



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Obrábění tvarových ploch na 3D tištěném
polotovaru**

**Machining of shaped surfaces on 3D
printed workpiece**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

František Málek

Studijní program: B2343 VÝROBA A EKONOMIKA VE
STROJÍRENSTVÍ
Studijní obor: 2303R014 TECHNOLOGIE, MATERIÁLY A
EKONOMIKA VE STROJÍRENSTVÍ
Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pelikán



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Obrábění tvarových ploch na 3D tištěném polotovaru“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lukáše Pelikána, s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze.....

František Málek.....



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Poděkování

Především bych rád poděkoval vedoucímu této práce, Ing. Lukáši Pelikánovi, a to především za věnovaný čas a cenné rady, které vedly k vytvoření této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali.



Abstrakt (Anotace)

Tato bakalářská práce se zabývá řešením přesných tvarových ploch na 3D tištěných součástech metodou direct metal laser sintering (DMLS). Metodou DMLS je možné vytvářet tvarově složité díly, které lze po tepelném zpracování využívat jako plně funkční součásti. Materiál dosahuje takřka srovnatelných mechanických vlastností, jako při jiných technologiích přípravy polotovarů. Navíc lze vytvářet velmi složité tvary a vnitřní struktury. Z pohledu přesnosti však zatím nedokáží aditivní technologie konkurovat klasickým technologiím třískového obrábění. Pro dokončování funkčních ploch je proto stále třeba využít hybridní technologie, kombinující přípravu obrobku aditivní technologií a dokončení funkčních ploch třískovým obráběním. Tato práce pojednává o uzpůsobení designu součásti a celkovému návrhu výroby pro aplikaci hybridní technologie.

Klíčová slova

Kovový 3D tisk, DMLS, přesné obrábění



Abstract (Annotation)

This bachelor's thesis deals with the process of finding solutions for exactly shaped on 3D printed parts using the method of Direct Metal Laser Sintering (DMLS). The DMLS method enables creations of complex-shaped parts that can be used as fully functioning parts after the heat treatment. The material reaches almost identical mechanical characteristics compared to other technologies for manufacturing of semi-finished products. Furthermore, it makes it possible to create very complicated shapes and internal structures. However, from the point of exactness, the additive methods are not capable of competing with conventional technologies of chip-forming operations. For the final finish of functional surfaces, it is still important to use hybrid technologies combining a work-piece preparation, an additive technology and finalization of functional surfaces by chip-forming operations. This thesis deals with modifications of design parts and complex production layout for the application of hybrid technology.

Keywords

metal 3D printing, DMLS, Precise Cutting



Obsah

Obsah.....	6
1 Úvod.....	7
2 Technologie DMLS.....	8
2.1 Proces tisku.....	9
2.2 Limity přesnosti současné technologie DMLS.....	10
1.1 Postprocessing.....	16
2.2.1 Obrábění 3D tištěných součástí.....	16
2.3 Srovnání obrábělnosti DMLS výtisku a výkovku.....	17
2.4 Přesné obrábění tvarových ploch.....	18
3 Praktická část.....	21
3.1 Návrh artefaktu.....	22
3.2 Vyhodnocení dat z CMM.....	23
3.2.1 Základna.....	23
3.2.2 Podstava.....	24
3.2.3 Těleso.....	24
3.3 Konstrukce 3D tištěného dílu s ohledem na přesné obrábění.....	26
3.3.1 Optimální přídavek na přesné obrábění.....	26
3.3.2 Upnutí dílu do obráběcího stroje.....	26
3.3.3 Vyrovnání dílu na obráběcím stroji.....	27
3.4 Obrábění tvarové plochy.....	28
3.4.1 Nástroj.....	28
3.4.2 Stroj.....	29
3.4.3 Řezné podmínky.....	30
3.4.4 Strategie obrábění.....	31
3.5 Vyhodnocení testů obrábění tvarových ploch.....	33
4 Závěr.....	34
5 Seznam použité literatury.....	35
6 Seznam obrázků.....	38
7 Seznam tabulek.....	39



1 Úvod

Kovový 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering (DMLS) umožňuje spékáním kovového prášku stavbu hmotných komponent s nebývalou tvarovou volností. Díky aditivním technologiím můžeme vytvořit výrobek s tvarově složitými plochami, které by byly těžko vyrobené jinými metodami, a to v relativně krátkém čase s minimálním nárůstem výrobních nákladů. Zásadními výhodami jsou například tištění dutých objektů, nebo tisk vnitřních struktur. [1]

Tisk kovových součástí s sebou ale nese i řadu nevýhod, jako je přesnost výroby, drsnost povrchu, omezený pracovní prostor, nebo začlenění do sériové výroby z důvodu dlouhých výrobních časů a nutnosti postprocesingu výtisků. Kvalita tištěného povrchu závisí především na správně nastavených parametrech tiskového procesu a kalibraci stroje. Kombinace volby materiálu, nastavení tisku, ochranné atmosféry a následného postprocesingu dávají možnosti jak dosáhnout lepší kvality výrobku. Povrch laserově spékaných dílů však v současnosti nedokáže dosáhnout požadované drsnosti a přesnosti funkčních ploch, jaké lze dosáhnout například třískovým obráběním. V této bakalářské práci se zaměřím na dosažení požadované přesnosti a drsnosti na funkčních tvarových plochách u 3D tištěných výrobků a to hybridní technologií: kombinací 3D tisku a třískového obrábění.[12]



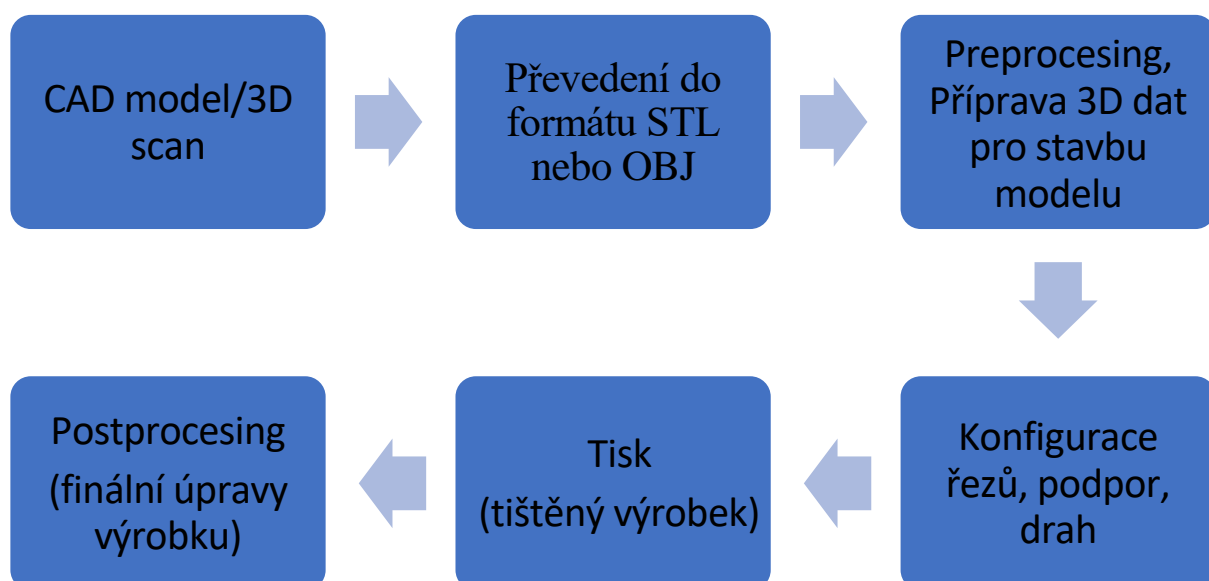
2 Technologie DMLS

Jak již bylo řečeno technologie DMLS je metoda při, které se spéká kovový prášek laserovým paprskem a umožňuje tak tvorbu tvarově složitých komponent v relativně krátkém čase.

Technologie DMLS se tedy řadí do aditivních technologií, nebo také Rapid Prototyping. (RP) je progresivní skupina metod, které slouží k co nejrychlejší tvorbě modelů, prototypů a komponent na základě 3D dat (modelu).

3D model lze získat více způsoby, nejrozšířenější a nejjednodušší je vymodelování 3D modelu v CAD softwaru. Nedílnou součástí procesu je odstranění případných chyb, které by mohly limitovat tisk součásti. Mohou to být například převrácené trojúhelníky, špatné hrany a tzv. díry v modelu. Opravený model se převede do formátu STL, nebo OBJ, tak aby ho software pro ovládání tiskárny přečetl. V softwaru se následně určí nejvhodnější poloha modelu, tak aby se minimalizovaly dokončovací práce, vygenerují se podpory a definují se jednotlivé vrstvy modelu.

Z hotových dat se vygeneruje se tzv G-code, Na základě kterého je řízen chod stroje skrze řídicí systém tiskárny. Vytisknutý výrobek nakonec projde dokončovacími operacemi, aby vyhovoval zadaným parametrům. Této fázi se říká postprocessing. [1] [15] [13]



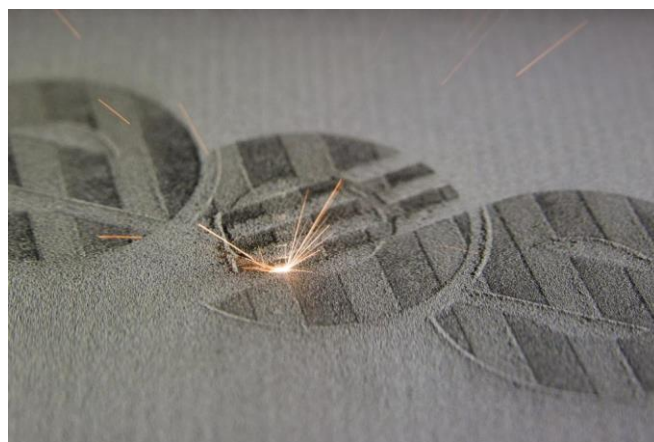


2.1 Proces tisku

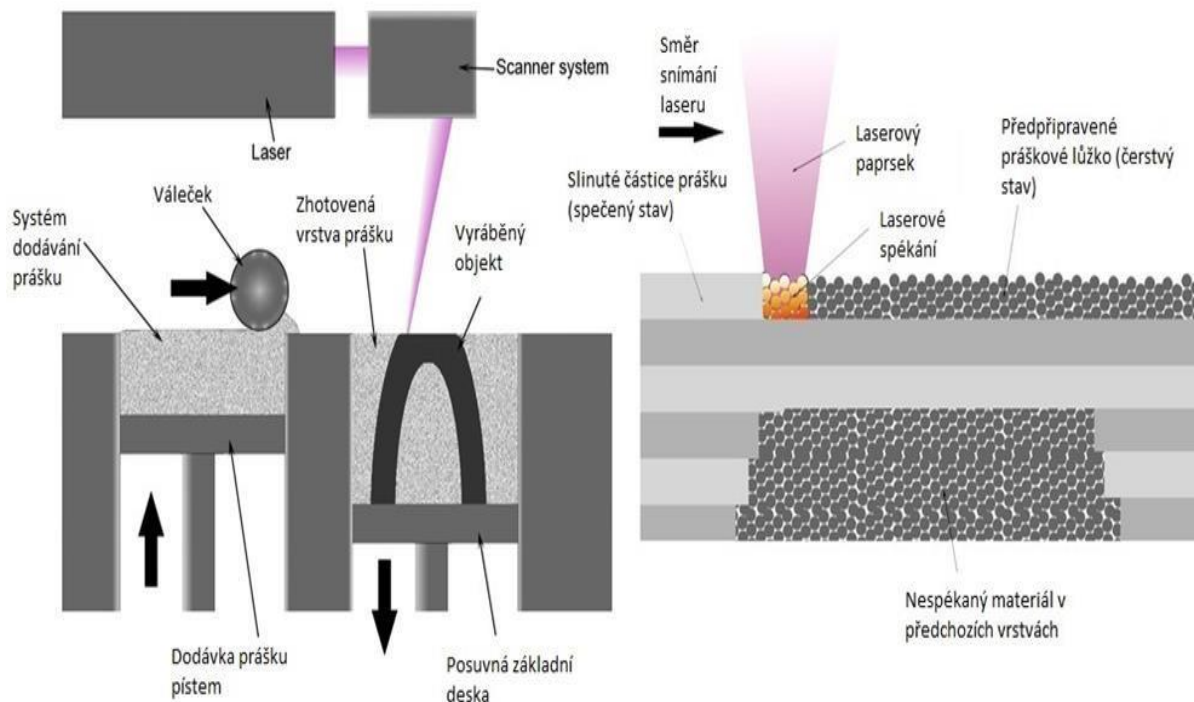
Do pracovního prostoru tiskárny se nejprve vloží kovová platforma, na které se bude objekt tisknout. Při tisku je objekt svařen s platformou, objekt je pak fixovaný a zamezuje se tak deformacím. Následně je potřeba naplnit zásobník Materiálem pro tisknutí. Materiál je do zásobníku tiskárny dodáván v podobě jemného kovového prášku (částice o velikosti již od jednotek μm). Kvůli zamezení oxidace a dosažení přijatelné kvality spékání kovu musí být pracovní prostor vyplněn inertním plynem (např. argonem, nebo dusíkem).

Samotná metoda tisku využívá vertikálně posuvnou podkladovou desku, na kterou jsou nanášeny jednotlivé vrstvy prášku. Správná volba tloušťky vrstev je důležitá zejména s ohledem na přesnost a rychlost výroby – tenčí vrstva znamená vyšší přesnost, ale prodlužuje výrobní čas. (obvyklá tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 20 až 40 μm)

Po nanesení první vrstvy je prášek působením laseru nataven a dochází k jeho spékání. Pro spékání se používají vláknové lasery s maximálním příkonem mezi 200 W a 400 W. Řídicí systém upravuje intenzitu laserového paprsku tak, aby byl materiál spečen jen v požadovaném místě. Okolní materiál zůstává nedotčen a slouží jako podpora. Tímto je dokončena jedna vrstva. Podkladová deska je posunuta o tloušťku jedné vrstvy dolů a dávkovací komora vystoupne o více než jednu vrstvu nahoru, aby bylo zjištěno dostatečné množství prášku, další vrstva prášku je nanášena nanášečem a proces spékání se opakuje. Na hotovou součást může být nanášeno navíc několik vrstev prášku, pro rovnoměrné chladnutí. [1] [12] [13]



Obr. 1: spékání kovového prášku laserem [21]



Obr. 2: princip technologie DMLS [10]

2.2 Limity přesnosti současné technologie DMLS

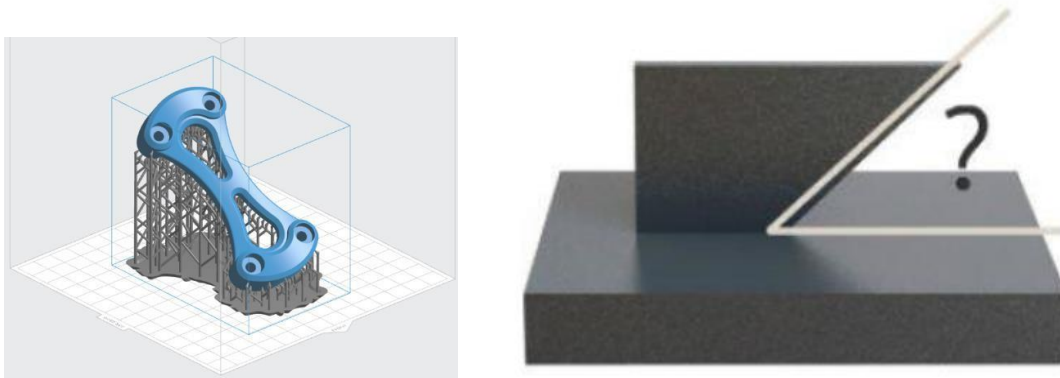
Vzhledem k velkému množství vnějších vlivů, které mají přímý vliv na přesnost výtisku, je třeba důkladně se zaměřit na přípravu tisku. Správná kalibrace stroje není jediný faktor určující přesnost výtisku.

V první řadě je potřeba zmínit, že přesnost výtisku už udává samotná vrstva kovového prášku. Průměrná vrstva se většinou pohybuje v rozmezí 20–40 μm .

Z hlediska odvodu tepla ze spékané oblasti a deformacím výtisku během stavebního procesu je třeba správně naprojektovat podpory. Podpory jsou tisknuty ze stejného prášku jako výrobek a po následném tepelném zpracování jsou od výtisku odstraněny. Správná volba podpor je klíčová ke správnému vytištění výrobku a jeho konečné přesnosti. Limitní sklon pro stavbu šikmých ploch bez podpor je cca 45° vůči tiskové platformě, nad tuto hodnotu sklonu se běžně umisťují podpory.



Umístění podpor však závisí na tištěném materiálu, množství vneseného tepla a na celkovém designu. [7] [8]



Obr. 3: znázornění podpor (vlevo), znázornění limitního úhlu (vpravo) [7] [8]

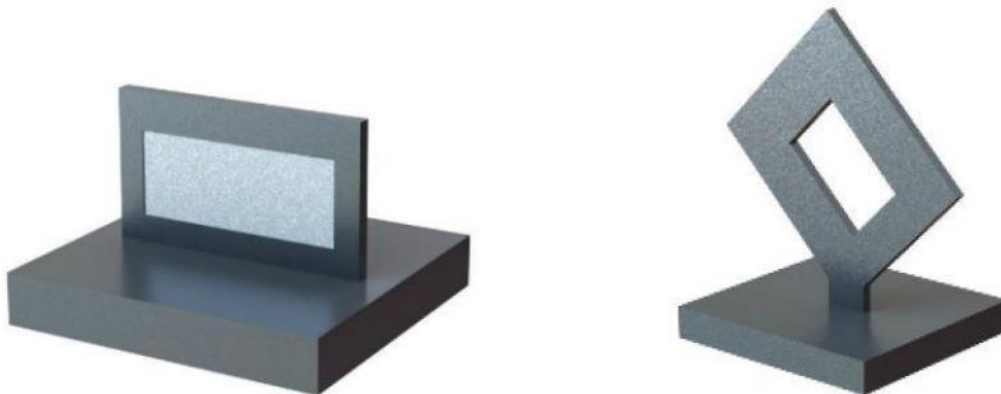
U staveb komponent s otvorem musíme dodržet limitní průměr, aby se otvor nezhroutil. Limitní průměr se může měnit v závislosti na materiálu, ale standardně se uvádí do 6 mm. Nad tuto hodnotu je třeba vytisknout podpory. Pokud nemusí být tvar kruhového průřezu, sloužící například k odlehčení, můžeme kruh nahradit jiným tvarem, který nebude podléhat borcení, např. tvar kapka. Díky této záměně není nutné otvor podkládat. Vhodná optimalizace modelu, již během modelování vede ke značným úsporám materiálu.[7]



Obr. 4: Podpora kruhového otvoru (vlevo), optimalizace tvaru bez podpor (vpravo) [7]

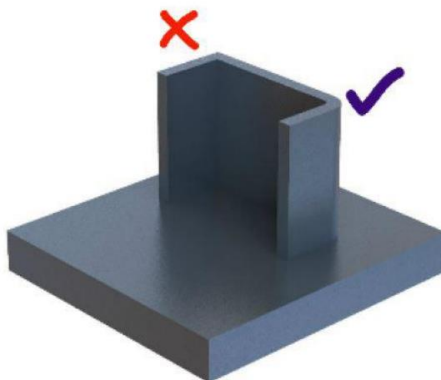


Vynechání podpor lze dosáhnout i jinými způsoby, např.: zvolením jiné polohy modelu vzhledem k tiskové platformě. [7]



Obr. 5: podpora čtvercové dílky (vlevo), Realizace modelu při změně polohy (vpravo) [7]

Další problémy může 3D tisk přinášet například při tvorbě ostrých hran. V těchto místech může snáze docházet k deformacím a nepřesnostem a proto se doporučuje tisk se zaoblením alespoň R 0,5 mm. [7]

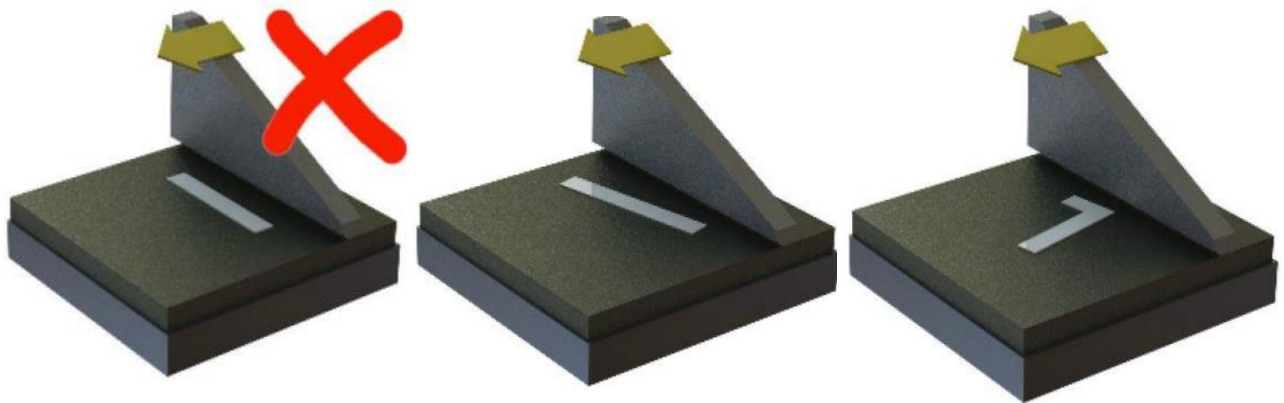


Obr. 6: Znázornění zaoblení hran na modelu [7]

Pokud hovoříme o možnosti tisku dutých těles, je nutné vždy do uzavřeného dutého tvaru vytisknout otvor na vysypání prášku. [7]

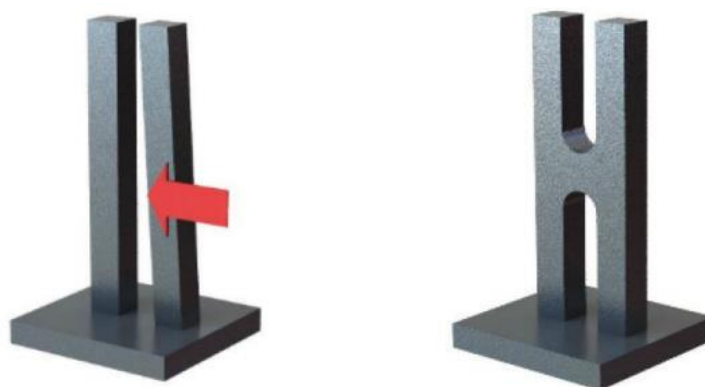


Na konečnou kvalitu má také vliv orientace tištěné součásti na platformě. Rovná hrana dílu by neměla být rovnoběžná s hranou tiskové platformy, protože by mohlo docházet k bránění pohybu nanašeče a následné deformaci náběžné hrany tisknutého dílu. [7]



Obr. 7: Znáornění nevhodné a vhodné polohy modelu vzhledem k nanášení [7]

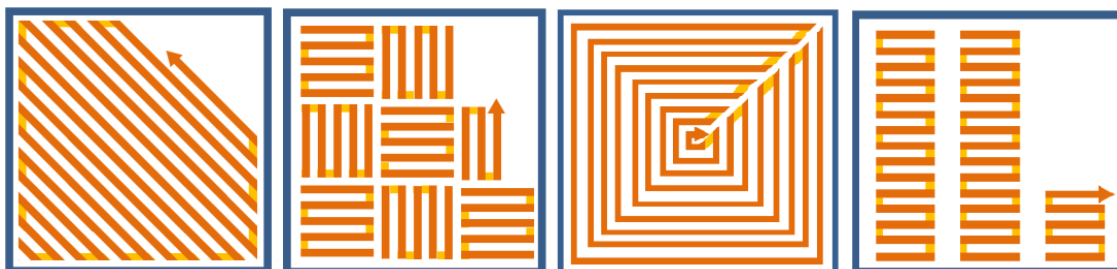
Poměr mezi výškou tělesa a délkou podstavy by neměl být vyšší než 8:1. Vlivem působení síly od nanášení vrstev může docházet k vychýlování součásti vzhledem k tiskové platformě. V těchto případech lze použít pomocné vzpěry mezi jednotlivými součástmi, které se stejně jako podpory po ukončení procesu odstraní. [7]



Obr. 8: Znáornění dlouhé tištěné součásti vychýlení (vlevo), realizace vzpěr (vpravo) [7]



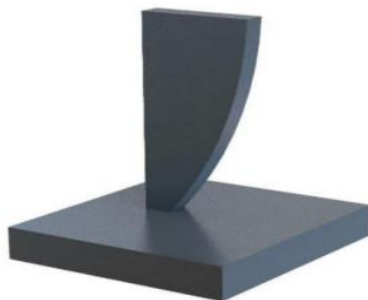
Strategie tisku, nebo také skenovací vzory mají podstatný vliv na pórovitost, drsnost povrchu, mikrostrukturu a vnesené teplo. S hustotou výplně a tiskovou strategií se mění pórovitost vrstvy i doba tisku. V praxi se testuje a používá mnoho skenovacích vzorů, například systém Renishaw používá převážně tyto čtyři: [20]



Obr. 9: skenovací vzory - meander, chessboard, total fill, stripes [20]

Strategie typu meander se využívá pro díly malého průřezu. Tato strategie je velmi rychlá a efektivní. Strategie typu stripes se využívá u dílů s velkým průřezem, je však pomalejší než strategie meander kvůli většímu množství skoků laseru. Strategie stripes vykazuje drobné zlepšení povrchu tištěného dílu, oproti předchozím strategiím. Časy tisku jsou však výrazně vyšší a proto se tato metoda běžně nepoužívá. Strategie total fill je nejjednodušší z uvedených strategií a má tudíž nejkratší čas tisku, proto je nejčastěji využívána při realizaci podpěr. [20]

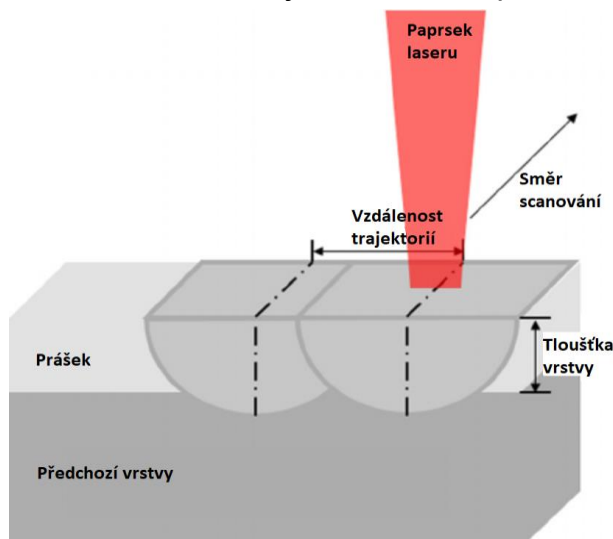
Vzhledem k velmi vysokým teplotám během tiskového procesu dochází k velkému pnutí uvnitř materiálu. U výsledné součásti se pnutí může projevit prohnutím, deformací při postprocesingu, či vznikem trhlin. Pro ustálení a odstranění vnitřních pnutí je lepší součást tepelně zpracovat ještě před oddělením od tiskové platformy. Pokud je hodnota pnutí příliš vysoká může docházet k odtržení části dílu, nebo podpůrného systému od platformy, ještě před oddělením. Odtržení lze předejít vhodnou polohou modelu (natočením tělesa nejužší stranou směrem k platformě), tímto se omezí oblast pnutí v oblasti tiskové platformy. [7]



Obr. 10: Poloha modelu pro omezení pnutí v oblasti tiskové platformy [7]

Pokud je objekt umístěný na kraji tiskové platformy, vykazuje menší přesnost z důvodu působení laserového paprsku pod úhlem.

V neposlední řadě má na přesnost vliv i samotný laser ať už jde o jeho parametry nebo nastavení. Dále se jedná o přesnost širě nastavené oblasti. Paprsek natavuje oblast o průměru zhruba 0,15mm, která nemá přesně danou hranici, mezi natavenou a nenatavenou oblastí. Přesnost a drsnost povrchu je také rozdílná v závislosti na orientaci dané plochy vůči tiskové platformě. Nejvíce se to projevuje u převislých ploch (bottom skin), protože laserový paprsek částečně natavuje 3 až 5 vrstev pod aktuálně spékanou vrstvou.



[5]

Obr. 11: oblast natavení prášku [14]



1.1 Postprocessing

Dokončovací operace jsou nezbytnou součástí výrobního procesu. Nejprve je nutno odstranit podpůrné struktury z povrchu součásti a poté upravit povrch dle daných parametrů tryskat, brousit, leštit nebo obrábět stejným způsobem jako klasický kovový materiál.

Většina publikovaných prací, zabývajících se postprocessingem kovových součástí vyrobených DMLS technologií, řeší zlepšení kvality povrchu. Tyto výzkumy se zabývají převážně jinými technologiemi zlepšení povrchových vlastností tištěných povrchů, než třískovým obráběním a řeší pouze úpravu kvality tištěných ploch.

Jednou z variant je Surface modification by ultrasonic cavitation abrasive finishing (UCAF), neboli Povrchová úprava pomocí ultrazvukové kavitační abrazivní metody. Pomocí této metody bylo u vzorků tištěných metodou DMLS zaznamenáno zlepšení drsnosti povrchu až o 45% po 30 minutách procesu.[4] Mezi další varianty patří tryskání kombinované s leštěním.[3] Zlepšení povrchu lze dosáhnout i přidáním materiálu. Francis E. H. Tay a E. A. Haider se ve své práci věnovali elektrolytický pokovením pomocí niklu. Povrchová úprava byla zlepšena ze 17–19 μm na 2–3 μm bez ztráty rozměrové přesnosti. [4]

2.2.1 Obrábění 3D tištěných součástí

I přes všechny snahy není v dosavadních silách zajistit 3D tiskem takovou přesnost a kvalitu ploch, jako v případě obrábění. Rozměrová přesnost a drsnost je důležitá u funkčních součástí, které mají za úkol zaručit vzájemnou polohu v předepsaných tolerancích, sloužit jako uložení nebo jako vodící plochy jiných součástí, případně pro dosedací plochy mající umožnit těsnost spoje. Hybridní postup nabízí kombinaci 3D tisku výrobku a obrábění v tom smyslu, že většina ploch již tiskem získává svůj finální tvar a pouze přesné funkční plochy jsou dále obráběny.



2.3 Srovnání obrobitelnosti DMLS výtisku a výkovku.

V rámci porovnání obrobitelnosti sintrovaného materiálu 17-4 PH byl na ČVUT proveden test obrobitelnosti na vzorcích připravených metodou DMLS. Jako etalon vlastností materiálu 17-4 PH posloužil výkovek z daného materiálu. Všechny vzorky byly dle doporučení výrobce tepelně zpracované na shodné mechanické vlastnosti, přičemž bylo dosaženo tvrdosti 42 HRC.

Pro zkoušky byla vybrána technologie frézování, frézovali se drážky do plného materiálu. Obrábění se uskutečnilo na stroji MAS VMC 500. Jako nástroj byla zvolena válcová fréza Gühring Navigator 3803, o průměru 3,5 mm. Výsledné řezné podmínky byly nastaveny během zkušebního obrábění výkovku postupnou iterací, se snahou najít nejextrémnější realizovatelné podmínky pro tento nástroj. Limity stroje a nástroje umožnili obrábět za podmínek $vc = 100$ m/min, $f = 0,022$ mm/zub, $ap = 1,5$ mm, $ae = 3,5$ mm. Pro každý obráběný druh polotovaru byla použita nová fréza.

Z hlediska silového zatížení vykazovalo obrábění stejné hodnoty u tištěného materiálu i u výkovku. Po skončení testovacího úběru materiálu bylo s využitím mikroskopu s CCD snímačem Olympus DSX 110 opticky provedeno měření, kterým se neprokázalo, že by po obrábění jednoho, nebo druhého obrobku bylo dosaženo většího opotřebení nástroje. Na též mikroskopu byly také zkoumány třísky, nasbírané během obrábění. Z rozboru tvorby třísek nebyl zřejmý rozdíl v mechanismu jejich utváření. [9]



Obr. 12: porovnání třísek, tištěný polotovar (vlevo), výkovek (vpravo) [9]



Následovalo srovnání z pohledu drsnosti obrobeného povrchu, které probíhalo na stroji MarSurf XCR 20. Byly naměřeny hodnoty na třech místech obrobených ploch. Na dně obrobené drážky nepatrně lepší výsledky vykazoval obrobek. Na stěnách drážek byla naměřena nižší drsnost na stěnách sintrovaného obrobku a to jak na sousledně obrobené stěně, tak na nesousledně obrobené stěně. [9]

Tab. 1: porovnání drsnosti povrchu [9]

R _a [μm]	Tištěný materiál	Výkovek
Dno drážky	0,58	0,4793
Sousledná strana	0,29468	0,42204
Nesousledná strana	0,50422	0,76046

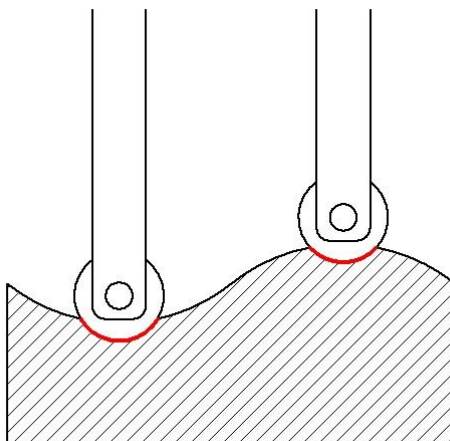
2.4 Přesné obrábění tvarových ploch

Se zvyšujícími se požadavky na přesnost a výkonnost je nutné hledat nové metody pro jejich zajištění. Jednou z důležitých technik ve výrobě je zhotovování tzv. free-form (volně tvarovaných) ploch nebo parametrických ploch, které se staly běžně využívanými s nástupem moderních CAD systémů. Dosažená rozměrová a geometrická přesnost těchto ploch hraje významnou úlohu při dosahování celkové kvality výrobků, protože často přímo souvisí s funkční výkonností výrobku. [16]

Pro dosažení co nejlepších výsledků přesného obrábění je nutné zajistit co nejvyšší stabilitu řezného procesu. Tu ovlivňuje tuhost stroje, vyložení a tuhost nástroje, upnutí obrobku, tuhost samotného obrobku a řezné podmínky. Při optimalizaci řezných podmínek je vhodné snažit se o minimalizaci řezných sil a především o plynulost řezného procesu a udržování konstantních parametrů a tedy i minimalizaci změn řezných sil. Z toho důvodu je optimální konstantní tloušťka přídavku na obrábění a snaha o konstantní úhel opásání frézy. [6]



To může být u obrábění tvarových ploch obtížné dosáhnout. Navzdory snaze o geometricky stejnou vrstvu přídavku na obrábění se liší šíře záběru při obrábění kulovým nástrojem například při přechodu mezi konvexní a konkávní obráběnou plochou.



Obr. 13: znázornění obrábění konvexní a konkávní plochy

To ovlivňuje velikost řezných sil, jelikož se mění průřez třísky a tedy množství odebraného materiálu za jednotku času. Lze tomu předcházet vhodnou volbou strategie obrábění, například trochoidálním obráběním. Některé CAM softwary dokáží při volbě trochoidální strategie upravit dráhy nástroje tak, že dochází téměř neustále ke konstantnímu úhlu opásání a tedy i k výrazně stabilnějšímu průběhu řezných sil. [7]

Záleží tak na konkrétních případech, zda je vhodné a možné udržovat konstantní úhel opásání nástroje, nebo je naopak žádoucí systematický reliéf od stopy nástroje i za cenu měnícího se úhlu opásání.

Proces zhotovování tvarově složitých součástek na CNC frézovacích strojích se většinou dělí na tři základní operace – hrubování, předdokončování a dokončování.

V hrubovací fáze je snaha o co největší úběr materiálu za co nejkratší čas, se zanecháním definovaného přídavku pro další operace. Při tomto procesu se obvykle používají čelní válcové frézy vzhledem k vysoké účinnosti odebrání materiálu a delší životnosti nástroje.

Předdokončovací frézování je zaměřeno na odstranění stop a výstupků (schodů) po hrubování a ponechává přídavek jednotné tloušťky pro následující dokončování. Nejčastěji se zde používají toroidní nebo kopírovací frézy.



U předdokončovací fáze se již ve větší míře při volbě tvaru a rozměru nástroje zohledňuje konečný požadovaný tvar součástky.

Při dokončovacím frézování se pro finální zhotovování tvarových ploch nejčastěji využívají kopírovací frézy. Nejdůležitějšími kritérii jsou rozměrová přesnost a drsnost povrchu. Pro dokončování je obecně potřeba největší množství času na obrábění, kvůli malé hloubce řezu a rychlosti posuvu. Snahou je provést dokončení jedním nástrojem kvůli stopám na povrchu obrobku, což v některých případech klade zvýšené nároky na trvanlivost nástroje.

Jedna z univerzálních a často využívaných strategií frézování je strategie konstantní Z nebo také konturování v paralelních rovinách, při níž je obrobek rozdělen na vrstvy, jejichž tloušťka je dána hloubkou řezu. Frézování se provádí vrstvu po vrstvě. Pro každou vrstvu se vytváří obrys (kontura), odvozený od obrysu součástky v dané výši, v případě hrubovací a předdokončovací operace s přídavkem pro následující operaci. Podle výzkumů a srovnávacích studií různých CAM systémů z hlediska výrobního času není rozhodující výška vrstvy (hloubka řezu), ale úroveň optimalizace drah nástroje při odebrání materiálu v jednotlivých vrstvách. Svou roli samozřejmě hraje i složitost tvaru jednotlivých vrstev a velikost nástroje.

V případě obrábění 3D tištěného polotovaru je potom snaha o vytvoření polotovaru s konstantním přídavkem materiálu na obrábění a při obrábění přejít přímo k dokončovacímu frézování, které probíhá podle výše popsání scénáře. [17]



3 Praktická část

Cílem experimentu je zjistit dosažitelné charakteristiky povrchu tvarových ploch na polotovaru připraveného aditivní technologií DMLS a také poukázat na potřebu minimálního nutného přídavku na obrábění s ohledem na nepřesnosti tištěného polotovaru. Ta je navíc rozdílná pro totožný polotovar tištěný v různých orientacích.

Pro experiment byly zvoleny dva artefakty. Artefakt M04 tištěný ve vodorovné poloze, a artefakt MS03 vytištěný ve svislé poloze. (viz Obr. 16.)

V rámci výzkumu možností DMLS na Fakultě strojní ČVUT bylo ve firmě Misan s.r.o. vytisknuto několik zkušebních artefaktů z korozivzdorné oceli 17-4 PH, které byly následně tepelně zpracovány v souladu s doporučením výrobce. Zpracování odpovídá H900 dle ASTM A564. Jedná se o nízkoteplotní vytvrzování s nejvyššími pevnostními vlastnostmi a nejnižší plasticitou. Artefakty byly vytištěné na kovové 3D tiskárně Concept laser M2 cusing. Bylo vytištěno několik shodných artefaktů s různou orientací a polohou na tiskové platformě. [9]

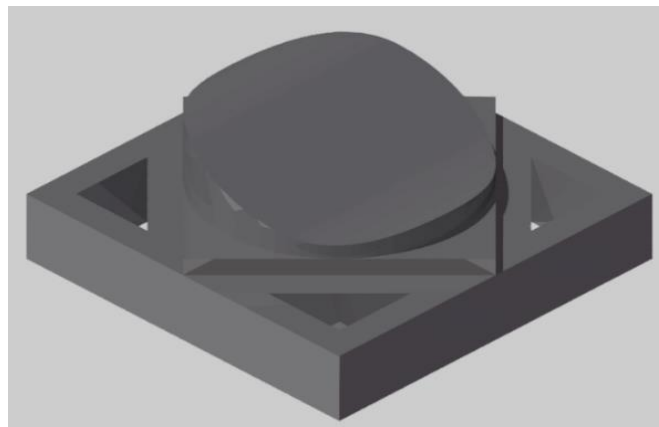


Obr. 14: Kovová 3D tiskárna Concept laser M2 cusing společnosti Misan s.r.o. [18]

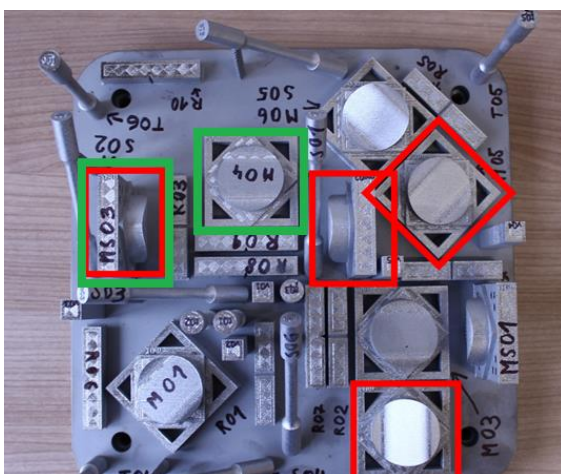


3.1 Návrh artefaktu

Geometrický tvar artefaktu byl volen s ohledem na možnost zjištění nejen deformací vlivem chladnutí dílu vzniklého nerovnoměrným vnitřním pnutím, ale také s ohledem na polohovací přesnost samotného stroje. Respektive přesnost polohování laserové hlavy a schopnost synchronního pohybu obou mechanismů os laserové hlavy. Proto je díl tzv. rozdělen na tři části: spodní podstava čtvercového půdorysu, vrchní podstava také čtvercového půdorysu, nicméně potočená o 45° proti spodní podstavě, aby se ověřily výše zmiňované synchronní pohyby polohovacích os laserové hlavy. Poslední, vrchní tvarová část má za úkol nasimulovat možnost tisku tvarových obecných ploch, přičemž půdorys je volen jako kružnice opět pro možnost ověření přesnosti kruhové interpolace polohovacích mechanismů stroje. [9]



Obr. 15: 3D model zkušebního artefaktu pro vyhodnocení přesnosti tisku DMLS [9]



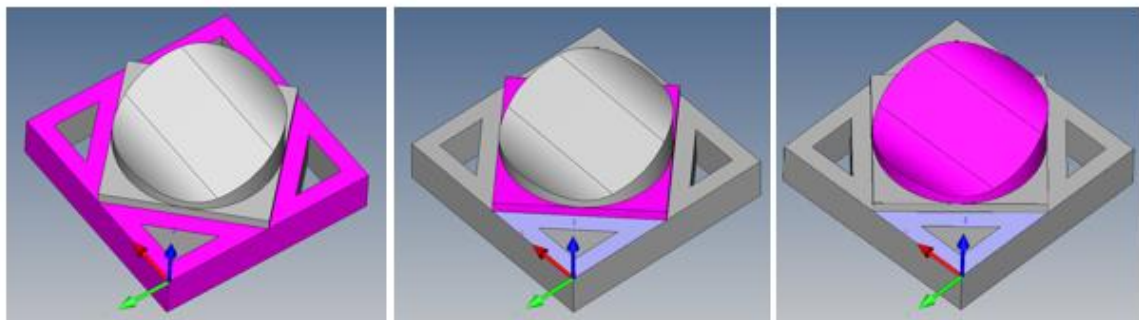
Obr. 16: vytištěná paleta, zeleně zvýrazněné M04 tištěný ve vodorovné poloze a artefaktu MS03 tištěný ve svislé poloze (na levém obrázku) [9]



3.2 Vyhodnocení dat z CMM

V rámci výzkumu možností DMLS na Fakultě strojní ČVUT bylo provedeno měření artefaktů před obráběním na stroji Prismo od společnosti Zeiss jako snímací systém byl použit vždy jen jeden snímač v ose Z, aby se s ním daly proměřit všechny potřebné charakteristiky. Průměr rubínové kuličky snímače byl volen s ohledem na potřebný prostor 1 mm.

Cílem měření bylo poskytnout objektivní srovnání rozměrové stálosti artefaktů po vyjmutí z pracovního prostoru (paleta) (viz Tab. 2.) ,dále po odříznutí artefaktů z tiskové platformy (řez) (viz Tab. 3)a nakonec po tepelném zpracování (TZP) (viz Tab. 4), které je nedílnou součástí technologického postupu 3D tištěných dílů. Proto bylo měření provedeno třikrát, vždy ale podle stejné metodiky aby byly výsledky porovnatelné. [9]



Obr. 17: Rozdělení tělesa artefaktu - základna (vlevo), podstava (uprostřed), těleso (vpravo) [9]

3.2.1 Základna

Tab. 2: Naměřená data před odříznutím artefaktů M04 a MS03 z tiskové platformy [9]

Artefakt	M04			M0S3		
	Paleta	Řez	TZP	Paleta	Řez	TZP
Rovinnost Z	0,0491	0,1443	0,1742	---	0,0675	0,0945
Kolmost Z1_1	0,0624	0,0328	0,04876	---	0,0960	0,0954
Kolmost Z1_2	0,0618	0,0333	0,03981	---	0,2914	0,1128
Rovnoběžnost Z	0,1338	0,0343	0,04283	---	0,1414	0,1468
Přímmost Z1	0,0551	0,0294	0,03771	---	0,0745	0,0864
Přímmost Z2	0,0739	0,0546	0,0582	---	0,0383	0,0329



Přímost Z3	0,0239	0,0341	0,03363	---	0,0871	0,1104
Přímost Z4	0,0552	0,0325	0,04215	---	0,1348	0,1390

3.2.2 Podstava

Tab. 3: Naměřená data po odříznutí artefaktů M04 MS03 z tiskové platformy [9]

Artefakt	M04			M0S3		
	Paleta	Řez	TZP	Paleta	Řez	TZP
Kolmost P1_1	0,0476	0,051	0,02827	---	0,0765	0,1472
Kolmost P1_2	0,0382	0,042	0,02228	---	0,2689	0,2889
Rovnoběžnost P	0,0655	0,0792	0,03469	---	0,0572	0,0612
Přímost P1	0,034	0,0357	0,01615	---	0,0466	0,0305
Přímost P2	0,0195	0,0151	0,02714	---	0,0605	0,0682
Přímost P3	0,0579	0,0496	0,04518	---	0,0517	0,0545
Přímost P4	0,0418	0,0382	0,02426	---	0,0669	0,0595

3.2.3 Těleso

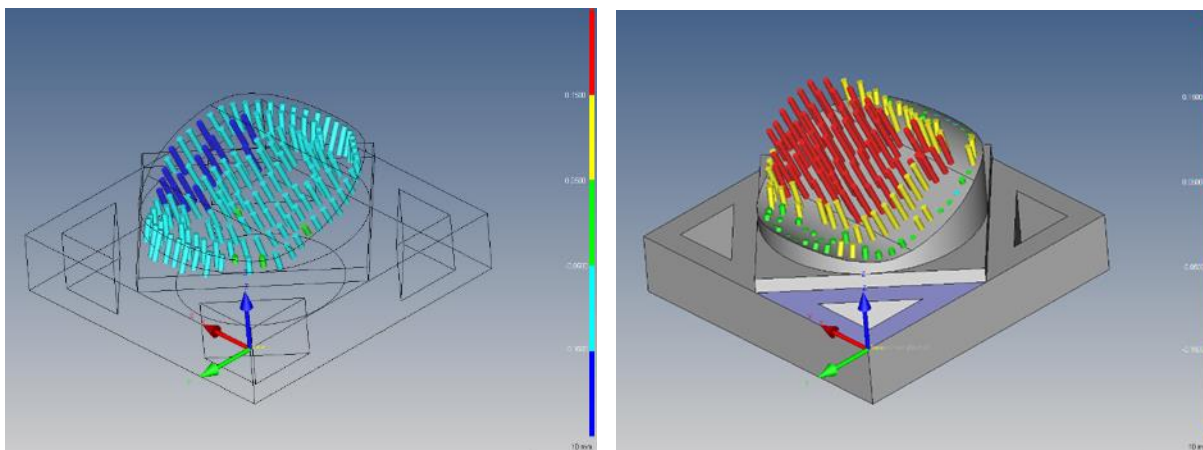
Tab. 4: Naměřená data artefaktů M04 MS03 po tepelném zpracování [9]

Artefakt	M04			M0S3		
	Paleta	Řez	TZP	Paleta	Řez	TZP
Kruhovitost 1	0,0294	0,0384	0,02872	---	0,0398	0,0633
Kruhovitost 2	0,0244	0,0284	0,01851	---	0,0460	0,0281
Profil plochy	---	---	0,329721	---	---	0,55916

Srovnání naměřených dat ukázalo, že v průběhu postprocessingu došlo u artefaktu M04 k drobnému zlepšení většiny charakteristik. U artefaktu MS03 došlo spíše ke zhoršení většiny charakteristik. U Artefaktu M04 byla naměřena nejhorší odchylka u rovinnosti Z základny artefaktu po tepelném zpracování. Odchylka od 3D modelu byla 0,1742 mm (viz.Tab. 2.) po tepelném zpracování (což může ukazovat na vyšší zbytkové vnitřní pnutí způsobené chladnutím artefaktu). Ostatní odchylky nepřesáhly hodnotu jedné desetiny mm. U Artefaktu MS03 přesáhlo hodnotu desetiny milimetru hned několik hodnot.



Jedná se hlavně o kolmosti a přímosti, tento problém by mohl být způsoben mírným zborcením tělesa, kvůli jeho nevyrovnané hmotnosti. Změny odchylek během celého procesu (kromě jedné) jsou minimální. Z naměřených hodnot vychází o něco lépe těleso M04. Nicméně ani u tělesa M04 nejsou výsledné hodnoty po tepelném zpracování tak přesné, aby se po tisku nemuselo využít klasického třískového obrábění kvůli dosažení přesných rozměrů. Plochy nejsou dokonalé a tvar je ovlivněn chladnutím, což ovlivňuje nejen vzhled ale i funkčnost vytisknutého dílu. [9]



Obr. 18: Rozdíl profilu plochy mezi tělesem M04 tištěným ve vodorovné poloze (vlevo) a tělesem MS03 tištěným ve svislé poloze (vpravo) [9]

Po tepelném zpracování byla proměřena tvarová plocha obou těles (viz Tab. 4.) Z výsledků je patrné, že menší tvarovou odchylku od 3D modelu měl opět artefakt M04. Výsledky měření u artefaktu M04 tisknutého ve vodorovné poloze ukazují, že tvarová plocha je více propadlá a výška celého artefaktu tak nedosahuje požadovaných hodnot. Naproti Artefakt MS03 tisknutý ve svislé poloze má materiálu naopak více, a tak je artefakt vyšší než by podle 3D modelu měl být. Odchylka tvaru je ale v obou případech tisku v řádu desetin. [9]



3.3 Konstrukce 3D tištěného dílu s ohledem na přesné obrábění

Abychom mohli v následující operaci třískového obrábění vytvořit přesný povrch na tištěném dílu, je nezbytné již v projekční fázi upravit design tak, aby bylo možné obrobek upnout, vyrovnat a obrobit při stabilním řezném procesu.

3.3.1 Optimální přídavek na přesné obrábění

Z ekonomického i technologického hlediska je vhodné volit co nejmenší přídavek na obrábění. Minimální velikost přídavku má však své limity, které jsou dané několika podmínkami.

Musí být zachována minimální tloušťka odřezávané vrstvy, kterou lze obecně definovat jako dvojnásobek poloměru hlavního ostří, záleží tedy na materiálu a geometrii nástroje a tloušťce povlakovacích vrstev nástroje. V opačném případě nebude docházet k řezání, ale k tváření obrobku. Tento parametr je ovšem většinou limitován velikostí posuvu, nežli hloubkou řezu.

Předně musíme vzít v potaz součet všech nepřesností, které mohou nastat, abychom měli na celé obráběné ploše vždy dostatek materiálu, který můžeme odebírat a nezůstali tak na funkční ploše vinnou nepřesností a deformací neobrobené oblasti.

Artefakt pro náš experiment byl namodelován s konzistentním přídavkem 0,2mm na testované tvarové ploše.

3.3.2 Upnutí dílu do obráběcího stroje

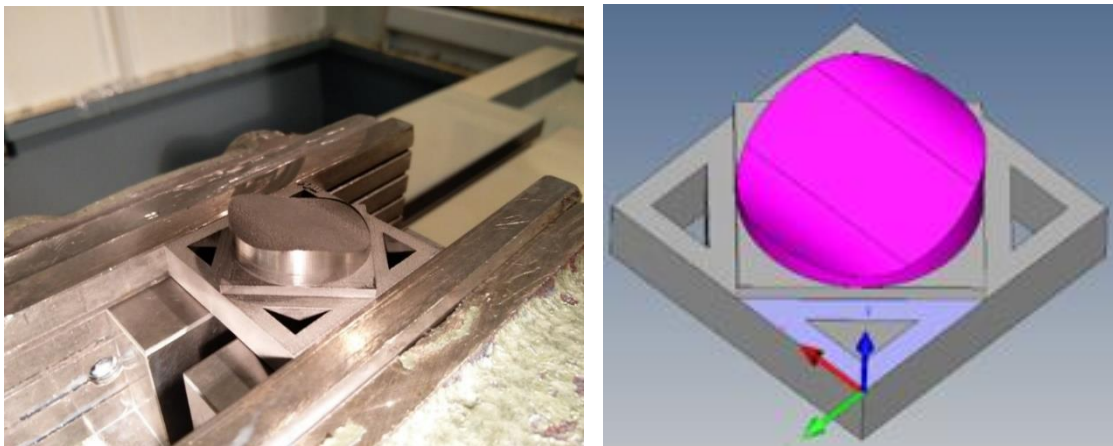
V první řadě je potřeba díl správně naprojektovat, aby ho vůbec bylo možné upnout do obráběcího stroje. Pokud konstrukce dílu neumožňuje vytvořit plochy vhodné k upnutí standardním způsobem, jako například do svěráku, sklíčidla, upínekami, na magnet nebo mezi hroty, je třeba již při návrhu řešit jiný způsob upnutí. Řešením může být přímo vytisknutí přípravku s negativním tvarem ploch obrobku.

Jelikož se jedná o přesné obrábění, je důležité způsobem upnutí eliminovat možnost vzniku vibrací a případného posunutí obrobku vůči souřadnému systému stroje. Proto by mělo být upnutí co možná nejužší a mělo by být realizované co nejbližší k obráběné oblasti. Plochy pro upnutí je třeba nadimenzovat tak, aby při upnutí dostatečnou silou, potřebnou k udržení stability obrobku, nedocházelo k deformacím vlivem upínacích sil.



Problém může nastat již při samotném upnutí dílu. Testovaný artefakt byl designován pro upnutí do svěráku za relativně mohutnou podstavu. Stěny podstavy tištěného artefaktu byly dle měření konkávně prohnuté. Může tedy nastat problém s kolmostí protilehlých stěn a především se styčnou plochou mezi obrobkem a svěrákem. Výtisky jsou od platformy často oddělovány drátovým řezáním, stejně jako tomu bylo i v případě testovaného artefaktu. Odchyšky v rovinnosti takto odříznuté plochy mohou být dle našeho experimentu až v řádu desetin milimetru.

Upínací plochy je tedy nutné před upnutím zúhlovat obráběním, nebo při upínání věnovat velkou pozornost vyrovnání součásti. [19]



Obr. 19: upnutí artefaktu (vlevo), upínací základna artefaktu (vpravo) [9]

3.3.3 Vyrovnání dílu na obráběcím stroji

Kromě upínacích ploch tištěného obrobku, je potřeba předem nadefinovat technologické základny, vůči nimž se bude moci obrobek vyrovnat a zadefinovat tak souřadný systém obrobku. Vzhledem k možným deformacím tištěného dílu je nutné uvažovat nad umístěním geometrických základen tak, aby byly co nejbližší elementům, vůči nimž jsou pozičně zadefinované obráběné plochy.

V případě testovaného artefaktu byla kontrolní základna (vodorovná plocha podstavy) obrobena v jedné operaci přímo s obráběním přesné tvarové plochy. Pro potřeby kontroly tak byla vytvořena přesná základna s přesně definovanou pozicí vůči tvarové ploše. Ovšem při prvotním upnutí na obráběcím stroji bylo provedeno vyrovnání podle neobrobenej upínací základny vzhledem k souřadnému systému znázorněného na Obr. 19. [19]



3.4 Obrábění tvarové plochy

3.4.1 Nástroj

Jako nástroj byla použita kulová fréza (tělo nástroje: Gühring 01941- 10,000) o průměru 10 mm s vyměnitelnou břitovou destičkou Gühring 2520 – 10 DK 460 UF. Tento nástroj je určen pro velmi přesné dokončování tvarových ploch.



Obr. 20: Kulová fréza s VBD

Tab. 5: Parametry frézy

Průměr d [mm]	10
Počet zubů z [1]	2
Funkční délka ostří l_2 [mm]	5
Úhel sklonu ostří λ [°]	0
Úhel čela γ_0 [°]	0
Průměr činné části [mm]	8
Délka činné části l_3 [mm]	44
Průměr dřívku [mm]	10
Celková délka l [mm]	95
Typ povlaku	FIREX

Destičky jsou výrobcem určeny k práci bez použití rezné kapaliny. Výrobcem doporučené rezné podmínky pro korozivzdorné oceli pevnosti vyšší než 750 N/mm² jsou:



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Tab. 6: Doporučené parametry pro frézu

Řezná rychlost [m/min]	100
Posuv na zub [mm/zub]	0,065
Doporučená hloubka třísky a_p [mm]	0,2
Doporučená šířka třísky a_e [mm]	0,5

3.4.2 Stroj

Jako stroj byla použita tříosá frézka VMC 500.

Tab. 7: Parametry Frézky

Rozměry upínací plochy	800X500	mm
Výkon hlavního motoru	7,5	kW
Maximální otáčky vřetena	10 000	min ⁻¹
Jmenovitý moment	102	Nm



Obr. 21: Tříosá frézka VMC 500



3.4.3 Řezné podmínky

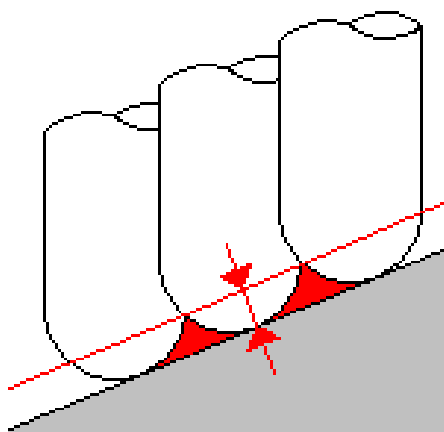
Řezné podmínky byly voleny velmi konzervativně s cílem dosáhnout co nejpřesnějšího povrchu a zároveň stanovit výchozí funkční řezné podmínky při obrábění tvarových ploch pro následné testy, během kterých může z těchto dat docházet k následnému navyšování řezných podmínek s ohledem na přesnost, kvalitu a opotřebení.

Řezná rychlost byla stanovena dle doporučení výrobce nástroje pro tuto kategorii materiálů martenzitických ocelí s pevností nad 1200 N/mm². Jedná se ovšem o řeznou rychlost na obvodu kulového nástroje. Vzhledem k velmi malé hloubce řezu byla reálná řezná rychlost výrazně nižší. Reálná řezná rychlost se také samozřejmě mění v závislosti na naklonění obráběné plochy vůči ose nástroje. Tento geometrický poměr určí oblast záběru na kulovém nástroji a tedy i reálnou řeznou rychlost.

Tab. 8: řezné podmínky obrábění tvarových ploch

Otáčky n [ot/min]	1655
Řezná rychlost na obvodu v_c [m/min]	52
Posuv f [mm/min]	40
Posuv na zub f_z [mm/zub]	0,012
Hloubka řezu a_p [mm]	0,2
Zbytková výška výběžků Scallop [mm]	0,002

Šířka řezu nebyla nastavena konstantně, ale pomocí parametru Scallop, který nám říká, jak velká bude výška výstupků zbytkové neobrobené plochy.



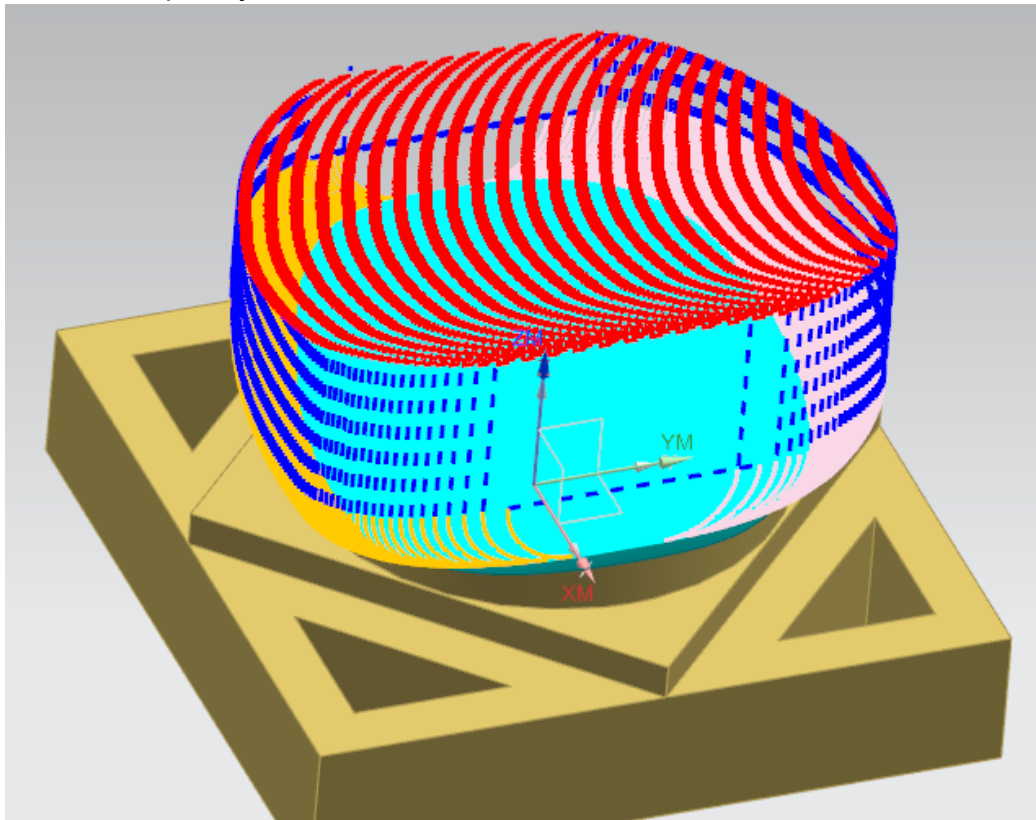
Obrázek 1: výška scallop



3.4.4 Strategie obrábění

Na artefaktech byla nejprve obrobena válcová plocha kolem tvarové vlny a současně s ní došlo k obrobení přilehlé čelní plochy. Díky tomu byla vytvořena přesná základna pro následné měření na souřadnicovém měřicím stroji. Obrábění bylo provedeno válcovou frézou o průměru 15,6 mm. Tvarová plocha s charakteristikou vlny byla obrobena kulovou frézou. Pro dosažení nejpřesnějšího tvaru výsledného povrchu byla zvolena strategie podélného řádkování. Po najetí do řezu do příslušného řádku došlo k uzamčení os Z a X a obrobek se vůči nástroji pohyboval pouze v ose Y. Tím se snížil vliv nepřesnosti stroje na variabilitu procesu. Řádkování bylo vedeno po vrstevnicích vlny a tedy úhel opásání nástroje se v jednotlivých řezech neměnil.

Artefakt byl obroben podle nc kódu, který byl vytvořen v rámci studentského projektu v softwaru siemens NX. Na níže přiloženém obrázku jsou znázorněny dráhy Obrábění tvarové plochy na tištěném artefaktu



Obr. 22: dráhy obrábění s nájezdy a výjezdy

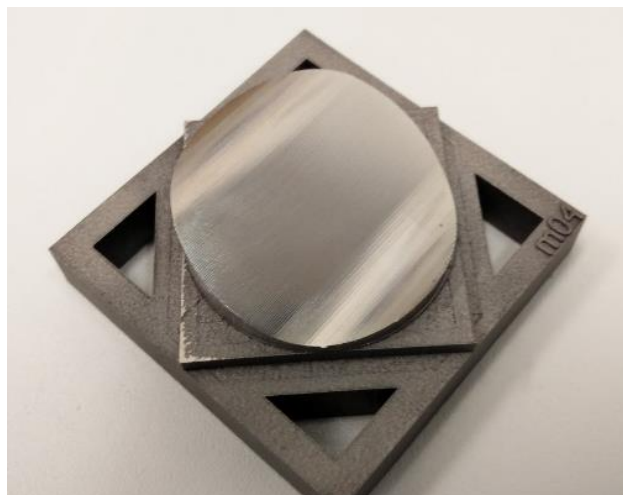


Obrábění proběhlo dle řezných podmínek a strategií popsanych v kapitole 3.4.3. Dle měření, která proběhla před obráběním, ale již po tepelném zpracování artefaktů je patrná značná deformace rovinných i tvarových ploch (viz Tab. 4, a Obr. 18)

U vodorovně tištěného artefaktu m04 je vlivem velké odchylky rovinnosti horní plochy základny velmi důležité, odkud se odměřuje souřadnice Z. Většina odchylek tvarové plochy (vlny) sice směřovala do záporných hodnot, ale v našem experimentu jsme stanovili hladinu Z u jednoho z nejnižších naměřených bodů. Díky tomu při teoretické hloubce řezu 0,2 mm došlo k obrobení celé plochy vlny.

U svisle tištěného artefaktu ms03 byl po tepelném zpracování naměřen na ploše vlny rozptýl odchylek od ideálního tvaru vytvořeného v CAD více jak 0,5 mm. Většina odchylek směřovala do kladných hodnot, souřadnici Z jsme tedy odměřili od nižších bodů horní plochy základny. Po obrobení s teoretickým přídávkem na obrábění 0,2 mm ovšem zůstala značná oblast tvarové plochy neobrobená. Obrábění proběhlo ještě znovu se snížením hladiny Z o 0,1 mm a posléze ještě jednou, s dalším snížením hladiny Z o 0,1 mm. Až s teoretickým přídávkem na obrábění 0,4 mm došlo k obrobení celé plochy vlny. I přes to, že většina této plochy vykazovala větší rozměry v ose Z, obzvláště v nejnižším bodě vlny byly tyto odchylky od nominální plochy i záporné. Z toho důvodu právě v této oblasti nedošlo při prvních dvou pokusech k obrobení dané plochy.

V případě opravdové funkční plochy je posun o 0,2mm zcela zásadní a produkt se stává zmetkovým. Musí se vytisknout znovu s větším přídávkem, nebo řešit vhodnost



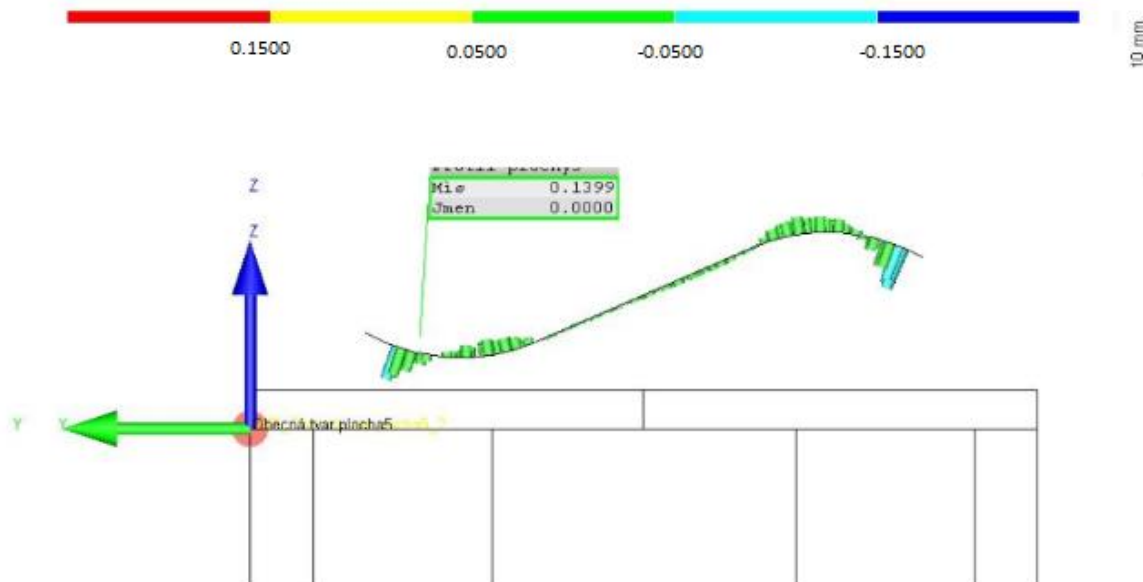
Obr. 23: obrobená tvarová plocha u artefaktu M04



technologické základny, od které se vyrovnává. Zároveň je vhodné pro vyrovnání definovat nejen plochy, ale i konkrétní místa na ploše, odkud bude souřadný systém odměřován.

3.5 Vyhodnocení testů obrábění tvarových ploch

Obrábění tvarových ploch sintrovaného materiálu nevykazovalo žádné abnormalie. Při zvolených velmi defenzivních řezných podmínkách ani nelze očekávat jakékoliv negativní projevy. Měření tvarové odchylky obrobenej plochy se podrobil artefakt s označením m04, tedy artefakt tištěný ve vodorovné poloze. Maximální odchylka od nominální tvarové plochy byla 0,139 mm.



Obr. 24: odchylka profilu frézované plochy od ideálního tvaru

Dále byla změřena drsnost povrchu obrobenej tvarové plochy. Cut-off filtr byl opět nastaven na hodnotu 0,8 mm.

Tab. 9: drsnost povrchu

R_a [μm]	0,7246
R_z [μm]	4,4947
R_{max} [μm]	5,2083
R_{Sm} [μm]	49,3



4 Závěr

Cílem tohoto experimentu bylo vytvoření funkčních tvarových ploch na 3D tištěných součástech metodou DMLS. Vzhledem k limitům rozměrové přesnosti a jakosti povrchu tištěných součástí byla zvolena hybridní technologie kombinující 3D tisk a přesné obrábění.

Pro možnost následného obrábění je nutné již u designování součásti řešit problematiku upnutí. Tištěná součást je ovšem většinou zatížena značnými deformacemi, a tak i přes to, že mám na výtisku navržené geometrické elementy pro jednoznačné upnutí, nemusí být upnutí dostatečně přesné, ani tuhé.

Právě deformace vytištěného a tepelně zpracovaného obrobku sehrávají významnou roli v problematice vyrovnání součásti na obráběcím stroji. Pokud souřadný systém vyrovnávám například vůči rovinným, nebo válcovým plochám, pak umístění souřadného systému nemusí být zdaleka jednoznačné. Jeho umístění bude záviset na tom, ze kterých bodů bude technologická základna odměřena.

Minimální velikost přídatku na obrábění je závislá na mnoha faktorech. Předně je to velikost tvarové odchylky od nominálního tvaru obráběné plochy. V případě testovaného artefaktu o maximálních rozměrech 50x50x23 mm byla naměřena odchylka tvarové plochy 0,56 mm u vzorku ms03 tištěného ve svislé poloze! Jen pouhou změnou orientace tisku lze přitom tuto odchylku výrazně snížit, když na vodorovně tištěném artefaktu m04 byla naměřena odchylka tvaru 0,33 mm. Výsledná velikost skutečně obráběného přídatku také závisí na již zmiňovaném vyrovnání součásti a zavedení souřadného systému v rámci obráběcího stroje.



5 Seznam použité literatury

[1] KONSTRUKTÉR. Jak funguje 3D tisk: Jak funguje 3D tisk metodou DMLS [online]. [cit. 2018-10-11]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>

[2] K.L. Tan, S.H. Yeo, Surface modification of additive manufactured components by ultrasonic cavitation abrasive finishing, *Wear*, Volumes 378–379, 2017, Pages 90-95, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.030>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164816305142>)

[3] Shamvedi, Deepak & Mccarthy, O & O'Donoghue, Eoghan & O'Leary, Paul & Raghavendra, Ramesh. Surface Treatment of 3D Metal Printed Microwave Components. (https://www.researchgate.net/publication/318589518_Surface_Treatment_of_3D_Metal_Printed_Microwave_Components)

[4] Francis E.H Tay, E.A Haider, Laser sintered rapid tools with improved surface finish and strength using plating technology, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 121, Issues 2–3, 2002, Pages 318-322, ISSN 0924-0136, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01220-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01220-1). (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013601012201>)

[5] Crucible Design Ltd. [online]. Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS). 2015 [cit. 2018-11-23]. Dostupné z: <https://www.crucibledesign.co.uk/images/uploaded/guides/bs7000-part-2-amanagement-guide-download-original.pdf>

[6] Yuji Furukawa, Nobuyuki Moronuki, Effect of Material Properties on Ultra Precise Cutting Processes, *CIRP Annals*, Volume 37, Issue 1, 1988, Pages 113-116, ISSN 0007-8506, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61598-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61598-4). (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607615984>)



[7] M. Otkur, I. Lazoglu, Trochoidal milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 47, Issue 9, 2007, Pages 1324-1332, ISSN 0890-6955, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.08.002>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695506001891>)

[8] ARMSTRONG, Courtney. A comprehensive guide for 3D printing with SLA covering the printing process, design specifications, material options and technology limitations. Easy CNC [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>

[9] PITRMUC, Zdeněk, Jan ŠIMOTA a Jan URBAN. Koncepce modelu digitální továrny za použití aditivních a CNC technologií: Vývoj technologie výroby obecných tvarových ploch za použití kombinace aditivních a CNC technologií využitelných v průmyslu. Praha, 2016. Výzkumná zpráva. ČVUT Fakulta strojní.

[10] Informace o technologiích 3D tisku. Nový inovovaný FabbsterG [online]. [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3dtisku/>

[11] M. Otkur, I. Lazoglu, Trochoidal milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 47, Issue 9, 2007, Pages 1324-1332, ISSN 0890-6955, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.08.002>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695506001891>)

[12] PÍŠA, Z. Rychlá výroba prototypů [online]. [cit. 2019-04-22]Dostupné na World Wide Web: .(<http://esf.fme.vutbr.cz/aktivity/akt-05/mod-07/rpt.pdf>>



[13] ROZKOŠNÝ, L. Jak vyrobit plně funkční kovové díly přímo z 3D CAD dat. [online]. 2008, [cit. 2018-11-23]. Dostupné na World Wide Web: [.\(http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=3698&mark=>.](http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=3698&mark=>)

[14] Researchgate. SLM proces parameters [online]. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/SLM-process-parameters-laser-power-scanning-speed-hatch-spacing-and-layer-thickness_fig2_286497734

[15] Direct Metal Laser Sintering. [online], [cit. 2018-11-23]. Dostupné na World Wide Web: [. http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering](http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering)

[16] CAM systémy a hodnocení strategií obrábění. CAD.cz [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2385-cam-systemy-a-hodnoceni-strategii-obrabeni.html>

[17] CAM systémy a výroba tvarových ploch. CAD.cz [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2321-cam-systemy-a-vyroba-tvarovych-ploch.html>

[18] GE Additive releases new version of Concept Laser M2 cusing range. GE additive [online]. [cit. 2018-10-16]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/press-releases/ge-additive-releases-new-version-concept-laser-m2-cusing-range>

[19] VIGNER, Miloslav. Obrábění. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984. Technický průvodce.

[20] RENISHAW PLC. Machine Profile Editing: Build Processor.

[21] EOS M 100 - Ideal entry level model for industrial 3D printing. Eos [online]. [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: <https://www.eos.info/eos-m-100>



6 Seznam obrázků

Obr. 1: spékání kovového prášku laserem [21].....	9
Obr. 2: princip technologie DMLS [10].....	10
Obr. 3: znázornění podpor (vlevo), znázornění limitního úhlu (vpravo) [7] [8].....	11
Obr. 4: Podpora kruhového otvoru (vlevo), optimalizace tvaru bez podpor (vpravo) [7]..	11
Obr. 5: podpora čtvercové dílry (vlevo), Realizace modelu při změně polohy (vpravo) [7]	12
Obr. 6: Znázornění zaoblení hran na modelu [7]	12
Obr. 7: Znázornění nevhodné a vhodné polohy modelu vzhledem k nanášení [7].....	13
Obr. 8: Znázornění dlouhé tištěné součásti vychýlení (vlevo), realizace vzpěr (vpravo) [7]	13
Obr. 9: skenovací vzory - meander, chessboard, total fill, stripes [20]	14
Obr. 10: Poloha modelu pro omezení pnutí v oblasti tiskové platformy [7]	15
Obr. 11: oblast natavení prášku [14].....	15
Obr. 12: porovnání třísek, tištěný polotovár (vlevo), výkovek (vpravo) [9].....	17
Obr. 13: znázornění obrábění konvexní a konkávní plochy.....	19
Obr. 14:Kovová 3D tiskárna Concept laser M2 cusing společnosti Misan s.r.o. [18].....	21
Obr. 15: 3D model zkušebního artefaktu pro vyhodnocení přesnosti tisku DMLS [9].....	22
Obr. 16: vytištěná paleta, zeleně zvýrazněné M04 tištěný ve vodorovné poloze a artefaktu MS03 tištěný ve svislé poloze (na levém obrázku) [9]	22
Obr. 17: Rozdělení tělesa artefaktu - základna (vlevo), podstava (uprostřed), těleso (vpravo) [9]	23
Obr. 18: Rozdíl profilu plochy mezi tělesem M04 tištěným ve vodorovné poloze (vlevo) a tělesem MS03 tištěným ve svislé poloze (vpravo) [9]	25
Obr. 19: upnutí artefaktu (vlevo), upínací základna artefaktu (vpravo) [9].....	27
Obr. 20: Kulová fréza s VBD.....	28
Obr. 21: Třiosá frézka VMC 500.....	29
Obr. 22: dráhy obrábění s nájezdy a výjezdy	31
Obr. 23: obrobena tvarová plocha u artefaktu M04.....	32
Obr. 24: odchylka profilu frézované plochy od ideálního tvaru	33



7 Seznam tabulek

Tab. 1: porovnání drsnosti povrchu [9]	18
Tab. 2: Naměřená data před odříznutím artefaktů M04 a MS03 z tiskové platformy [9]..	23
Tab. 3: Naměřená data po odříznutí artefaktů M04 MS03 z tiskové platformy [9]	24
Tab. 4: Naměřená data artefaktů M04 MS03 po tepelném zpracování [9].....	24
Tab. 5: Parametry frézy	28
Tab. 6: Doporučené parametry pro frézu	29
Tab. 7: Parametry Frézky	29
Tab. 8: řezné podmínky obrábění tvarových ploch	30
Tab. 9: drsnost povrchu	33