

Rapid prototyping

Martin Vaculík

Bakalářská práce
2011

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin VACULÍK**
Osobní číslo: **T080143**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Rapid prototyping**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerži na dané téma.
 2. Připravte vhodné modely pro výrobu pomocí rapid prototyping
 3. Provedte provnání vlastností daných modelů a jejich přípravy
 4. Vyhodnoňte zjištěné údaje
-

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle zadání vedoucího práce BP

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Michal Staněk, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

14. února 2011

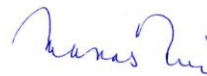
Termín odevzdání bakalářské práce:

3. června 2011

Ve Zlíně dne 12. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Vaoulik Martin.....

Obor: TZ.....

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 27.5.2011

Vaoulik

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

²⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

(3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

³⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jim dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce bylo analyzovat a porovnat dvě výrobní zařízení, která používají různou metodu výroby prototypů Rapid Prototyping. Práce byla zaměřena na porovnání času potřebného pro výrobu modelů, mechanické vlastnosti, finanční zhodnocení a vzhled. Dle normy byly vyrobeny zkušební modely, které sloužily k analýze pro mechanické zkoušky.

Klíčová slova: Rapid Prototyping, PolyJet, FDM, prototyp, mechanické zkoušky.

ABSTRACT

The object of this bachelor's work was to compare and analyze two production equipments, which are using different methods of prototyping production, known as Rapid Prototyping. The work was focused on comparing times required for models production, mechanical properties, economical aspekt and looks. The models were produced according to used Standards, and were used in mechanical tests.

Key words: Rapid Prototyping, PolyJet, FDM, prototyp, mechanical tests.

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D., za odborné vedení, rady a čas, které mi po dobu této práce věnoval a také za vedení a podporu v účasti na studentské odborné vědecké činnosti.

„ Člověk není poražen, je-li sražen k zemi.

Poražený bude, jen když na té zemi zůstane“

(Zig Ziglar)

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 VÝROBA PROTOTYPU	12
2 RAPID PROTOTYPING	13
2.1 MOŽNOSTI POUŽITÍ RAPID PROTOTYPING	13
2.1.1 Oblasti použití Rapid Prototyping.....	13
2.1.2 Ukázky vyrobených prototypů z Rapid Prototyping	14
2.1.3 Směr vývoje a použití Rapid Prototyping do budoucna.....	17
2.2 VÝHODY A NEVÝHODY RAPID PROTOTYPING	17
2.3 PROCES VÝROBY RAPID PROTOTYPING	17
2.4 METODY VÝROBY RAPID PROTOTYPING PRO POLYMERNÍ MATERIÁLY	18
2.4.1 Stereo Lithography (SLA) - vytvrzování vrstev tekutého polymeru.....	18
2.4.2 Selective Laser Sintering (SLS) – selektivní spékání práškového materiálu.....	19
2.4.3 Laminated Object Manufacturing (LOM) – vrstvená výroba.....	20
2.4.4 Fused Deposition Modeling (FDM) – nanášení roztaveného polymeru z vlákna	21
2.4.5 Multi Jet Modeling (MJM) – vícenásobné nanášení.....	22
2.4.6 PolyJet	23
2.4.7 Genesis 3D Printer – vytlačování polyesterové směsi	24
2.4.8 Ballistic Particle Manufacturing (BPM) – nástřík kapek polymeru.....	24
2.4.9 Model Maker 3D Plotting – nástřík kapek polymeru z více tiskových hlav	24
2.5 METODY VÝROBY RAPID PROTOTYPING PRO NEPOLYMERNÍ MATERIÁLY	25
2.5.1 Multiphase Jet Solidification (MJS) – nanášení pomocí trysky.....	25
2.5.2 Direct Shell Production Casting (DSPC) – selektivní spojování pojivem.....	25
2.5.3 ProMetal 3D Printing – slinování kovového prášku	25
2.5.4 Direct Laser Forming (DLF) – nanášení kovového prášku.....	26
3 VÝROBA PROTOTYPŮ KONVENČNÍMI METODAMI OBRÁBĚNÍM	27
3.1 SOUSTRUŽENÍ.....	27
3.2 FRÉZOVÁNÍ.....	27
3.3 BROUŠENÍ.....	28
4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	29
4.1 MECHANICKÉ ZKOUŠKY TAHEM	30
II PRAKTICKÁ ČÁST	31
5 POROVNÁNÍ VÝROBY U DVOU TYPŮ 3D TISKÁREN	32

5.1	3D TISKÁRNA OBJET EDEN 250	32
5.2	3D TISKÁRNA DIMENSION SST 768.....	34
6	POROVNÁNÍ 3D TISKÁREN NA MODELECH	36
6.1	ČAS PRO VYHOTOVENÍ MODELU - ŠKRABKY	36
6.2	HMOTNOST MODELU - ŠKRABKY.....	39
6.3	VÝPOČET CENY MATERIÁLU	40
6.4	ČAS PRO VYHOTOVENÍ MODELU - DOMEČKU.....	41
6.5	HMOTNOST MODELU - DOMEČKU.....	45
6.6	POROVNÁNÍ NÁKLADŮ NA VÝROBU DOMEČKU	46
7	MECHANICKÉ ZKOUŠKY.....	48
7.1	ZKOUŠKA TAHEM	48
7.2	RÁZOVÁ ZKOUŠKA	52
8	POROVNÁNÍ VZHLEDU MODELŮ.....	55
	ZÁVĚR	57
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	58
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ	61
	SEZNAM TABULEK.....	63

ÚVOD

Snaha urychlit, ulehčit či zdokonalit práci nás provází od minulosti až do současnosti. Nyní ve 21. století máme možnost techniky, která pracuje v krocích, jaké lidské oko není schopno běžným způsobem vidět. Pokud chceme vyrobit výrobek, jehož zhotovení není v lidských schopnostech, jsme nuceni použít technická zařízení. Jedním z nich jsou stroje, které pracují na setiny až tisíce milimetru. Do této kategorie můžeme zařadit zařízení, která používají rychlý způsob výroby prototypů, označovaná názvem Rapid Prototyping.

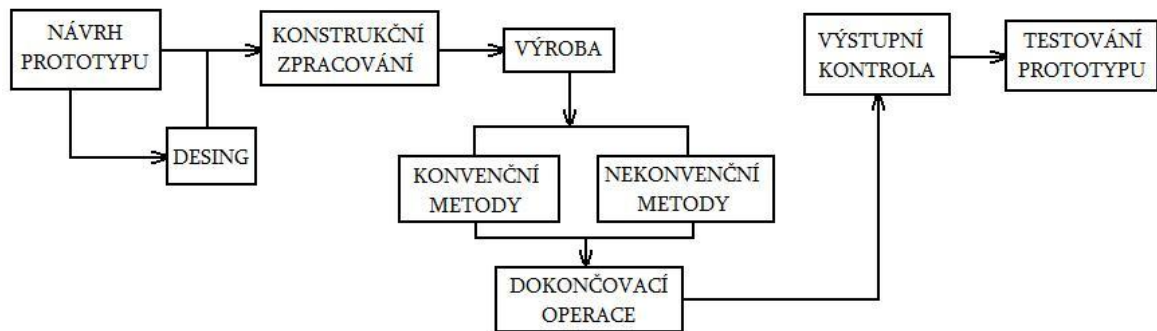
Použitím Rapid Prototyping lze provést vymodelování 3D objektu z dat programu do fyzické podoby. Tento způsob výroby lze uplatnit ve velmi širokém rozsahu, a to ve strojírenství, lékařství, automobilovém průmyslu, letectví, designu a v mnoha dalších oblastech.

Tato práce je zaměřena na použití Rapid Prototyping za pomoci dvou různých typů zařízení. V teoretické části jsou popsány charakteristiky zařízení, v praktické části je zaměřena pozornost na časovou náročnost výroby, cenové porovnání nákladů výroby, mechanické zkoušky a vzhled modelů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VÝROBA PROTOTYPU

Prototyp (z řeckého prótos, první, a typos, ražba) je vzorový, pokusný první výrobek nebo vůbec příkladný exemplář nějaké třídy věcí. Navrženou novinku, nový typ nějakého průmyslového výrobku, je třeba vyzkoušet dřív, než se rozhodne o její výrobě nebo než se výroba rozběhne. Proto se nejprve staví např. zmenšené modely a následně se přikročí k výrobě funkčního prototypu. Ta je pochopitelně náročná, a protože pro ni ještě nejsou k dispozici výrobní nástroje hromadné výroby, musí se vyrábět více méně „ručně“ v několika málo kusech. [1]



Obr. 1 Schéma postupu výroby prototypu

2 RAPID PROTOTYPING

Rapid Prototyping je automatická výstavba fyzikálních objektů pomocí tzv. aditivní výrobní technologie. První technologie pro Rapid Prototyping se objevily po roce 1980 a byly použity k výrobě modelů a prototypových dílů. Dnes jsou tyto technologie používány pro mnohem širší spektrum aplikací. [2]

Rapid Prototyping je technologie, která se využívá v mnoha oborech při vývoji nových výrobků. Cílem je především ověření jejich tvarů a funkčnosti. Základní výhodou Rapid Prototypingu je jeho úzká svázanost s 3D systémy pro průmyslové navrhování. Vlastní data lze v současné době prakticky získat z většiny dostupných 3D systémů pouhým uložením modelu do formátu STL. [3]

2.1 Možnosti použití Rapid Prototyping

V současné době se technologie Rapid Prototyping používá:

- pro vytvoření prostorových modelů složitých objektů s cílem získání názorné představy o celkovém provedení a tvaru;
- ke kontrole designu navrhovaného objektu;
- při vývoji výrobku, tzn., že navrhovanou součást je možno v kterékoli fázi vývoje snadno vyrobit a následně korigovat další vývojové fáze;
- k ověření a optimalizaci výrobku: mimo korekce tvaru je možno např. snáze vybrat z konkurenčních návrhů ten nejlepší;
- v oblastech výroby forem a nástrojů;
- k simulacím v oblastech namáhání, proudění, koncepčního konstruování, designu a archivace 3D objektů. [4]

2.1.1 Oblasti použití Rapid Prototyping

- automobilový průmysl (obr. 1, 2);
- strojírenství (obr. 3, 4);
- lékařství (obr. 5, 6);

- architektura (obr. 7, 8);
- návrhářství, design (9);
- geografický informační systém (GIS) (obr. 10);
- vesmírný program (obr. 11);
- různé (obr. 12).

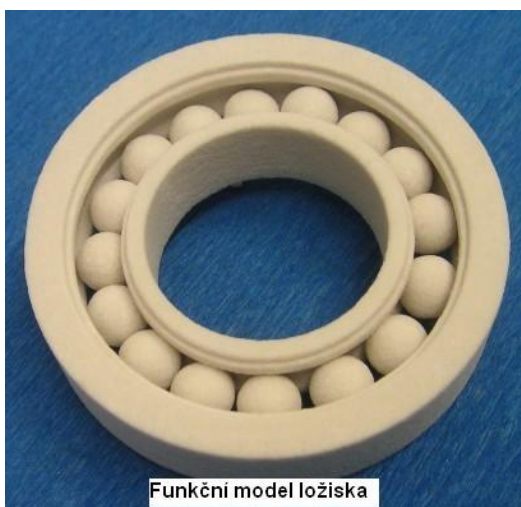
2.1.2 Ukázky vyrobených prototypů z Rapid Prototyping



Obr. 2 Sestava motoru [4]



Obr. 3 Výfukové svody [5]



Obr. 4 Ložisko kuličkové [5]



Obr. 5 Ozubená kola [5]



Obr. 6 Lebka a spodní čelist [6]



Obr. 7 Horní čelist [6]



Obr. 8 Model vícepatrového domu [5]



Obr. 9 Santiniho kostel – Zelená Hora [7]



Obr. 10 Model postavy [8]



Obr. 11 Geografický informační systém [9]



Obr. 12 Terénní vesmírné vozidlo [10]



Obr. 13 Prostorové těleso [11]

2.1.3 Směr vývoje a použití Rapid Prototyping do budoucna

Výrobci stále vyvíjejí nové materiály a zdokonalují technologii výroby. 3D tisk už umí zpracovávat i kovy jako titan a kobalt, které se špatně zpracovávají klasickým obráběním. Výhodou 3D tisku je, že materiál neodebíráme, ale přidáváme. Je tedy možné, že v budoucnu při meziplanetárních letech nepovezou kosmonauti spoustu náhradních dílů, ale pouze "pytel" práškového titanu, plastu a 3D data dílů rakety a v případě potřeby si díl jednoduše „vytisknou". [12]

2.2 Výhody a nevýhody Rapid Prototyping

Hlavní výhody:

- rychlá výroba;
- výroba prototypu;
- nízké náklady na výrobu;
- malé rozměry zařízení;
- nenáročnost na pracovní prostředí.

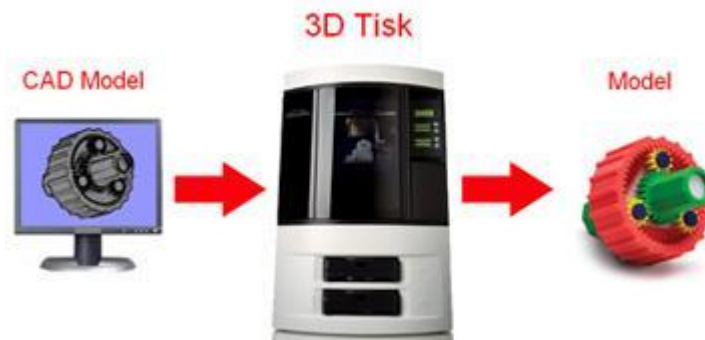
Hlavní nevýhody:

- pořizovací cena zařízení;
- nelze najednou vytvářet modely velkých rozměrů.

2.3 Proces výroby Rapid Prototyping

Celý proces práce 3D tisku je zcela automatický bez nutnosti obsluhy. Počítačový model uložený ve formátu STL, který je nejběžnějším pro tuto operaci, se jednoduše pošle na 3D tisk přímo z pracovní stanice designéra, konstruktéra, projektanta nebo architekta. Při převodu dat pomocí tohoto formátu je objemový model nahrazen triviální prezentací povrchu původního modelu pomocí ploch. Výhodou tohoto řešení je prakticky nulová závislost na vlastní struktuře a topologii 3D modelu původní součásti. [13], [3]

Zařízení je určeno pro práci v běžných kancelářských podmínkách a nevyžaduje žádné další vybavení kanceláře. Proces modelování je jednokrokový – stavba modelu začne okamžitě po odeslání požadavku na tisk a ihned po dokončení stavby je model připraven k dalšímu použití. Vynikající vlastnosti modelovacího materiálu dovolují využití modelů přímo jako funkční prototypy. [13]



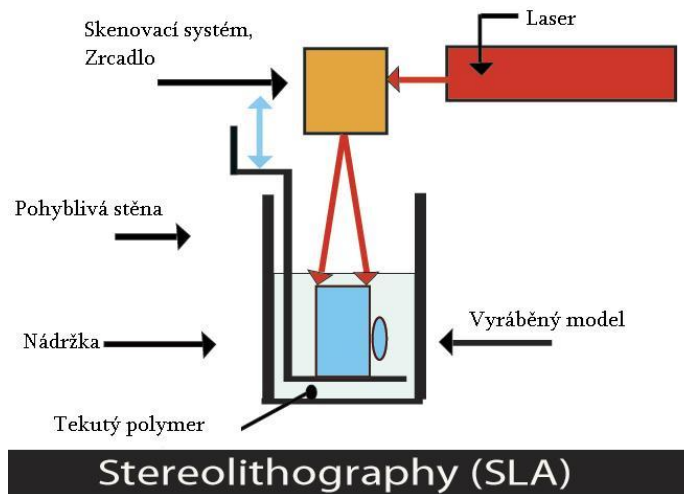
Obr. 14 Postup výroby Rapid Prototyping [13]

2.4 Metody výroby Rapid Prototyping pro polymerní materiály

2.4.1 Stereo Lithography (SLA) - vytvrzování vrstev tekutého polymeru

Stereo Lithography (SLA) patří do kategorie Rapid Prototyping technologií, pomocí kterých se vytváří třídimenzionální model z tekutého polymeru citlivého na světlo. Účinkem ultrafialového záření dochází k vytvrzování jednotlivých vrstev tekutého polymeru. [3]

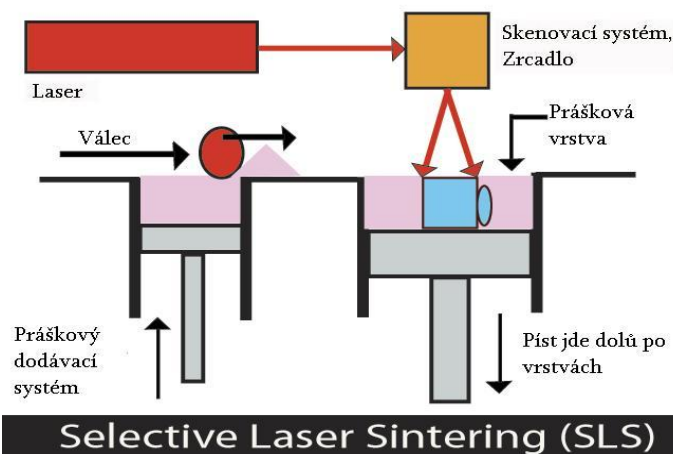
Jde o nejstarší metodu z technologií Rapid Prototyping, která byla vyvinuta společností 3D Systems, Inc., a roku 1987 uvedena na trh. Na základě dříve vytvořených informací o tvaru a rozměrech příčných řezů počítačového prostorového modelu jednotlivými rovinami (vrstvami) jsou vypočítávány řídicí údaje, které vedou paprsek laseru pomocí XY skenovací hlavy nad horní plochou nádoby s polymerem. Součást je vytvářena na nosné desce, která se na začátku procesu nachází přímo pod hladinou polymeru. Po vytvrzení (tj. po osvětlení) jedné vrstvy se nosná deska ponoří o tloušťku vrstvy hlouběji do lázně a začne se vytvářet další vrstva. Aby se vyrovnaly nepřesnosti vzniklé nanášením polymeru, je nutné před osvětlením každé vrstvy přejet hladinu tzv. stěračem. Vytvarováním tekutého polymeru po vrstvách a následným sejmutím z nosné desky vzniká trojrozměrné těleso (model). [4]



Obr. 15 Metoda výroby způsobem SLA

2.4.2 Selective Laser Sintering (SLS) – selektivní spékání práškového materiálu

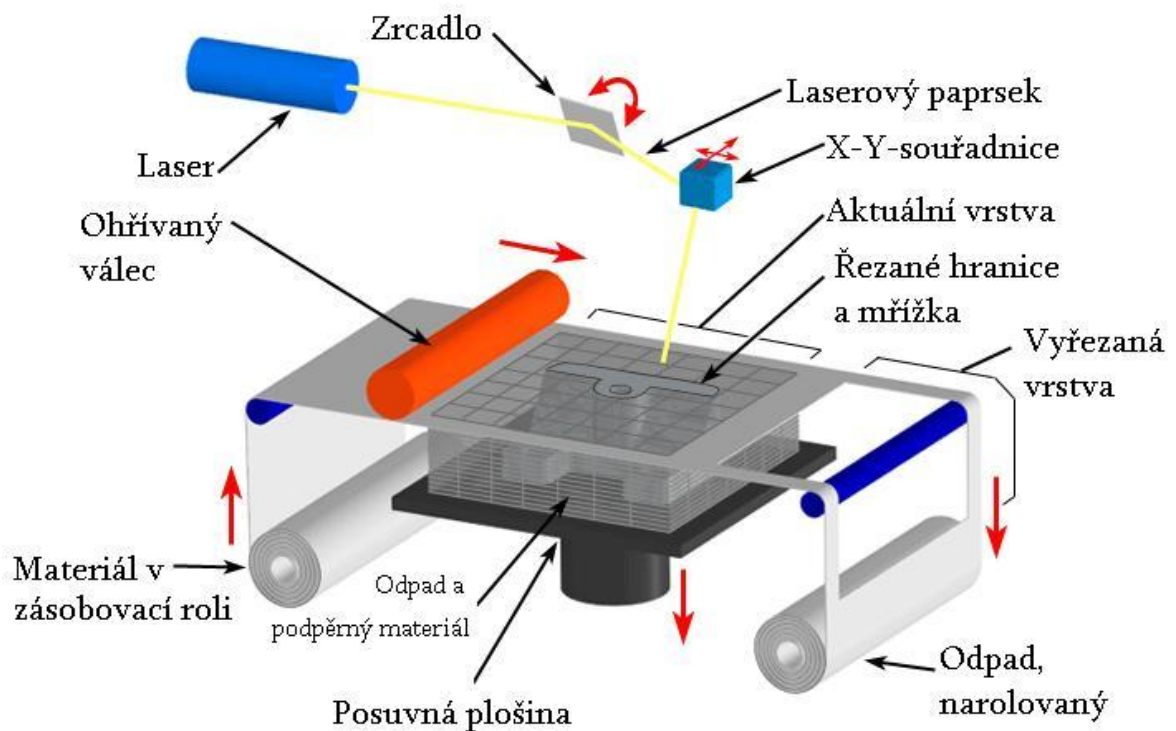
Metoda Selective Laser Sintering (SLS) – využívá spékání práškového materiálu pomocí laseru. Byla vyvinuta na texaské univerzitě v Austinu. Na rozdíl od stereolitografie jsou modely vyrobené metodou SLS velmi pevné. Podstatou SLS je, že paprskem CO_2 laseru je prášek spékán do požadovaného tvaru. Přídavný materiál je nanášen na nosnou desku v inertní atmosféře (dusík nebo argon) po vrstvách. Podle vypočtených souřadnic bodů rovin řezů je řízena XY skenovací hlava, která vede paprsek laseru nad povrchem prášku nasypaného ve vaně. V místě působení laseru se přídavný materiál buď speče, nebo roztaví a ztuhne. Okolní neosvícený materiál slouží jako nosná konstrukce. Výroba součásti probíhá po vrstvách. Po vytvoření jedné vrstvy se nosná deska sníží o hodnotu odpovídající hloubce vrstvy. Je možné vytvářet vrstvy tloušťky od 0,02 mm do několika desetin milimetru. [4]



Obr. 16 Metoda výroby způsobem SLS

2.4.3 Laminated Object Manufacturing (LOM) – vrstvená výroba

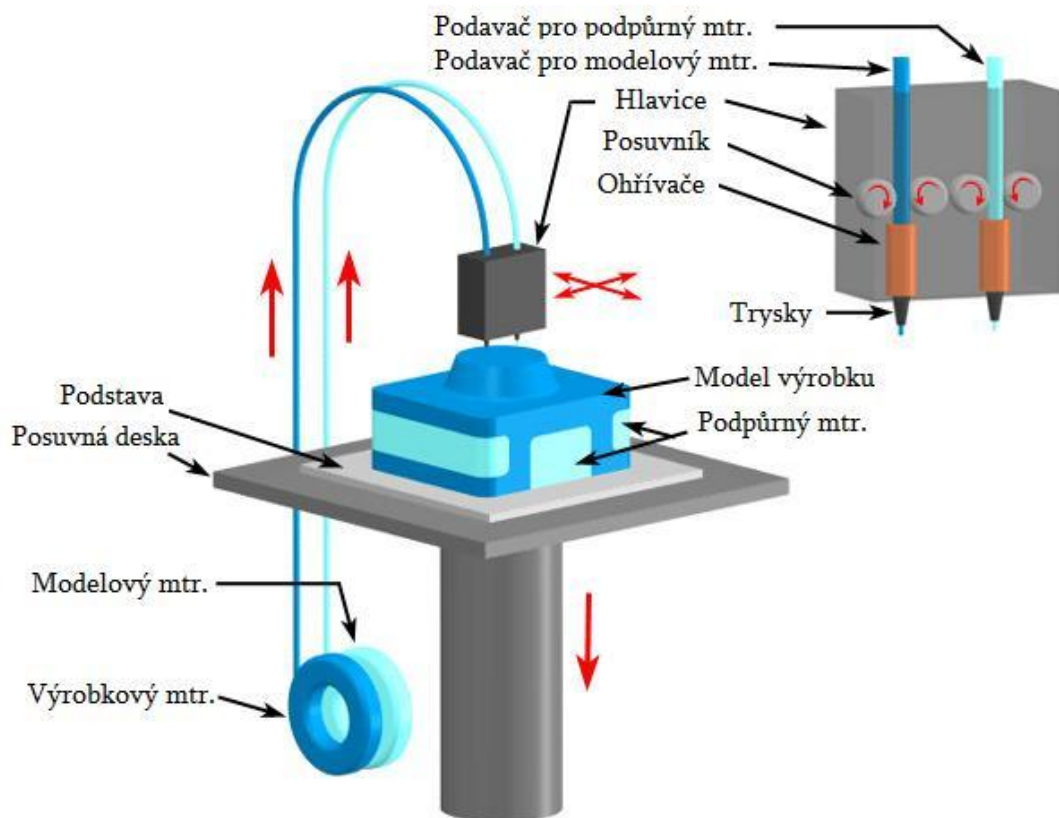
Metoda Laminated Object Manufacture – vrstvená výroba předmětu, je založena na vrstvení lepidivého materiálu a byla vyvinuta americkou firmou Helysis. Součást je vytvářena ze speciálních plastových fólií nebo z mnoha vrstev papíru napuštěných zpevňující hmotou. Jednotlivé vrstvy jsou oříznuty do správného tvaru CO₂ laserem. Součástka je vytvářena na svisle se pohybující nosné desce. Celý proces probíhá tak, že se na nanesenou a vyřezanou vrstvu natáhne papírová fólie opatřená vrstvou polyetylenu. Ta se poté přitlačí soustavou vyhřívaných válců, čímž dojde ke slepení obou vrstev. Paprskem laseru je vyřezán požadovaný obrys vytvářené vrstvy. Přebytečná odřezaná fólie je laserem rozdělena na čtverce a později odstraněna. Po vytvoření vrstvy se podložka sníží o tloušťku fólie a postup se opakuje až do vytvoření celé součásti. Vytvořené součásti mají podobné vlastnosti, jako kdyby byly vyrobené ze dřeva. K dosažení hladkého povrchu je nutné součást opracovat ručně. Metoda je vhodná na výrobu velkých součástí. Její nevýhodou je velké množství odpadu. [14]



Obr. 17 Metoda výroby způsobem LOM

2.4.4 Fused Deposition Modeling (FDM) – nanášení roztaveného polymeru z vlákna

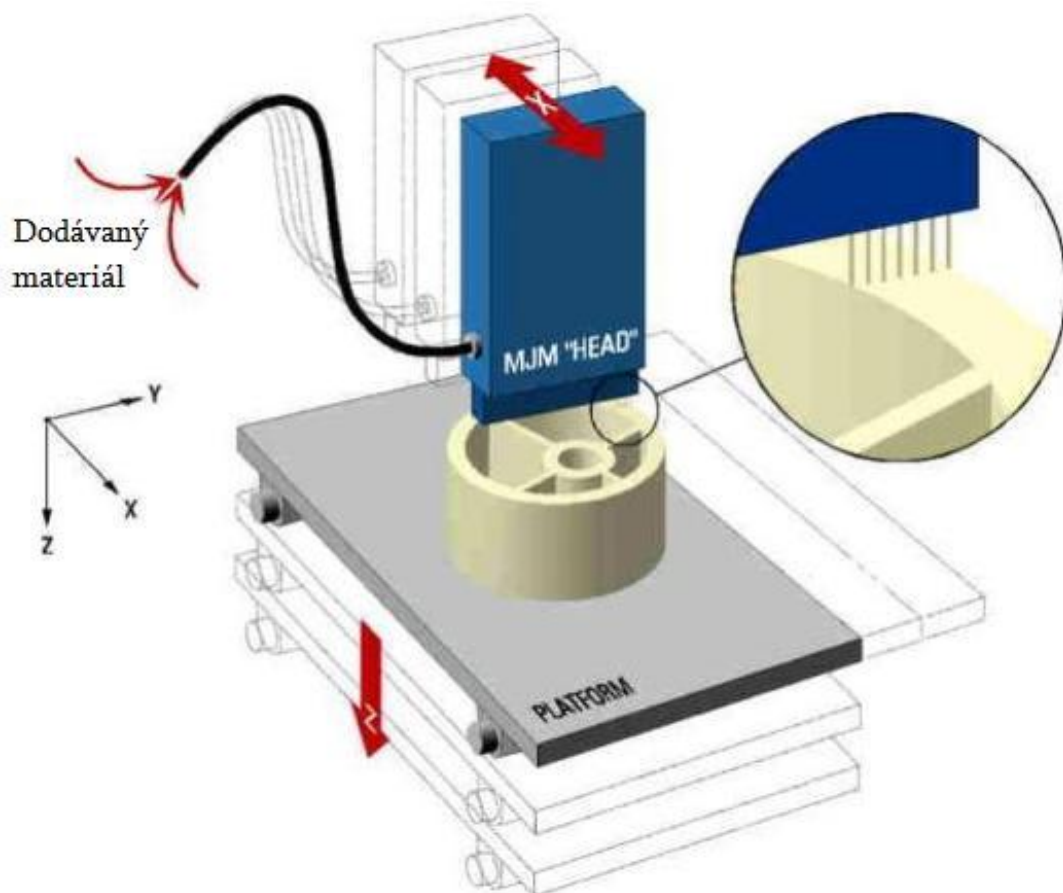
Metoda FDM – k výrobě modelu využívá nanášení vlákna z termoplastu a byla vynalezena v roce 1988 společností Stratasys, Inc. Tato technologie na rozdíl od ostatních nevyužívá laseru. Součást se vytváří postupným nanášením jednotlivých vrstev z různých netoxických termoplastů nebo vosků. Materiál ve tvaru tenkého vlákna vychází z vyhřívané trysky, která se pohybuje v rovině nad pracovním prostorem. V trysce je ohříván na teplotu o 1 °C vyšší, než je jeho teplota tavení. Při styku s povrchem vytvářené součástky se vlákna vzájemně spojují a vytvářejí tak požadovanou ultratenkou vrstvu, která ihned tuhne. Součást se opět vytváří na nosné desce, která se vždy po nanesení jedné vrstvy sníží o tloušťku další vrstvy. Na podepření přečnávajících částí je nutné vytvořit podpurnou konstrukci z lepenky nebo polystyrenu. [14]



Obr. 18 Metoda výroby způsobem FDM [21]

2.4.5 Multi Jet Modeling (MJM) – vícenásobné nanášení

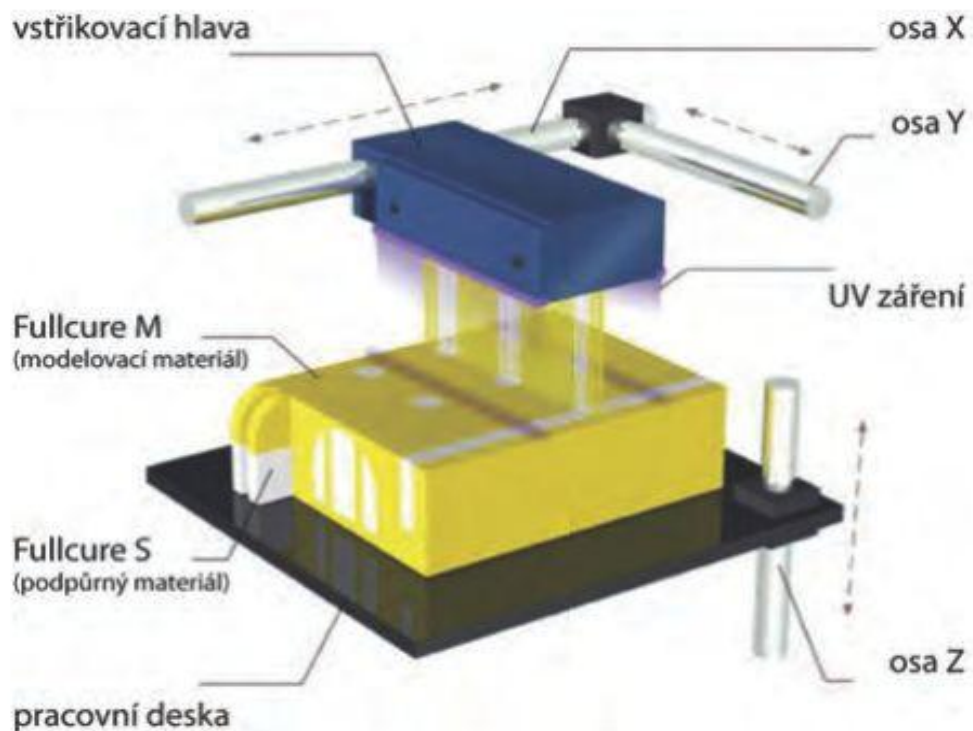
Vývoj MJM – Vícenásobné modelování, započalo v roce 1994. Jedná se o tisk vrstev pomocí termopolymeru. Princip technologie spočívá v nanášení jednotlivých vrstev termopolymeru postupně na sebe pomocí speciální tiskové pracovní hlavy, která má 96 trysek, uspořádaných rovnoběžně vedle sebe. Množství nanášeného materiálu je pro každou trysku samostatně řízeno programem. Součást se opět vytváří na zvláštní nosné desce podobně jako u stereolitografie. Pracovní hlava se pohybuje nad nosnou deskou ve směru osy. Je-li součást širší než pracovní hlava, posouvá se ve směru osy tak, aby se vytvořila celá součást. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Nanášený termoplastický materiál ztuhne při styku s už naneseným materiálem téměř okamžitě. [14]



Obr. 19 Metoda výroby způsobem MJM

2.4.6 PolyJet

Metodu výroby PolyJet používá firma OBJET. Fotopolymerový materiál je vytvrzovaný po tenkých vrstvách UV zářením. Tento proces je využíván na produktech typu Eden. Modely takto vytvořené, nejsou podrobovány dokončovacím vytvrzování. Vytvrzování probíhá současně s modelováním za pomoci UV záření. Modely jsou připraveny k použití okamžitě po dokončení procesu modelování. Různé dutiny jsou vyplněny snadno odstranitelným podpurným materiálem na bázi gelu. [20]



Obr. 20 Metoda PolyJet

2.4.7 Genesis 3D Printer – vytlačování polyesterové směsi

Genesis 3D Printer je další technologií firmy Stratasys, Inc. Její vývoj byl převzat od společnosti IBM v roce 1995. Jako materiál se používá polyesterová směs, která je vytlačována hlavou na příslušné místo. Nepoužívá se podpůrných struktur ani následného vytvrzování. Součást lze barvit, vrtat a jinak upravovat. [14]

2.4.8 Ballistic Particle Manufacturing (BPM) – nástřik kapek polymeru

Technologie BPM spočívá v nástřiku kapek termoplastu pomocí jedné pracovní hlavy. Vynalezl ji v roce 1987 Bill Masters, jenž v roce 1988 založil společnost Perception Systems, Inc., později přejmenovanou na BPM Technology, Inc., která se zabývá vývojem BPM systému. Technologie využívá principu inkoustových tiskáren. Je založena na tlakovém nanášení materiálu (termoplastu) ve formě kapek a jejich následném vytvrzení. Nanášení materiálu je docíleno tím, že jednotlivé malé kapky materiálu jsou vystřelovány z tlakové hlavy na pracovní plochu a tam bezprostředně po dopadu vytvrzeny. Cíleným nanášením dalších kapek na už nanesený materiál se vyrobí celá trojrozměrná součást. Technologie BPM pracuje pouze s jednou tiskovou hlavou, která má 5 stupňů volnosti. Tato metoda umožňuje vytvářet modely bez podpůrné konstrukce. [14]

2.4.9 Model Maker 3D Plotting – nástřik kapek polymeru z více tiskových hlav

Technologie Model Maker 3D Plotting pracuje na stejném principu jako technologie BPM. Rozdíl je v tom, že Model Maker 3D Plotting pracuje se dvěma tiskovými hlavami, přičemž první nanáší materiál a druhá ho tvaruje. [14]

2.5 Metody výroby Rapid Prototyping pro nepolymerní materiály

2.5.1 Multiphase Jet Solidification (MJS) – nanášení pomocí trysky

Princip technologie MJS spočívá v zahřátí materiálu, ze kterého má být součást vyrobena a v postupném nanášení vrstev materiálu tryskou. V zásobníku je materiál (většinou ve formě prášku, ať již čistého kovu, keramiky nebo směsi kovu, případně keramiky s vhodným pojivem) zahříván na teplotu, při které vytváří nízkoviskózní fázi. Pístovým systémem je vytlačován skrz ohřivanou trysku. Při styku s materiálem vyráběné součásti tuhne a vytváří tak požadovanou vrstvu. Celý pracovní cyklus je obdobný jako u technologie FDM. Technologie MJS umožňuje vyrábět součásti z ušlechtilých ocelí, titanu, siliciumkarbidu, kysličníku hliníku, apod. [14]

2.5.2 Direct Shell Production Casting (DSPC) – selektivní spojování pojivem

U technologie DSPC jde o výrobu součástí z keramického prášku. Princip je obdobný jako u technologie SLS. Výchozí materiál (keramický prášek) je však spojován tekutým pojivem. Technologie DSPC je založena na vytváření vrstev nanášením keramického prášku spojovaného tekutým pojivem a jeho následným slinováním paprskem laseru. Nanášení pojiva se provádí pomocí Ink-Jet-tryskové hlavy, jejíž pohyb je řízen počítačem. [14]

2.5.3 ProMetal 3D Printing – slinování kovového prášku

Jedná se o výrobu součástí slinováním práškových materiálů. Technologii ProMetal 3D Printing vyvinula americká společnost Extrude Hone. Je založena na selektivním vrstveném inkoustovém tisku trojrozměrných předmětů z ultrajemných kovových, keramických, fermezových nebo kompozitních prášků se speciálními pojivy. Technologie používá principu Ink-Jet počítačových tiskáren a tiskových hlav s vysokým rozlišením. Integrovanou součástí technologie je slinování výrobku a jeho infiltrace kovem pro dosažení vysoké pevnosti a téměř 100% hustoty. Při tepelném zpracování dochází k vyhoření pojiva a slinutí kovových prášků na porézní strukturu, která se zpevňuje infiltrací kovu. [14]

2.5.4 Direct Laser Forming (DLF) – nanášení kovového prášku

Technologie DLF umožňuje přímou výrobu kovových součástí z práškových materiálů. Vyvinula ji firma TRUMPF Laser und Systemtechnik. Podstata technologie spočívá ve výrobě součástí postupným nanášením kovového prášku, který je přiváděn do stopy paprsku laseru, kde se taví. Pohybem laseru v osách je součást vyráběna po jednotlivých vrstvách. [14]

3 VÝROBA PROTOTYPŮ KONVENČNÍMI METODAMI OBRÁBĚNÍM

Obráběcí proces se uskutečňuje různými metodami obrábění. K základním metodám patří soustružení, frézování, vrtání, vyhrubování, vystružování a zahlubování, vyvrtávání, hoblování a obrázení, protahování a protlačování. Uvedené metody jsou charakterizovány použitím nástrojů s definovanou geometrií břitu a představují v současné době nejvíce využívané aplikace při obrábění strojírenských součástí. [15] Nejvíce používané metody na zhotovení prototypů jsou uvedeny níže.

3.1 Soustružení

Soustružení je nejrozšířenější způsob obrábění a představuje 30 až 40 % celkové pracovní síly strojírenského obrábění. Soustružením lze obrábět vnější a vnitřní válcové i kuželové plochy a tvarové plochy. Na soustruzích lze vrtat, vystružovat, řezat závity, soustružit rovinné i kulovité plochy. Kromě toho lze na nich konat zvláštní práce jako vroubkování, válečkování, okružní frézování závitů apod. [16]

Podstata soustružení

Obrobek se otáčí, nástroj se pohybuje přímočaře. Hlavní pohyb je vždy rotační a koná jej obrobek. Pracovní pohyb nástroje ve směru osy obrobku - podélný posuv (stopa nože na obrobku je šroubovice), ve směru kolmém na osu obrobku - příčný posuv (stopa nože na obrobku je Archimédova spirála). Přisuv je pohyb nástroje, kterým se nastavuje hloubka záběru. [16]

3.2 Frézování

Frézování je obrábění, při kterém se materiál obrobku odebírá břity otáčejícího se nástroje. Posuv nejčastěji koná součást, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posunové pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky. [15]

3.3 Broušení

Broušení se používá zejména pro obrábění s vyššími požadavky na přesnost rozměrů, tvarů a jakost povrchu. Dále se broušení uplatňuje při obrábění materiálů, které není možné jinými obráběcími metodami obrobit, nebo je brousící metoda hospodárnější než jiné. S rozvojem výkonných brousících nástrojů a strojů se význam broušení rozšiřuje z původní oblasti dokončovacích operací také na produkční obrábění.

Brousící proces má základní charakteristiky podobné jako jiné obráběcí procesy a zvláště je blízký frézování. Při broušení však dochází ke kvantitativním a kvalitativním odlišnostem, které souvisí zejména s vlastnostmi brousícího kotouče a řeznými podmínkami. Broušení se od frézování odlišuje především různorodostí geometrického tvaru brousících zrn a jejich nepravidelným rozmístěním po ploše brousícího nástroje. Úhel čela zrn se mění a bývá vesměs záporný. Brousící proces se uskutečňuje při vysokých řezných rychlostech. [15]

4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

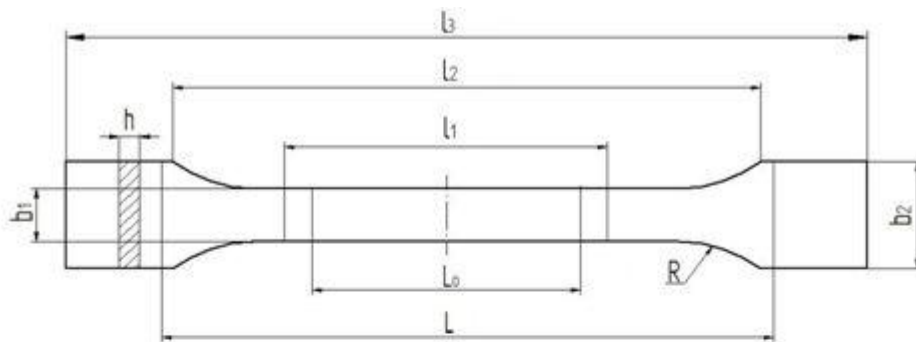
Pomocí mechanických zkoušek se zjišťují vlastnosti, které vyjadřují deformační chování materiálu a podmínky porušení vzorků za působení vnějších sil. Výsledky slouží jako významný podklad pro dimenzování součástí a pro technologii. Metodika zkoušek je většinou normalizována. [17]

Mechanické zkoušky poskytují nejdůležitější hodnoty pro použití materiálu v konstrukci technologických zařízení, která musí odolávat při zatížení vnějšími silami základním druhům namáhání. Jsou to převážně zkoušky destrukční, při nichž se zkoušený materiál namáhá až do porušení (přetržení, zlomení apod.). Proto se mohou provádět jen na zkušebních vzorcích (zkušebních tělesech), jejichž tvar je normalizován. Zhotovují se buď ze zkušebního surového materiálu (tyče, profily, plochy) nebo z nejvíce namáhaného místa dané součásti. Běžné zkoušení materiálů se provádí v laboratořích na speciálních zkušebních strojích, které v daných možnostech imitují některé druhy skutečných zatížení součásti v provozu. [17] Mechanické zkoušky lze rozdělit podle různých hledisek (způsob zatěžování, fyzikální podmínky, stav napjatosti). Nejčastěji je dělíme na zkoušky statické (pomalu narůstající síla, příp. síla stálé velikosti) a zkoušky dynamické (síla je v čase proměnná nebo působí rázem). [17]

Statické zkoušky určují chování (hlavně deformaci) materiálu při zatěžování zkušebního tělesa klidným zatížením a spojitou pomalou změnou tohoto zatížení. Síla vyvolává deformaci, která většinou vede až k porušení vzorku. Zkoušky statické imitují v praxi nejčastěji se objevující druhy namáhání tj. tah, tlak, ohyb, krut, střih. [17]

4.1 Mechanické zkoušky tahem

Zkouška tahem představuje nejužívanější statickou mechanickou zkoušku. Zkušební těleso je protahováno ve směru své hlavní podélné osy konstantní rychlostí zkoušení do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí v tahu (zatížení) nebo protažení (poměrné prodloužení) dosáhnou předem zvolené hodnoty. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení. Registrační zařízení stroje zaznamená průběh zkoušky do diagramu. Závislost mezi tahovou silou F a prodloužením ΔL většinou zaznamenává registrační zařízení zkušebního stroje. Tahová zkouška pro plasty je normalizována dle ČSN EN ISO 527-1 (640604). [17], [18]



Typ zkušebního tělesa	Rozměry v milimetrech	
	1 BA	1 BB
l_3 Celková délka	≥ 75	≥ 30
l_2 Rozpětí mezi širokými rovnoběžnými částmi	58 ± 2	23 ± 2
l_1 Délka zúžené rovnoběžné části	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$
L_0 Počáteční měřená délka	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
L Počáteční vzdálenost čelistí	$l_2 \text{ } ^{+2}_0$	$l_2 \text{ } ^{+1}_0$
R Poloměr	≥ 30	≥ 12
h Tloušťka	≥ 2	≥ 2
b_1 Šířka zúžené části	$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
b_2 Šířka konců	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
Poznámka - Zkušební tělesa typu 1BA a 1BB jsou tvarově úměrná typu 1B, s redukčním faktorem 1:2 a 1:5, s výjimkou tloušťky.		

Obr. 21 Tvar zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku [19]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 POROVNÁNÍ VÝROBY U DVOU TYPŮ 3D TISKÁREN

Pro práci byly použity dva typy zařízení, které vyrábí modely pomocí Rapid Prototyping. Prvním zařízením byla 3D tiskárna OBJET model EDEN 250, která používá metodu PolyJet. Materiál pro model spolu s pomocným materiálem se nanáší z tiskové hlavy, která má 96 trysek. Použitý materiál byl VeroWhite a FullCure®705 Support. Druhým zařízením pro porovnání byla 3D tiskárna Dimension model SST 768, která používá metodu FDM. Použitý materiál byl ABS a Support.

5.1 3D tiskárna OBJET EDEN 250

3D tiskárna OBJET EDEN 250 používá k výrobě proces PolyJet. Fotopolymerový materiál je vytvrzovaný po tenkých vrstvách UV zářením. Tento proces je využíván na produktech typu EDEN. Modely takto vytvořené, nejsou podrobovány dokončovacím vytvrzování. Vytvrzování probíhá současně s modelováním za pomoci UV záření. Modely jsou připraveny k použití okamžitě po dokončení procesu modelování. Různé dutiny jsou vyplněny snadno odstranitelným podpurným materiálem na bázi gelu. [20]

Tab. 1 Technické informace k 3D tiskárně OBJET EDEN 250

Rozměry tiskárny (d x š x v):	870 mm x 735 mm x 1200 mm
Hmotnost tiskárny:	280 Kg
Pracovní rozsah (X x Y x Z):	260 mm x 260 mm x 200 mm
Výrobní rozsah (X x Y x Z):	250 mm x 250 mm x 200 mm
Tloušťka vrstvy:	HQ (High Quality) - síla vrstvy 0,016 mm HS (High Speed) - síla vrstvy 0,032 mm
Rozlišení:	osa x – 600 dpi osa y – 300 dpi osa z – 1600 dpi
Použitý materiál:	Fullcure® 720 - pevný, průhledný, VeroBlue - pevný, barva modrá, VeroWhite - pevný, barva bílá, VeroBlack - pevný, barva černá Vero Gray - pevný, barva šedá, FullCure®705 Support - pomocný materiál
Formát pro zpracování dat:	STL a SLC

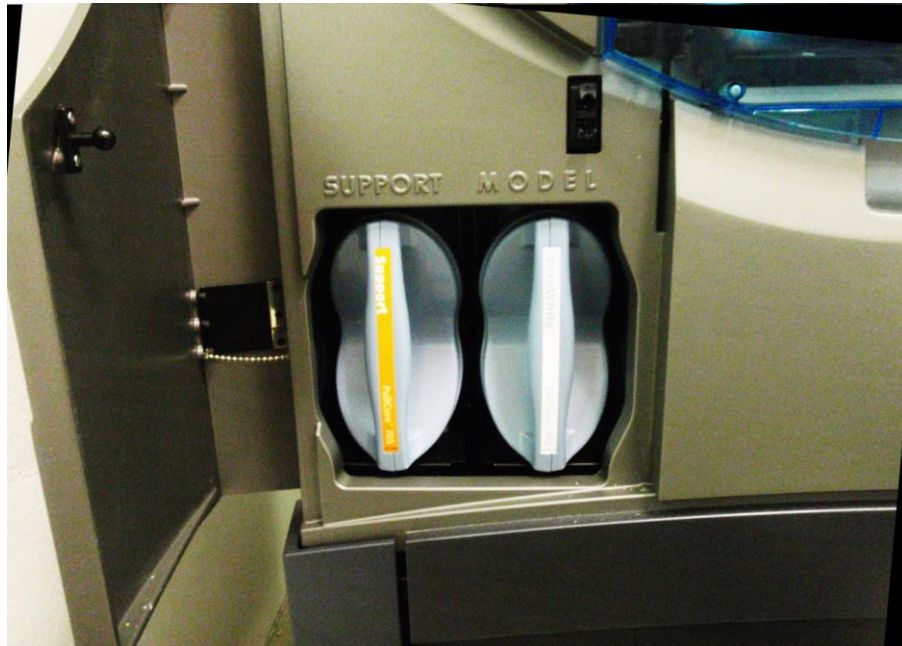


Obr. 22 3D tiskárna OBJET EDEN 250

3D tiskárna OBJET EDEN 250 je díky svým rozměrům nenáročná na pracovní prostor. K časté manipulaci však určená není, jelikož není vybavena pojezdovými kolečky. Tiskárna má velmi dobrý přístup k výměně, případně doplnění materiálu pro 3D tisk. Materiál je od výrobce dodáván v boxech - kazetách. Jedna kazeta obsahuje dva kilogramy materiálu.



Obr. 23 Materiál pro 3D tiskárnu OBJET EDEN 250



Obr. 24 Uložení kazet s materiálem - OBJET

5.2 3D tiskárna DIMENSION SST 768

3D tiskárna Dimension SST 768 pracuje metodou FDM (Fused Deposition Modeling), což je metoda tavení a postupného nanášení materiálu po velmi tenkých vrstvách. Fyzický model vzniká postupně od základny a roste po tenkých vrstvách nahoru. Tato metoda umožňuje vystavět i vnitřní složité struktury. Vytištění fyzického modelu trvá 3D tiskárně až několik hodin, to závisí na složitosti a velikosti zadaného modelu. Pro stavbu modelu se používá netoxický ABS plastový materiál, který je dnes běžně používaným materiálem. [7]

Tab. 2 Technické informace k 3D tiskárně OBJET EDEN 250

Rozměry tiskárny (d x š x v): <i>(bez podstavce)</i>	686 mm x 914 mm x 1041 mm
Hmotnost tiskárny:	136 Kg
Pracovní rozsah (X x Y x Z):	203 mm x 203 mm x 350 mm
Výrobní rozsah (X x Y x Z):	200 mm x 200 mm x 250 mm
Tloušťka vrstvy:	- síla vrstvy 0,254 mm - síla vrstvy 0,33 mm
Rozlišení:	osa x – 0,1 mm osa y – 0,1 mm osa z – 0,5 mm
Použitý materiál:	ABS
Formát pro zpracování dat:	STL



Obr. 25 3D tiskárna Dimension SST 768

3D tiskárna Dimension SST 768 je díky svým rozměrům také nenáročná na pracovní prostor. Ke snadnější manipulaci je 3D tiskárna vybavena pojezdovými kolečky. Díky tomu je snadno přemístitelná. Tiskárna má opět velmi dobrý přístup k výměně, případně doplnění materiálu pro 3D tisk. Materiál je od výrobce dodáván v boxech - kazetách.



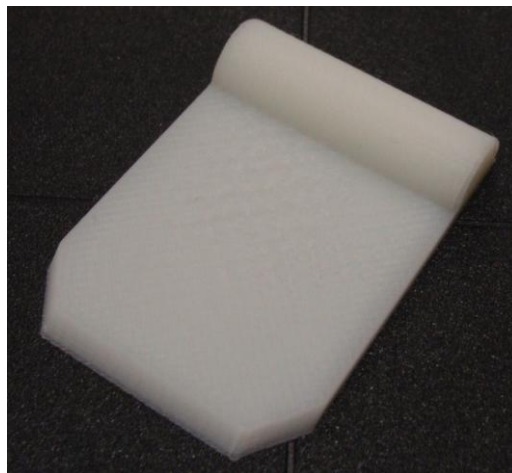
Obr. 26 Uložení kazet s materiálem - Dimension

6 POROVNÁNÍ 3D TISKÁREN NA MODELECH

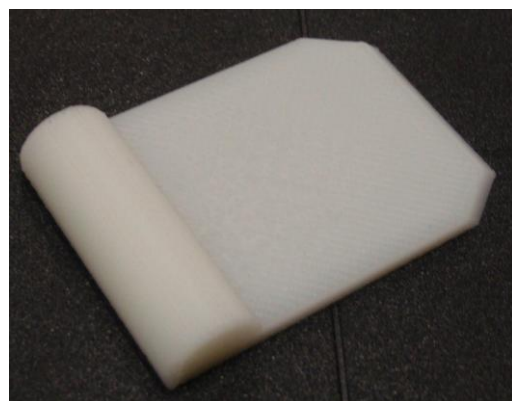
Praktická část byla zaměřena na porovnání několika kritérií u daných zařízení. V této části práce bylo provedeno porovnání času výroby, hmotnosti a ceny pro výrobu modelů. K porovnání byly na obou typech 3D tiskáren vytvořeny dva různé tvarové modely těles. Dosažené výsledky měření byly porovnány a vyhodnoceny.

6.1 Čas pro vyhotovení modelu - škrabky

Pro porovnání byl vytvořen zkušební model, který byl postupně vymodelován na obou typech 3D tiskáren a následně byly porovnány časy modelování. Na každé tiskárně byl vymodelován jeden zkušební model výrobku. Modelovat více kusů najednou nebylo potřeba, jelikož údaje potřebné pro porovnání tisku více kusů jsou vygenerovány i programem, který je součástí 3D tiskáren.



Obr. 27 Model škrabky



Obr. 28 Model škrabky

Tab. 3 Vyhodnocení času pro vytvoření modelu škrabky

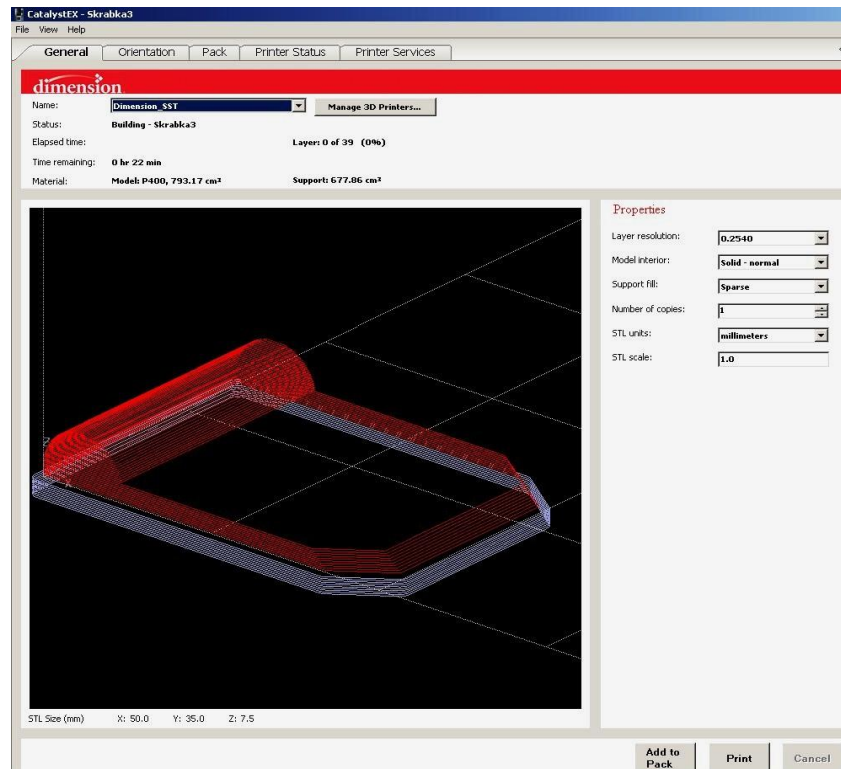
Typ procesu	OBJET EDEN 250 [s]	DIMENSION SST 768 [s]	Rozdíl času [s]
<i>Zahřívání stroje:</i>	0:02:05	0:25:07	0:23:02
<i>Doba po zahřátí, než stroj začne tisknout:</i>	0:01:24	0:02:40	0:01:16
<i>Tisk definovaný programem:</i>	0:35:00	0:21:26	0:13:34
<i>Skutečný tisk (od položení první vrstvy):</i>	0:35:12	0:22:00	0:13:12
<i>Doba potřebná k vyjmutí dílce a vyčištění stroje</i>	0:02:04	0:01:05	0:00:59
<i>Čas potřebný k očištění modelu (bez použití pracího stroje):</i>	0:00:54	0:00:15	0:00:39
<i>Celkový potřebný čas:</i>	0:41:39	0:51:07	0:09:28

Z naměřených hodnot, které jsou uvedeny v tabulce č. 3, je patrné, že velkou nevýhodou 3D tiskárny Dimension je zahřívací doba, která se pohybuje v rozmezí dvaceti pěti minut. Doba, kterou generoval software u obou strojů na tisk, je přibližně stejná jako ve skutečnosti. Program stroje však nezahrnuje čas, než stroj začne tisk. U 3D tiskárny Dimension přesahuje tato prodleva dvě a půl minuty. 3D tiskárna OBJET na rozdíl od 3D tiskárny Dimension má delší pracovní čas na vyjmutí dílce ze stroje a očištění pracovní plochy. Výhodou u 3D tiskárny OBJET je krátká časová příprava před započítím tisku. U obou tiskáren není po odeslání dat již potřeba zasahovat do průběhu modelování. V tabulce č. 4 je doba, která je potřebná při modelování více kusů.

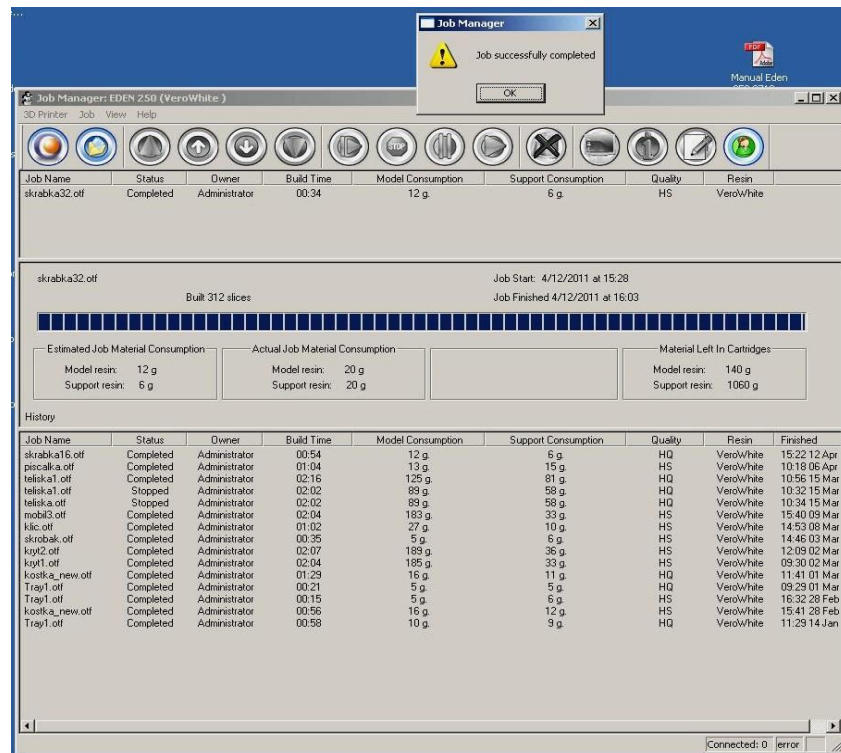
Tab. 4 Doba potřebná pro vytvoření více modelů škrabek

Počet kusů	OBJET EDEN 250 [s]	DIMENSION SST 768 [s]	Časový rozdíl [s]
<i>1 model</i>	0:35:00	0:22:00	0:13:00
<i>3 modely</i>	0:42:00	1:06:00	0:24:00
<i>5 modelů</i>	1:24:00	1:51:00	0:27:00

Z uvedených hodnot lze usoudit, že tisk více kusů modelů na 3D tiskárně OBJET je výrazně rychlejší, než na 3D tiskárně Dimension. Není zde však zahrnut čas, s kterým je nutno počítat na čištění a vyjmutí dílců.



Obr. 29 Výpočet škrabky u 3D tiskárny Dimension SST 768



Obr. 30 Průběh procesu u 3D tiskárny OBJET EDEN 250

6.2 Hmotnost modelu - škrabky

Tiskárny mají materiál uložen v kazetách, kde je polymer uschován před nežádoucími vlivy, jako je světlo, vlhkost a další. Kapacita jedné kazety jsou dva kilogramy. Tiskárna má v sobě dvě kazety. Jedna kazeta je s materiálem pro model a druhá s tzv. podpurným materiálem (Support). Program tiskárny po načtení modelu vygeneruje spotřebu materiálu, která bude potřeba a informuje o stavu zásob v tiskárně. Je-li i v jedné z kazet nedostatek materiálu pro stavbu modelu, je nutné kazetu vyměnit. Z vyhotoveného modelu bylo provedeno porovnání skutečné hmotnosti modelu a hmotnosti udávané programem.

Výsledky:

Tab. 5 Vyhodnocení hmotnosti modelu škrabky z 3D tiskárny Dimension SST 768

DIMENSION SST 768	Hmotnost z programu		Hmotnost modelu		Rozdíl	
	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [g]	Support [g]
1 model	6,61	1,98	5,56	1,8	-1,05	-0,18
3 modely	18,03	5,95			15,9 %	9 %
5 modelů	33,07	9,92				

Tab. 6 Vyhodnocení hmotnosti modelu škrabky z 3D tiskárny OBJET EDEN 250

OBJET EDEN 250	Hmotnost z programu		Hmotnost modelu		Rozdíl	
	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [g]	Support [g]
1 model	12,00	6,00	6,83	1,96	-5,17	-4,04
3 modely	35,00	25,00			43 %	67 %
5 modelů	58,00	41,00				

Z výsledků je patrné, že hmotnost materiálu udávaná programem je vždy vyšší, než jakou má ve skutečnosti hotový model. Většinou jsou to přebytky, které stroj zpracovává v průběhu tisku, tyto přebytky jsou brány jako odpad.

Ve spotřebě materiálu má podstatně lepší výsledky 3D tiskárna Dimension SST 768, kde spotřeba materiálu navíc, nepřevýšila hranici 20 %. 3D tiskárna OBJET má však vyšší spotřebu materiálu a to se negativně projeví i na ceně modelu.

6.3 Výpočet ceny materiálu

Tab. 7 Výpočet ceny materiálu pro tiskárnu OBJET EDEN 250

3D tiskárna OBJET EDEN 250				
Materiál	Množství	Cena (€)	Cena x 24,5 (Kč)	Min. odběr u mtr. 2 kg
VeroWhite	1 kg	236	5782	11564
Support	1 kg	106	2597	5194
			Celkem:	16758 Kč

1 g Mtr. = 11564 Kč / 2000 g = 5,8 Kč

1 g Supp. = 5194 Kč / 2000 g = 2,6 Kč

Celkem: ± **8,4 Kč/g**

Cena 1 kg materiálu na 3D tiskárně OBJET EDEN 250 vychází na ± 8,4 Kč/g.

Tab. 8 Výpočet ceny materiálu pro tiskárnu Dimension SST 768

DIMENSION SST 768				
Materiál	Množství	Cena (€)	Cena x 24,5 (Kč)	Min. odběr u mtr. 2 kg
ABS	1 kg	250	6125	12250
Support	1 kg	250	6125	12250
			Celkem:	24 500 Kč

1 g Mtr. = 12250 Kč / 2000 g = 6,13 Kč

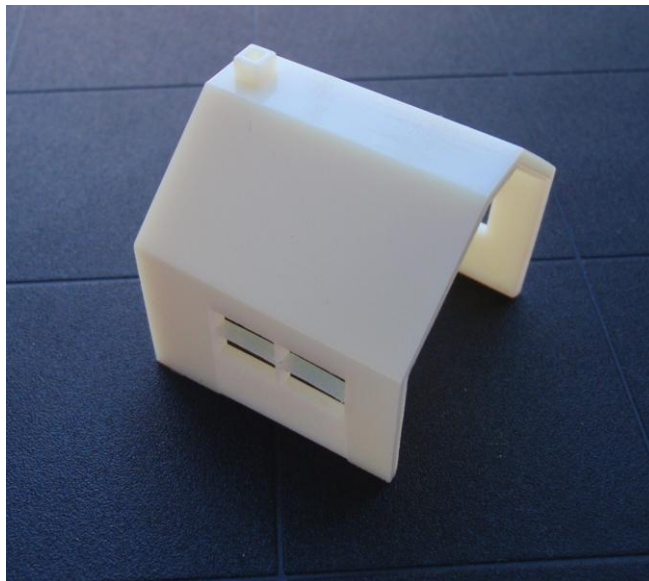
1 g Supp. = 12250 Kč / 2000 g = 6,13 Kč

Celkem: ± **12,26 Kč/g**

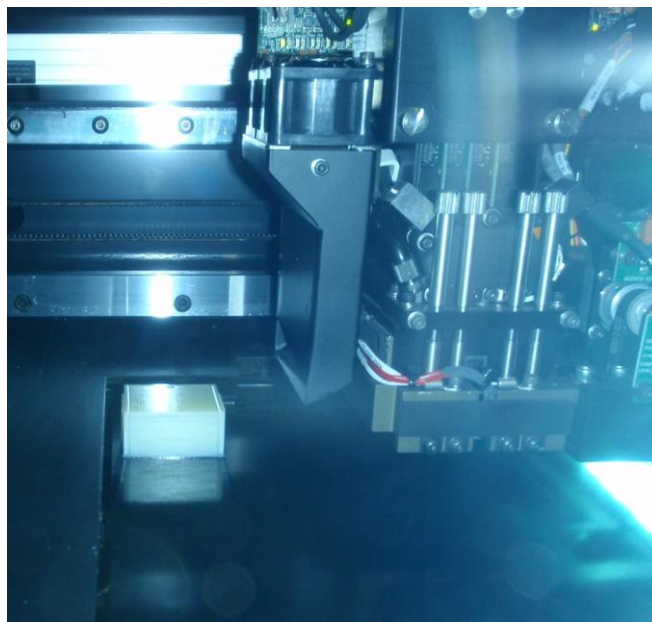
Cena na 3D tiskárně Dimension SST 768 vychází na ± 12,26 Kč/g.

6.4 Čas pro vyhotovení modelu - domečku

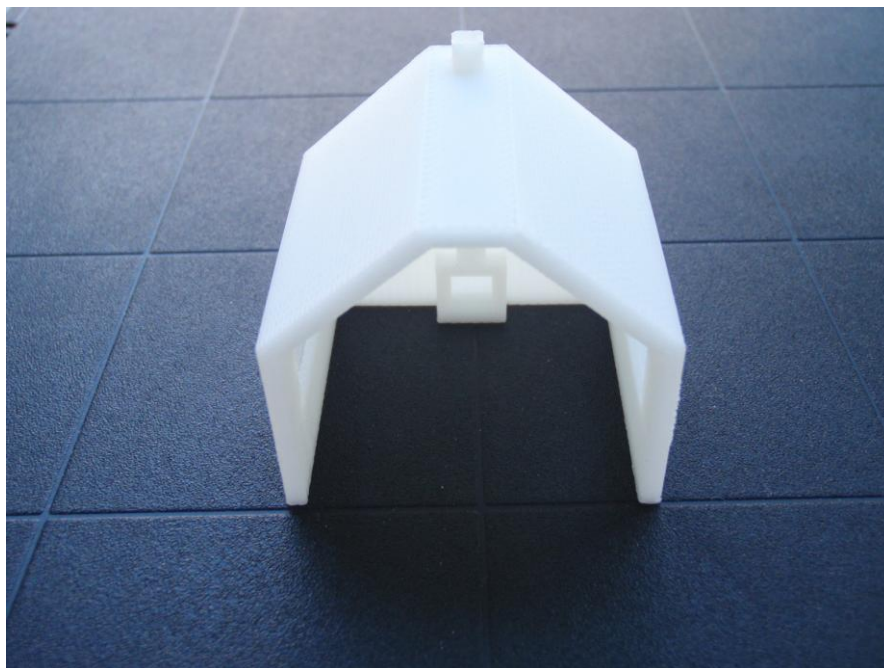
Pro porovnání byl vytvořen i druhý zkušební model, který byl postupně vymodelován na obou typech 3D tiskáren a následně byly porovnány časy modelování. Na každé tiskárně byl vymodelován jeden zkušební model výrobku. Modelovat více kusů najednou nebylo potřeba, jelikož údaje potřebné pro porovnání tisku více kusů jsou vygenerovány i programem, který je součástí 3D tiskáren.



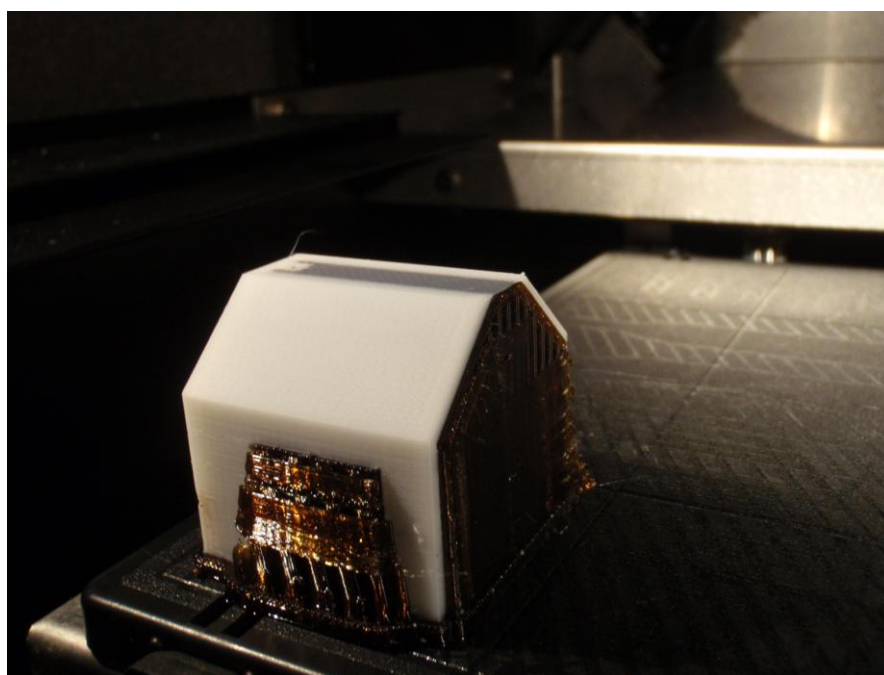
Obr. 31 Model domečku - OBJET



Obr. 32 Výroba domečku na 3D tiskárně OBJET



Obr. 33 Model domečku - Dimension

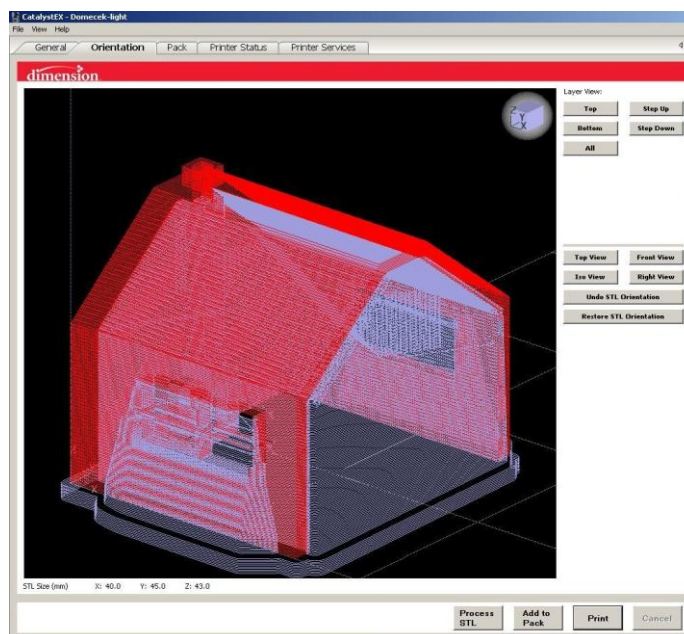


Obr. 34 Výroba domečku na 3D tiskárně Dimension

Tab. 9 Vyhodnocení času pro vytvoření modelu domečku

Typ procesu	OBJET EDEN 250 [s]	DIMENSION SST 768 [s]	Časový rozdíl [s]
Zahřívání stroje:	0:02:05	0:25:07	0:23:02
Doba po zahřátí, než stroj začne tisknout:	0:01:24	0:02:40	0:01:16
Tisk definovaný programem:	4:33:00	2:40:00	1:53:00
Skutečný tisk (od položení první vrstvy):	4:52:02	2:35:10	2:16:52
Doba potřebná k vyjmutí dílce a vyčištění stroje	0:02:10	0:01:03	0:01:07
Čas potřebný k očištění modelu:	0:27:54	2:38:00	2:10:06
Celkový potřebný čas:	5:25:35	5:42:00	0:16:25

Z naměřených hodnot, které jsou uvedeny v tabulce č. 9, je patrné, že opět nevýhodou u 3D tiskárny Dimension je zahřívací doba, která se pohybuje v rozmezí dvaceti pěti minut. Doba, kterou generoval software u obou strojů na tisk, je přibližně stejná jako ve skutečnosti. Program stroje však nezahrnuje čas, než stroj začne tisk. U 3D tiskárny Dimension přesahuje tato prodleva dvě a půl minuty. Jelikož tento model je tvarově složitější, tak zde došlo ke změně v čase potřebného na očištění, model vyhotovený z 3D tiskárny Dimension musel být dát do vodní lázně, kde je zároveň přidavek chemické látky, kterou dodává výrobce od 3D tiskárny Dimension. Doba potřebná na očištění byla přes dvě a půl hodiny Model z 3D tiskárny OBJET byl očištěn ručně, ale doba potřebná na očištění byla okolo půl hodiny.



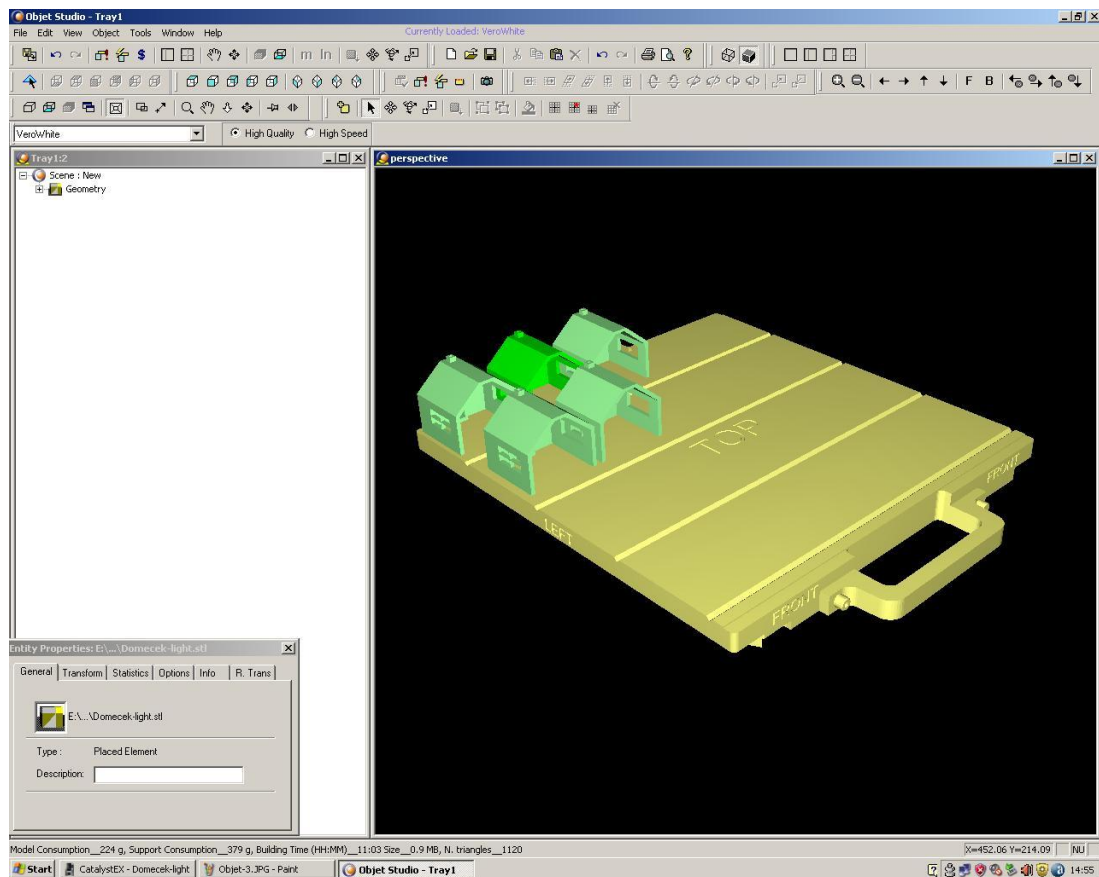
Obr. 35 Výpočet u 3D tiskárny Dimension SST 768

V tabulce č. 10 je doba, která je potřebná při modelování více kusů.

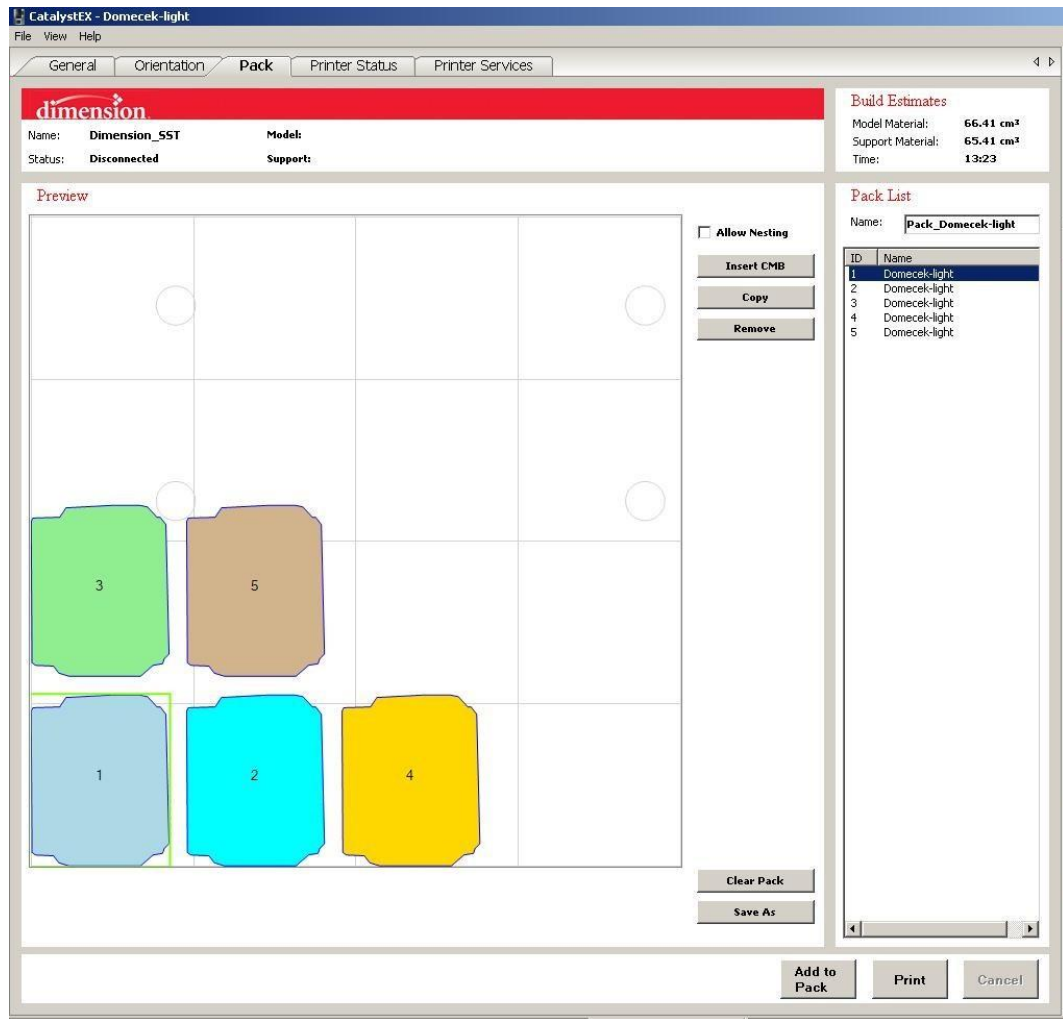
Tab. 10 Doba potřebná pro vytvoření více modelů domečků

Počet kusů	OBJET EDEN 250 [s]	DIMENSION SST 768 [s]	Časový rozdíl [s]
1 model	4:52:00	2:35:00	2:17:00
3 modely	5:18:00	8:01:00	2:43:00
5 modelů	6:01:00	13:23:00	7:22:00

Z uvedených hodnot lze vyvodit, že tisk více kusů modelů na 3D tiskárně OBJET EDEN 250 je výrazně rychlejší, než na 3D tiskárně Dimension SST 768.



Obr. 36 Výpočet u 3D tiskárny OBJET EDEN 250



Obr. 37 Výpočet u 3D tiskárny OBJET EDEN

6.5 Hmotnost modelu - domečku

Tab. 11 Vyhodnocení hmotnosti modelu domečku z 3D tiskárny Dimension SST 768

DIMENSION SST 768	Váha z programu		Váha modelu		Rozdíl	
	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [g]	Support [g]
1 model	13,28	13,08	12,66	15,7	-0,62	2,62
3 modely	39,00	84,00			4,7%	20%
5 modelů	66,41	65,41				

Tab. 12 Vyhodnocení hmotnosti modelu domečku z 3D tiskárny OBJET EDEN 250

OBJET EDEN 250	Váha z programu		Váha modelu		Rozdíl	
	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [g]	Support [g]
1 model	48,00	68,00	15,23	60,4	-32,77	-7,60
3 modely	132,00	222,00			32%	11%
5 modelů	213,00	368,00				

Z výsledků je patrné, že hmotnost materiálu udávaná programem je vždy vyšší, než jakou má ve skutečnosti hotový model. Většinou jsou to přebytky, které stroj zpracovává v průběhu tisku, tyto přebytky jsou brány jako odpad. Ve spotřebě materiálu má podstatně lepší výsledky 3D tiskárna Dimension SST 768, kde spotřeba materiálu navíc, nepřevýšila hranici 20 %. 3D tiskárna OBJET má však vyšší spotřebu materiálu, a to se negativně projeví i na ceně modelu.

6.6 Porovnání nákladů na výrobu domečku

Cena výrobního materiálu pro 3D tiskárnu Dimension SST 768:

1 g mtr. = 12250 Kč / 2000 g = 6,13 Kč
1 g Supp. = 12250 Kč / 2000 g = 6,13 Kč
Celkem: ± 12,3 Kč/g

Cena výrobního materiálu pro 3D tiskárnu Dimension SST 768:

1 g mtr. = 11564 Kč / 2000 g = 5,8 Kč
1 g Supp. = 5194 Kč / 2000 g = 2,6 Kč
Celkem: ± 8,4 Kč/g

Tab. 13 Cena materiálu potřebná pro výrobu na 3D tiskárn Dimension SST 768

DIMENSION SST 768	Váha z programu		Váha modelu		Cena	
	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [Kč]	Support [Kč]
1 model	13,28	13,08	12,66	15,7	77,6	96,2

Tab. 14 Cena materiálu potřebná pro výrobu na 3D tiskárně OBJET EDEN 250

OBJET EDEN 250	Váha z programu		Váha modelu		Cena	
	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [Kč]	Support [Kč]
<i>1 model</i>	48,00	68,00	15,23	60,4	88,3	157,0

Tab. 15 Porovnání ceny materiálu mezi 3D tiskárnou OBJET a Dimension

<i>1 - model</i>	Váha z programu		Váha modelu		Cena	
	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [g]	Support [g]	Materiál [Kč]	Support [Kč]
DIMENSION SST 768	13,28	13,08	12,66	15,7	77,6	96,2
OBJET EDEN 250	48,00	68,00	15,23	60,4	88,3	157,0
				ROZDÍL:	10,7	60,8

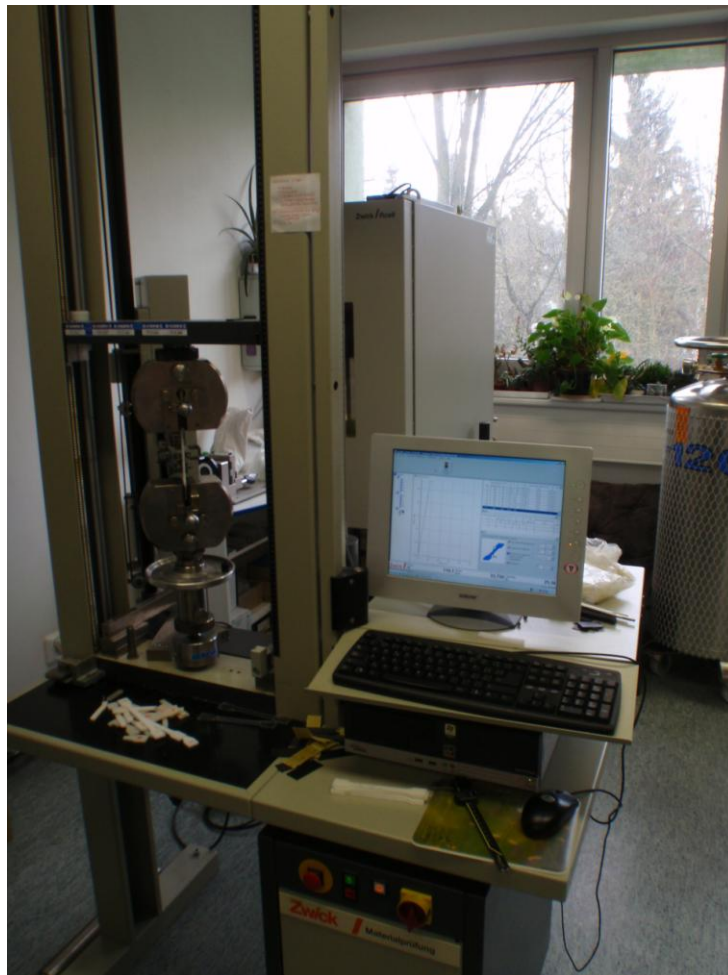
Výsledek porovnání ceny je nepatrně vyšší u výroby modelu z 3D tiskárny OBJET EDEN 250. Při sériové výrobě by se tento rozdíl jistě velmi negativně projevil, ale jelikož se jedná o výrobu prototypu, je důležité zvážit všechny okolnosti pro vyhotovení modelu.

7 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Pomocí mechanických zkoušek byly zjišťovány vlastnosti, které vyjadřují deformační chování materiálu a podmínky porušení vzorků za působení vnějších sil. Výsledky slouží jako významný podklad pro porovnání daných zařízení.

7.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem byla prováděna na stroji značky ZWICK 1456.



Obr. 38 ZWICK 1456

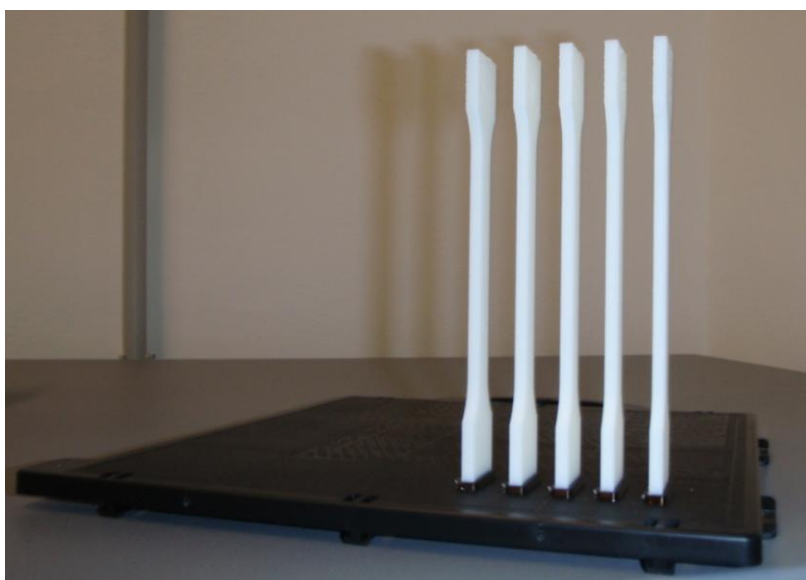


Obr. 39 Uchycení ZWICK 1456

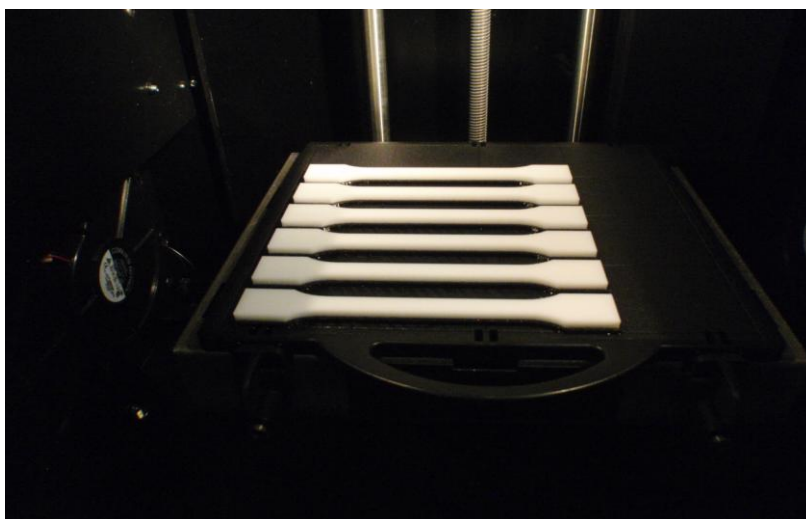
Dle normy ČSN EN ISO 572-2 byla vyhotovena zkušební tělesa a provedeny zkoušky jejich vlastností v tahu. Bylo provedeno celkem dvacet pět měření, tedy pět druhů vyhotovení po pěti kusech. Rychlost posuvu čelistí 50mm/min. Zkušební tělesa byla vyhotovena na 3D tiskárně OBJET EDEN 250, dále 3 typy těles vyhotovených na 3D tiskárně Dimension SST 768, a to v poloze vertikální (svislé), horizontální (vodorovné) a boční (podélné). Jako poslední byla k porovnání vyrobena tělesa na vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 420 C 1000-350 tělesa z ABS materiálu.



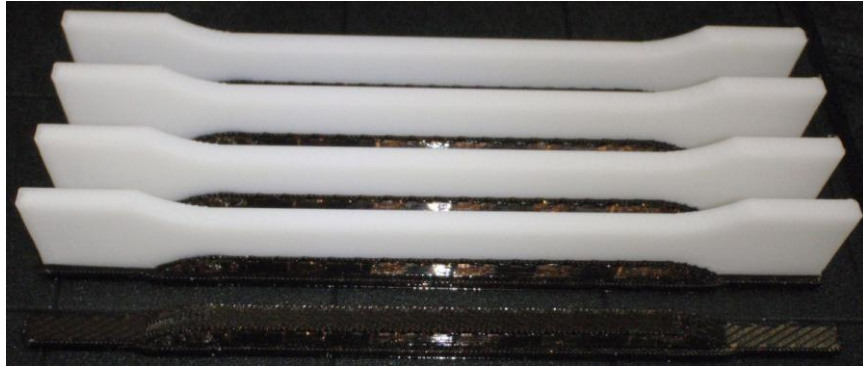
Obr. 40 Modely z 3D tiskárny OBJET EDEN 250



Obr. 41 Modely z 3D tisk. Dimension SST 768 - vertikálně



Obr. 42 Modely z 3D tisk. Dimension SST 768 - horizontálně



Obr. 43 Modely z 3D tisk. Dimension SST 768 – bočně (podélně)



Obr. 44 Model Arburg Allrounder - ABS

Vyhodnocení:

Tab. 16 Zkouška tahem

Pořadí	Typ tělesa	σ_e [MPa]	As [%]	Es [MPa]
1	OBJET	1,37	5,75	1836
2	A - ABS	0,64	2,75	2302
3	Dimension - horizontálně	0,40	2,98	1774
4	Dimension - podélně	0,49	2,71	1271
5	Dimension - vertikálně	0,21	1,53	1631

Maximální napětí před přetržením	σ_s [MPa]
Tažnost	A_s [%]
Modul pružnosti v tahu	E_s [MPa]

V tabulce č. 16 jsou zaznamenány výsledky ze zkoušky tahem, kdy nejlepších výsledků dosáhly zkušební modely z 3D tiskárny OBJET EDEN 250 (obr. 40). Druhým v pořadí byl model ze vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 420 C 1000-350 (obr. 44). Na třetí pozici se umístil opět model z 3D tiskárny Dimension SST 768, který se tiskl horizontálně (obr. 42). Pozici předposlední, čtvrtou, obsadil model z 3D tiskárny Dimension SST 768, který se tiskl v podélné (boční – viz obr.č.43) a jako nejhůře se umístil model, který byl tištěn vertikálně na 3D tiskárně Dimension SST 768 (obr. 41).

7.2 Rázová zkouška

Rázová zkouška byla provedena na přístroji CEAST Resil Impactor Junior. Zkouška byla provedena na dvaceti pěti zkušebních tělesech, na kterých byl proveden V-vrub o velikosti 2mm.



Obr. 45 CEAST pro V-vrub



Obr. 46 CEAST Resil Impactor Junior

Tab. 17 Rázová zkouška

Pořadí	Typ tělesa	Maximální síla [N]	Síla při přelomení [N]	Deformace při maximu [mm]	Deformace při zlomení [mm]	Práce spotřebovaná [kJ/m ²]	Celková práce [kJ/m ²]
1	<i>Dimension - podélně</i>	444,03	103,98	1,49	4,35	10,31	22,81
2	<i>Arburg - ABS</i>	611,41	34,16	1,49	3,45	13,74	24,10
3	<i>Dimension - horizontálně</i>	384,80	34,16	1,51	2,85	9,68	14,15
4	<i>OBJET</i>	361,70	13,26	0,88	0,90	4,38	4,49
5	<i>Dimension - vertikálně</i>	119,23	0,84	0,23	0,41	0,50	0,79

Z výsledků v tabulce č. 17 vyplývá, že nejlepších hodnot dosáhl model z 3D tiskárny Dimension SST 768, který se tiskl v podélné (boční – viz obr.č.43) poloze. Druhým v pořadí byl model ze vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 420 C 1000-350 (obr. 44). Na třetí pozici se umístil opět model z 3D tiskárny Dimension SST 768, který se tiskl horizontálně (obr. 42). Pozici předposlední, čtvrtou, obsadil model z 3D tiskárny OBJET EDEN 250 (obr. 40) a jako nejhůře se umístil model, který byl tištěn vertikálně na 3D tiskárně Dimension SST 768 (obr 41).

8 POROVNÁNÍ VZHLEDU MODELŮ

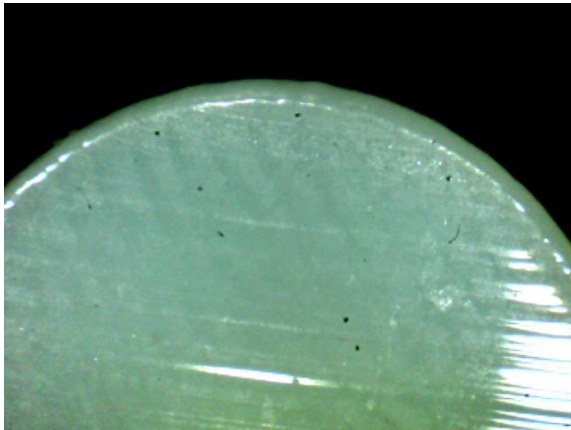
Porovnání výsledného vzhledu (struktury) modelu bylo provedeno na zařízení ProScope HR BODELIN technologies.

Digitální snímač byl propojen přes USB do počítače, kde se zobrazil zvětšený obraz. Zvětšení bylo třicetinásobné.



Obr. 47 ProScope HR BODELIN

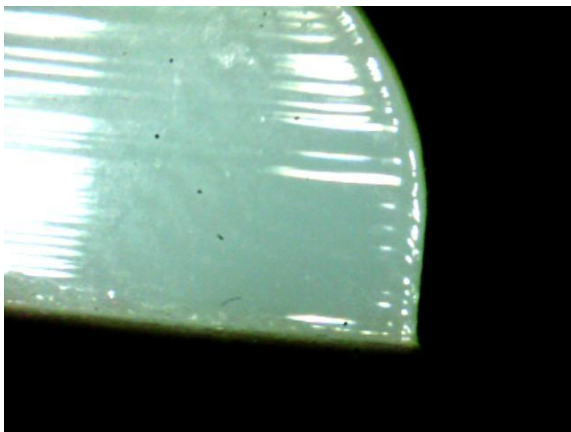
Struktura povrchů modelů z 3D tiskárny OBJET EDEN 250 a 3D tiskárny Dimension SST 768 je velmi rozdílná. U první jmenované 3D tiskárny byla nastavena hodnota kvality tisku v ose „Z“ na 0,032 mm a u druhé 3D tiskárny na hodnotu kvality tisku v ose „Z“ na 0,254 mm. Tento rozdíl je patrný na níže přiložených obrázcích.



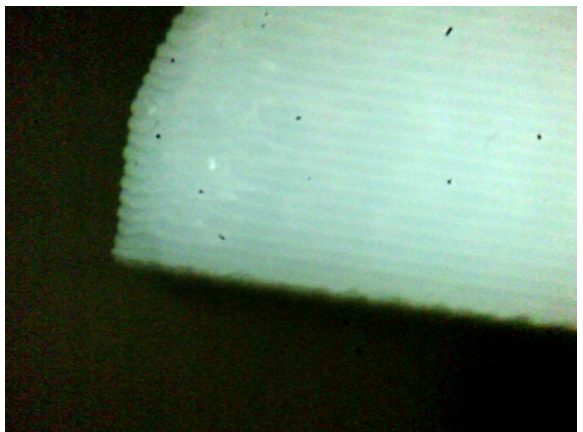
Obr. 48 Model z 3D tiskárny OBJET



Obr. 49 Model z 3D tiskárny Dimension



Obr. 50 Model z 3D tiskárny OBJET



Obr. 51 Model z 3D tiskárny Dimension



Obr. 52 Model z 3D tiskárny OBJET



Obr. 53 Model z 3D tiskárny Dimension

ZÁVĚR

Z naměřených výsledků vyplývá, že po provedených mechanických zkouškách na modelech mají nejlepší výsledky modely z 3D tiskárny OBJET EDEN 250. Dobré výsledky byly prokázány i u modelů, které byly tištěny v poloze horizontálně z 3D tiskárny Dimension SST 768. U modelů, které jsou vytvářeny nejen pro fyzický tvar, hraje velkou roli i jejich vzhled. Jsou to například modely, které slouží k prezentaci. U těchto modelů je právě na vzhled kladen velký důraz. Porovnáním modelů je velmi dobře vidět rozdíl struktury povrchu, kdy modely z 3D tiskárny OBJET EDEN 250 jsou velmi hladké oproti modelům z 3D tiskárny Dimension SST 768. Hodnoty výsledných časů, potřebné pro vytvoření modelu jasně ukazují, že pro vyhotovení více modelů současně je rychlejší 3D tiskárna OBJET EDEN 250, a to s úsporou času až o třetinu. 3D tiskárna OBJET EDEN 250 získala velmi dobré výsledky nejen z prokázání mechanických vlastností zkoušených modelů, ale i vzhledu a času potřebného k výrobě modelu. Nevýhodou proti 3D tiskárně Dimension SST 768 je spotřeba materiálu, kterého je na stejný typ modelu potřeba dvakrát takové množství. Negativní vlastnost se tak projeví u zvýšení ceny potřebné pro výrobu. Tato větší spotřeba materiálu je způsobena použitím jiné technologie pro Rapid Prototyping.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Wikipedia* [online]. 16.5.2010 [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.cs.wikipedia.org/wiki/Prototyp>>
- [2] *Syscae* [online]. c1994-2004 [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW:
<http://www.sysca.cz/web/page_112.php>
- [3] MIKŠÍK, T.: [online]. 24.1.2006 [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.designtech.cz/c/cad/pripravujeme-data-pro-rapid-prototyping.htm>>
- [4] ŘASA, J.; KEREČANINOVÁ, Z.: Nekonvenční metody obrábění 9. díl :
9 Rapid Prototyping. *Nekonvenční technologie : inovace*. 19. listopadu 2008, 081127,
str.50. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil>>.
- [5] *DIGIS, spol. s r.o.* [online]. [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW: <
<http://www.digis.cz/3d-tiskarny-vyroba-3d-modelu/princip-tisku/>>
- [6] *Vytiskni3d* [online]. c2007 [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.vytiskni3d.cz/?page=medical&lang=cz>>
- [7] PŘÍHODA, J.: [online] 18.5.2008 [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.designtech.cz/c/support/santiniho-poutni-kostel-virtualne.htm>>
- [8] *Moddle* [online]. [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.moddler.com/index.php?p=model&id=8>>
- [9] *Tis-ltd* [online]. c2006 [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.tis-ltd.co.uk/3dprinting.html>>
- [10] *Utep* [online]. 6.19.08 [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW:
<<http://engineering.utep.edu/news061908.htm>>
- [11] *George W. Hart's* [online]. c2003-2005 [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.georgehart.com/rp/rp.html>>

- [12] *3dstudio* [online]. 23.11.2009 [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.3dstudio.cz/3dsmax/animace/3d-tisk-dil-ii..html/3d-tisk-dil-ii..html>>
- [13] *Mcae* [online]. [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW: <http://www.mcae.cz/rychla_vyroba_prototypu_CS.html>
- [14] ŘASA, J.; KEREČANINOVÁ, Z.: Nekonvenční metody obrábění 10. díl :Rapid Prototyping. *Nekonvenční technologie : inovace*. 17. prosince 2008, 081207, str.38. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil>>.
- [15] KOČMAN, K.; PROKOP, J.: Technologie obrábění. Brno : CERM, s.r.o. Brno, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [16] DRIML, B.: [online]. [cit. 2010-08-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.elitalyca.wz.cz/files/tep/tep17.pdf>>
- [17] LUKOVICS, I.: Konstrukční materiály a technologie. 1. vyd. [s.l.] : VUT Brno, 1992. 272 s. ISBN 80-214-0399-3.
- [18] ČSN EN ISO 527-1 (640604)
- [19] ČSN EN ISO 527-2 (640604)
- [20] *CAD.cz* [online]. [cit. 2010-16-10]. Dostupné z WWW: <http://www.rcmt.cvut.cz/actions/20100225_emo2009/10_stroje_pro_rychle_prototypovani.pdf>
- [21] *3D Studio FaVU Brno* [online]. [cit. 2010-16-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2310-expresni-reseni-pro-reprodukciv-tvarove-slozitych-soucastek.html>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Rapid Prototyping	Rychlá výroba prototypů;
3D	(Trojrozměrný, trojdimenziální);
CAD	(Computer Aided Design) - počítačem podporované kreslení;
USB	(Universal Serial Bus) - univerzální sériová sběrnice;
STL	Formát vygenerovaný software CAD;
SLC	Formát vygenerovaný software CAD;
UV	(Ultraviolet) - ultrafialové záření;
FDM	(Fused Deposition Modeling) - je metoda tavení a postupného nanášení;
dpi	(Dots per inch) - určuje kolik obrazových bodů se vejde do délky jednoho
inch	Anglicky jeden palec - 2,54 cm;
ABS	(Akrylonitrilbutadienstyren) - je amorfni termoplastický kopolymer, který je odolný vůči mechanickému poškození;
€	(Euro) - Je měna eurozóny;
σ_E [MPa]	Mez pružnosti;
A [%]	Tažnost - je poměrné prodloužení vyjádřené v procentech původní délky;
E_s [MPa]	Modul pružnosti, materiálová konstanta;

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma postupu výroby prototypu.....	12
Obr. 2 Sestava motoru [4].....	14
Obr. 3 Výfukové svody [5].....	14
Obr. 4 Ložisko kuličkové [5].....	14
Obr. 5 Ozubená [5].....	14
Obr. 6 Lebka a spodní čelist [6].....	15
Obr. 7 Horní čelist [6].....	15
Obr. 8 Model vícepatrového domu [5].....	15
Obr. 9 Santiniho kostel – Zelená Hora [7].....	15
Obr. 10 Model postavy [8].....	15
Obr. 11 Geografický informační systém [9]	16
Obr. 12 Terénní vesmírné vozidlo [10].....	16
Obr. 13 Prostorové těleso [11].....	16
Obr. 14 Postup výroby Rapid Prototyping [13]	18
Obr. 15 Metoda výroby způsobem SLA	19
Obr. 16 Metoda výroby způsobem SLS.....	19
Obr. 17 Metoda výroby způsobem LOM.....	20
Obr. 18 Metoda výroby způsobem FDM [21]	21
Obr. 19 Metoda výroby způsobem MJM.....	22
Obr. 20 Metoda PolyJet	23
Obr. 21 Tvar zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku [19]	30
Obr. 22 3D tiskárna OBJET EDEN 250	33
Obr. 23 Materiál pro 3D tiskárnu OBJET EDEN 250	33
Obr. 24 Uložení kazet s materiálem - OBJET	34
Obr. 25 3D tiskárna Dimension SST 768	35
Obr. 26 Uložení kazet s materiálem - Dimension.....	35
Obr. 27 Model škrabky	36
Obr. 28 Model škrabky	36
Obr. 29 Výpočet škrabky u 3D tiskárny Dimension SST 768	38
Obr. 30 Průběh procesu u 3D tiskárny OBJET EDEN 250	38
Obr. 31 Model domečku - OBJET.....	41

Obr. 32 Výroba domečku na 3D tiskárně OBJET	41
Obr. 33 Model domečku - Dimension	42
Obr. 34 Výroba domečku na 3D tiskárně Dimension.....	42
Obr. 35 Výpočet u 3D tiskárny Dimension SST 768.....	43
Obr. 36 Výpočet u 3D tiskárny OBJET EDEN 250.....	44
Obr. 37 Výpočet u 3D tiskárny OBJET EDEN.....	45
Obr. 38 ZWICK 1456	48
Obr. 39 Uchycení ZWICK 1456	49
Obr. 40 Modely z 3D tiskárny OBJET EDEN 250.....	50
Obr. 41 Modely z 3D tisk. Dimension SST 768 - vertikálně.....	50
Obr. 42 Modely z 3D tisk. Dimension SST 768 - horizontálně.....	50
Obr. 43 Modely z 3D tisk. Dimension SST 768 – bočně (podélně)	51
Obr. 44 Model Arburg Allrounder - ABS.....	51
Obr. 45 CEAST pro V-vrub.....	52
Obr. 46 CEAST Resil Impactor Junior	53
Obr. 47 ProScope HR BODELIN	55
Obr. 48 Model z 3D tiskárny OBJET.....	56
Obr. 49 Model z 3D tiskárny Dimension.....	56
Obr. 50 Model z 3D tiskárny OBJET.....	56
Obr. 51 Model z 3D tiskárny Dimension.....	56
Obr. 52 Model z 3D tiskárny OBJET.....	56
Obr. 53 Model z 3D tiskárny Dimension.....	56

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Technické informace k 3D tiskárně OBJET EDEN 250	32
Tab. 2 Technické informace k 3D tiskárně OBJET EDEN 250	34
Tab. 3 Vyhodnocení času pro vytvoření modelu škrabky.....	37
Tab. 4 Doba potřebná pro vytvoření více modelů škrabek	37
Tab. 5 Vyhodnocení hmotnosti modelu škrabky z 3D tiskárny Dimension SST 768	39
Tab. 6 Vyhodnocení hmotnosti modelu škrabky z 3D tiskárny OBJET EDEN 250	39
Tab. 7 Výpočet ceny materiálu pro tiskárnu OBEJT EDEN 250.....	40
Tab. 8 Výpočet ceny materiálu pro tiskárnu Dimension SST 768.....	40
Tab. 9 Vyhodnocení času pro vytvoření modelu domečku.....	43
Tab. 10 Doba potřebná pro vytvoření více modelů domečků.....	44
Tab. 11 Vyhodnocení hmotnosti modelu domečku z 3D tiskárny Dimension SST 768	45
Tab. 12 Vyhodnocení hmotnosti modelu domečku z 3D tiskárny OBJET EDEN 250	46
Tab. 13 Cena materiálu potřebná pro výrobu na 3D tiskárn Dimension SST 768	46
Tab. 14 Cena materiálu potřebná pro výrobu na 3D tiskárn OBJET EDEN 250	47
Tab. 15 Porovnání ceny materiálu mezi 3D tiskárnou OBJET a Dimension	47
Tab. 16 Zkouška tahem.....	51
Tab. 17 Rázová zkouška	53