konvenčních technologií
- Otryskání
- Omílání
- Abrazivní toková úprava
- Chemické ošetření
- Odstranění podpěr a stavební platformy
- Tepelné zpracování
- Laserové povrchové úpravy
- Tepelný nástřik
- Iontová implantace
- Elektrochemické leštění

3.1 Odstranění podpěr z dílu a výtisku z platformy

Odstranění podpěr z dílu a výtisku z platformy je základní a nejjednodušší druh post processingu. Využívá se technologií řezání, broušení, obrábění. Podpěry drží díl připevněný ke stavební platformě. Podpírá převisy a přemostění, které přesahují úroveň samonosného úhlu. Zabraňují deformaci dílu tím, že drží nejvíce exponované oblasti výtisku silou k platformě nebo k jiné části výtisku. Odvádějí teplo z dílu do okolního prášku a do platformy. Podpěry jsou po výtisku odstraněny, proto se navrhují tak, aby se daly jednoduše odřezat, vybrousit atd. [40] [44]



Obrázek 23 – zobrazení podpěr

3.2 Úpravy povrchu

Součásti vyrobené pomocí DMLS mají drsnost povrchu okolo Ra 12,5 (drsnost se může lišit v závislosti na stroji, parametrech tisku a materiálu). Tato nízká jakost povrchu je problém u funkčních částí výrobku a je třeba povrch vhodně opracovat, čímž se dosáhne vyšší jakosti povrchu a také lepší rozměrové přesnosti. Úpravy povrchu nezahrnují jen řešení drsnosti, ale také i zpevnění nebo odolnost povrchu proti korozi. [40] [41]

Základními technologiemi pro snížení drsnosti a zvýšení rozměrové přesnosti jsou třískové obrábění, broušení a lapování. Používají se k dosažení daných parametrů u funkčních ploch. U těchto technologií je třeba počítat s úběrem materiálu, a proto s přídatky při návrhu součásti. Konkrétně u obrábění se pohybujeme v jakosti povrchu od Ra 6,3 až 1,8. U broušení je to od Ra 0,8 až 0,2 a lapování dokáže leštit od 0,2 a méně. Problémem jsou často tvarově komplikované díly, které se u těchto technologií těžko upínají.[37] [41] [40]

Možné je také po vytištění zařadit otryskání povrchu. Vliv tryskání se liší v závislosti na použitém abrazivu. Základní dělení abraziva je ostré a tupé. Pro díly vytvořené technologií DMLS se běžně využívají písek, korund, ocelová drť nebo broky. Pomocí ostrých částic se povrch vyčistí a také se sníží drsnost. Za použití tupých částic (např. při brokování) se navíc dosáhne zpevnění povrchu součásti (mírně se sníží tažnost). [40] [41] [44] [45]

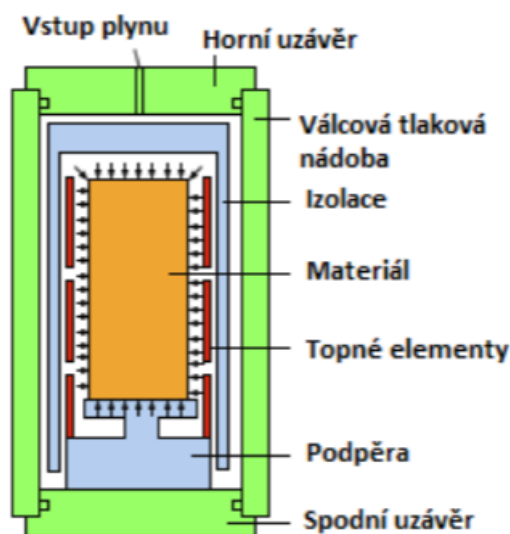
Další operací, která se využívá, je omílání. Omíláním docílíme hladkého povrchu a součást se zbaví povrchových nečistot. Omílání funguje na principu tření materiálů o sebe. Tato operace je často zařazena před chemickou úpravou z důvodu kvalitnějšího následného zpracování. [41]

3.3 Úprava vnitřních vad

Ve struktuře dílů vyrobených pomocí DMLS nalezneme vnitřní vady, jako jsou póry a dutiny. Tyto vady nejsou při správném nastavením tisku tak rozsáhlé, že by musely být vždy odstraněny, ale pokud to aplikace příslušné součásti vyžaduje nebo je použit materiál, který vykazuje po výtisku vysokou pórovitost, máme technologie, kterými tento problém dokážeme řešit.

Jednou z možností je izostatické lisování za tepla (HIP). Tato technologie dokáže u dílu snížit poréznost a zvýšit tak hustotu materiálu. Proces probíhá v tlakové komoře, do níž je umístěn díl. Poté se díl zhutní pomocí stlačeného inertního plynu, který působí rovnoměrně ve všech směrech. Tento proces probíhá za zvýšených teplot a způsobuje uzavření vnitřních dutin.

Nevýhodou je snížení rozměrů dílu, proto se musí při návrhu dílu brát toto smrštění v potaz. Hipování je poměrně drahá technologie, takže se využívá jen v nezbytných případech. [43] [44]



Obrázek 24 – metoda Hipování [43], přeloženo
a upraveno pro BP

3.4 Tepelné zpracování dílů vyrobených technologií DMLS

Tepelné zpracování (TZ) pro tradiční technologie, jako je například odlévání, je velmi dobře popsáno, avšak jinak je tomu u kovových tištěných slitin. Vzhledem k tomu, že u technologie DMLS je mnoho vstupujících vlivů, které mají výrazný podíl na výslednou mikrostrukturu výtisku, je tepelné zpracování takto vyrobených součástí velmi komplikované a neprobádané.

Je známo, že naprosto stejný materiál má odlišnou mikrostrukturu u součástí vyrobených tradičními technologiemi a kovovým 3D tiskem. Z tohoto důvodu nelze tepelné zpracování tištěných součástí provádět normalizovanými postupy vytvořenými pro jiné technologie i přesto, že se jedná o stejný materiál.

Součásti vyrobené technologií DMLS jsou v procesu tištění vystaveny vysokým teplotám a rychlým tuhnutím materiálu. V důsledku toho se v dílech vytvoří zbytková napětí, která jsou nepřijatelná u příslušných aplikací těchto dílů. Proto je použito následné tepelné zpracování pro odstranění těchto zbytkových napětí. Tato zbytková napětí lze také snížit předehřátím stavební platformy na 150 až 300 °C.

Tepelné zpracování ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti. Výtisky vykazují po tepelném zpracování nižší hodnoty pevnosti o 20 až 30 % oproti stavu as-build. Tažnost se může zvýšit až o 10 %. [16] [37] [40] [44] [45]

4 Vady dílů vyrobených technologií DMLS

U součástí vyrobených technologií DMLS pozorujeme několik vad, které ovlivňují výslednou kvalitu. Většinu vad lze eliminovat vhodným nastavením parametrů tisku nebo následným zpracováním. Pokud dokážeme pochopit příčiny vad a zaměříme se na jejich zkoumání, můžeme zdokonalit technologii, optimalizovat proces, a to vše vede k vyšší kvalitě součástí.

Zdroje vad lze rozdělit do kategorií, které nám dávají bližší informace o jejich původu. Do první kategorie spadají vady způsobené zařízením. Jedná se zejména o nastavení stroje, nevhodný výkon laseru a špatnou kalibraci celého systému. V druhé kategorii jsou vady vyvolané procesem. Jde o vliv procesních parametrů na výsledné defekty součástí. V třetí kategorii jsou vady vyvolané nevhodným návrhem modelu nebo špatně řešenými

podpěrami. Za čtvrtou kategorii bychom mohli považovat vady způsobené vstupním materiálem (práškem). Kvalita prášku je ovlivněna jeho výrobou a také zacházením. [44]

Rozměrová přesnost a drsnost povrchu zde nebudou uvedeny jako vady, a to z důvodu faktu, že se jedná spíše o příslušné vlastnosti součástí vyrobených pomocí technologie DMLS. Tyto vlastnosti jsou přímo závislé na technologii, materiálu, procesních parametrech výroby atd. Z tohoto důvodu se nejedná o vady, nýbrž důsledky jednotlivých faktorů výroby. [3] [13] [21] [39] [40] [41] [42] [44]

4.1 Pórovitost

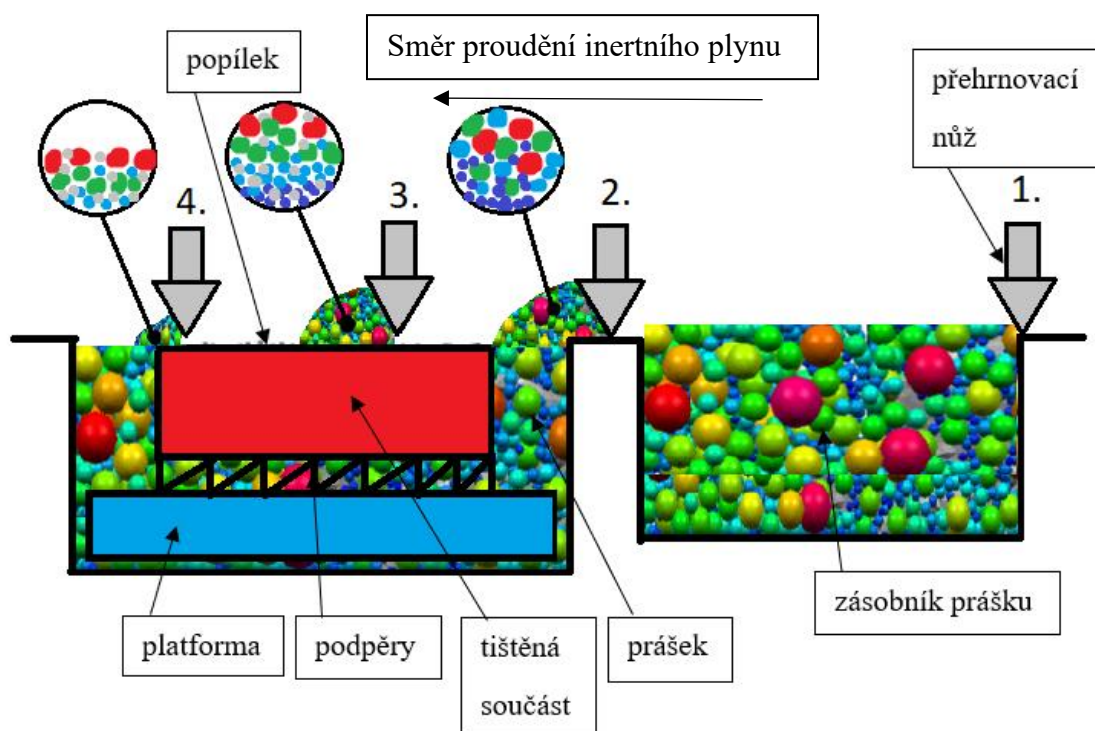
Pórovitost obecně u součástí silně ovlivňuje jejich únavové vlastnosti, mechanické vlastnosti a podporuje růst trhlin. Z těchto důvodů je u výrobků nežádoucí a je třeba ji odstranit. Pórovitost se u součástí vyrobených DMLS vyskytuje uvnitř vrstev, mezi nimi i na povrchu. Póry vzniklé u této technologie mají různé tvary, velikost i rozložení. Některé na délku dosahují až $20\ \mu\text{m}$. Na obrázku 25 je vidět rozložení pórů u vzorku ze slitiny AlSi10Mg vyrobené pomocí technologie DMLS. [44] [45]



Obrázek 25 – CT snímek vzorku 3D tištěné slitiny AlSi10Mg [45]

Pórovitost je způsobena hned několika zdroji. Jedná se o vady způsobené zařízením (to je blíže specifikováno na obr. 26), procesními parametry a v neposlední řadě charakteristikou prášku. Procesní parametry jako jsou tloušťka vrstvy, výkon laseru a šířka skenovacích drah, mají zásadní vliv na míru pórovitosti v součásti. Pokud tyto parametry budou nastavené správně, bublinky v tavné lázni budou při procesu schopné unikát a tím pádem nebude vznikat pórovitost. [3] [44]

Charakteristika prášku zahrnuje tvar, velikost a chemické složení částic. V závislosti na těchto vlastnostech prášku můžeme pozorovat jiné hodnoty pórovitosti součástí. Zejména pak při použití jiného materiálu. [3]



Obrázek 26 – schéma nanášení nové vrstvy

Na obrázku 26 je blíže popsán možný způsob vzniku pórovitosti, který spadá do kategorie vady vzniklé zařízením.

Obrázek znázorňuje čtyři polohy přehrnovacího nože, který ze zásobníku formou hrnutí začne rovnoměrně prášek rozprostírat do pracovního prostoru, a tím připraví další vrstvu k tisknutí.

V prvním poloze najede přehrnovací nůž do přesně definovaného množství prášku vytlačeného ze zásobníku. Velikosti částic prášku jsou v zásobníku rovnoměrně promíchány. Problém nastává, když se prášek hrne. Částice se podle velikostí vrství od nejmenších po největší, avšak na konci zásobníku je prášek ještě relativně rovnoměrně rozdělen.

V druhé poloze dochází k počátku přehrnování nové vrstvy prášku na předešlou. Jak můžeme vidět v detailu, prášek je již mírně rozdělen podle velikostí. Ty nejmenší částice jsou distribuovány na začátek pracovního prostoru. Díky tomu začátek pracovního prostoru disponuje vyšší hustotou.

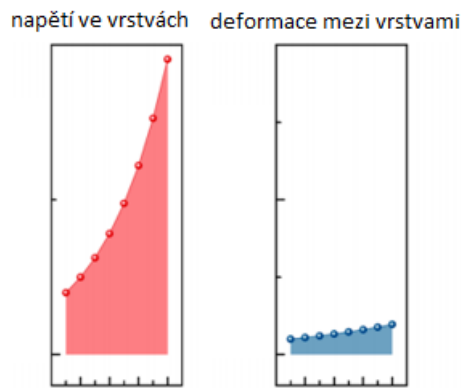
V třetí poloze je rozložení prášku silně určeno velikostí částic a také dochází k smíchání prášku s jemným popílkem, který vznikl na předešlé vrstvě. Také jsou do prášku

vmíchány částice, které vylétají z tavné lázně a díky proudění inertního plynu dopadají nerovnoměrně do pracovního prostoru. Tyto nečistoty způsobují nedokonalou čistou kovového prášku. Ve svém důsledku se nečistoty znovu roztaví v nové tavné lázni a dochází k vytvoření bublinek. Bublínky, které nestihnou z tavné lázně odejít před jejím ztuhnutím, vytvoří ve struktuře póry.

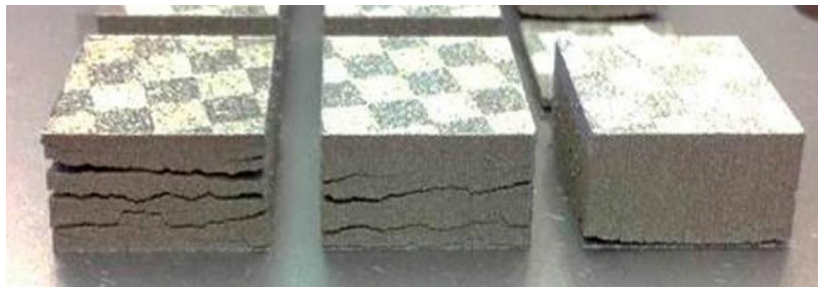
V detailu u poslední čtvrté polohy můžeme vidět, že nejmenší částice se zde již nenacházejí nebo se vyskytují pouze ve velmi malém množství. To je způsobeno právě jevem, při kterém se prášek vrství dle velikostí částic. Z tohoto důvodu je hustota prášku na konci pracovního prostoru nižší než na začátku, protože mezery mezi většími částicemi nejsou vyplněny. Hustota prášku má zásadní vliv na vedení tepla a tekutost v pracovním prostoru. To má silný dopad na kvalitu výsledné součásti. Ke konci pracovního prostoru může dojít k nedokonalému přehrnutí nové vrstvy způsobenému nedostatkem prášku. Důvodem je propadlá plocha v místě, kde byl prášek slinut, a tak se vytvoří větší prostor na novou vrstvu. Tento nedostatek prášku má vliv na pórovitost, ale také na rozměrovou přesnost a správné protavení materiálu.

4.2 Zbytkové napětí a delaminace

Jak již bylo podrobněji popsáno výše, zbytkové napětí je způsobeno tepelným působením v procesu tisku. Jedním z důsledků zbytkového napětí je možný vznik prasklin a delaminace součástí. Delaminace je příslušný druh praskání materiálu, kdy se praskliny šíří mezi sousedními vrstvami. Vzniká překročením vazbové síly mezi vrstvami z důvodu silného zbytkového pnutí. Na obrázku 27 vidíme, že napětí mezi vrstvami je mnohonásobně vyšší než deformace ve vrstvách. Ve svém důsledku je toto právě důvod, proč delaminace vzniká mezi vrstvami a ne uvnitř vrstev. Reálné fotografie delaminace jsou vidět na obrázku 28, kde můžeme pozorovat silnou delaminaci mezi několika vrstvami. Na pravé straně fotografie se jedná o delaminaci mezi platformou a součástí. Zbytkové napětí zde bylo větší než silová vazba mezi platformou a součástí. [10] [11] [33] [39]



Obrázek 27 – napětí a deformace v dílu [33], přeloženo a upraveno pro BP

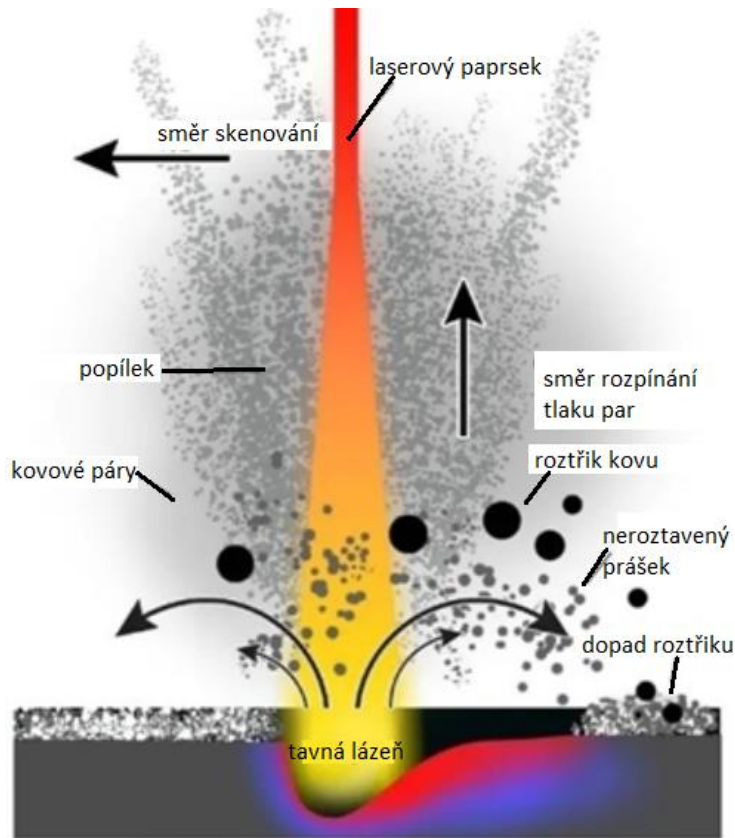


Obrázek 28 – delaminace vzorků [39]

4.3 Vada balling

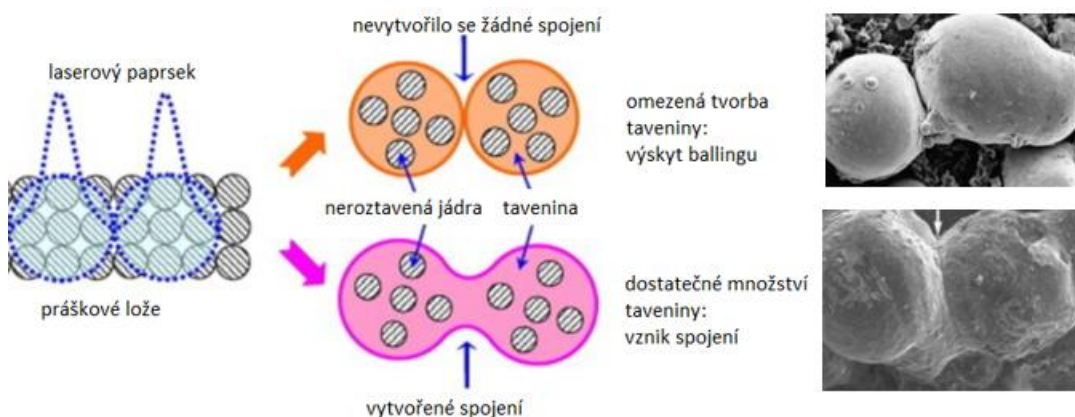
Jev balling (kuličkování) je jeden z nejvýznamnějších problémů u DMLS. Má nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti, pórovitost a mikrostrukturu slinutých součástí. Balling je ve větším rozsahu, pokud vytvoříme přebytek roztaveného materiálu nebo když je viskozita v tavné lázni příliš nízká. Výskyt ballingu během tisku zabraňuje homogennímu spojení prášku a vrstev, tím dojde k porézności, separaci vrstev v důsledku slabé vazby mezi vrstvami a indukovanému tepelnému napětí. K vadě balling dochází, když vrstva prášku se nedokáže protavit a propojit s vrstvou pod ní nebo když je výkon laseru příliš velký a tím se vytváří vysoký tlak par uvnitř taveniny, čímž následně dochází k rozstříku kapének taveniny, které mají velmi malou smáčivost a tekutost v důsledku rychlého tuhnutí. Tyto kapénky dopadají na okolní povrch a vytváří nerovnou plochu. Další vrstvy jsou tedy tvořeny na špatném povrchu a vady struktury se násobí. Vadě balling velmi napomáhá existence oxidu ve vrstvě a na povrchu taveniny. Výskyt ballingu je tedy při

DMLS nežádoucí kvůli řadě nevýhod s tím spojených, jako je zvýšení drsnosti povrchu, tvorba pórů, zhoršení rozměrové přesnosti a mechanických vlastností atd. [3] [4] [44]



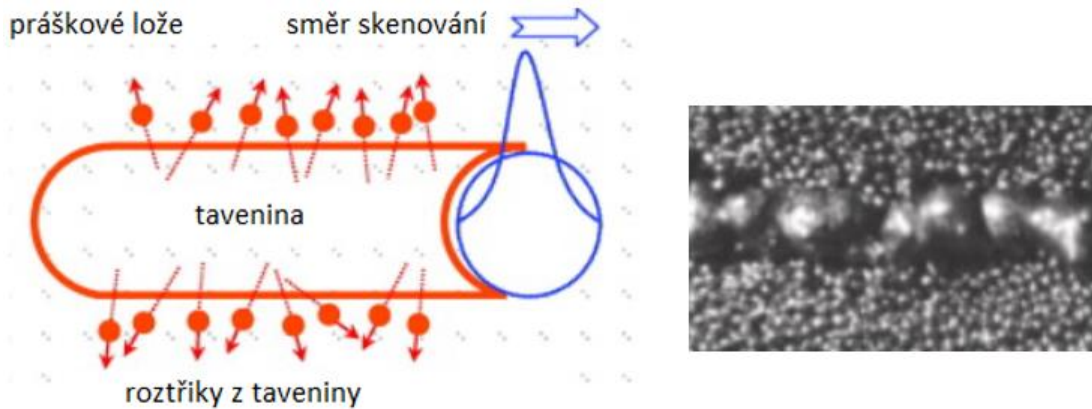
Obrázek 29 – schéma vzniku ballingu [39], přeloženo a upraveno pro BP

První způsob vzniku ballingu nastává při nízkém výkonu laseru. U prvního druhu byly na povrchu kuliček nalezeny extrémně drsné kuličky s přerušovanými dendritickými vzory. První druh ballingu je způsoben malým množstvím kapaliny, nízkou viskozitou taveniny a nedostatečným roztavením kvůli nízkému výkonu laseru. [3]



Obrázek 30 – první mechanismus vzniku ballingu [3], přeloženo a upraveno pro BP

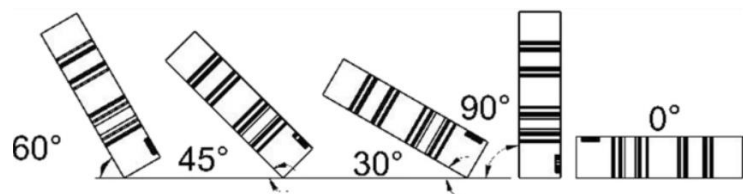
Druhý způsob vzniku ballingu je charakterizovaný velkým množstvím malých kuliček. Nastává při poměrně vysoké rychlosti skenování. Druhý druh ballingu se objevuje v důsledku rozstříkávání roztavené kapaliny vzniklé intenzivní nestabilitou taveniny.[3]



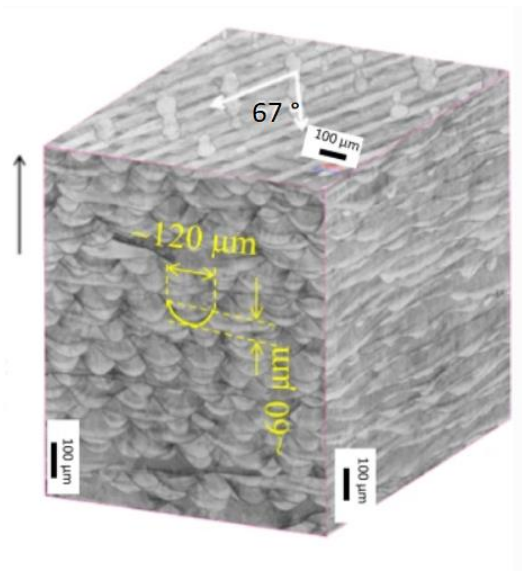
Obrázek 31 – druhý mechanismus vzniku ballingu [3], přeloženo a upraveno pro BP

4.4 Anizotropie

Směr tisku materiálu ovlivňuje jeho mikrostrukturu. Jinými slovy, výrobek nemá díky vrstvení materiálu na sebe všude stejnou mikrostrukturu (to můžeme vidět na obr. 33 – kostka). Což vede k anizotropnímu mechanickému chování. Získanou texturu nelze zcela upravit standardními tepelnými úpravami. Anizotropie materiálu ovlivňuje nejen mechanické vlastnosti, ale i šíření trhlin. Anizotropie je silně ovlivněna nastavením parametrů tisku, avšak při vhodném nastavení ji můžeme značně eliminovat. Tento jev může ovlivnit i orientace a poloha dílů na platformě. Na obrázku 32 můžeme např. vidět různé možnosti polohování. Pod úhlem 45° je nutnost použití podpěr. Sklon 90° může přinést výsledky v případě rovinnosti, drsnosti povrchu, ale následná doba tisku a náklady na tisk by mohly být ve srovnání s jinými úhly vyšší. [5] [12]



Obrázek 32 – možnosti orientace součásti [12]



Obrázek 33 – znázornění vrstev na různých plochách [14],
upraveno pro BP

5 Vliv parametrů tisku

Optimalizace parametrů u této technologie se musí brát jako určitý celek, protože jednotlivé parametry jsou na sobě velmi závislé. Při změně určitého parametru je třeba brát v úvahu možnost vzniku vady v důsledku porušení určité vazby mezi parametry. V dnešní době je již vyzkoumáno několik kombinací těchto parametrů, které dosahují nejlepších výsledků. Tyto kombinace se volí na základě charakteristiky příslušného dílu.

Parametry tisku mají velmi zásadní schopnost rozhodovat o kvalitě součásti a mají přímou spojitost s množstvím a velikostí vad. Parametry tisku s největším vlivem na kvalitu finální součásti jsou ty, které dovedou ovlivnit množství roztaveného materiálu v tavné lázni. Toto množství taveniny má přímou vazbu na množství vložené energie z laseru.[1] [3] [5] [8] [9] [42]

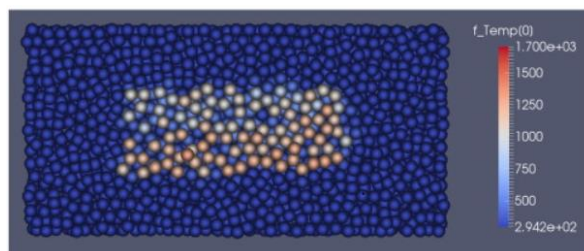
5.1 Vliv výkonu laseru

Různým výkonem laseru ovlivňujeme výši vnesené hustoty objemové energie (VED). Velikost přivedené energie je pro nás velmi důležitá, protože ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti, ale také výskyt a množství vad ve vyrobeném dílu.

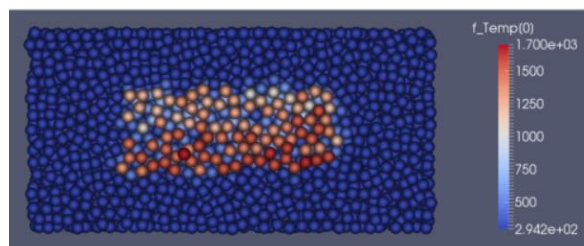
Při nízké hodnotě výkonu je tavná lázeň malá. To má za následek nedokonalé protavení prášku a špatné spojení vedlejší a spodní vrstvy. V důsledku toho se v prášku vyskytují částečně neroztavené částice (vměšky) a objevuje se poréznost materiálu.

Při velkém výkonu laseru je vnesení VED příliš agresivní. Vzniká tak větší tavná lázeň, ve které dochází k turbulentnímu chování taveniny a vytváření vysokého tlaku v tavenině z důvodu vypařování materiálu, což vede k rozstříku taveniny a vzniku ballingu. Tento vysoký výkon laseru má za následek velký teplotní gradient. Distribuce tepla se pak stává nerovnoměrnou, vzniká povrchové teplotní prnutí a následně i zbytkové prnutí celého dílu. To vede k většímu počtu trhlin ve vrstvě i mezi vrstvami.

Při vhodném nastavení výkonu dosáhneme dobré smáčivosti taveniny. To vede k správnému spojení vrstev a vytvoření struktury s malým výskytem vad. Tím dosáhneme lepších mechanických vlastností, nižší drsnosti a lepší rozměrové přesnosti. [1] [3] [7] [8]



Obrázek 34 – distribuce tepla při výkonu laseru 100 W
[1]



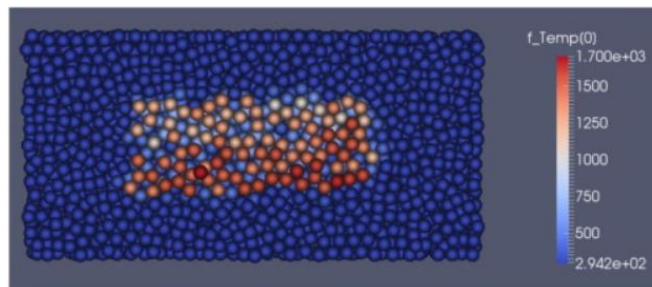
Obrázek 35 – distribuce tepla při výkonu laseru 300 W
[1]

Na základě obrázků 34 a 35 můžeme s jistotou konstatovat, že při vyšších výkonech laseru se zvyšuje i teplota v práškovém loži.

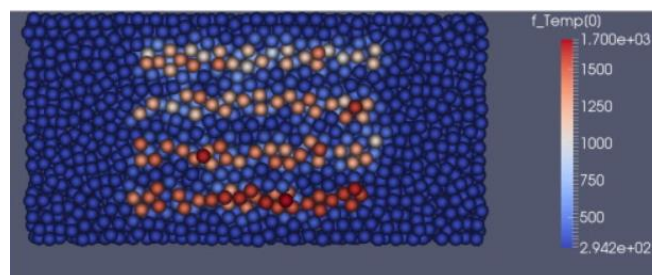
5.2 Vliv rozteče skenovacích drah

Obrázky 36 a 37 poukazují na fakt, že vnesené teplo je v obou případech stejné. To je způsobeno stejnými tiskovými parametry výkonu a rychlosti skenování. Zásadní rozdíl nastává v homogenitě vyrobeného dílu. Hlavním důvodem je větší rozteč drah skenování, v důsledku čehož je zapříčiněno nedostatečné roztavení prášku. Vznikají tak nedokonalé vazby mezi sousedními vrstvami a velká poréznost materiálu. Při tisku se používá přesah $1/4$ průměru laseru pro dosažení správného spojení sousedních vrstev. Při menší rozteči skenovacích drah se dosáhne vyšší jakosti povrchu.

S dobře nastavenou roztečí skenovacích drah dochází v prášku k většímu pohlcení energie, a to má příznivý vliv na mechanické vlastnosti výtisku. [1] [6] [36]



Obrázek 36 – distribuce tepla při použité rozteči 0,1 mm za stálého výkonu a rychlosti skenování [1]



Obrázek 37 – distribuce tepla při použité rozteči 0,2 mm za stálého výkonu a rychlosti skenování [1]

5.3 Vliv rychlosti skenování

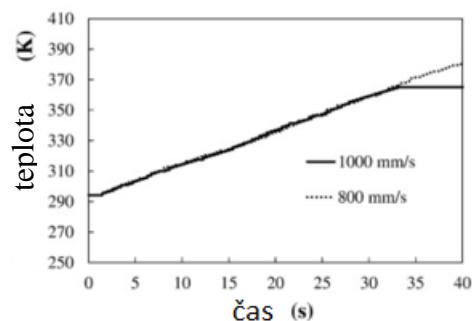
Při použití nižší rychlosti skenování se dosahuje většího protavení do hloubky a jsou pozorovány vyšší tepelné špičky z důvodu větší hustoty energie. S nižší rychlostí se dráhy stávají širší z důvodu větší tavné lázně. V důsledku toho vzniká vyšší povrchové napětí a

dochází k dělení tavné lázně. Ta pak tuhne v kulovitých útvarech, což je pro nás nežádoucí. [7] [17]

Dále při vysoké rychlosti je pozorovatelný vyšší výskyt druhého typu ballingu, který způsobuje pórovitost a rozměrovou nepřesnost. [7]

Vysoká i nízká rychlost laseru má za následek vady, a proto je důležité vhodné nastavení tohoto parametru pro eliminaci těchto vad. [3]

Z obrázku 38 je patrné, že rychlost skenování nemá zásadní vliv na průměrnou teplotu, avšak při použití větší rychlosti je proces dokončen dříve. [1] [8]

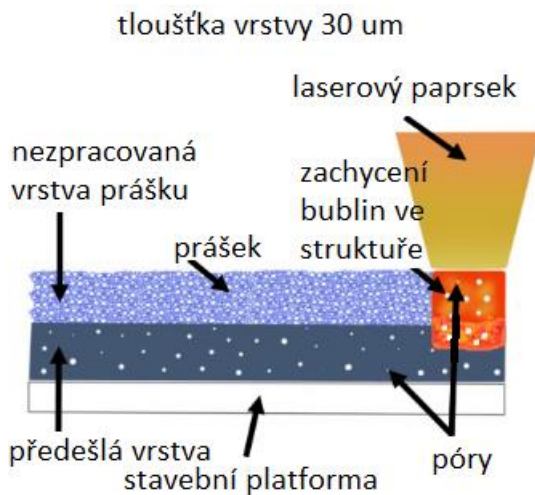


Obrázek 38 – skenovací rychlosti 1000 mm/s a 800 mm/s

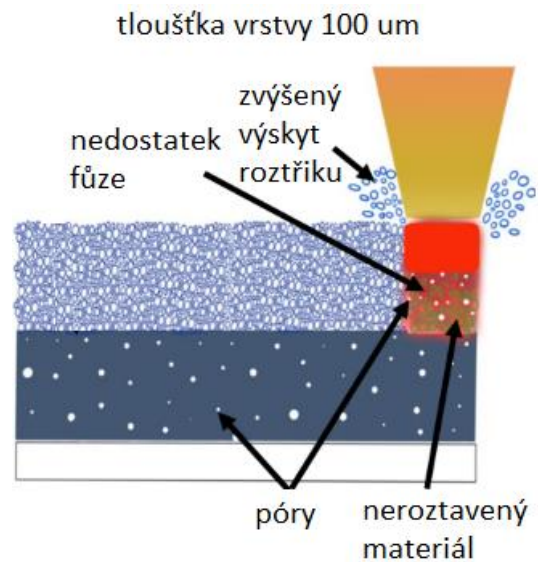
[1]

5.4 Vliv tloušťky vrstvy

Zvětšení tloušťky vrstvy zkracuje výrobní čas, avšak při překročení určité hranice se objevují problémy, jako je pórovitost, drsnost, snížená rozměrová přesnost a oslabené mechanické vlastnosti způsobené nehomogenitou dílu. Tloušťku vrstvy lze nastavit mezi 20 až 100 μm (rozsah tloušťky vrstvy udává výrobce). S nízkou tloušťkou vrstvy vzniká nebezpečí kontaktu přehrnovacího nože s vytištěnou vrstvou. To může snížit přesnost stroje nebo ho poničit. Také může nastat situace, kdy velikost některých částic prášku bude větší než nastavená tloušťka a v tom případě dojde k nerovnoměrně vytvořené vrstvě, což vysoce ovlivňuje kvalitu výtisku. [26] [42] [45]



Obrázek 39 – vliv tloušťky vrstvy 30 µm [26],
přeloženo a upraveno pro BP



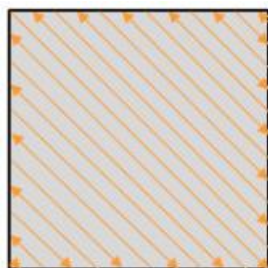
Obrázek 40 – vliv tloušťky vrstvy 100 µm [26],
přeloženo a upraveno pro BP

5.5 Vliv skenovací strategie

Jak již bylo řečeno výše, skenovací strategie má významný vliv zejména na zbytkové napětí materiálu. Toto napětí můžeme silně eliminovat použitím příslušné strategie. Máme více typů skenovacích strategií, jejichž použití je dáno samotnou stavbou součásti. Snažíme se najít vždy nejvhodnější druh skenovací strategie, který nejlépe vyhovuje konkrétní geometrii součásti.

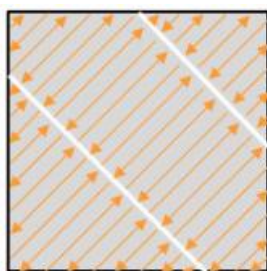
Ačkoli strategií skenování je mnoho, zde budou popsány tři nejzákladnější a nejpoužívanější.

Základní skenovací strategií je metoda „tam a zpět“. U této metody se využívá natočení vrstev o 67°. Při tomto úhlu se stejný směr šraf bude opakovat až po několika vrstvách. To je pro nás velice přínosné, protože se napětí v součásti rozloží do několika směrů. Tento způsob šrafování umožňuje vyšší stavební rychlost, avšak je vhodný pouze pro tenké a malé součásti. To je způsobeno faktem, že tento druh šrafování vysoce podporuje vznik zbytkového napětí kvůli dlouhým skenovacím vektorům. Na obrázku 41 vidíme schéma drah. [6] [11] [20]



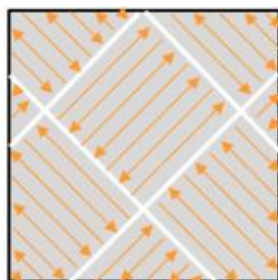
Obrázek 41 – strategie skenování tam a zpět [11]

Další ze skenovacích strategií je metoda pruhů. Metoda je pro nás přínosná, protože u ní pozorujeme homogenní rozložení zbytkového pnutí. Jinými slovy je pnutí v součásti rovnoměrněji rozděleno. Díky tomu je tato strategie vhodná pro velké součásti. Obrázek 42 znázorňuje tuto strategii pruhů. [11]



Obrázek 42 – strategie pruhů [11]

Třetí strategií je šachovnicový vzor. Šrafy jsou rozdělené do jednotlivých čtverců o straně 5 mm, přičemž sousední čtverce mají vždy směr šraf natočený o 90° . Stejně jako u první metody se u každé další vrstvy otočí vzor o 67° . Otočí se i jednotlivé čtverce. Tímto způsobem se značně eliminuje zbytkové napětí. Metoda je proto vhodná pro velkoplošné součásti. Oproti jiným strategiím je metoda časově náročnější, avšak při použití u velkých součásti vykazují tyto díly nejvyšší eliminaci zbytkového pnutí. [11]



Obrázek 43 – strategie šachovnice [11]

Závěr

Předložená práce poskytla čtenáři možnost pochopit technologii DMLS a poukázala na stěžejní výhody oproti konvenčním technologiím. Také byly v rámci práce shrnuty hlavní aspekty rozhodující o výsledné kvalitě součástí vyrobených technologií DMLS.

Tyto aspekty zahrnovaly zejména tepelné působení při procesu tisku. V tomto bodě jsem podrobně popsal děje týkající se tavné lázně a s tím spojené vnesení tepelné energie do práškového lože. Bylo zjištěno, že laser, jako distributor tepelné energie, jeví v závislosti na poloze místa skenování eliptické zkreslení a má také různou intenzitu ve svém průměru. Také jsem zjistil, že tavná lázeň může pronikat až přes pět vrstev a zasahuje i do okolních drah. Tím je způsobeno několikanásobné tepelné ovlivnění již hotových vrstev a vznik zbytkového napětí. Proto jsou v této práci popsány oba mechanismy vzniku. Jedná se o vznik pomocí tepelného gradientu a vznik pomocí chladnutí horních vrstev. Objasnili jsem možnost jeho eliminace pomocí vhodně zvolené strategie skenování. Ukázalo se, že nejvhodnější jsou ty strategie, které s danou geometrií součásti mají krátké skenovací vektory. Také je možné zmírnit zbytkové napětí a jeho důsledky orientací součásti na platformě. Je to taková orientace součásti, která má malou exponovanou plochou a vhodně umístěné podpěry. Silné zbytkové napětí vede až k prasknutí součásti a proto je v práci také zahrnuta delaminace.

Pro technologii DMLS jsou mimo zbytkového napětí charakteristické další vady, jako je pórovitost, anizotropie a balling. Vznik pórovitosti má více činitelů, jako je špatná kvalita prášku, nevhodné nastavení parametrů tisku, nebo spadá do kategorie vady vzniklé zařízením. Pro podrobnější popis jsem vytvořil obrázek, který vyobrazuje právě možný vznik pórovitosti způsobený samotným strojem. Jedná se hlavně o smíchání popílku, nerovnoměrné přehrnutí nové vrstvy a rozdělení částic prášku podle velikosti.

Anizotropie v technologii DMLS je viditelná, avšak mnohé studie dokazují, že při správném nastavení parametrů ji můžeme značně eliminovat.

V neposlední řadě byla podrobně vysvětlena vada balling, která je nejtypičtější z vad pro technologii DMLS. Byly popsány oba způsoby jejího vzniku. Velkou roli v míře ballingu hrají parametry tisku, jako je konkrétně výkon laseru a rychlost skenování.

V závislosti na charakteristických vlastnostech součástí byli sepsány možnosti následného zpracování. Stěžejní metody byly obrábění pro dosažení potřebné kvality

ploch, izostatické lisování za tepla pro snížení pórovitosti a také tepelné zpracování hlavně k zmírnění zbytkového napětí.

Dále byly popsány parametry tisku a jejich vlivy na výslednou kvalitu výtisků. Parametry tisku jsou výkon laseru, strategie skenování, rozteč drah, rychlost skenování a tloušťka vrstvy. Jejich nevhodné nastavení podporuje zvýšenou drsnost, malou rozměrovou přesnost, pórovitost, vznik ballingu, velikost zbytkového napětí a další. Bylo poukázáno na fakt, že parametry tisku jsou jeden na druhém velice závislé. Při změně určitého parametru je často třeba přenastavit i parametry ostatní, tudíž je nezbytně nutné brát parametry tisku jako určité kombinace, které jsou již nalezeny a shledány jako nejlepší pro příslušné materiály a aplikace dílů.

Na kvalitě výtisků se podílí i vstupní materiál. Proto jsou v práci zahrnuty důsledky velikosti a tvaru částic, možnosti úpravy a legování prášku. Hustota vstupního materiálu má značný dopad na tekutost, tepelné vedení a vznik vad. Proto je žádoucí mít v prášku různé velikosti částic, čímž se zvýší výsledná hustota práškového lože.

V neposlední řadě byla technologie DMLS přiblížena čtenáři z pohledu výhod oproti konvenčním technologiím. Největší výhodou je flexibilita výroby a minimální limitace z pohledu tvarové složitosti. Tyto a další výhody byly konkrétně vyobrazeny na příkladech z praxe, kde právě kovový 3D tisk může značně zefektivnit výrobu a ušetřit finanční náklady.

Pro důkladnější zpracování aspektů s vlivem na výslednou kvalitu dílů by bylo vhodné práci rozšířit o podrobnější popis změn mikrostruktury v závislosti na použitých materiálech a různých parametrech tisku. To už by bylo ale nad rámec cílů této práce.

Potenciál této technologie je obrovský, a tudíž byla předmětem mnoha výzkumů, i přesto stále disponuje několika neznámými v oblasti samotného procesu. Pokud dokážeme detailněji pochopit vliv procesních parametrů, vznik vad, důsledky charakteristiky vstupního materiálu, procesy odehrávající se v tavné lázni a další, můžeme tuto technologii vysoce zefektivnit a tím rozšířit její pole použití.

Bibliografie

- [1] LEE, Weng-Hoh a Yi ZHANG. Discrete element modeling of powder flow and laser heating in direct metal laser sintering process. *Powder Technology* [online]. 2017, (315) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.04.002>
- [2] JONES, Gordon. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained. *All3DP* [online]. 2021 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>
- [3] ANAND, Mukul a Alok Kumar DAS. Issues in fabrication of 3D components through DMLS Technique: A review. *Optics & Laser Technology* [online]. 2021, (139) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106914>
- [4] SHEN, Yifu. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials & Design (1980-2015)* [online]. 2009, (30) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.013>
- [5] LEE, Jeong-Rim a Min-Su LEE. Effects of building direction and heat treatment on the local mechanical properties of direct metal laser sintered 15-5 PH stainless steel. *Materials Characterization* [online]. 2020, (167) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110468>
- [6] BHARDWAJ, Tarun a Mukul SHUKLA. Effect of laser scanning strategies on texture, physical and mechanical properties of laser sintered maraging steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2018, 2018, (734) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.089>
- [7] SADOWSKI, Magda a Leila LADANI. Optimizing quality of additively manufactured Inconel 718 using powder bed laser melting process. *Additive Manufacturing* [online]. 2016, (11) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.03.006>
- [8] KUMAR, Pravin a P. CHAKRAVARTHY. Effect of Scan Speed and Laser Power on the Nature of Defects, Microstructures and Microhardness of 3D-Printed Inconel 718 Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2021, (30) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s11665-021-06163-8>

- [9] RHEIN, Robert K. a Qianying SHI. Effect of direct metal laser sintering build parameters on defects and ultrasonic fatigue performance of additively manufactured AlSi10Mg. *FFEMS: Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* [online]. 2021, 2021, (44) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/ffe.13355>
- [10] BASKETT, Ryan. *EFFECTS OF SUPPORT STRUCTURE GEOMETRY ON SLM INDUCED RESIDUAL STRESSES IN OVERHANGING FEATURES* [online]. San Luis Obispo, 2017 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3057&context=theses>. Diplomová práce. Faculty of California Polytechnic State University. Vedoucí práce Kim Shollenberger, Ph.D.
- [11] SAUNDERS, Marc. Design for metal AM - a beginner's guide. *Linked in* [online]. 2017 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: https://www.linkedin.com/pulse/design-metal-am-beginners-guide-marc-saunders/?trk=portfolio_article-card_title
- [12] ULLAH, Rizwan a Jan Sher AKMAL. Anisotropy of additively manufactured AlSi10Mg: threads and surface integrity. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, (107) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05243-8>
- [13] MOHAMMADI, Mohsen a Hamed ASGARI. Achieving low surface roughness AlSi10Mg_200C parts using direct metal laser sintering. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, (20) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.012>
- [14] BAWANE, Kaustubh Krishna a Dheepa SRINIVASAN. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Direct Metal Laser-Sintered (DMLS) CoCrMo After Heat Treatment. *Metallurgical and Materials Transactions A* [online]. 2018, (49) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s11661-018-4771-4>

- [15] NANDY, Jyotirmoy. Microstructure evolution of Al-Si-10Mg in direct metal laser sintering using phase-field modeling. *Advances in Manufacturing* [online]. 2018, (6) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s40436-018-0213-1>
- [16] RAJ, B. Anush a J. T. Winowlin JAPPES. Studies on heat treatment and electrochemical behaviour of 3D printed DMLS processed nickel-based superalloy. *Applied Physics A* [online]. 2019, (125) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00339-019-3019-5>
- [17] ŽIVČÁK, J. a M. ŠARIK. FEA simulation of thermal processes during the direct metal laser sintering of Ti64 titanium powder. *Measurement* [online]. 2016, (94) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.072>
- [18] KESHAVARZKERMANI, Ali a Magda SADOWSKI. Direct metal laser melting of Inconel 718: Process impact on grain formation and orientation. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2018, (736) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.130>
- [19] CH, Srinivasa Rakesh a A. RAJA. Influence of working environment and built orientation on the tensile properties of selective laser melted AlSi10Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2019, (750) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.103>
- [20] CARTER, Luke N. a Christopher MARTIN. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2014, (615) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.172>
- [21] MOHAMMADI, Mohsen a Hamed ASGARI. Achieving low surface roughness AlSi10Mg_200C parts using direct metal laser sintering. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, (20) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.012>

- [22] SINGH, Rupinder a Jashanpreet Singh SIDHU. On Innovative Profile of Intramedullary Pins for Canine by Direct Metal Laser Sintering. *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers* [online]. 2022, (1) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00160-7>
- [23] *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/technologies/3d-printing/direct-metal-laser-sintering>
- [24] KOZAK, Jerzy, Tomasz ZAKRZEWSKI a Marta WITT. *SELECTED PROBLEMS OF ADDITIVE MANUFACTURING USING SLS/SLM PROCESSES* [online]. 2021, 21 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:DOI: 10.2478/tar-2021-0003
- [25] SHELLABEAR a NYRHILÄ. *DMLS – DEVELOPMENT HISTORY AND STATE OF THE ART* [online]. 2004, 12 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.i3dmfg.com/wp-content/uploads/2015/07/History-of-DMLS.pdf>
- [26] DABWAN, Abdulmajeed, Saqib ANWAR a Ali M. AL-SAMHAN. *Investigations on the Effect of Layers' Thickness and Orientations in the Machining of Additively Manufactured Stainless Steel 316L* [online]. 2021 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/ma14071797>
- [27] SERRES, Nicolas, Dorian TIDU a Simon SANKARE. Environmental comparison of MESO-CLAD® process and conventional machining implementing life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2011, (19) [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.010>
- [28] KOUBOVÁ, Jana. *Využití aditivních technologií v průmyslu 4.0*. Praha, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Aleš Herman, Ph.D.
- [29] 3D tisk části motoru vrátil závodní speciál zpět na trať. *3D WISER* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/3d-tisk-dilu-motoru-vratil-zavodni-special-zpet-na-trat/>

- [30] KNÍŽEK, Martin a Libor BERÁNEK. 3D TISK KOVŮ PRONIKÁ DO VÝROBY POMALU. *Fakulta strojní ČVUT v Praze* [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/verejnost/pr-media/pribehy-z-ustavu/pribeh-3d-tisk-kovu/>
- [31] Letectví: Zkracování údržby s 3D tisknutými nástroji. *3D WISER* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/letectvi-zkracovani-udrzby-s-3d-tisknutymi-nastroji/>
- [32] 3D tisk kovů. *Materialise* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/3d-tisk-kovu>
- [33] PATTERSON, Albert E., Sherri L. MESSIMER a Phillip A. FARRINGTON. *Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need*. University of Alabama in Huntsville, 2017.
- [34] Pros & Cons of 3D Printing. *3 space* [online]. Louisville, 2018 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://3space.com/pros-and-cons-of-3d-printing/>
- [35] DMLS MATERIALS. *Forecast 3D* [online]. [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <https://www.forecast3d.com/materials/dmls>
- [36] BINELI, Aulus Roberto Romão, Ana Paula Gimenez PERES a André Luiz JARDINI. DIRECT METAL LASER SINTERING (DMLS): TECHNOLOGY FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF MICROREACTORS. *ABCM* [online]. Brasil, 2011, 7 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <http://alvarestech.com/temp/cobef2011/grima.ufsc.br/cobef2011/media/trabalhos/COF11-0502.pdf>
- [37] BARTÁK, Tomáš. *Studium struktury a vlastností slitiny AlSi10Mg připravené 3D tiskem* [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/96929>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.
- [38] Konformní chlazení. *INNOMIA* [online]. Jaroměř [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <http://www.konformni-chlazení.cz/>

- [39] Typical Defects of 3D Printed Metal Parts. *Eplus 3D* [online]. 2021 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: https://www.eplus3d.com/Company-News/article_177
- [40] VORA, Hitesh D. a Subrata SANYAL. A comprehensive review: metrology in additive manufacturing and 3D printing technology. *Progress in Additive Manufacturing* [online]. 2020, 2020, (5) [cit. 2022-07-24]. ISSN 2363-9520. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s40964-020-00142-6>
- [41] HALMELOVÁ, Lucie. *Kvalita povrchu u dílů vyrobených metodou DMLS* [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/86278/F2-BP-2019-Halmelova-Lucie-Bakalarka%20k%20odevzdani.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Barbora Bryksí Stunová, Ph.D.
- [42] CALIGNANO, F., D. MANFREDI a E. P. AMBROSIO. Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2012, 2012, (67) [cit. 2022-07-24]. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-012-4688-9>
- [43] SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. *PRÁŠKOVÁ METALURGIE* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/21810660-Praskova-metalurgie-studijni-opory.html>
- [44] GRASSO, Marco a Bianca Maria COLOSIMO. Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review. *Measurement Science and Technology* [online]. 2017, (28) [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/aa5c4f/meta>
- [45] RŮŽIČKOVÁ, Ludmila. *Vliv parametrů tepelného zpracování na užité vlastnosti slitiny AlSi10Mg vyrobené 3D tiskem* [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/89802>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.

[46] REED, Roger C. a Yuanbo T. TANG. Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys. *Nature Communications* [online]. 2020, (11) [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-020-16188-7>

[47] Úprava kovových prášků. *Studentske.cz* [online]. [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/prava-kovovch-prk.html>

[48] DVOŘÁK, Milan a Michaela MAREČKOVÁ. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, ODBOR TVÁŘENÍ KOVŮ A PLASTŮ. *TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ: Prášková metalurgie*. Technická 2896/2, 616 69 Brno, 2006. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/technologie_tvareni/index.htm

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 – konformní chlazení [38].....	15
Obrázek 2 – prášek 316L SS – nepravidelný tvar velikost č. 42-155 μm [4]	18
Obrázek 3 – prášek 316L SS – pravidelný kulovitý tvar, velikost č. 6-38 μm [4].....	18
Obrázek 4 – rozložení částic prášku.....	18
Obrázek 5 – graf velikostního rozdělení částic prášku AlSi10Mg [45].....	19
Obrázek 6 – předlegovaný prášek.....	20
Obrázek 7– částečně legovaný prášek.....	20
Obrázek 8 – směsný prášek.....	20
Obrázek 9 – zobrazení vnesení tepelné energie v simulačním programu.....	21
Obrázek 10 – skenovací dráhy [36] přeloženo a upraveno pro BP.....	22
Obrázek 11 – znázornění intenzity laseru [36], přeloženo a upraveno pro BP.....	22
Obrázek 12 – dopad laseru pod úhlem, přeloženo a upraveno pro BP.....	23
Obrázek 13 – schéma tavné lázně [46], přeloženo a upraveno pro BP.....	23
Obrázek 14 – řez tavnou lázní [7].....	24
Obrázek 15 – fázový profil více částic Al-Si-10Mg při teplotním gradientu 362,66 K /mm [15].....	25
Obrázek 16 – fázový profil více částic Al-Si-10Mg při teplotním gradientu 263,33 K /mm [15].....	25
Obrázek 17 – mikrostruktura tištěných dílů ze slitiny AlSi10Mg a) v řezu směru vrstev b) v řezu směru stavby [45].....	25
Obrázek 18 – první mechanismus vzniku zbytkového napětí [33] přeloženo a upraveno pro BP.....	27
Obrázek 19 – druhý mechanismus vzniku zbytkového napětí [33], přeloženo a upraveno pro BP.....	27
Obrázek 20 – strategie „tam a zpět“.....	28

Obrázek 21 – strategie šachovnice.....	28
Obrázek 22 – exponovaná plocha při různé orientaci.....	28
Obrázek 23 –zobrazení podpěr.....	30
Obrázek 24 – metoda Hipování [43], přeloženo a upraveno pro BP.....	31
Obrázek 25 – CT snímek vzorku 3D tištěné slitiny AlSi10Mg [45].....	33
Obrázek 26 – schéma nanášení nové vrstvy.....	34
Obrázek 27 – napětí a deformace v dílu [33], přeloženo a upraveno pro BP.....	36
Obrázek 28 – delaminace vzorků [39].....	36
Obrázek 29 – schéma vzniku ballingu [39], přeloženo a upraveno pro BP.....	37
Obrázek 30 – první mechanismus vzniku ballingu [3], přeloženo a upraveno pro BP...	37
Obrázek 31 – druhý mechanismus vzniku ballingu [3], přeloženo a upraveno pro BP....	38
Obrázek 32 – možnosti orientace součásti [12].....	38
Obrázek 33 – znázornění vrstev na různých plochách [14], upraveno pro BP.....	39
Obrázek 34 – distribuce tepla při výkonu laseru 100 W [1].....	40
Obrázek 35 – distribuce tepla při výkonu lasere 300 W [1].....	40
Obrázek 36 – distribuce tepla při použité rozteči 0,1 mm za stálého výkonu a rychlosti skenování [1].....	41
Obrázek 37 – distribuce tepla při použité rozteči 0,2 mm za stálého výkonu a rychlosti skenování [1].....	41
Obrázek 38 – skenovací rychlosti 1000 mm/s a 800 mm/s [1].....	42
Obrázek 39 – vliv tloušťky vrstvy 30 um [26], přeloženo a upraveno pro BP.....	43
Obrázek 40 – vliv tloušťky vrstvy 100 um [26], přeloženo a upraveno pro BP.....	43
Obrázek 41 – strategie skenování tam a zpět [11].....	44
Obrázek 42 – strategie pruhů [11].....	44
Obrázek 43 – strategie šachovnice [11].....	44

Seznam tabulek

Tabulka 2 – materiály pro DMLS [35], přeloženo a upraveno pro BP.....	15
---	----