VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

POVRCHOVÉ ÚPRAVY PLASTOVÝCH DÍLŮ

SURFACE FINISHING OF PLASTIC PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE MANH THANH NGUYEN
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. DAVID PALOUŠEK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Manh Thanh Nguyen

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Povrchové úpravy plastových dílů

v anglickém jazyce:

Surface finishing of plastic parts

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je testování povrchových úprav plastových dílů vyráběných pomocí technologií rapid prototyping. Jedná se především o leptání povrchu acetonovými parami.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)
1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva
Typ práce: experimentální; Účel práce: výzkum a vývoj
Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).
Zásady pro vypracování práce:
http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2015.pdf
Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

Rory A. Wolf. Plastic Surface Modification: Surface Treatment and Adhesion Hardcover – October 15, 2009. 181 pages. ISBN-10: 1569904472. ISBN-13: 978-1569904473.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně dne 21. 11. 2014

L.S.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ DĚKANÁT

v. z.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

v. z.

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tématem této bakalářské práce jsou povrchové úpravy plastových dílů vyráběných pomocí technologie FDM. Součásti práce je experimentální část, jejímž cílem je otestovat různé možnosti úprav povrchů leptáním acetonovými parami. Testování proběhne na dvou typech vzorků z materiálu ABS, ze kterých se budou vyhodnocovat různé parametry rozměrů a geometrie.

KLÍČOVÁ SLOVA

ABS, FDM, rapid prototyping, povrchové úpravy, acetonové páry

ABSTRACT

The main topic of this barchelor thesis is surface finishing of plastic part manufactured by FDM technology. The thesis includes experimetal part which aim is to test various possibilities of surface finishing by acetone vapour etching. Two different samples of ABS materiál will be used for testing. Changes of dimension and geometry will be observed.

KEY WORDS

ABS, FDM, rapid prototyping, surface finishing, acetone vapour

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NGUYEN, Manh T. *Povrchové úpravy plastových dílů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Povrchové úpravy plastových dílů* vypracoval samostatně za použití uvedených zdrojů pod odborným vedením pana doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za cenné rady, dále Ing. Anetě Zatočilové a Ing. Tomáši Kouteckému za odbornou pomoc v praktické části práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodinně za plnou podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

OBSAH **11**
ÚVOD **12**
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO POZNÁNÍ **13**
1.1 Aditivní technologie výroby 13
1.2 Výběr technologií a stručný popis 13
1.2.1 Stereolitografie (SLA) 13
1.2.2 Selective Laser Sintering (SLS) 14
1.2.3 Laminated object manufacturing (LOM) 14
1.2.4 Fused deposition modeling (FDM) 15
1.3 Post-processing 16
1.3.1 Finishing Touch Smoothing Station 16
1.3.2 Tryskání 17
1.3.3 Omílání 17
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE **20**
2.1 Struktura povrchu 20
2.2 Cíl práce 21
3 MATERIÁL A METODY **22**
3.1 Materiály 22
3.1.1 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) 22
3.1.2 Polylactic acid (PLA) 22
3.1.3 Nylon 12 22
3.1.4 Polykarbonát (PC) 22
3.1.5 ASA 23
3.1.6 ULTEM 9085 23
3.2 Návrh vzorků 23
3.3 Metody 25
3.3.1 Leptaní acetonovými parami za tepla 25
3.3.2 Leptaní acetonovými parami za pokojové teploty 25
3.4 Měření 27
3.4.1 ATOS III Triple Scan 27
3.5 Získávání parametrů 28
4 VÝSLEDKY **30**
4.1 Vzorek A 30
4.1.1 Odchylky 30
4.1.2 Průměr vzorků 31
Vzorek B 31
4.1.3 Rovinnost: 31
4.1.4 Kontrola úhlů: 32
5 Diskuze **33**
6 ZÁVĚR **34**
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ **35**
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK **38**
9 SEZNAM OBRAÁZKŮ **39**
10 SEZNAM TABULEK **40**
11 SEZNAM PŘÍLOH **41**

ÚVOD

V současné době prochází rapid prototyping (RP) dynamickým rozvojem. Možnost rychlé výroby fyzických modelů umožňuje testování prototypů a jejich prezentace. Díky tomu lze získat cenné informace a odezvu uživatelů bez potřeby výroby drahých forem, které se použijí až pro finální verzi produktu pro hromadnou výrobu. RP je řešením, které zefektivňuje návrhářskou fázi, a tím urychluje celý výrobní proces. Z hlediska kusové a malosériové výroby se jedná o ekonomicky výhodnou a časově úspornou technologii.

Přes své výhody má svá úskalí a omezení, která jsou neustálým vývojem potlačovány. Jedná se především o horší mechanické vlastnosti anebo pro RP charakteristický vrstvený vzhled.

Tato práce je zaměřena na problematiku kvality povrchu dílů vyrobených pomocí technologie RP a možnosti její úpravy. Teoretická část práce obsahuje stručný přehled RP technologií a možnosti povrchových úprav využívaných v průmyslu. Součásti práce je také experimentální část. Ta se skládá z aplikací metod leptání povrchu parami a zkoumání jejich vlivů na zkušební vzorky.

Využití povrchových úprav je přínosné nejen pro estetické účely, lepší prodejnost designu, kvalitnější povrch může mít pozitivní vliv na funkci a trvanlivost kontaktních součástí jako jsou například ozubená kola nebo klouby hraček a součástí.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO POZNÁNÍ

1.1 Aditivní technologie výroby

Termín aditivní technologie (AM) výroby byl organizací ASTM International definován jako proces vytváření fyzického předmětu z dat 3D modelu. [2] Tento proces obvykle probíhá nanášením materiálu vrstvu po vrstvě. Je tedy opakem klasických obráběcích procesů, kde se obrobek vytváří odebíráním materiálu v podobě třísky (subtraktivní metoda).

V mnoha odvětvích průmyslu se také používá pojem rapid prototyping (RP), neboli rychlé prototypování. Technologie původně vynalezena za účelem co nejrychlejšího zhotovení prototypů. S neustále rostoucí kvalitou zhotovených dílů se rozdíly mezi prototypem a požadovaným finálním produktem stírají. [1]

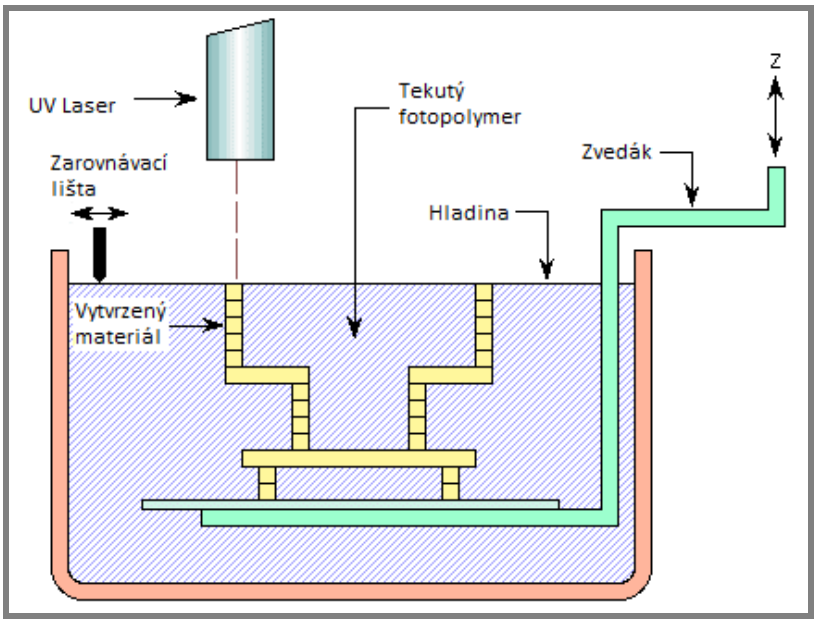
Dnes se využití těchto strojů již rozšířilo a neomezuje se jen na tvorbu prototypů. Některé součástky lze už touto technologií vyhotovit přímo. Z tohoto důvodu je pojem RP zavádějící a začíná se od něj opouštět. [1]

1.2 Výběr technologií a stručný popis

1.2.1 Stereolitografie (SLA)

Stereografie je založena na vytvrzování vrstev tekutého polymeru.[4] Je považována za nejstarší a v současné době zároveň za jednu z nejpřesnějších metod AM. Přesnost se pohybuje okolo 0,05 až 0,2 mm na 100 mm. [3]

K vytvrzování polymeru (plastické hmoty citlivé na světlo) dochází pomocí počítačově řízeným UV laserem, který prochází přes složitou optickou soustavou na hladinu. Po vytvrzení jedné vrstvy se materiál ponoří o tloušťku vrstvy (0,05 až 0,15 mm), která na ní bude navazovat. [c, d] Tímto způsobem dochází k tvorbě celého 3D modelu. Po skončení výrobního procesu je zbytek polymeru odveden a model musí projít úpravou povrchu a sušením. [3]



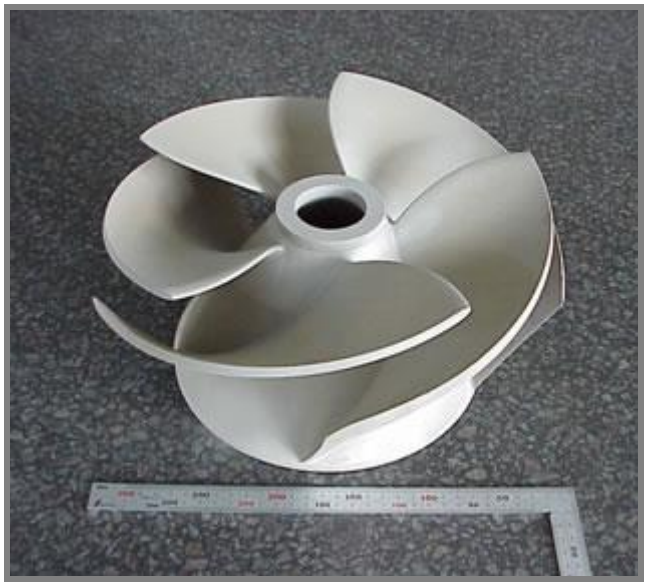
Obr. 1-1 Schéma stereolitografie [17]

1.2.2 Selective Laser Sintering (SLS)

SLS vytváří součásti z jednotlivých vrstev práškového materiálu. [3] Výrobní proces součásti probíhá v uzavřené komoře naplněné inertním plynem (většinou dusík), aby se zamezilo oxidaci práškového materiálu. Zároveň je prášek zahříván na teplotu nižší než je jeho teplota tavení/skelného přechodu. To je nezbytné k tomu, aby se minimalizovaly energetické nároky na laser a předcházelo se hroucení součásti v důsledku nerovnoměrného tepelného roztahování a smršťování. [1]

Jednotlivé vrstvy práškového materiálu jsou nanášeny speciálním válečkovým systémem a působením CO_2 laseru spékány do požadovaného tvaru. V místě působení laseru se přídavný materiál buď speče, nebo roztaví a ztuhne. [4] Okolní nenatavený materiál slouží jako podpora pro model a odstraňuje se po dokončení tisku. [3]

Součásti vytvořené touto metodou mají vysokou pevnost. Minimální tloušťka vrstvy je až 0,02 mm. [4] Jako materiál lze použít různé plasty, pryže, kovy, keramika a dokonce i speciální písek. [3]



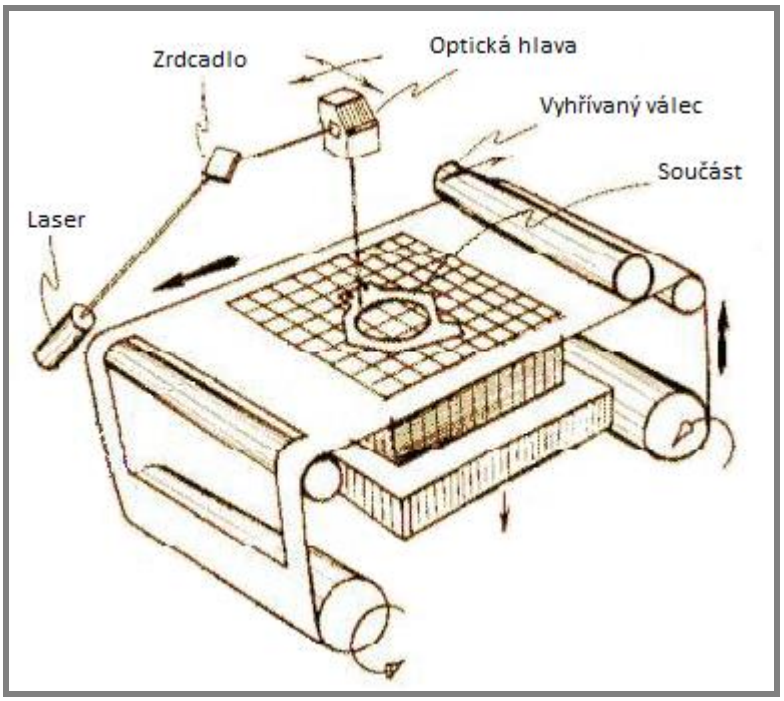
Obr. 1-2 Testovací součást vyrobená pomocí SLS [18]

1.2.3 Laminated object manufacturing (LOM)

Technologie LOM je založená na principu vrstvení lepivého materiálu – speciální plastové fólie nebo mnoho vrstev papíru napuštěných zpevňující hmotou. Technologie také využívá CO_2 laseru, který má za úkol oříznout jednotlivé vrstvy do požadovaného tvaru. [5]

Základem celé aparatury (obr. 1-3) je svisle se pohybující nosná deska, na které je součástka vytvářena. Na vrstvu, která je nanesená na desku a ořezaná CO_2 laserem do požadovaného tvaru, se natáhne papírová fólie opatřena vrstvou polyetylenu. Působením soustavou vyhřívaných válců se tyto vrstvy k sobě přitlačí, čímž dojde k jejich slepení. Paprsek CO_2 laseru vyřeže požadovaný obrys vytvořené vrstvy a přebytečný materiál rozdělí do čtverců, které jsou později odstraněny. Poté, co je vrstva hotová, se pohybující nosná deska sníží o tloušťku fólie a cyklus začíná nanovo, dokud se nezíská požadovaný model. [5]

Vlastnosti součástí vytvořené metodou LOM se podobají těm, které by byly vytvořené ze dřeva. Je nutná konečná úprava, kdy k dosažení hladkého povrchu je zapotřebí součást opracovat ručně. Tato metoda přináší bohužel jisté nevýhody a to zejména ve velkém množství odpadního materiálu, který vyprodukuje. [5]



Obr. 1-3 Princip metody LOM [19]

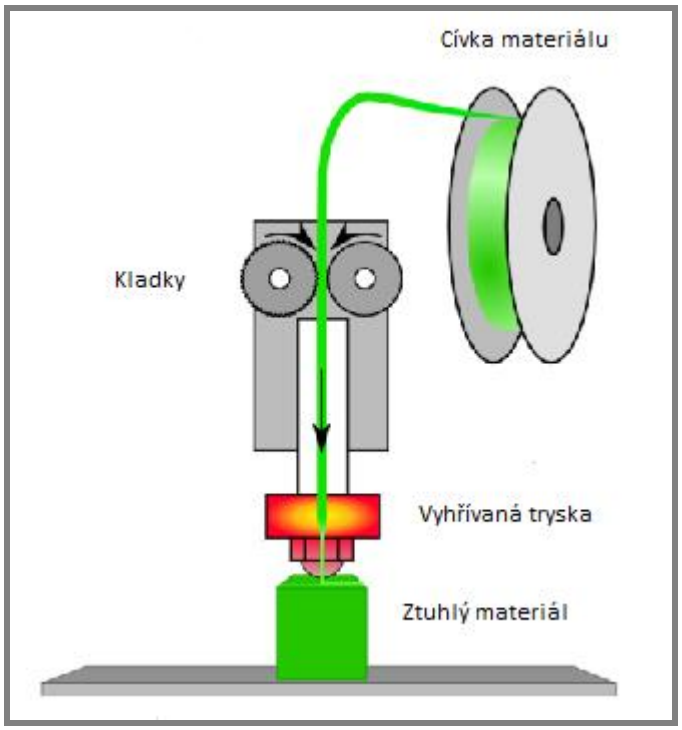
1.2.4 Fused deposition modeling (FDM)

Princip metody FDM spočívá v natavování termoplastického materiálu ve formě drátu navinutého na cívce. Z této cívky je materiál postupně pomocí kladek vtlačován do vyhřívané trysky, ve které je ohřán do polotekutého stavu. [3] Z trysky materiál vychází ve tvaru tenkého vlákna. Při styku s povrchem vytvářené součástky se vlákna vzájemně spojují a vytvářejí tak požadovanou tenkou vrstvu, která ihned tuhne. [5] Postupným nanášením jednotlivých vrstev vzniká celá součást.

Metoda vyžaduje stavbu podpor. Ty mohou být ze stejného materiálu jako vyráběná součást, v tom případě se po vyhotovení odlamují mechanicky. Nebo lze použít podpěry z rozpustného materiálu, které se odstraňují chemickým rozpouštěním.[3] Jako stavební materiál lze použít různých netoxických termoplastů nebo vosků. [5]

Vzhledem k pevnosti používaných materiálů je možné metodou FDM vyrobit funkční prototypy, které se svými vlastnostmi blíží konečným produktům. [3]

Jelikož budou testovací díly pro tuto práci vyrobené pomocí FDM, budou se následující kapitoly týkat právě této metody.



Obr. 1-4 Princip metody FDM [20]

1.3 Post-processing

Většina vytvořených produktů musí projít ještě finální úpravou. Důvody mohou být různé. Nejčastějšími jsou zkvalitnění dílů nebo překonání některých omezení technologií AM. [1] To zahrnuje například:

a) odstranění podpěrného materiálu,
b) zlepšení struktury povrchu,
c) zlepšení přesnosti,
d) estetické úpravy, atd. [1]

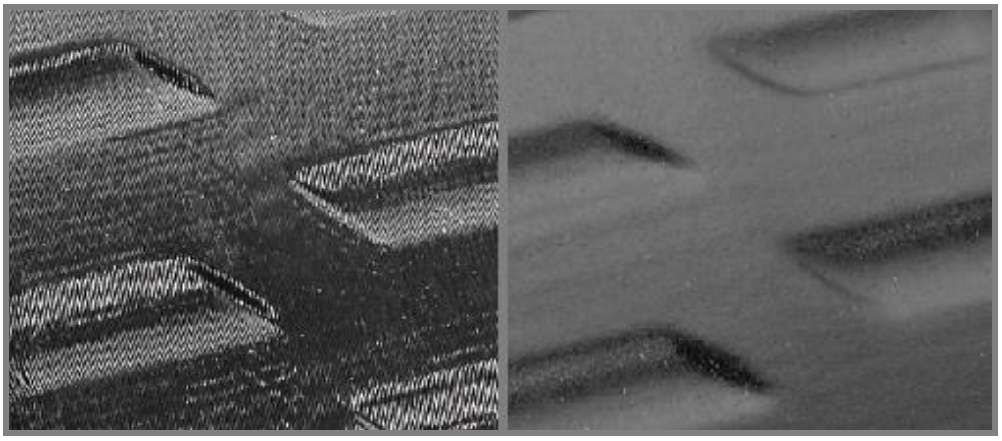
1.3.1 Finishing Touch Smoothing Station

Produkt firmy Stratsys (obr. 2-5) slouží k dokončovacím úpravám dílů vytvořených technologií FDM a to především z materiálu ABS a jeho modifikací. Funguje na chemickém principu.

Hlavní části tvoří vyhlazovací komora a komora vysušovací. Do první zmíněné komory se upravovaný díl vkládá na dobu 10 až 30 sekund. Poté se díl vytáhne a zkontroluje se kvalita jeho povrchu. Pro dosažení požadované úpravy je tento postup obvykle nutné opakovat 2 až 4 krát. Pracovním médiem je „Smoothing station fluid“ na bázi trans-dichlorethylenu. Než bude možné s dílem dále manipulovat, je nutné ho nakonec ještě zavěsit ve vysušovací komoře (30-45 minut). [6]

Celý proces má minimální vliv na rozměry a přesnost dílů. Výsledná kvalita povrchu by se měla přibližovat ke kvalitě povrchu vstřikovaných dílů. Výrobce uvádí, že díky „finishing touch“ zle dosáhnout až 15 krát hladšího povrchu (vyplývá z nezávislé studie QC Inspection, měřeno na dílech zhotovených na výrobním systému Fortus a tloušťce vrstvy 0,25mm. U těchto dílů došlo ke snížení drsnosti z Ra 600 na Ra 60 až Ra 40). [6]

Obr. 1-5 Finishing Touch Smoothing Station [6]



Obr. 1-6 Povrch před (vlevo) a po (vpravo) úpravě ve „Finishing Station“ [6]

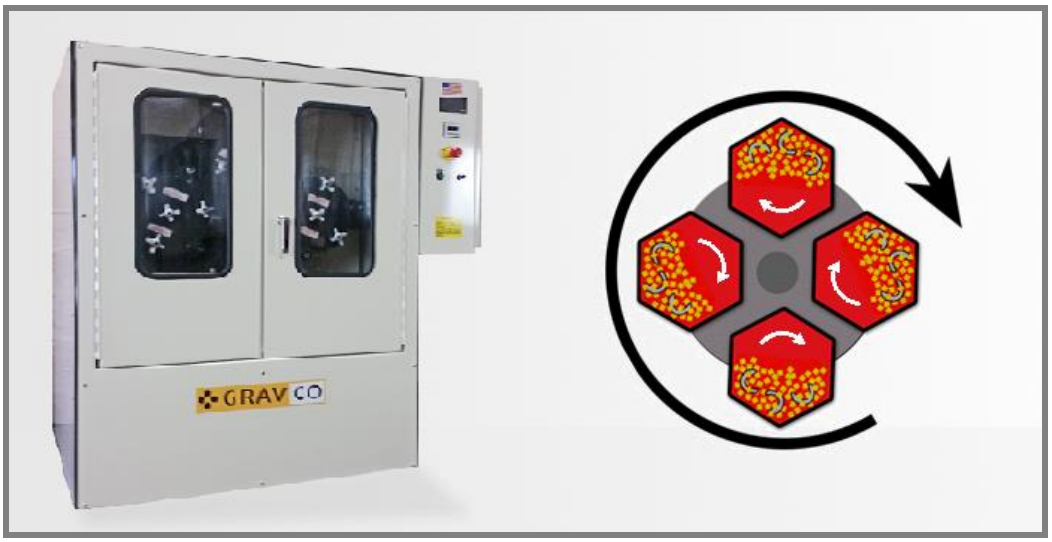
1.3.2 Tryskání

Při tryskání dochází k úběru materiálu součásti pomocí částic abrazivního materiálu, které vysokou rychlostí dopadají na upravovanou plochu a zlepšují její vzhled i drsnost povrchu. Ve většině případů je nosným médiem stlačený vzduch nebo kapalina, kterými se dopravují pracovní částice přestavitelnými tryskami k součásti. [7]

Proces probíhá bez tepelného ovlivnění. Dosažitelná drsnost povrchu se různí podle použitého brusiva, tlaku nosného média, vzdálenosti součást-tryska, aj. Přesnost je daná výrobní operací a tryskáním se nezlepší. [7]

1.3.3 Omílání

Univerzální metoda úpravy povrchů (vzhledu) pro velkého množství menších předmětů bez nároků na přesnost. Podstatou je úběr materiálu z povrchu abrazivními částicemi při jejich vzájemném pohybu v omílacím bubnu. Dráhy, rychlost a abrazivní účinek závisí na tvaru a pohybu bubnu; tvaru, materiálu a pohybu částic; tvaru ploch, materiálu a rozměrech opracovávaných dílů. [7]



Obr. 1-7 Odstředivé omílací zařízení a jeho princip [21, 22]

1.3.3.1 Výběr abraziva:

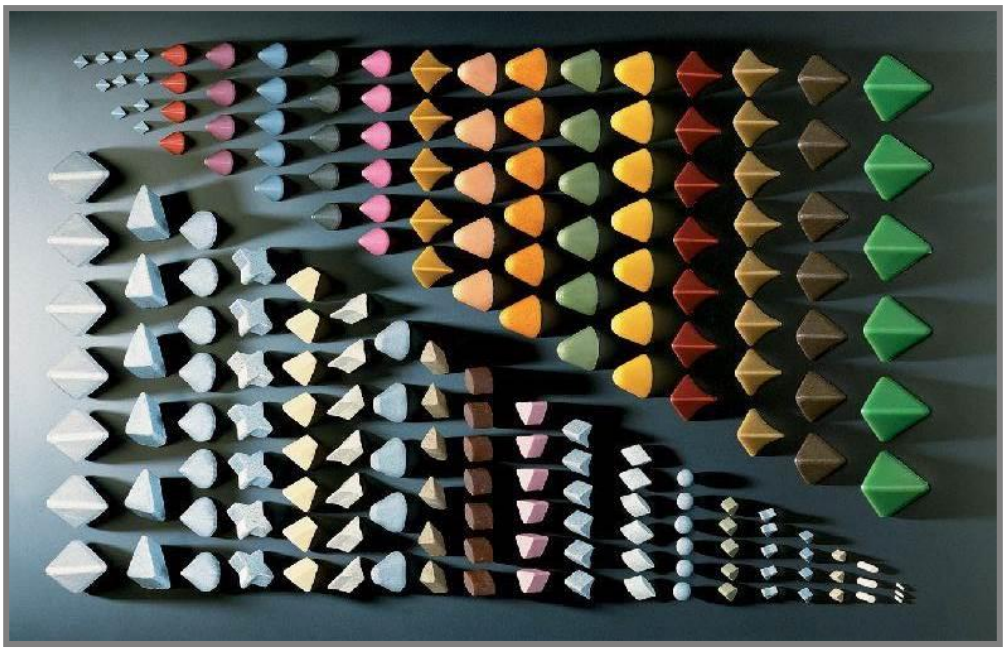
Druhů abraziv existuje mnoho a mohou se od sebe lišit jak materiálem, velikostí, tak tvarem částic (obr. 1-8). Při výběru je tak nutno vzít v úvahu velikost, geometrií i požadovanou úpravu dílů. Například pro drobné předměty jsou vhodná brusiva složená z menších částic a pro díly obsahující detailní prvky je zase nutno zvolit brusivo složitějších tvarů (hvězda, apod.). [8]

Výrobce obvykle také uvádí získatelný vzhled povrchu. Tento údaj ovšem popisuje předpokládaný výsledek pro kovové díly a u dílů z FDM platit nemusí. [8] Experimenty společnosti Stratasys přinesly tyto poznatky:

• **Keramika** – nejtvrdší a nejagresivněji působící částice. Vhodné zejména pro odolnější materiály jakým je např. PC. Pomocí keramického abraziva lze dosáhnout až lesklého povrchu. [8]

• **Plast** – částice lehčí a měkčí než keramika, a proto i působí i méně agresivně. Vhodné pro opracování ABS, PC-ABS a ve většině případů také pro PC. [8]

• **Syntetická brusiva** – podobně jako plastové částice jsou vhodná zejména pro materiály ABS a ABS-PC. Jsou však lehčí, což přináší šetrnější působení a menší riziko mechanického poškození dílu. Zároveň se ovšem prodlužuje potřebný čas pro opracování. Jedná se o příhodnou volbu pro tenkostěnné díly a modely s drobnými prvky. [8]



Obr. 1-8 Různé druhy pracovního média (nad diagonálou – plast, pod diagonálou – keramika) [23]

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Struktura povrchu

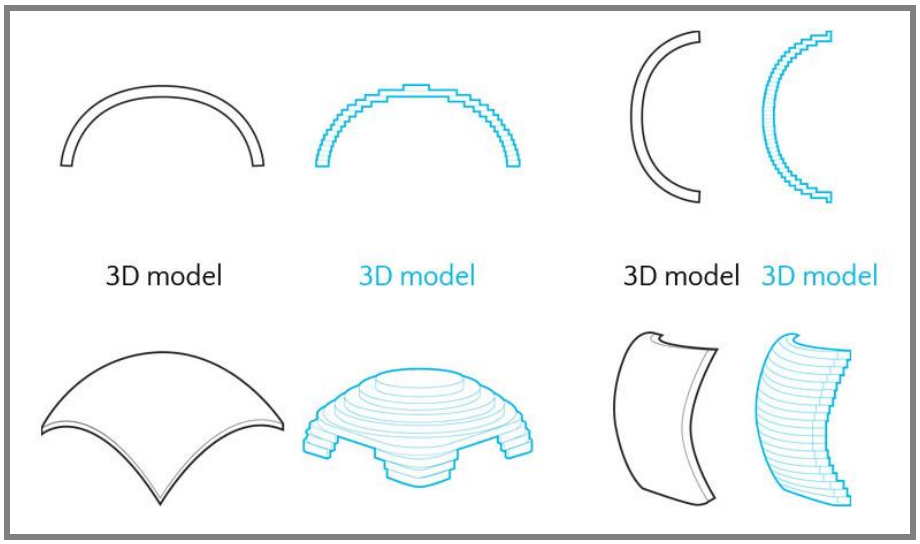
Přestože FMD dnes patří k nejvyužívanějším AM technologiím, stále trpí několika nedostatky. Jedním z nich je kvalita povrchu. Jak bylo dříve zmíněno, principem výroby je postupné nanášení vrstev. Jelikož má každá vrstva konečný rozměr, dochází ke vzniku „schodovitého vzhledu“.

Tento problém lze částečně řešit volbou tenčích vrstev (u nejdražších strojů zle dosáhnout tloušťky až 0,078 mm), to však může vést k výraznému prodloužení času a nákladů. [1]

V praxi se nejčastěji volí tloušťka vrstvy 0,1 až 0,35 mm.

Obr. 2-1 Modely s tloušťkou vrsty 0,1 mm (vlevo) a 0,35 (vpravo) [24]

Dalším parametrem významně ovlivňujícím „schodovitost“ a tím i drsnost je orientace povrchu součásti. [9] Vhodná orientace modelu ovlivňuje nejen kvalitu povrchu, ale i stavbu podpěr, výrobní čas a náklady. [10]



Obr. 2-2 Vliv orientace modelu na povrch [25]

2.2 Cíl práce

Cílem této práce je experimentální výzkum vybraných metod povrchových úprav plastových dílů vyráběných technologií FDM. Jedná se především o různé metody leptání povrchu acetonovými parami. Jako zkušební vzorky poslouží díly z materiálu ABS plus.

Předmětem zkoumání bude výsledný vzhled povrchů, rozměrové odchylky, geometrické odchylky a míra shody s virtuálním modelem. Výsledky metod budou nakonec porovnány mezi sebou, ale také v rámci jednotlivých metod v závislosti na orientaci povrchů.

Dílčí cíle:

1) návrh vzorků,
2) tisk vzorků,
3) naskenování vzorků před jejich úpravou,
4) návrh a aplikace povrchových úprav,
5) naskenování vzorků po jejich úpravě,
6) vyhodnocení a porovnání výsledků.

3 MATERIÁL A METODY

3.1 Materiály

Přehled materiálů využívaných v FDM, jejich charakteristické vlastnosti a vhodnost použití.

3.1.1 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

ABS je pevný a mechanicky odolný materiál. Prototyp vyrobený z plastu ABS dosahuje až 80 % pevnosti plastů ABS vstřikovaných do formy, což znamená, že je mimořádně vhodný pro funkční aplikace. [11]

Další modifikace:

a) ABSi – průhledný termoplast, houževnatější než samotný ABS,
b) ABS-M30 – o 25 % až 70 % pevnější, než standartní ABS,
c) ABS-M30i – pevný, biokompatibilní materiál,
d) ABS-ESD7 – termoplast s unikátní vlastností rozptylu elektrostatického náboje. [12]

3.1.2 Polylactic acid (PLA)

PLA je biologicky odbouratelný polymerní materiál, který se získává z obnovitelných zdrojů, jakými jsou například kukuřice nebo cukrová řepa. [13]

Oproti ostatním termoplastům využívaných v FDM má nízkou teplotu tání (207 °C) a teplotu skelného přechodu okolo 60 °C, což omezuje jeho širšímu využití. Je také tvrdší, ale křehčí než ABS. [13]

Díky nízké teplotní roztažnosti nepotřebuje při tisku vyhřívání. [14] Využití nalézá především v malých kancelářských a domácích tiskárnách.

3.1.3 Nylon 12

Materiál s nejvyšší houževnatostí ze všech FDM termoplastů. Dále se vyznačuje vysokou odolností proti únavě a vynikající chemickou odolností. [15]

Nylon 12 je ideální pro výrobu součástí, které jsou cyklicky namáhány a vyžadují vysokou únavovou odolnost. Vhodný je do leteckého, či automobilového průmyslu, kde pokryje vlastní výrobu nástrojů, přípravků, krytů, apod. [15]

3.1.4 Polykarbonát (PC)

Jedná se o průmyslový termoplast, který nachází široké uplatnění zejména v automobilovém a leteckém průmyslu nebo v lékařství. Tento materiál disponuje lepšími mechanickými vlastnostmi než ABS a řada dalších materiálů. [12]

Využívá se k výrobě přesných, odolných a pevných součástí, které se mohou použít na testování funkčnosti prototypu. [12]

Další modifikace:

a) PC-ISO – biokompatibilní termoplast,
b) PC-ABS – kombinuje vlastnosti obou materiálů. [12]

3.1.5 ASA

Z dosud známých FDM materiálů se může ASA pochlubit nejkvalitnějšími povrchovými a estetickými vlastnostmi výrobků. Díly z tohoto materiálu mají vynikající odolnost vůči UV záření. [16]

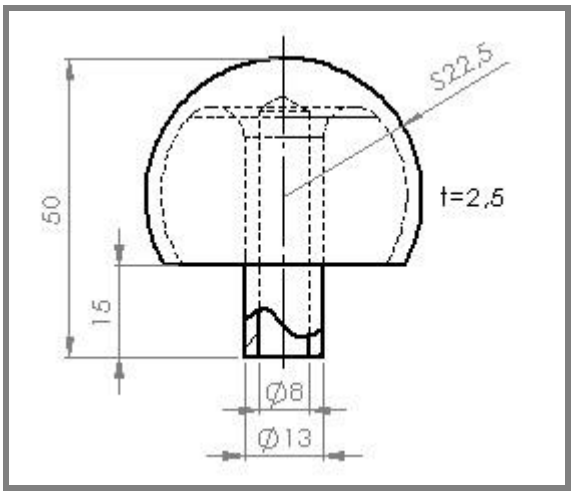
Využití je možné v mnoha oblastech průmyslu včetně sportovního zboží, outdoorových pomůcek, elektrických výrobků, hraček nebo v automobilových aplikacích. [16]

3.1.6 ULTEM 9085

Termoplast se samozhášecí schopností. Díky dobrému poměru pevnost/hmotnost a klasifikace FST (Flame, Smoke, Toxicity) je jeho využití příhodné v oblastech dopravního průmyslu (v letecké, námořní i pozemní dopravě). [12]

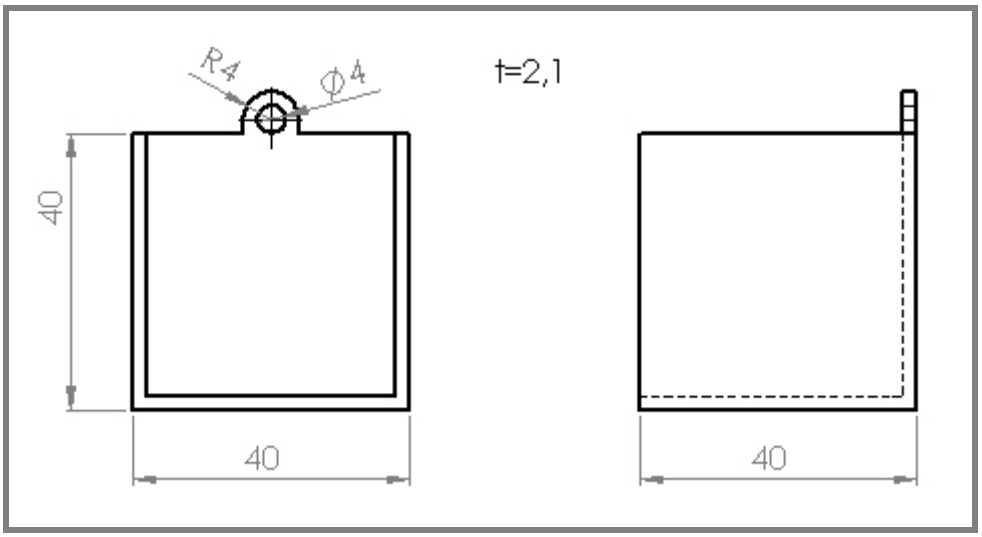
3.2 Návrh vzorků

Pro experimentální část byly navrženy 2 druhy vzorků. Prvním z nich je skořepina ve tvaru kulové plochy, z jejíž dutiny vystupuje „stopka“ (obr. 3-1). Geometrie koule umožňuje pozorovat různou „schodovitost“ na povrchu v závislosti na orientaci povrchu. „Stopka“ slouží k účelům upnutí. Z důvodu přesnějšího ustavení dat je na povrch vzorků vnesen osově nesymetrický prvek – vyvrtaná díra.



Obr. 3-1 Geometrie vzorku A

Druhý vzorek je složen ze čtyř mezi sebou navzájem kolmých stěn (obr. 3-2). K účelům upnutí vzorku zde poslouží „očko“ vyčnívající ze spodní stěny. Oba vzorky jsou navrženy jako tenkostěnná tělesa, jelikož se předpokládá, že tako geometrie je náchylnější k deformacím vlivem povrchových úprav.



Obr. 3-2 Geometrie vzorku B

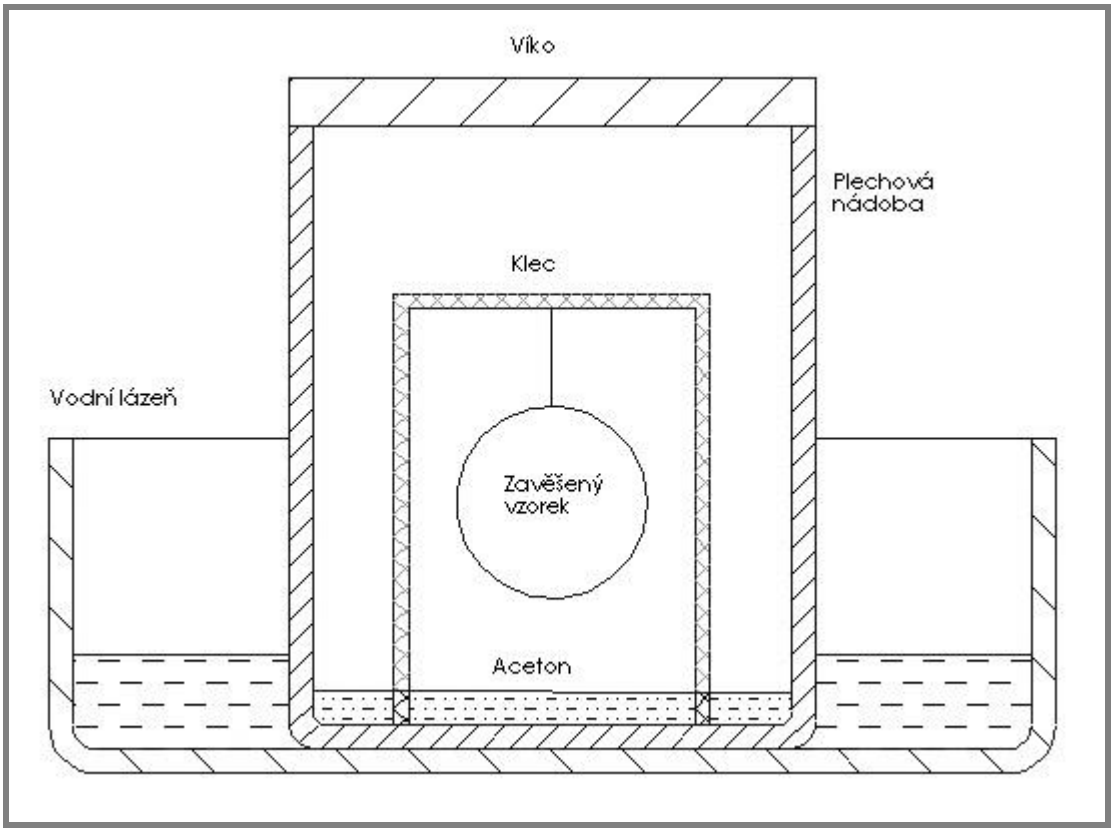
Vzorky jsou vyhotoveny v zařízení *Dimension SST 1200es*. Použitým materiálem je termoplast ABS plus. Tloušťka jednotlivých vrstev je nastavena na 0,254 mm. Vzorek A je vytištěn kulovou plochou orientovanou dolů, směrem k podložce a při jeho tisku jsou použity podpory z odlišného – vyplavitelného materiálu.

3.3 Metody

3.3.1 Leptaní acetonovými parami za tepla

Princip metody je založen na rozpustnosti materiálu ABS v acetonu. Vystaví-li se plastový model účinkům jeho par tohoto organického rozpouštědla, dojde k rozleptání materiálu na jeho povrchu.

Pro experimentální aplikaci této metody poslouží aparatura schematicky znázorněná na obr. 3-3:



Obr. 3-3 Schéma aparatury pro leptání za tepla

Model je zavěšen v kleci a vložen do nádoby s acetonem (20 ml) a zavíkován. Do lázně je přivedena vroucí voda (250 ml). Teplota vody je sledována teploměrem. Jakmile dosáhne požadované teploty (t=70 °C) vloží se do ní nádoba se vzorkem.

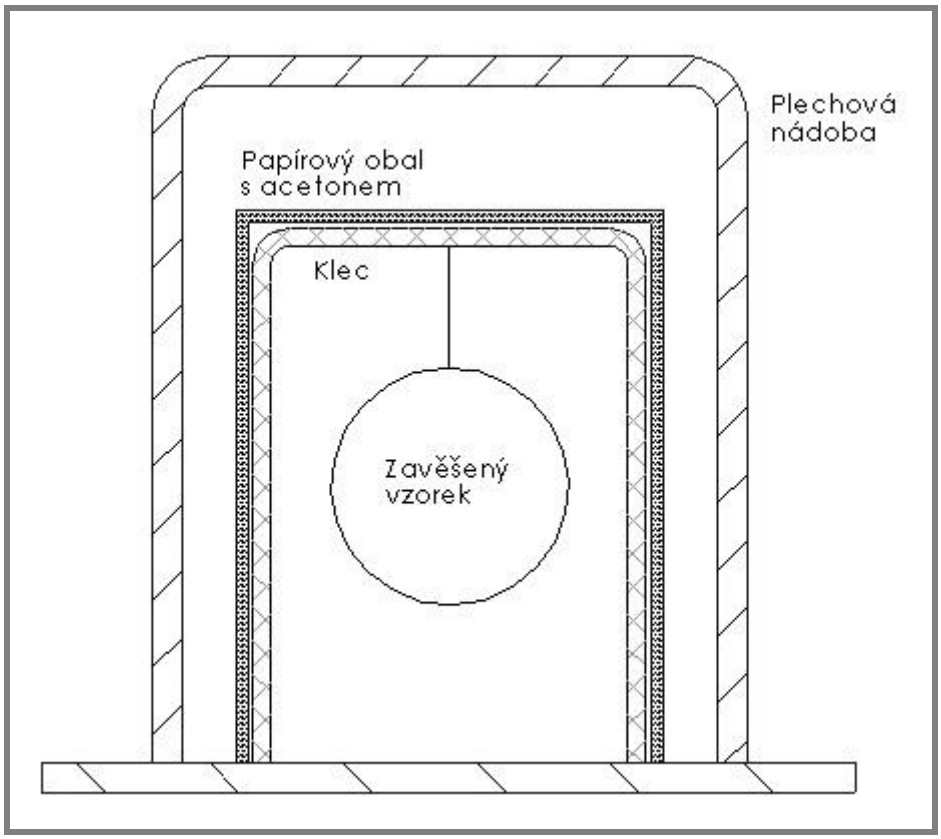
Vzorek je vystaven působení acetonových par po dobu v řádech sekund, následně je vyjmut a ponechán na vzduchu. Zbytky acetonu z povrchu vzorku se odpaří a materiál opět ztuhne.

.

3.3.2 Leptaní acetonovými parami za pokojové teploty

Princip metody je obdobný jako v předchozím případě. Při nižších teplotách (t=22°C) páry účinkují méně agresivně a vzorky se jejich působení vystavují značně delší dobu.

Schéma aparatury je znázorněné na obr. 3-4:



Obr. 3-4 Schéma aparatury pro leptání za pokojové teploty

Model je zavěšen v kleci, která se obalí papírem. Papírová vrstva se rovnoměrně namočí acetonem (20 ml, dávkování pomocí stříkačky) a aparatura se uzavře plechovou nádobou. Z papíru se aceton pomalu vypařuje a nádoba se naplní jeho parami. Vzorek je v aparatuře ponechán po dobu v řádech desítek minut. Následně je vyjmut a nechá se vysušit na vzduchu.

Obr. 3-5 Zavěšení vzorku A (vlevo) a vzorku B (vpravo)

3.4 Měření

Skenování je provedeno pomocí zařízení *ATOS III Triple Scan* (obr). Jelikož není možné nasnímat černý lesklý plastový povrch vzorků, je potřeba vzorky nejprve nastříkat křídovým sprejem. Ten vzorkům dodá matný do bíla zbarvený vzhled. Nevýhodou tohoto spreje je fakt, že nanesená vrstva matnícího prášku může dosahovat tloušťky setin milimetru.

Data z naskenovaných snímků jsou následně zpracována v softwaru *ATOS Professional* a vyexportována do formátu STL. Se soubory STL se dále pracuje v prostředí softwaru *GOM Inspect*, ve kterém se data upravují, vyhodnocují a získávají se z nich požadované parametry.

3.4.1 ATOS III Triple Scan

Jedná se o bezkontaktní skenovací systém od firmy *GOM*. Skládá se ze skenovací hlavy a stojanu. Hlava obsahuje veškeru optiku. Stojan umožňuje posuvy do dvou směru a natočení hlavy kolem tří os. Zařízení využívá technologií modrého světla, které umožňuje přesné měření nezávisle na okolních světelných podmínkách. Základní technické údaje jsou uvedeny v tab. Vzhledem k rozměrům zkušebních vzorků byl použit měrný objem MV170. [26]

Tab. 1 Základní parametry

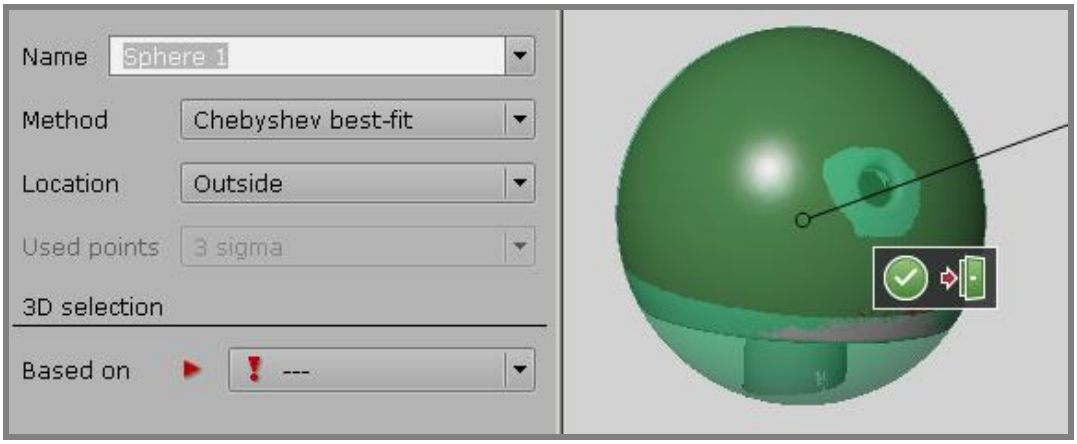
	ATOS III Triple Scan
Rozlišení	2 × 8 000 000
Plocha měření	38 × 29 -2000 ×1500 mm2
Hustota bodů	0,01 - 0,61 mm
Pracovní vzdálenost	490 - 2000 mm
Pracovní teploty	5 - 40 °C

Obr. 3-6 ATOS III Triple Scan [26]

3.5 Získávání parametrů

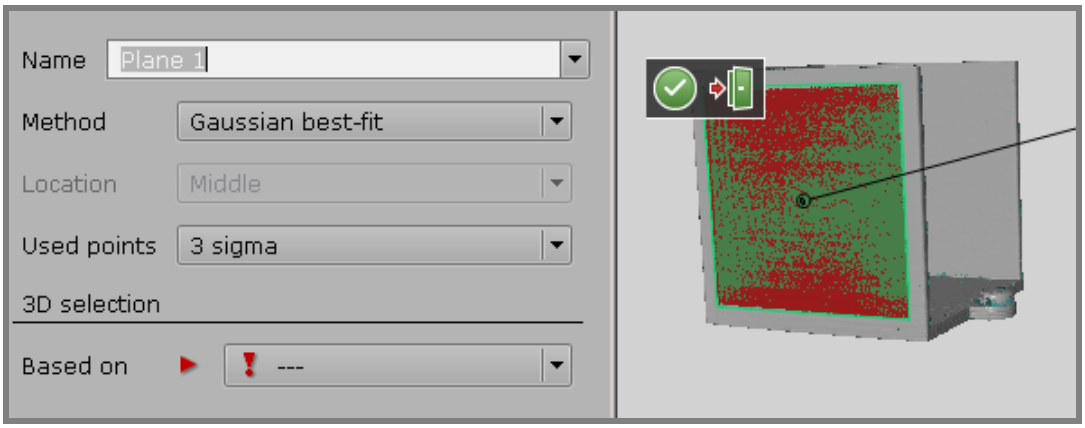
U vzorku A jsou sledovány odchylky v závislosti na orientaci povrchu a změnu geometrie. Pomocí získaných dat jsou porovnány neupravené, upravené a CAD model mezi sebou. V prostředí *GOM Inspect*, k tomuto účelu slouží *Surface Comparison.*

Pozorování změn v geometrii je provedeno pomocí sférických ploch, kterýma je proložen povrch naskenovaných vzorků. K tomuto účelu je použita funkce *Fitting Sphere*. Na obr.3-6 znázorněno nastavení a výběr ploch.

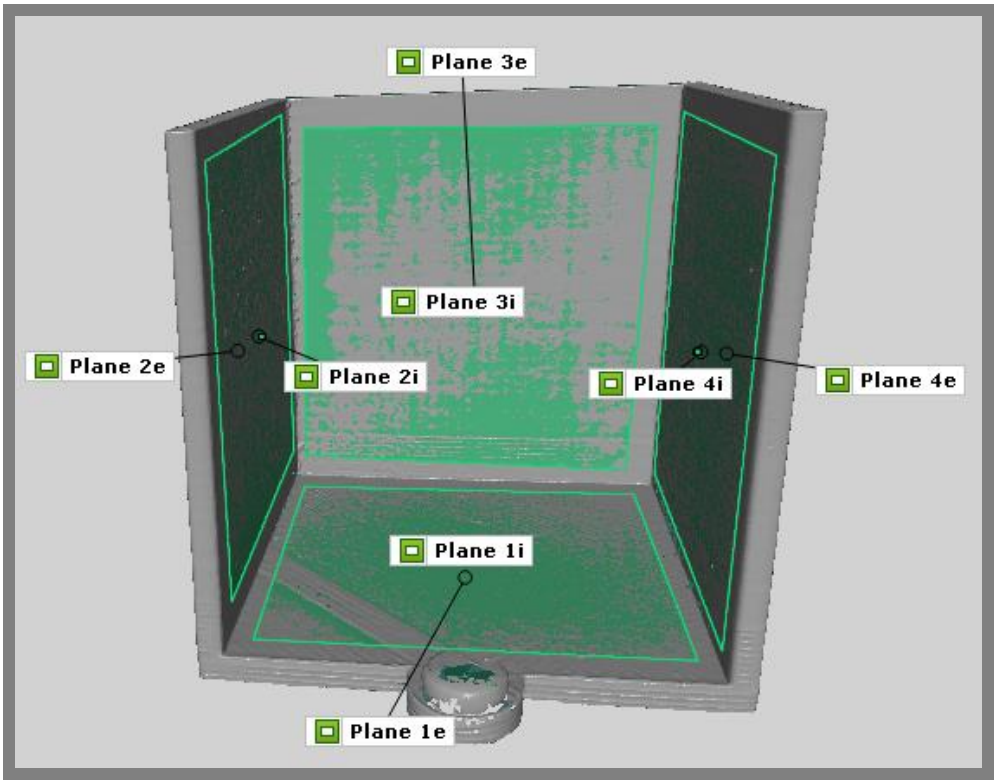


Obr. 3-7 Nastavení a prokládání plochy koulí

Pro získání požadovaných údajů z dat vzorku B, je potřeba proložit všemi stěnami modelů roviny pomocí funkce *Fitting Plane...* Pro lepší přehlednost jsou roviny pojmenovány v tomto formátu: Plane 1e (1 – číslo stěny, e – vnější stěny, i – vnitřní stěny, obr. 4-6).



Obr. 8 Nastavení a prokládání plochy rovinou



Obr. 3-9 Značení vytvořených rovin

.

Pomocí proložených rovin je dále zjišťována:

1) Rovinnost – nejmenší vzdálenost dvou rovnoběžných rovin, mezi které leží všechny body plochy.
2) Kolmost a rovnoběžnost – měření úhlů stran pomocí rovin vnitřních ploch.

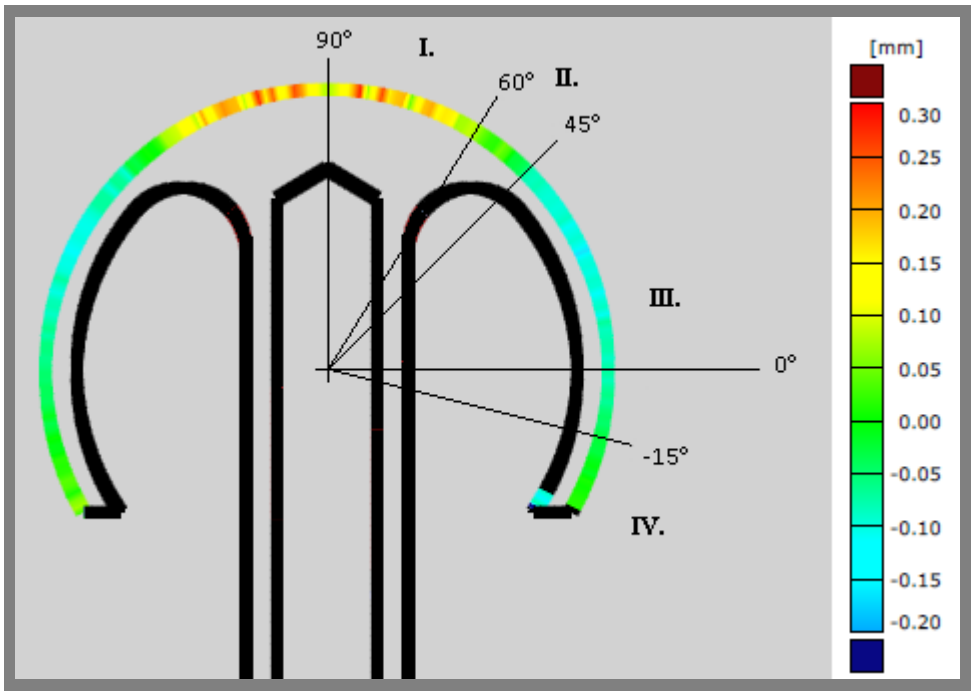
4 VÝSLEDKY

Výsledky jednotlivých metod jsou zachyceny a fotografie přiloženy v příloze 1.

4.1 Vzorek A

4.1.1 Odchylky

K ustavení modelů byl použit automatický pre-alignment. Mapy odchylek jsou vykresleny v příloze 2. Po srovnání vytištěného vzorku s CAD modelem, lze model rozdělit do několika oblastí podle odchylek.



Obr. 4-1 Mapa odchylek – pohled v řezu

Oblast I. – (90° až 60°). Oblast s největším rozsahem odchylek. Při těchto úhlech je schodovitost povrchu nejzjevnější. Odchylky se pochybují od 0,05 mm (vnitřní hrany schodků) do 0,28 mm (vnější hrany schodků).

Oblast II. – (60° až 45°). Spolu s oblasti IV jsou to místa s nejnižšími odchylkami. Hodnoty se pohybují od -0,04 mm do 0,7 mm.

Oblast III. – (45° až -15°). Oblast s výskytem záporných odchylek. Hodnoty -0,15 až -0,05.

Oblast IV. – (od -15°). Podobně jako u oblasti II. se hodnoty odchylek pohybují od -0,04 mm do 0,07 mm.

4.1.2 Průměr vzorků

Tab. 2 Průměry – leptání za tepla

	Čas leptání [s]	Průměr koule [mm]
Vzorek$_r$ A1	-	44,84
Vzorek$_u$ A1	40	44,91
Rozdíl		0,07
Relat. rozdíl		0,16%
Vzorek$_r$ A2	-	44,83
Vzorek$_u$ A2	90	44,97
Rozdíl		0,14
Relat. rozdíl		0,31%

Tab. 3 Průměry – leptání za tepla

	Čas leptání [min]	Průměr koule [mm]
Vzorek$_r$ A3	-	45,39
Vzorek$_u$ A3	15	45,38
Rozdíl		-0,01
Relat. rozdíl		-0,02%
Vzorek$_r$ A4	-	45,24
Vzorek$_u$ A4	30	45,23
Rozdíl		-0,01
Relat. rozdíl		-0,02%

Vzorek B

4.1.3 Rovinnost:

V následujících tabulkách jsou vypsány hodnoty rovinnosti před a po úpravě vzorků (tab. 3 a tab. 4)

Tab. 4 Porovnání rovinnosti – leptání za tepla

	Doba leptání [s]	[1]1e [mm]	1i [mm]	2e [mm]	2i [mm]	3e [mm]	3i [mm]	4e [mm]	4i [mm]
Vzorek$_r$ B1	-	0,16	0,18	0,11	0,11	0,07	0,15	0,09	0,11
Vzorek$_u$ B1	40	0,16	0,15	0,07	0,07	0,08	0,09	0,05	0,11
Rozdíl		0	-0,03	-0,04	-0,04	0,01	-0,06	-0,04	0
Nový stav		100,0%	83,3%	63,6%	63,6%	114,3%	60,0%	55,6%	100,0%
Vzorek$_r$ B2	-	0,13	0,07	0,06	0,06	0,08	0,09	0,06	0,11
Vzorek$_u$ B2	90	0,14	0,07	0,05	0,05	0,09	0,12	0,12	0,13
Rozdíl		0,01	0	-0,01	-0,01	0,01	0,03	0,06	0,02
Nový stav		107,7%	100,0%	83,3%	83,3%	112,5%	133,3%	200,0%	118,2%

[1] číslo stěny + e=vnější plochy, i= vnitřní plochy (značení stěn viz obr 3-7)
Vzorek $_{r/u}$ – r= referenční vzorek, u= povrchově upravený vzorek
Nový stav – konečný stav vůči původnímu v %

Tab. 5 Porovnání rovinnosti – leptání za studena

	Doba leptání [min]	1e [mm]	1i [mm]	2e [mm]	2i [mm]	3e [mm]	3i [mm]	4e [mm]	4i [mm]
$Vzorek_r$ B3	-	0,13	0,09	0,08	0,1	0,1	0,12	0,12	0,13
$Vzorek_u$ B3	15	0,17	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,04
Rozdíl		0,04	0,01	0,01	-0,02	-0,03	-0,05	-0,06	-0,09
Nový stav		130,8%	111,1%	112,5%	80,0%	70,0%	58,3%	50,0%	30,8%
$Vzorek_r$ B4	-	0,18	0,17	0,09	0,16	0,9	0,14	0,07	0,16
$Vzorek_u$ B4	30	0,18	0,16	0,08	0,12	0,9	0,17	0,15	0,11
Rozdíl		0	-0,01	-0,01	-0,04	0	0,03	0,08	-0,05
Nový stav		100,0%	94,1%	88,9%	75,0%	100,0%	121,4%	214,3%	68,8%

4.1.4 Kontrola úhlů:

Tab. 6 Změna úhlů vlivem leptaní za tepla

	Čas leptání [s]	*α12 [°]	α13 [°]	α14 [°]	α23 [°]	α34 [°]	α24 [°]
Vzorek B1	-	90,04	89,97	90	90,35	89,87	0,22
Vzorek B1	40	90,01	90	90,03	90,32	89,81	0,14
Rozdíl		-0,03	0,03	0,03	-0,03	-0,06	-0,08
Vzorek B2	-	89,91	90,03	90,05	90,62	89,79	0,41
Vzorek B2	90	89,86	90,05	90,08	90,23	89,75	0,06
Rozdíl		-0,05	0,02	0,03	-0,39	-0,04	-0,35

[2]**Tab. 7** Změna úhlů vlivem leptaní za studena

	Čas leptání [min]	α12 [°]	α13 [°]	α14 [°]	α23 [°]	α34 [°]	α24 [°]
Vzorek B3	-	89,98	90	90,03	90,32	89,76	0,08
Vzorek B3	15	89,84	90,01	90,03	90,29	89,74	0,14
Rozdíl		-0,14	0,01	0	-0,03	-0,02	0,06
Vzorek B4	-	89,96	90,04	90,08	90,35	89,73	0,09
Vzorek B4	30	89,98	90,04	90,05	90,28	89,83	0,11
Rozdíl		0,02	0	-0,03	-0,07	0,10	0,02

* α12 – úhel mezi vnitřními plochami stěn 1 a 2 (značení stěn viz obr 3-7)

5 DISKUZE

Ze získaných údajů lze říci, že použité metody mají malý či zanedbatelný vliv na geometrii vzorků. Největší změny průměru nastaly u metod s teplými parami. Po 90 sekundách došlo ke změně o 0,31% a po 40 sekundách o 0,16%. U metod se studenými parami je změna v řádech setin procenta.

Změny úhlu mezi stěnami se pohybuje v setinách stupňů. Ve výjimečných případech byly zjištěny změny 0,39° a 0,14°. Jelikož se jedná o plastové díly, nemusí být tyto změny způsobeny pouze aplikací povrchových úprav, ale třeba deformací nešetrným zacházením, teplotou nebo jinými vlivy.

U rovinnosti nelze říci, zda má tendenci se zlepšovat či zhoršovat vlivem použitých povrchových úprav. Výsledná rovinnost se pohybuje od 30,8% až po 214,3% původní hodnoty.

Z otestovaných metod mělo leptání za studena po dobu 15 minut na povrchu nejmenší efekt. Upravený vzorek se od původního příliš nelišil. Schodovitost i vzduchové mezery byly zachovány. Během tak krátké doby se při nízkých teplotách nejspíše nestačí vytvořit potřebné množství par. Na stopce vzorku A lze však zpozorovat, že acetonové výpary začínají působit od vrchních částí.

Výsledek leptání za studena po dobu 40 minut se nejvíce přiblížil CAD modelu. Povrch je lesklý a rovnoměrně vyhlazený. Schodovitost není patrná. Zajímavosti je, že vzorky upravené touto metodou jako jediné měly výrazně vyhlazené i vnitřní plochy. Může za to fakt, že jsou tyto plochy orientovány vzhůru, směrem k blízkému zdroji acetonových par.

Při úpravě povrchu parami za tepla se ukázalo, že doba působení 40 sekund je nedostatečná. Naleptány byly pouze níže položené plochy vzorků. Nejvýše položené oblasti povrchu byly ovlivněny minimálně nebo vůbec. Naleptaná oblast se značně odlišuje od neovlivněné oblasti zvýšeným leskem. Schodovitá struktura zůstala zachována.

Působením teplých par po dobu 90 sekund došlo k nejvýraznějším změnám. Vzorek má lesklý povrch, na pohled bez známek vrstvené struktury. Schodovitost je zcela vyhlazena. Stopy po aditivním způsobu výroby jsou odhalitelné až při detailním zkoumání. U vzorku typu A už ale docházelo ke stékání materiálu, ten se pak hromadil na nejnižším bodě. U vzorku B se na nejníže napolohovanou stěnu po zaschnutí vytvořila vrásčitá struktura.

Chyby a odchylky mohou být způsobený nepřesnosti skenovacího zařízení a především nízké míry zkušenosti jeho obsluhy. Další nepřesnosti měření mohou být způsobeny nerovnoměrným nanášením křídového prášku na skenované objekty.

6 ZÁVĚR

Cíl práce byl splněn. Různé metody využití acetonových par k povrchovým úpravám ABS dílů byly otestovány. Jednotlivé metody byly prozkoumány a výsledky zaznamenány. Pro použité metody nebyl prokázán významný vliv na celkové rozměry a geometrii. Výsledky jsou vztaženy pouze k testovaným vzorkům. Pro obecnější pojetí problematiky nebyl použit dostatečně velký statistický soubor.

Byly objeveny výhody a nevýhody obou metod. Za tepla jsou páry velmi agresivní a působí velmi rychle. Je nutný dozor nad pracovní aparaturou nejen z důvodu bezpečnosti, ale i vyšší citlivosti konečného výsledku na dobu leptání. Značnou výhodou je časová úspornost. Optimální doba leptání se pravděpodobně pohybuje mezi 40 až 90 sekund.

Výhodou leptání acetonovými parami za studena je jednoduchost konstrukce i obsluhy. Oproti metodě s teplými parami působí šetrněji a rovnoměrněji. Doba leptání je podstatně delší – i patnáctiminutové působení se projevilo jako nedostatečné. Optimální čas je odhadován kolem 30 minut a více.

Na pozorovaných vzorcích se v oblastech větší schodovitosti vyskytují převážně kladné odchylky vůči CAD modelům. Řešením tohoto problému může být použití mechanického opracování (omílání, tryskání) před užití úprav leptáním.

Během experimentu došlo u jednoho z dílů k prasknutí „očka“ při utáhnutí šroubu relativně malou silou. Stojí za zvážení další výzkum vlivů použitých povrchových úprav na vnitřní strukturu a mechanické vlastnosti materiálu.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] GIBSON, Ian, David W. ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies*. Boston, MA: Springer US, 2010. ISBN 1441911197.

[2] BOSCHETTO, Alberto a Luana BOTTINI. Roughness prediction in coupled operations of fused deposition modeling and barrel finishing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, vol. 219, s. 181-192 [cit. 2015-04-04].. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.12.021. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013602009536

[3] PÍŠKA, Miroslav et al. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

[4] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění 9. díl. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. Praha: Vogel Publishing, 2008, č. 11 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html

[5] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění 10. díl. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. Praha: Vogel Publishing, 2008, č. 12 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html

[6] Fortus Finishing Touch Smoothing Station. In: *Stratasys* [online]. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://www.stratasys.com/~/media/Main/Secure/System_Spec_Sheets-SS/Fortus-Product-Specs/Fortus-SS-FinishingTouchSmoothingStation-01-13-web.pdf

[7] MÁDL, Jan et al. *Technologie obrábění: 3. díl*. Praha: ČVUT, 2000, 79 s. ISBN 80-010-2091-6.

[8] Mass Finishing for FDM Parts. *Stratasys* [online]. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://www.stratasys.com/solutions-applications/finishing-processes/mass-finishing

[9] PANDEY, Pulak M, N VENKATA REDDY a Sanjay G DHANDE. Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*[online]. 2003, vol. 132, 1-3, s. 323-331 [cit. 2015-04-04]. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00953-6. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602009536

[10] CHEN, Yonghua a Jianan LU. RP part surface quality versus build orientation: when the layers are getting thinner. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, vol. 67, 1-4, s. 377-385 [cit. 2015-

04-04]. DOI: 10.1007/s00170-012-4491-7. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4491-7

[11] ABS. *3D Printing Service i.materialise* [online]. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://i.materialise.com/materials/abs

[12] FDM Thermoplastics. *Stratasys* [online]. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://www.stratasys.com/materials/fdm

[13] DRUMRIGHT, Ray E. Polylactic Acid Technology. *Advanced Materials* [online]. 2000, č. 12 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://onlinelibrary.wiley.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/doi/10.1002/1521-4095(200012)12:23%3C1841::AID-ADMA1841%3E3.0.CO;2-E/epdf

[14] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. Základy 3d tisku. In: *Prusa Research, s. r. o.* [online]. 2014 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/

[15] FDM Nylon 12. *3D tisk a 3D tiskárny Stratasys* [online]. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z:http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy/fdm-nylon-12

[16] MATALOVÁ, Helena. Nový materiál ASA pro 3D tisk v osmi různých barvách. *MM Průmyslové Spectrum* [online]. 2015, č. 3 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/novy-material-asa-pro-3d-tisk-v-osmi-ruznych-barvach.html

[17] *DTD Handbook* [online].2011 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://www.afgrow.net/applications/dtdhandbook/sections/page7_4_1_3.aspx

[18] *Metal Technology Co. Ltd.* [online]. 2008 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://www.kinzoku.co.jp/english/eng/images/img32b.jpg

[19] 3D tisk-metody. *14220* [online]. 2013 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/

[20] FDM. *Studiodagiacomo* [online]. 2014 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://www.studiodagiacomo.it/wordpress/wp-content/uploads/2014/11/FDM.png

[21] Centrifugal Barrel Finishing Machines & Debur Tools - Mass Finishing Incorporated. *MFI* [online]. 2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://www.massfin.com/products-services/machines/centrifugal-barrel-finishing

[22] *Gyra Machines - Gravco LLC* [online]. 2014 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://gravcollc.com/wp-content/uploads/2014/09/C-4545-Gyra-Finish-Machine.jpg

[23] Variety of Ceramic, Plastic Media Available for Mass Finishing. *Products Finishing* [online]. 2011 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://www.pfonline.com/products/variety-of-ceramic-plastic-media-available-for-mass-finishing

[24] Giving 3D printed parts a shiny smooth finish. *Hackaday* [online]. 2013 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: http://hackaday.com/2013/02/26/giving-3d-printed-parts-a-shiny-smooth-finish/

[25] *3D Printing Service i.materialise* [online]. 2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://i.materialise.com/materials/abs/design-guide

[26] *Optical Measuring Techniques: GOM* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: http://www.gom.com/index.html]

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkatka	Význam
3D	Trojrozměrný
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AM	Additive manufacturing
FDM	Fused deposition modeling
LOM	Laminated object manufacturing
PC	Polykarbonát
PLA	Polylactic acid
RP	Rapid prototyping
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Tessellation Language
UV	Ultrafialový

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Schéma stereolitografie [17] 13
Obr. 1-2 Testovací součást vyrobená pomocí SLS [18] 14
Obr. 1-3 Princip metody LOM [19] 15
Obr. 1-4 Princip metody FDM [20] 16
Obr. 1-5 Finishing Touch Smoothing Station [6] 17
Obr. 1-6 Povrch před (vlevo) a po (vpravo) úpravě ve „Finishing Station“ [6] .. 17
Obr. 1-7 Odstředivé omílací zařízení a jeho princip [21, 22] 18
Obr. 1-8 Různé druhy pracovního média [23] 19
Obr. 2-1 Modely s tloušťkou vrsty 0,1 mm (vlevo) a 0,35 (vpravo) [24] 20
Obr. 2-2 Vliv orientace modelu na povrch [25] 20
Obr. 3-1 Geometrie vzorku A 23
Obr. 3-2 Geometrie vzorku B 24
Obr. 3-3 Schéma aparatury pro leptání za tepla 25
Obr. 3-4 Schéma aparatury pro leptání za pokojové teploty 26
Obr. 3-5 Zavěšení vzorku A (vlevo) a vzorku B (vpravo) 26
Obr. 3-6 ATOS III Triple Scan [26] 27
Obr. 3-7 Nastavení a prokládání plochy koulí 28
Obr. 18 Nastavení a prokládání plochy rovinou 28
Obr. 3-9 Značení vytvořených rovin 29
Obr. 4-1 Mapa odchylek – pohled v řezu 30

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní parametry 27
Tab. 2 Průměry – leptání za tepla..... 31
Tab. 3 Průměry – leptání za tepla..... 31
Tab. 4 Porovnání rovinnosti – leptání za tepla..... 31
Tab. 5 Porovnání rovinnosti – leptání za studena 32
Tab. 6 Změna úhlů vlivem leptaní za tepla 32
Tab. 7 Změna úhlů vlivem leptaní za studena..... 32

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Fotodokumentace
Příloha 2: Mapy odchylek