



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta strojní
Ústav strojírenské technologie**

Optimalizace modelu pro technologii 3D tisku

Optimization of the model for 3D printing technology

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojírenského inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Petr Zikmund

Martin Drašnar

Praha 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Děkuji panu Ing. Petru Zikmundovi a panu Ing. Marku Česalovi za odborné vedení práce, věcné připomínky, dobré rady a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá možnostmi efektivního převodu trojrozměrného počítačového modelu do hmotné podoby s využitím technologie 3D tisku. Cílem je dosáhnout úspory materiálu a omezit chyby během celého procesu. V řešení byla s volně dostupným softwarem použita metoda nízkonákladového tisku, která je blíže dostupná každému uživateli. Pomocí modelovacích programů a generátorů byly digitálně vytvořeny a následně vytištěny dva zkušební modely. Tyto prvky jsou záměrně ztvárněny tak, aby vzájemným porovnáním poukazovaly na rozdíl mezi neznalostí této oblasti a technikou optimalizace. S využitím znalostí použitého materiálu a vhodného nastavení optimalizačních nástrojů bylo dosaženo úspory materiálu o 24% a časové úspory 26 minut na každý výtisk. Jednotlivé fáze kontrolují model jako celek, přičemž zamezí ztrátě pevnosti, stability či tvarovým chybám. Přínosem má být přiblížení těchto znalostí do oblastí, kde je zapotřebí přizpůsobit model funkčním požadavkům a zároveň předejít znehodnocení vlivem záporných vlastností používaných materiálů.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the efficient ways of printing a real 3D model based on a 3D computer model designed in a specific software. The main aim is to reach material savings and reduce product's defects and defects arising during the manufacturing process. The solution included application of a low-cost print with an appropriate software, where both is available to every user. Two provisional models were digitally created and printed using the modeling programs and generators. These two elements were intentionally created to show the difference while being familiar with technique of optimization. Total material savings were 24% and time savings were 26 minutes per each print, with knowledge of used material and appropriate optimization tool settings. Every particular phase controls a model as a unit with prevention of strength loss, loss of stability or shape defects. This thesis is supposed to bring this knowledge to the areas where it is necessary to adopt the model to the functional requirements while trying to avoid the decrease in quality due to negative features of used materials.

Obsah

1	Úvod	6
2	Historie technologie 3D tisku	9
3	Používané materiály, technologie a software	10
3.1	Obecný vývoj materiálů, užitek a možná rizika	10
3.2	Plastové materiály	10
3.2.1	ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene	10
3.2.2	Polylactic Acid (kyselina polymléčná)	11
3.2.3	PET – Polyethylene Terephthalate	11
3.2.4	Nylon	11
3.2.5	Flex	12
3.3	Kovové materiály	12
3.4	Ostatní materiály	12
3.5	Technologie 3D tisku	13
3.5.1	FDM – Fused Deposition Modeling	13
3.5.2	SLA – Stereolitography	14
3.5.3	SLS – Selective Laser Sintering	14
3.5.4	LOM – Laminated Object Manufacturing	15
3.6	Software potřebný pro 3D tisk	16
3.6.1	Software volně k dispozici	16
3.6.2	Profesionální software	16
3.6.3	Převod digitálního modelu a komunikace s 3D tiskárnou	16
3.6.1	Snadnější realizace digitálního modelu	18
4	Případová studie optimalizace 3D modelu	20
4.1	Potřeba optimalizace	20
4.2	Příprava tisku	20
4.3	Analýza a možnosti optimalizace v jednotlivých fázích	21
4.4	3D topology optimization – 3D topologická optimalizace	25
4.5	Cost-effective 3D printing – nákladově efektivní 3D tisk	26
4.6	Optimalizace modelu helikoptéry	27
4.6.1	Podoba modelu	27
4.6.2	Softwarová příprava a první možnost tisku	27
4.6.3	Analýza modelu helikoptéry, optimalizace a nastavení parametrů	30
5	Zhodnocení a závěr	36
	Seznam použitých obrázků	37
	Seznam použité literatury	38

1 Úvod

Tento proces zastává v dnešní době velmi důležitou pozici. Žádoucí je co nejpřesněji reprodukovat digitální model do hmotné podoby za co možná nejnižší cenu, v nejkratším čase a bez zásahu lidského faktoru. 3D tisk jako technologie je etapa vývoje produktů, která pokrývá značné množství odvětví průmyslů. Hojně je využíván v automobilovém, leteckém nebo potravinářském průmyslu, ale setkat se s ním lze i v oblasti medicíny, a to například při tvorbě implantátů.

Většina studií a optimalizací v problematice 3D tisku, které v této práci budu zmiňovat, se bude týkat nízkonákladových 3D tiskáren, a to z důvodu snadné dostupnosti a v dnešní době nejvíce se rozvíjejícímu odvětví 3D tisku.

Znalost technologií tisku, možností a vlastností používaných materiálů, součástí tiskárny, tiskových parametrů a ovládacích softwarů pomůže zajistit co možná nejkvalitnější výstup, který je požadován.

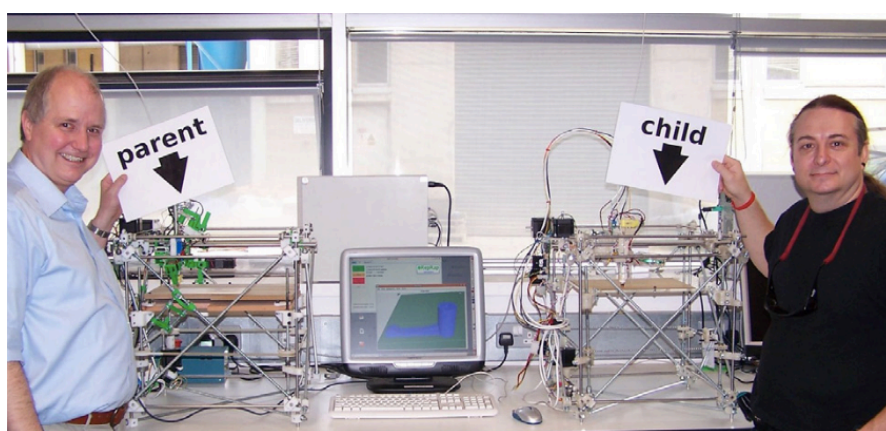
Zásadním plusem této technologie je možnost rychlých a efektivních úprav, a to i během tiskového procesu. Jelikož 3D tisk nevyžaduje potřebu forem ani jiných externích přípravků, lze docílit značné úspory. Pokud například zákazník nebude spokojen s koncepcí zhotoveného modelu, je možno jej efektivně dopracovat přesně podle přání. Kdyby byl tento problém řešen bez užití rozvíjejících se technologií 3D tisku, musely by se tak upravovat a vytvářet stále nové formy, které by mohly zapříčinit výrazné ztráty.

Hlavním cílem vývoje této problematiky je vytvořit pomocí jednoho procesu finální podobu produktu. 3D tisk umí dosáhnout podoby, která se však často musí dále upravovat, a to hlavně kvůli vzhledovým požadavkům.

Oblast rozvoje 3D tisku zaznamenala za poslední období doslova raketový růst. Nejen, že je tu příležitost utváření určité představy, na které jsou stále vyšší nároky z hledisky přesnosti a náročnosti, ale v rámci této dovednosti vystupuje idea na snížení nákladů každého kusu.

Jedním z nejdůležitějších kritérií je celková cena zařízení a náklady na tisk. Vždy je zapotřebí vědět, do jaké podoby se má výsledný produkt dostat, a jaké musí mít vlastnosti. Zde si dovoluji vyzdvihnout velmi rozšířenou,

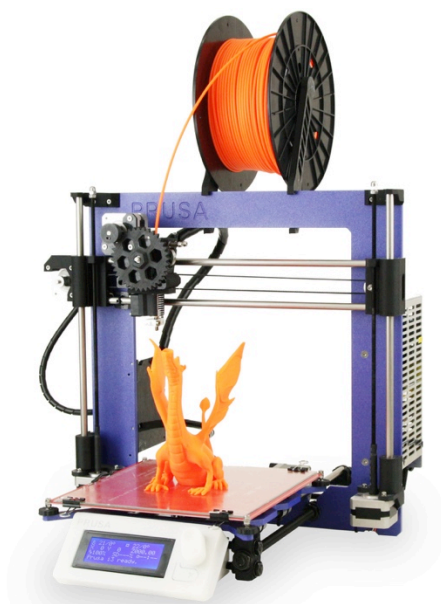
populární a levnou možnost tvorby 3D modelu. Je tím nízkonákladová možnost tisku, jejíž základ tvoří replikace hlavních dílců celého zařízení, které vytvořila „mateřská tiskárna“. To přináší možnost sestavení plnohodnotného zařízení a při vhodné kombinaci s dnes volně dostupným softwarem vytisknutí modelu, které si může dovolit i jednotlivec. Zrodem této inovativní myšlenky je stále se rozvíjející projekt „RepRap“, který vznikl v roce 2005 pod vedením britského inženýra a matematika Dr. Adriana Bowyera. Ten s pomocí Vika Olivera z Nového Zélandu vytvořil první takto replikovanou tiskárnu a rozpoutal tak vlnu, do které se rychle zapojili nadšenci z celého světa.



Obrázek 1.1: První replikovaná tiskárna Dr. Adrian Bowyer a Vik Oliver [12]

Nelze zde zapomenout na české zastoupení v projektu „RepRap“. Je jím technologický vývojář a propagátor výstavby 3D tiskáren Josef Průša, který se této problematice věnuje od roku 2009. Ten si spolu s dalšími kolegy v rámci celého „RepRap“ vytvořil vlastní projekt, ve kterém zdokonaluje již třetí ztvárnění své tiskárny, která nese název „Prusa I3“. Hlavní myšlenkou těchto projektů není jen možnost replikace hlavních dílců a nízké náklady, ale také volná dostupnost pro jakékoliv využití, která je často označována jako „Open Source neboli otevřený zdroj“.¹

¹ Kraj Vysočina. *Životopis Josefa Průši* [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.kr-vysocina.cz/josef-prusa/d-4049540>. [6]



Obrázek 1.2: 3D tiskárna Prusa I3 Plus [11]

Prozatím byly zmíněny především inovace a rozvoj tisku s použitím plastických materiálů. Možnost 3D tisku se ale již rozvíjí i za použití kovových materiálů. Této metody se využívá hlavně k potřebě součástí s vyšší pevností a náročností na trvanlivost a celkovou soudržnost. Jedná se o technologii, která je výrazně dražší, než tomu je v případě projektu „RepRap“. V nynější době zaznamenala velký rozvoj v oblasti strojírenství. Velký užitek přináší větším firmám, které tak mají možnost jednoduššího vytvoření kovového modelu a ušetří tak finance za pořizování drahých strojů, které umí 3D tiskárna nahradit.

Očekávaný výsledek ovlivňuje řada vstupních i výstupních faktorů, jak materiálů, tak i vliv okolního prostředí. Problematiku materiálů, typů materiálů a metody (technologie) 3D tisku budu ještě ve své práci detailněji rozebírat, protože sehrávají při optimalizaci vstupního modelu velmi důležitou roli. Vývoj technologií z hlediska přesnosti je chápán jako možnost dosáhnout „jemného rozlišení“ každého vytisknutého segmentu. Pro přiblížení - jako na každé obrazovce počítače či televizoru nás mimo jiné především zajímá její kvalita přenosu, tedy její tzv. „rozlišení“, takový parametr je klíčový i při zhotovování modelu na 3D tiskárně. Jemnější tisk znamená možnost vytvoření modelu s většími nároky na přesnost, soudržnost, tvarovou složitost a pevnost.

2 Historie technologie 3D tisku

Prvopočátky 3D tisku se označovaly jako „Rapid Prototyping“ (rychlá výroba prototypů). S tímto názvem se v oblasti tvorby modelů lze setkat i dnes. V roce 1984 byla Charlesem Hullem vynalezena technologie nazvaná „stereolitografie“ (dnes označovaná jako technologie „SLA“). Klíčem k této metodě je působení UV záření a zkoumání fotopolymerů. Vynálezce Charles Hull si v roce 1986 nechává patentovat technologii stereolitografie, zakládá společnost 3D Systems a vyvíjí svoji první tiskárnu, která nese název „SLA 1“ (StereoLithographic Aparatus #1). V této době cena takové tiskárny přesahovala v přepočtu stotisíc korun.

Rok 1988 přinesl veřejnosti nový typ 3D tiskárny „SLA 250“ z dílen firmy 3D Systems. Představeny jsou i nové technologie, konkrétně FDM (Fused Deposition Modeling a SLS (Selective Laser Sintering).

Nové možnosti 3D tisku byly aplikovány také v odvětví medicíny. V letech 1999-2002 se začaly tisknout první repliky orgánů. Například úspěšná transplantace funkčních ledvin nemocnému zvířeti.

Revoluci přinesl až rok 2005, kdy vznikl již zmiňovaný projekt „RepRap“, který spojuje vývojáře 3D tisku. Tito lidé aktivně přispívají hlavně svými novými poznatky a nasbíranými zkušenostmi. Dnes je již známo mnoho zástupců 3D tiskáren, které vděčí za svůj vznik právě lidem z tohoto projektu. Nejvíce známé jsou tiskárny Darwin, Mendel a Prusa. Díky své jednoduché konstrukci a možnosti replikace získaly své sympatie hlavně tam, kde nejsou prostředky pro koupi profesionálnějších, tedy dražších zařízení.²



Obrázek 2.1: 3D tiskárna „SLA 1“ od společnosti 3D Systems [13]

² O 3D. CHLEBO, Martin. *Časová linie 3D tisku I.* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/št%C3%ADtky/historie-3d-tisku> [9]

3 Používané materiály, technologie a software

3.1 Obecný vývoj materiálů, užitek a možná rizika

S rozvojem technologií 3D tisku, které umožňují vytvořit širokou škálu požadovaných tvarů a rozměrů, od milimetrů až po několik metrů, se vyvíjí i nejdůležitější oblast 3D tisku, materiály.

Materiály nesou hlavní odpovědnost za výslednou podobu, s jejichž pomocí 3D tiskárna vytvoří trvanlivý, různobarevný či zdravotně nezávadný produkt. Tak je umožněno spojit mnohé vlastnosti různých typů materiálů a nastavit si přesné parametry, které jsou žádoucí pro výsledný model.

Ve většině případů však k docílení finálního tvaru dochází k roztavení materiálu. Parametry potřebné k zajištění nezmetkového objektu je nutno správně konfigurovat, nastavovat vždy adekvátně k použitému materiálu a neustále kontrolovat. U některých materiálů je zapotřebí zajistit optimální podmínky a omezit tak zásah vnějších vlivů. Mezi takové vlivy patří hlavně okolní teplota.

Ve své práci se zaměřím hlavně na plastové materiály, které jsou používanější v oblasti nízkonákladových 3D tiskáren, a to z hlediska příznivé ceny a dostupnosti v různých variantách a složení.

3.2 Plastové materiály

3.2.1 ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene

Jedním z nejvíce využívaných plastových materiálů v oblasti 3D tisku je ABS. Cena tohoto materiálu se dnes pohybuje okolo 500 Kč za 1 kilogram, což je ve srovnání s jinými materiály relativně levné. ABS má dobrou tepelnou vodivost a vysokou pevnost. Při tiskovém procesu se jeho teplota pohybuje řádově někde okolo 250°C. Materiál dobře odolává okolním teplotám bez větších ztrát na pevnosti až do 100°C. Nejvíce je dodáván ve formě tiskové struny o průměru 1,75mm, která je namotaná na kotouči. Tak se dávkuje hlavně do nízkonákladových 3D tiskáren. Hlavní nevýhodou je ve srovnání s ostatními materiály jeho tepelná roztažnost, která způsobuje deformaci tisknutých objektů.

Tomu můžeme částečně předejít použitím vyhřívané podložky, na které je objekt umístěn. Ani ta však nezabezpečí spolehlivost tisku, a to hlavně u modelů, které jsou větší než 15 cm.

3.2.2 Polylactic Acid (kyselina polymléčná)

Zástupcem materiálů, který je biologicky odbouratelný v řádech několika měsíců, je PLA. Vyroben je z kukuřičného škrobu. Oproti ABS má velmi nízkou tepelnou roztažnost, proto není třeba užít vyhřívané podložky. Díky této vlastnosti je v oblasti 3D tisku velmi oblíbený. Používá se tam, kde velikost objektů k tisku přesahuje 20cm. Nedokonalostí tohoto materiálu je však jeho křehkost a teplotní stálost za vyšších teplot. Modely, které se zhotoví z PLA, se dají použít do teploty 60°C. Po překročení této teploty začíná být materiál plastický. Aplikační teplota v případě PLA je 200°C.

3.2.3 PET – Polyethylene Terephthalate

Materiál je známý hlavně ve formě lahví k uchovávání různých nápojů. Začal se používat teprve v poslední době, a to především proto, že kombinuje vlastnosti materiálů ABS a PLA. Je pevný, teplotně stálý a má nízkou tepelnou roztažnost, díky níž není třeba užívat vyhřívané podložky. Tisková teplota se pohybuje okolo 250°C a materiál odolává teplotě vyšší než 100°C. Nevýhodou je jeho vysoká cena (vyšší než u ABS a PLA) a jeho možnost dodání pouze v čiré barvě. Tento materiál je však velmi perspektivní pro 3D tisk, a je proto neustále ve vývoji.

3.2.4 Nylon

U 3D modelů, kde je žádána co možná největší pružnost, se uplatňuje právě Nylon. Tomu však chybí životnost, jakou má například materiál ABS. Nevýhodou je také postrádající schopnost rychlého ochlazení bez změny tvaru, čímž disponuje materiál PLA (rychlé ochlazení ho snadno poškodí). Nylon je před tiskem nutno

vysoušet a uchovávat ve vakuovém obalu, aby nedocházelo k odchlípnutí vrstev během tisku. Naopak výhodou je jeho pružnost a nízká váha. Nylon je používán pro tisk strojních součástí, protože je tvarově přizpůsobivý, tlumí rázy a umožňuje připájení k jiným součástem. Dodává se ve formě tiskové struny s průměrem 1,75mm. Jeho aplikační teplota je 230-260°C.

3.2.5 Flex

Další zástupce pružných materiálů je známý jako Flex. Výborně se hodí do oblasti, kde má výsledný produkt nahradit gumovou podobu. Používá se tedy kupříkladu k tisku „gumových těsnění“ či jako „pneumatika“ pro model automobilu. Tiskový proces je vzhledem k pružným vlastnostem materiálu velmi pomalý. Teplota při tisku se pohybuje okolo 195°C. Nutno vyhřívat i pomocí podložky na teplotu minimálně 40°C. Dodáván též ve formě tiskové struny s průměrem 1,75mm.

3.3 Kovové materiály

Kovové materiály se využívají hlavně v kombinaci s technologií tisku DMLS (Direct Metal Laser Sintering), která pracuje obdobně jako technologie SLS. Místo prášku z plastových hmot se zde využívá prášek primárně z oceli. Použít však lze i hliník, titan, stříbro či zlato. Kovový prášek se paprskem sinteruje (spéká), a poté se vzniklý objekt nechá vypálit v peci. Tento 3D způsob tisku nachází využití v oblasti medicíny, elektrotechniky a robotiky. Nevýhodou tisku z materiálů, jako je hliník stříbro a zlato, je jejich vysoká tepelná kapacita, která způsobuje zhoršení kvality povrchu.

3.4 Ostatní materiály

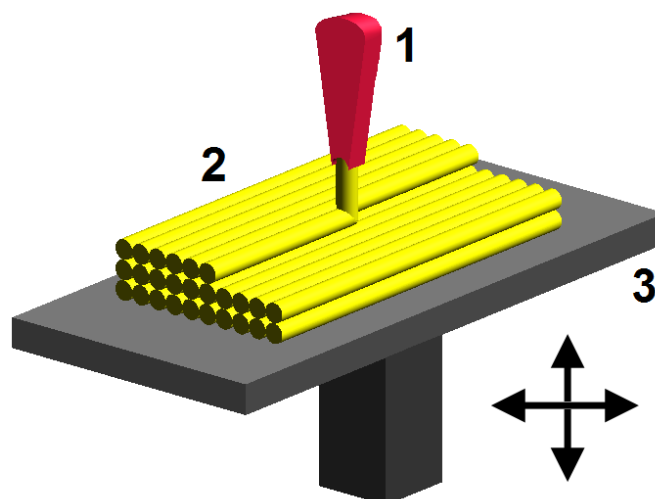
3D technologie dnes umožňují tisknout i pohyblivé objekty. Ty se ovšem nedají vytvořit bez použití podpurných materiálů. Takové se pro odstranění buď rozpouštějí v látce k tomu určené, nebo se otryskávají proudem kapaliny.

Mezi tyto materiály patří například HIPS – POLYSTEREN, který je rozpustný v lemonenu. HIPS se dá použít i u nízkonákladových tiskáren v podobě tiskové struny. Jeho doba rozpustnosti je 10 až 15 minut. Podobným materiálem je POLYKARBONÁT, využívaný při tvorbě jader strojních součástí. Pro odstranění je zapotřebí dlouhého času rozpouštění v louhovém roztoku, proto není příliš využíván.

3.5 Technologie 3D tisku

3.5.1 FDM – Fused Deposition Modeling

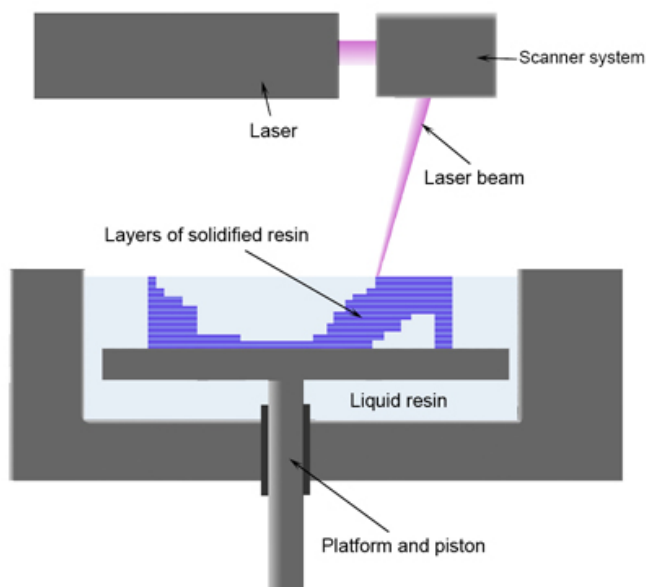
Je-li zapotřebí užívat model ihned po výtisku, je výhodné volit právě tuto technologii. Výtisk má okamžitě po ukončení procesu finální mechanické vlastnosti, není křehký a vydrží do určité míry i mechanické namáhání. Tato metoda má ale i své nevýhody, mezi které patří hlavně nemožnost plnobarevného tisku a horší rozlišení. Princip je velmi jednoduchý. Přiváděný materiál se ve formě roztavené tiskové struny (filamentu) postupně vrství skrz tiskovou tryšku. Ihned tuhne a za vhodně nastavených podmínek umožňuje tisk například doma či v kanceláři. Nevýhoda možnosti tisku pouze v jedné barvě se dá obejít použitím více trysek, ve kterých budou použity struny různých barev. Cena 3D tiskáren s technologií FDM se pohybuje v řádech desetitisíců korun.



Obrázek 3.1: Princip technologie FDM: 1-tryška vysunující roztavený plast, 2-položený materiál (modelovací část), 3-řiditelná deska pohyblivá ve třech osách [2]

3.5.2 SLA – Stereolithography

Princip této metody je založen na působení UV záření do předem stanoveného místa, kdy za určitých podmínek dochází k tuhnutí materiálu (pryskyřice), který je tvořen fotocitlivými polymery, tedy fotopolymery. Metodou SLA můžeme dosáhnout extrémně detailních součástí. Nevýhodou této metody tisku je hlavně silná toxicita pryskyřice v nevytvrzené formě. Při manipulaci v průběhu tisku je zapotřebí dbát opatrnosti a nepřijít s toxickou látkou do kontaktu. Technologie SLA tímto vyžaduje dostatečně proškolenou obsluhu a odpovídající pracoviště.

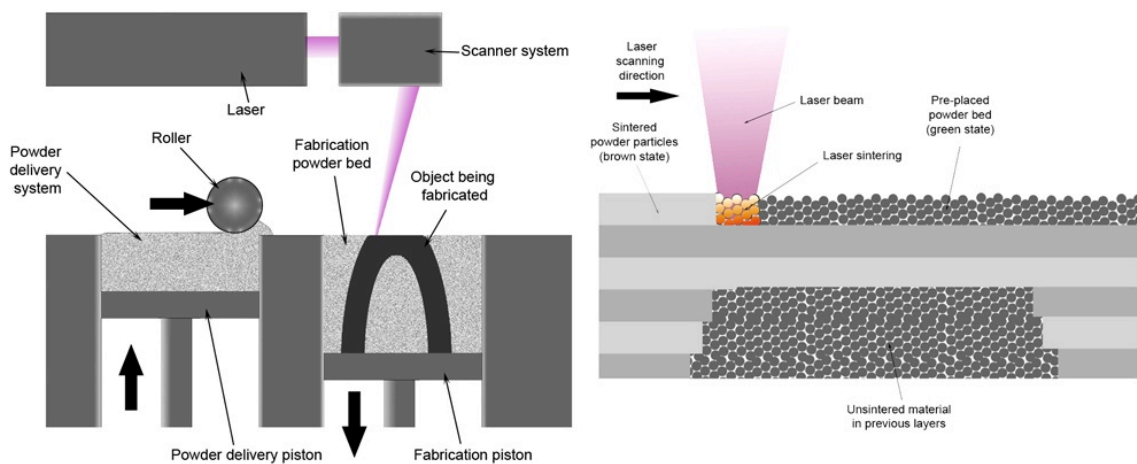


Obrázek 3.2: Princip technologie stereolitografie [4]

3.5.3 SLS – Selective Laser Sintering

Nástupcem technologie SLA je technologie SLS. Hlavní rozdíl spočívá v použitém materiálu. Ten již není toxický a může se skladovat v práškové formě. Na materiál po uvolnění z nádoby začne působit laserový paprsek. Ten nemusí být zdrojem UV záření. Za působení vysoké teploty dochází k roztavení prášku, který tuhnutím formuje výsledný objekt. Materiál, který není žádoucí pro finální model,

se odstraní z přístroje. Výhod této technologie je více. Přebytečný materiál, který se odstraňuje v konečné fázi, lze využít k opětovnému použití, což umožní značně snížit náklady pro následující tisk. Další z výhod této inovativní technologie je bezesporu možnost přimíchat do práškové směsi barevný pigment, který umožní tisk plnobarevného modelu. SLS pracuje i s jinými materiály, a to na bázi nejen plastů, ale i kovů a keramiky. Využívá se hlavně tam, kde jsou žádány vysoké nároky na přesnost.



Obrázek 3.3: Princip technologie SLS (obdobně funguje i technologie DMLS za použití kovového prášku) [4]

3.5.4 LOM – Laminated Object Manufacturing

3D tisk s použitím práškových technologií je i v dnešní době velmi nákladný. Pokud je možnost zanedbat nároky na celistvou strukturu, přičemž je žádoucí ušetřit na pořizovací ceně přístroje, využívá se této technologie. Principem je vyřezání fólie v tloušťce pohybující se kolem 0,2mm a následné nalepování jednotlivých vrstev, které po vytvrzení lepidla vytvoří požadovaný prostorový útvar. Užitekem této metody jsou tedy nízké náklady na tiskový proces a dobré zmínit i vysokou rychlost samotného stroje. Naproti tomu značnou nevýhodou je vznik odpadu z přebytečného materiálu, který je ve většině případů znovu nevyužitelný.

3.6 Software potřebný pro 3D tisk

3.6.1 Software volně k dispozici

Jako jednoduchý nástroj pro tvorbu 3D modelů může sloužit 123D Design. Jedná se o volně dostupnou distribuci modelovacího softwaru od společnosti Autodesk, Inc. Umožňuje i snadný převod do formátu, se kterým lze pracovat, než započne samotný tisk.

Je-li třeba tvořit modely pomocí textového zápisu (kódu), obstojně poslouží zdarma dostupný software OpenSCAD, který snadno vytvoří i velké projekty. Modely vytváří parametricky, kdy zadáním určitého parametru změní prvek objektu, nikoliv celý objekt.

3.6.2 Profesionální software

Volně dostupný software často nenabízí rozšířené možnosti či podporu pro některá zařízení. Ty lze užívat v placených verzích od různých distributorů. Cena těchto modelovacích softwarů je velmi vysoká a často s omezeným počtem licencí, které je nutno dokoupit zvlášť, pokud je třeba na více přístrojích.

V mém případě jsem uplatnil možnost využít školní licence a pořídil si software od společnosti Autodesk, Inc. Konkrétně je to balíček obsahující modelovací software Inventor, který dokáže tvořit model vizuálně a rovněž ho exportovat do potřebného formátu.

Kromě modelovacího software Inventor existují i jiné profesionální programy. Např.: 3D Studio Max (Autodesk, Inc.), SolidWorks (SolidWorks Corporation), aj.

3.6.3 Převod digitálního modelu a komunikace s 3D tiskárnou

Po vytvoření koncepce digitálního modelu je důležitý správný převod do požadovaného formátu. Nejčastěji užívaným výstupním formátem 3D softwarů je formát s příponou .STL, nazvaný podle STereoLithography.

Převádí-li se složitější model, často může docházet k různým chybám. Tyto chyby jsou nejčastější příčinou špatného výstupu, poškození celého modelu nebo poškození některých komponentů 3D tiskárny. Jeden z hlavních cílů mé práce je optimalizovat vznik chyb, které vznikají buď během tvorby digitálního modelu, nebo právě při exportu.

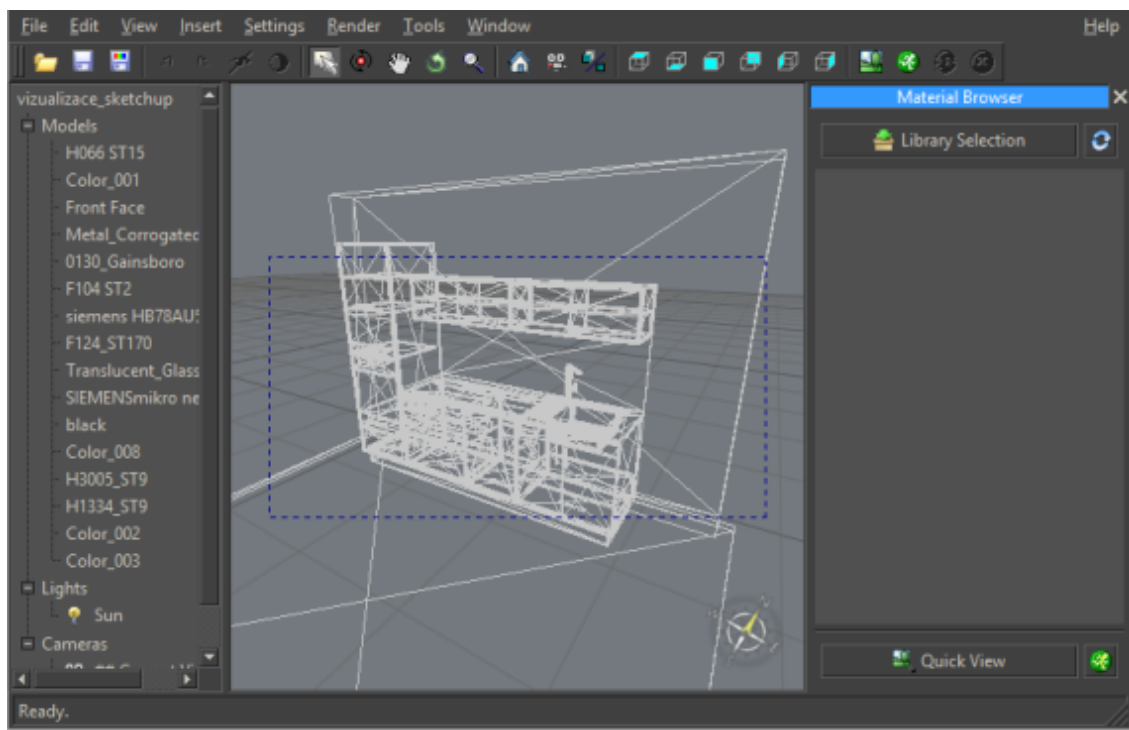
Software, do kterého můžeme snadno naimportovat digitální model s příponou .STL, a který nám slouží pro slicování a přípravu modelu, se nazývá SLICER. Slicování lze chápat jako rozčlenění modelu v celém jeho objemu na předem definované vrstvy. Tloušťka takové vrstvy je dána parametry tiskárny a určuje, jak jemného rozlišení jednotlivých vrstev se může dosáhnout. Takto připravený soubor se již exportuje a následně importuje do programu, který ovládá činnost 3D tiskárny. Exportovaný formát má již novou příponu (.gCode). Rychlost exportu je dána jednak složitostí modelu, ale také hardwarovým vybavením počítače (rychlostí procesoru). Nejpoužívanějším zástupcem softwaru pro slicování modelu je program Slic3r, který je rovněž volně dostupný.

Nejdůležitějším softwarem pro chod celého tiskového procesu je software, který ovládá 3D tiskárnu. Zde záleží hlavně na správné konfiguraci a nastavení výchozích parametrů. Takovými parametry jsou hlavně teplota, na kterou se taví tiskový materiál, rychlost tisku (určuje pohyb tiskové hlavy), korekce tloušťky jednotlivé vrstvy, kterou je 3D tiskárna schopna vytisknout, sepnutí vyhřívané podložky, množství materiálu, které protéká tryskou za definovaný čas a v neposlední řadě také výchozí poloha tisku, která je důležitá pro správné rozvrstvení modelu na tiskové podložce. Nastavení jednotlivých tiskových parametrů závisí především na složitosti tvaru a použitém materiálu. S konečným nastavením je definována doba celého tisku a možnost nahlédnout i do simulace procesu, která umožňuje analyzovat skládání jednotlivých vrstev, než celý proces započne. Během tisku je možné monitorovat jeho průběh. Vhodným nástrojem pro ovládání tiskáren je kupříkladu software PrintRun nebo Cura.

3.6.1 Snadnější realizace digitálního modelu

Ne každý uživatel si může dovolit tvorbu produktů v profesionálních softwarech. Tyto nástroje vyžadují výbornou znalost funkcí programu a mnohé dovednosti, které jsou pro modelování potřebné. Existují mnohá školení, na kterých se uživatel naučí pracovat a orientovat se v takových softwarech. Vysoká cena licencí profesionálních nástrojů často rozhoduje při pořizování modelovacích softwarů, hlavně u jednotlivců a menších společností.

Pro účely snadnější realizace obstojně poslouží modelovací rozhraní v prostředí programu Google SketchUp Make. Tato distribuce slouží nejen pro nekomerční použití, které je volně k dispozici každému, ale i pro firmy, které mohou využít placené verze Google SketchUp Pro. Nástroj umí snadno vytvářet různé typy modelů pomocí již vytvořených prvků od jiných uživatelů, které jsou taktéž volně k dispozici. Importované objekty lze tvarově upravovat a přepracovávat do žádané podoby. Využití nachází hlavně v oblasti stavebnictví nebo strojírenství.³



Obrázek 3.4: Tvorba reálné vizualizace v programu Google SketchUp [8]

³ Online SketchUp. *SketchUp info* [online]. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://onlinesketchup.cz> [8]

Pro uživatele, kteří neumějí ovládat modelovací programy nebo k nim nemají přístup, chtějí využít možnosti 3D tisku a najít tak přibližnou inspiraci, představuje jistou náhradu webový portál www.thingiverse.com. Zde lze nalézt velké množství již zhotovených modelů s přiloženými fotografiemi či videi jejich podoby, funkce a použití. Výhodou je opět volné využití všech nahraných souborů. Nevýhodou se může stát určitá neověřitelnost některých modelů, která by vedla k chybě při tisku, pokud se neprovede vlastní optimalizace.

4 Případová studie optimalizace 3D modelu

4.1 Potřeba optimalizace

Nízkonákladový 3D tisk je neustále se rozvíjející oblast této technologie. Vývojáři pracují na inovativních způsobech celého tiskového procesu. Nové technologie umožňují například vyšší rychlost tisku, různé modifikace výplně, čímž šetří množství použitého materiálu, a v neposlední řadě také tisk rozměrnějších součástí. Jednu z nejpodstatnějších částí vzniku finálního modelu nese ovšem jeho optimalizace. Umožní ušetřit množství materiálu bez ztráty na pevnosti, zamezí vzniku chyb při tisku a zvýší bezpečnost modelu při jeho funkci. U optimalizace jsou klíčovou stránkou určité znalosti jak softwarové, tak i materiálové či konstrukční. Uzpůsobení vždy směřuje k možnostem, které nabízí 3D tiskárna a k funkčním vlastnostem, které má finální produkt mít.

4.2 Příprava tisku

Stoprocentní úspěšnost tisku není zaručena prakticky nikdy. Tomu, aby se co možná nejvíce omezilo riziko vzniku chyb, se dá předcházet. Základním vstupním nastavením 3D tiskárny před každým tiskem je vhodné navolení parametrů. Mezi ty hlavní patří zahřívací teplota a teplota podložky, která se volí podle užitého materiálu. Neméně důležitou součástí přípravy je také kalibrace, která zahrnuje nastavení hlavní roviny vzhledem k tiskové trysce, a vyrovnání celé 3D tiskárny. Po každé větší manipulaci je nutná recalibrace. Pokud je tisk prováděn v místnosti, kde dochází k výraznějšímu poklesu teploty a většímu proudění vzduchu, je nutné celou 3D tiskárnu umístit kupříkladu do ochranné plexisklové krychle. Právě při poklesu teploty často dochází k odtržení modelu z tiskové podložky.

Vyhřívaná podložka je na povrchu opatřena připevněnou tabulkou skla o tloušťce 2mm. Na tuto tabulku se při přípravě nanáší vrstva kancelářského lepidla a vrstva aerosolu, který obsahuje rozpuštěný tiskový materiál v acetonu určitého poměru. Tato příprava zajistí přilnutí základní vrstvy tištěného modelu.

Po kalibraci, importu modelu, volbě počáteční polohy a nahřátí tiskového média může započít tisk. Nutné je usměrnění toku roztaveného materiálu, které se zabezpečí „objetím“ tvaru tisknutého modelu v definované vzdálenosti. Tato vrstva je pouze doplňující a po ukončení tisku se odstraní.

V průběhu tisku je důležitým parametrem také rychlost tisku. S vyšší rychlostí dosáhneme menšího času, ale model může utrpět ztráty na kvalitě. Pokud je žádána detailnější struktura, musíme tomu uzpůsobit průběh, tedy zmírnit rychlost tisku.

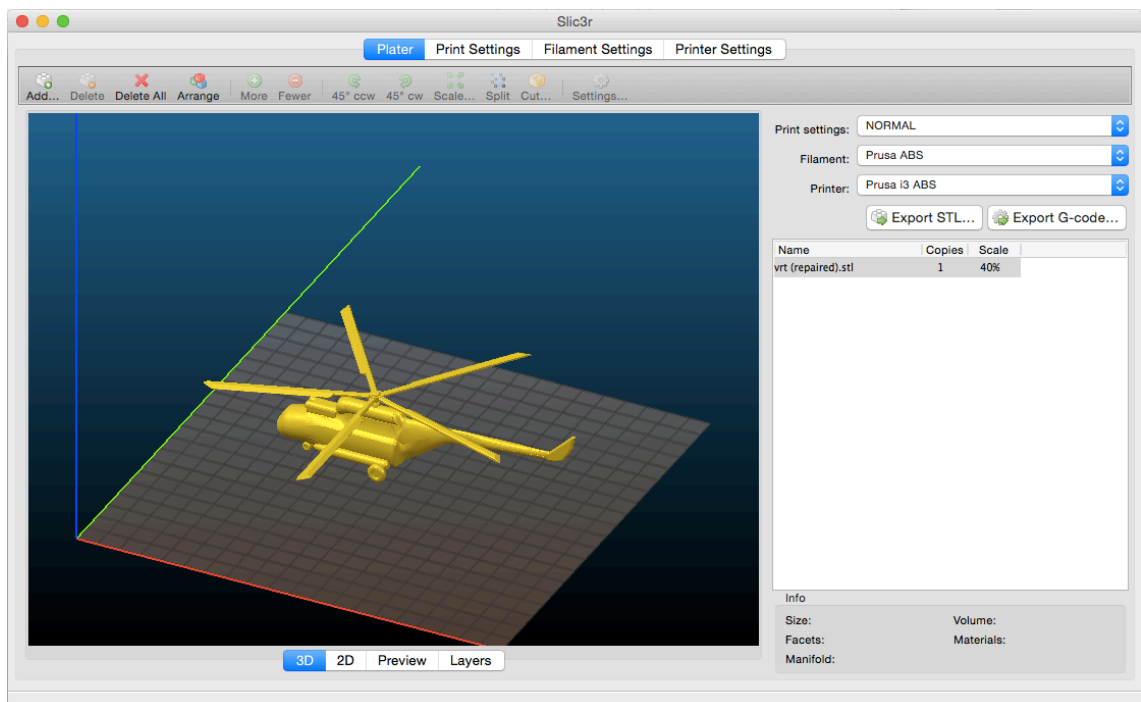
Po uplynutí generované doby a vytištění poslední vrstvy 3D tiskárna zakončí svůj proces. Model však ještě není připraven k odstranění. Musí nejméně 10-15 minut chladnout, aby nedošlo k oddělení vrstev nebo k jeho deformaci. Tato doba se pro různé materiály liší, nicméně je velmi důležité ji dodržovat. Pokud byla správně provedena příprava vyhřívané podložky, jde model snadno odejmout. Nežádoucí či pomocné části se mohou odstranit odříznutím, vyvrtáním nebo odtržením.

4.3 Analýza a možnosti optimalizace v jednotlivých fázích

Má-li model finální digitální podobu, provede se export do formátu .STL. Ten slouží jako vstupní formát pro import do softwaru, pomocí kterého se definuje rozvrstvení modelu.

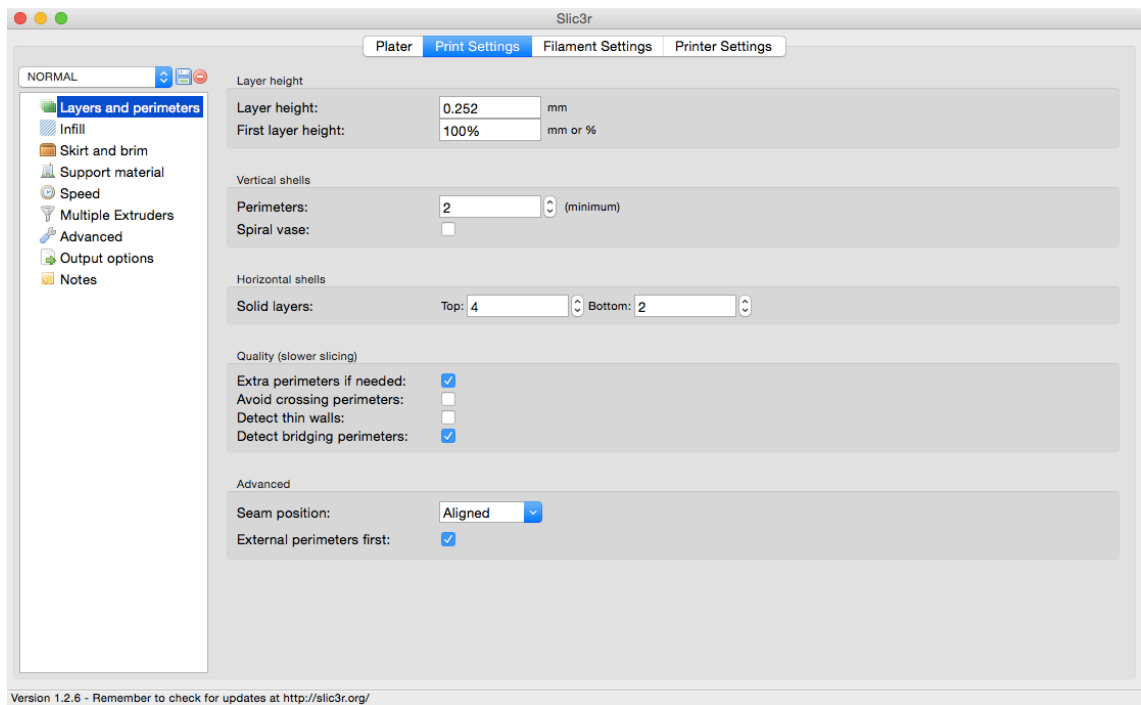
Již zmíněný nástroj Slic3er má v sobě pro tuto operaci nahrané obecné počáteční nastavení jak pro model, tak pro přiváděný materiál i tiskárnu. Definované parametry lze upravovat do požadované podoby. V základním zobrazení je vidět tisková podložka s importovaným modelem, kterou lze přepnout do 3D zobrazení, 2D zobrazení, náhledu a přehledu jednotlivých vrstev. S modelem tak lze plynule otáčet a nechybí možnost přiblížení. V informačním okně program vypisuje rozměry objektu a jeho stav. Model může být zmenšen či zvětšen podle měřítko nebo například otočen podle os x, y, z, které jsou v náhledu barevně vyznačeny. Aby 3D tiskárna byla schopna vytisknout model bez potíží, je zapotřebí, aby byl model takzvaně „vodotěsný“ (měl uzavřené smyčky v každé

vrstvě). Pokud by model nebyl takto ošetřen, 3D tiskárna by tak nerozpoznala tištěné objekty a tisk by se nezdařil.



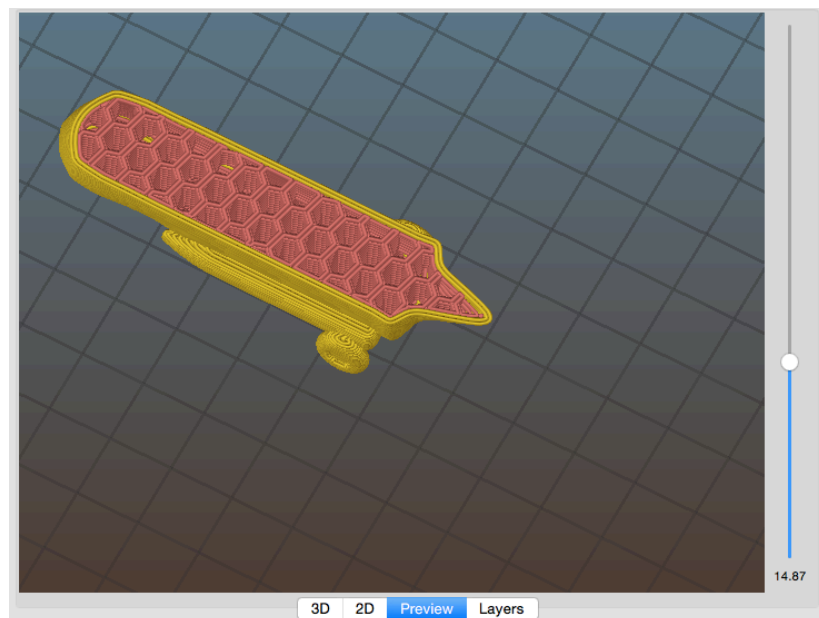
Obrázek 4.1: Základní zobrazení Slic3ru po importu modelu helikoptéry

Přenastavením parametrů se model ihned aktualizuje. Po vygenerování lze kontrolovat jeho podobu v návrhovém zobrazení. Důležitými parametry pro optimalizaci jsou nastavení jednotlivých vrstev (provádí se vzhledem k materiálu, jeho průměru a vlastnostem trysky), výplň materiálu (nejčastěji užívaná čarová výplň nebo tzv. „honeycomb“ tedy „včelí plástev“, pomocí nichž se mění tvar či procentuální hustota) a podpůrný materiál, vyplňující „hluchá“ místa při dosahování převislých částí modelu.

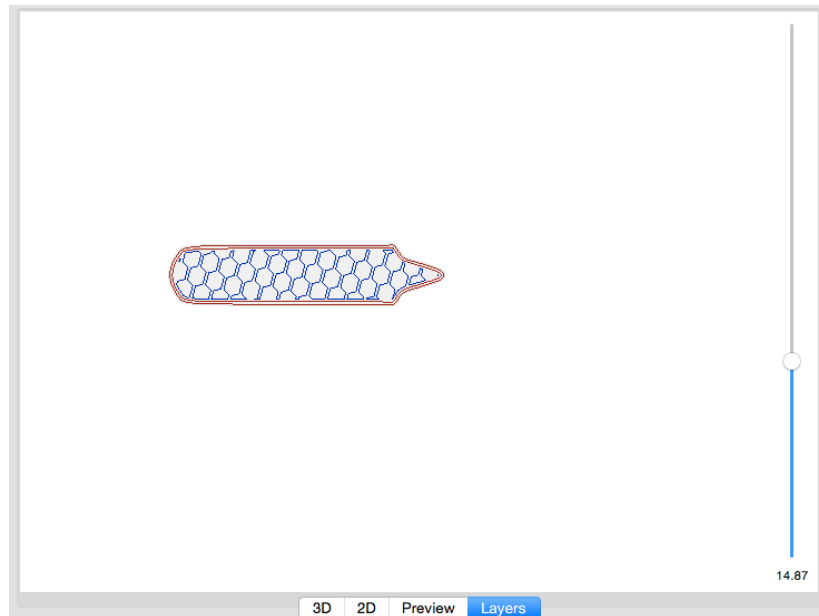


Obrázek 4.2: Nastavování tiskových parametrů v programu Slic3r

Jednotlivé vrstvy lze prohlížet posuvníkem. 3D režim vykresluje realistický náhled průběhu tisku vrstvu po vrstvě.



Obrázek 4.3: 3D realizace náhledu vrstvy modelu helikoptéry



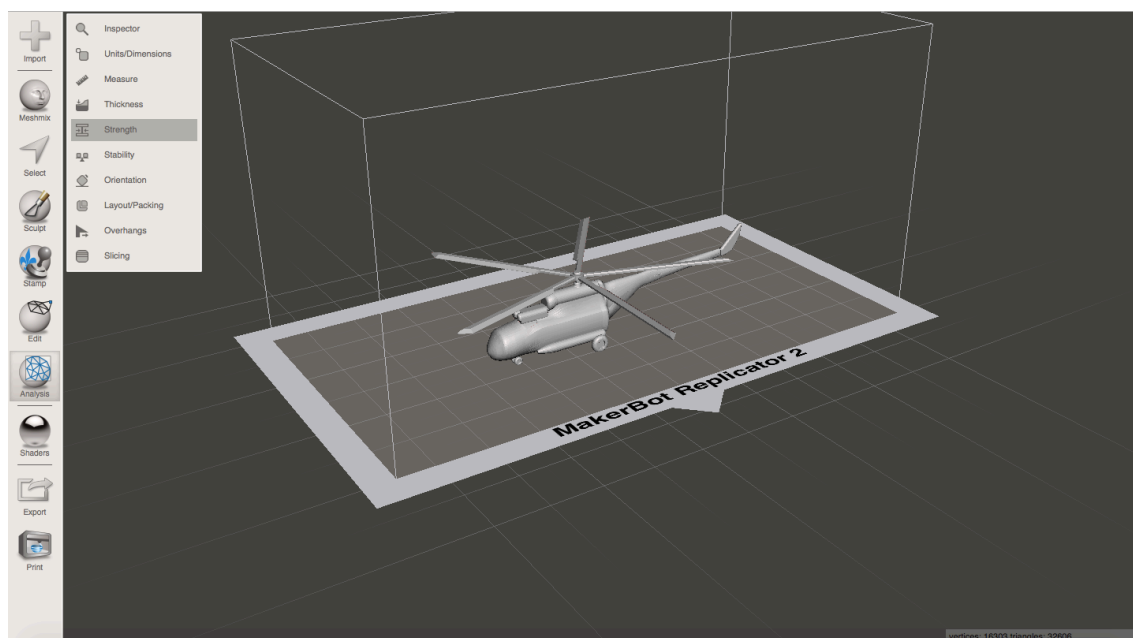
Obrázek 4.4: 2D náhled struktury vrstvení modelu helikoptéry

Užitečnou možností náhledu je i základní 2D rozvrstvení modelu. Pokud program Sli3er analyzuje výskyt chyb v digitálním modelu, je pro bezchybný výtisk zapotřebí tyto nedostatky odstranit. Vhodným řešením je volně dostupný software Netfabb Basic, který velmi účinně a jednoduše odstraní závadu na modelu. Nejčastěji se v něm opravují problémy s „vodotěsností“. Oprava chyby s sebou někdy nese zdeformování opravovaného objektu, které není žádoucí. Tento nedostatek se dá opravit přemodelováním určité části do podoby, která nepovede ke vzniku takové chyby.



Obrázek 4.5: Analýza chyb v prostředí programu Netfabb basic

Optimalizační software Meshmixer od společnosti Autodesk, Inc., umožňuje najít „slabá“ místa objektů, která by mohla způsobovat deformaci během tisku nebo prasknutí modelu při manipulaci. Konkrétní analýzy tohoto nástroje budou v práci detailněji rozpracovány.

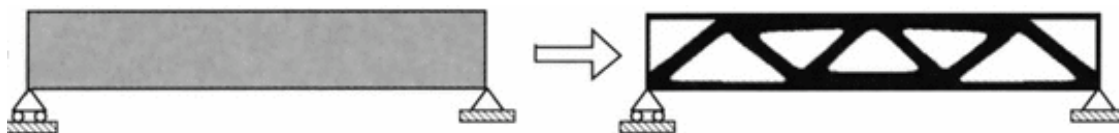


Obrázek 4.6: Analyzační prostředí softwaru Autodesk Meshmixer

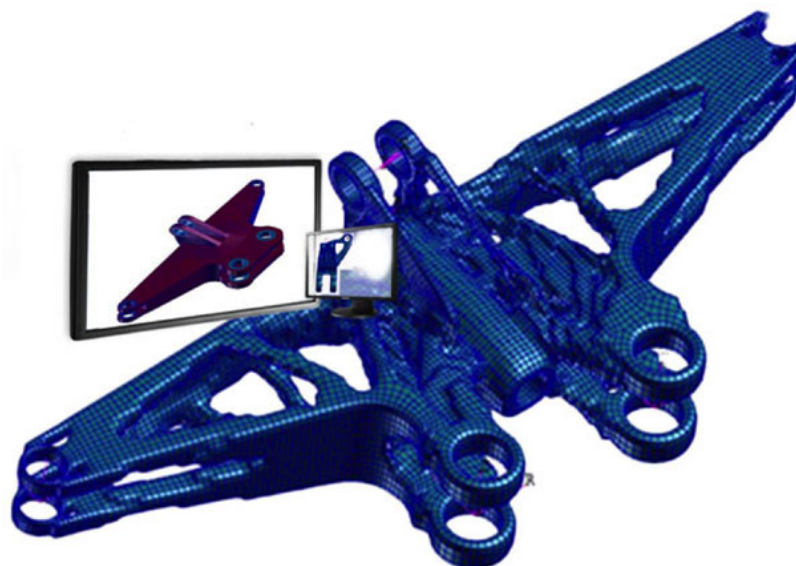
4.4 3D topology optimization – 3D topologická optimalizace

Technologie topologické optimalizace představuje návrh pro optimální tvar a redukci množství materiálu při zachování pevnostních vlastností celého prvku. Efektivní využití materiálů je důležité kupříkladu v oblasti letectví, a to konkrétně při zachování co možná nejmenší hmotnosti mechanických prvků letadla. Lze tak ušetřit až 500kg na celkové hmotnosti dopravního letadla. Tvarové optimalizace se využívá také v konstrukci elektromagnetického či elektrochemického zařízení. Strukturální studie kombinují mechaniku s matematickým programováním pro získání lepších návrhových konstrukcí. Základní části topologie zkoumají prvek nejen z pevnostního hlediska, ale kladou důraz i na výsledný design.⁴

⁴ On 3D Printing. *Topology optimization* [online]. [cit. 2015-04-24]. [10]



Obrázek 4.7: Stručný příklad topologické optimalizace při návrhu nosníku [1]

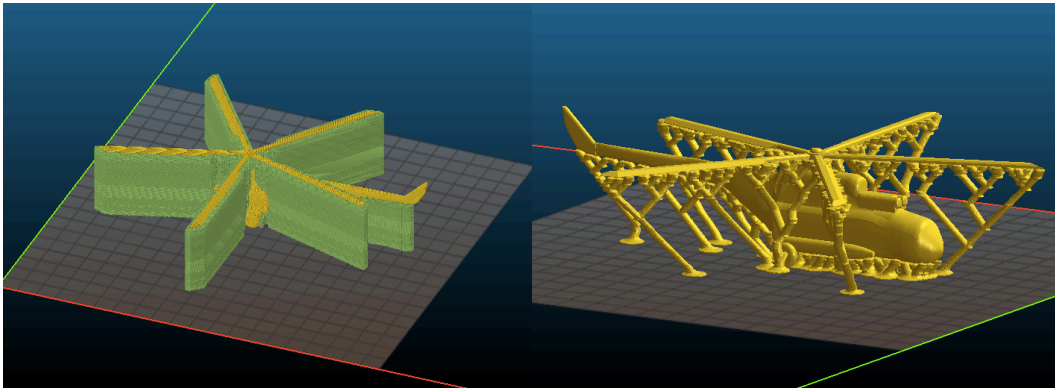


Obrázek 4.8: Praktická ukázka 3D topologické optimalizace mechanické součásti dopravního letadla [10]

4.5 Cost-effective 3D printing – nákladově efektivní 3D tisk

Cílem nákladově efektivního 3D tisku je najít kompromisní řešení pro úspory materiálu za účelem snížení objemu, zachování stability a geometrické přibližnosti. Používá se v rámci tiskové technologie FDM i SLS. Při tisku tvarově náročnějších modelů lze využít generátory podpěr, které zajistí styk s tištěnou oblastí modelu pouze v jednom místě, tedy bodový styk. Výhodou je snadné odejmutí podpurných částí z finálního výtisku.⁵

⁵ *Cost-effective Printing of 3D Objects with Skin-Frame Structures* [online]. [cit. 2015-04-24]. [3]

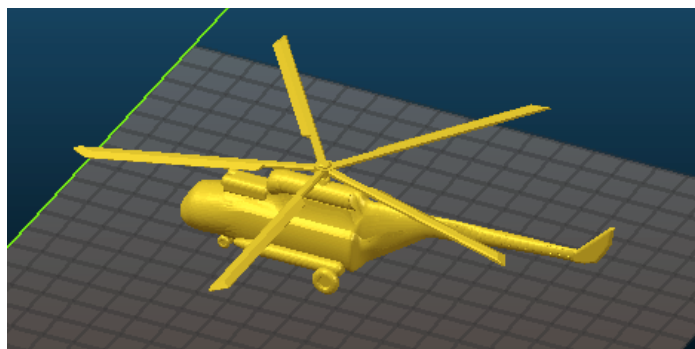


Obrázek 4.9: Náhled před tiskem bez a s využitím technologie nákladově efektivního 3D tisku (prostředí programu Slic3r)

4.6 Optimalizace modelu helikoptéry

4.6.1 Podoba modelu

Jako testovací prvek, u kterého chci demonstrovat vhodné využití optimalizačních prostředků, jsem si vybral model helikoptéry, který jsem vymodeloval v softwaru Autodesk Inventor. V experimentální části budou ukázány chyby, které mohou nastat, pokud není provedena vhodná optimalizace modelu před tiskovým procesem. Tyto chyby budou analyzovány a následně opraveny tak, aby byl výtisk úspěšný.



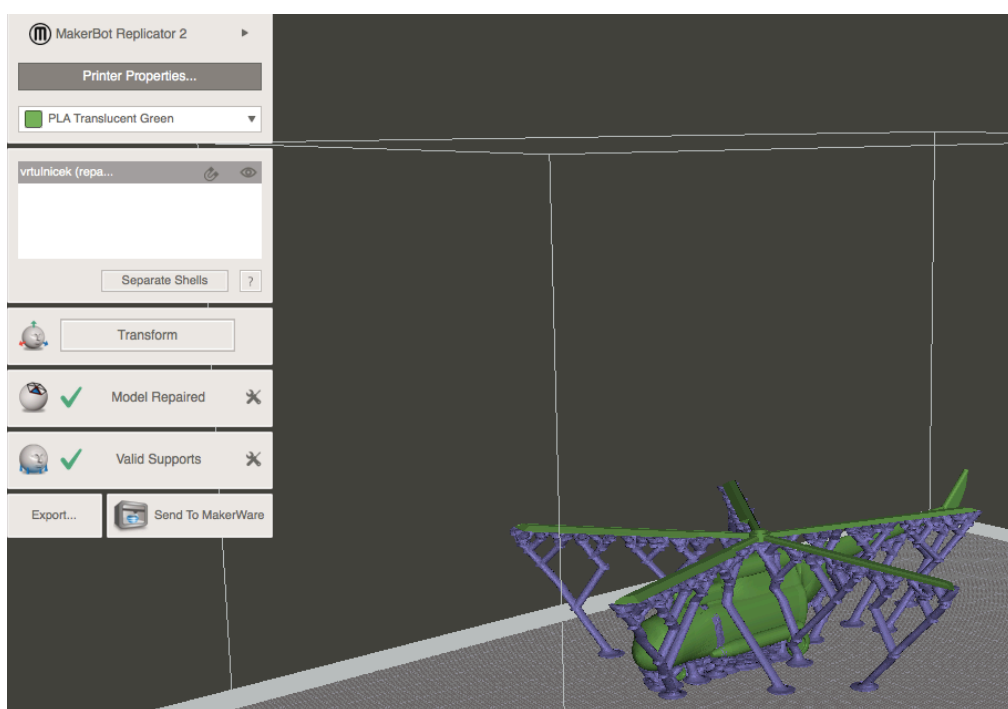
Obrázek 4.10: 3D realizace zvoleného modelu helikoptéry

4.6.2 Softwarová příprava a první možnost tisku

Vytvořený model je po exportu do formátu s příponou .STL připraven k importu do prostředí softwarů, ve kterých je konfigurován k tisku.

Model helikoptéry je tvarově náročný. Tisk modelu vcelku vyžaduje vhodnou volbu podpěr, které zachytí spodní část trupu a jednotlivé „listy“ hlavního rotoru.

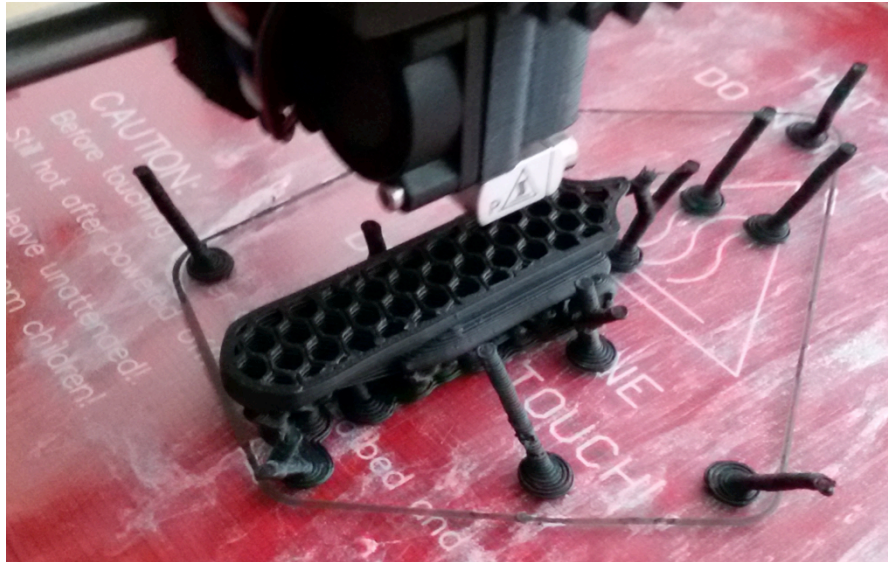
Nabízí se možnost použití generátoru podpěr Autodesk Meshmixer, a to hlavně kvůli úspoře materiálu. Zvoleno generování v předvoleném režimu s maximálním úhlem podpěry 45°, průměrem 3mm a výškou vrstvy 0,2mm. Takto připravený model (viz obrázek 4.11) je exportován do souboru.



Obrázek 4.11: Generování podpěr v prostředí softwaru Autodesk Meshmixer

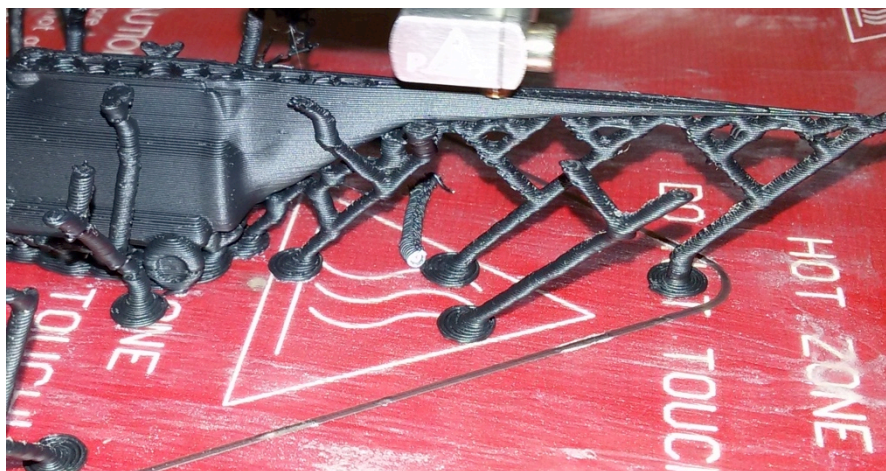
Předpřipravený model se následně importuje do programu Slic3r, ve kterém se nastaví hlavní tiskové parametry. Každá 3D tiskárna má jiné možnosti tisku, a proto je nutné dodržovat parametry, které jsou vhodně předepsány vývojářem 3D tiskárny. Model helikoptéry bude tištěn z materiálu ABS na 3D tiskárně typu Prusa I3 od již zmiňovaného českého konstruktéra Josefa Průši. Nastavená výška tisku je 0,252mm, výplň ve tvaru „Honeycomb“, tedy „včelí plástve“ a maximální rychlost tisku 60mm/s. Po exportu do souboru s příponou .GCODE může započít předehřev a příprava 3D tiskárny.

Pro materiál ABS je teplota trysky nastavena na 285°C a teplota vyhřívané podložky na 80°C. Doba tisku modelu helikoptéry, kterou generuje obslužný software Printron, je 2 hodiny 46 minut.



Obrázek 4.12: Průběh tisku modelu helikoptéry

Po hodině tisku dochází k odtržení první podpěry od tiskové podložky. Příčinou této chyby je buď špatná příprava podložky, nebo nevhodně zvolené parametry. Volený průměr 3mm jednotlivých podpěr je vzhledem k jejich výšce nedostatečný. Při nanášení vrstev tisková hlava nepatrně vychyluje podpěru. Tato výchylka se s růstem celého modelu zvyšuje až do té doby, co se podpěra uvolní z tiskové podložky. To má za následek znehodnocení celého modelu, nebo jeho části. V případě modelu helikoptéry 3D tiskárna nebude moct navázat vrstvy, které tvoří „listy“ hlavního rotoru. Tiskový materiál se bude vrstvit do vzduchu, kdy nedosáhne požadovaného tvaru.



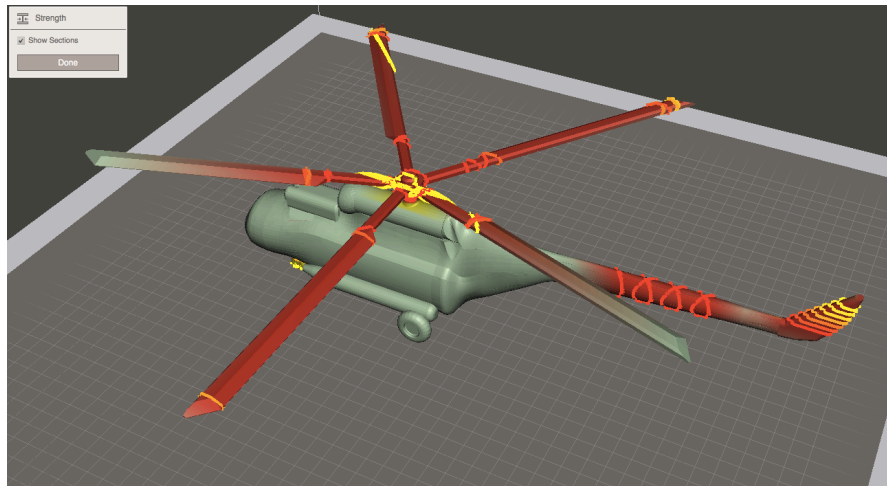
Obrázek 4.13: Podpěra odtržená od vyhřívané podložky



Obrázek 4.14: Následky špatné optimalizace modelu helikoptéry

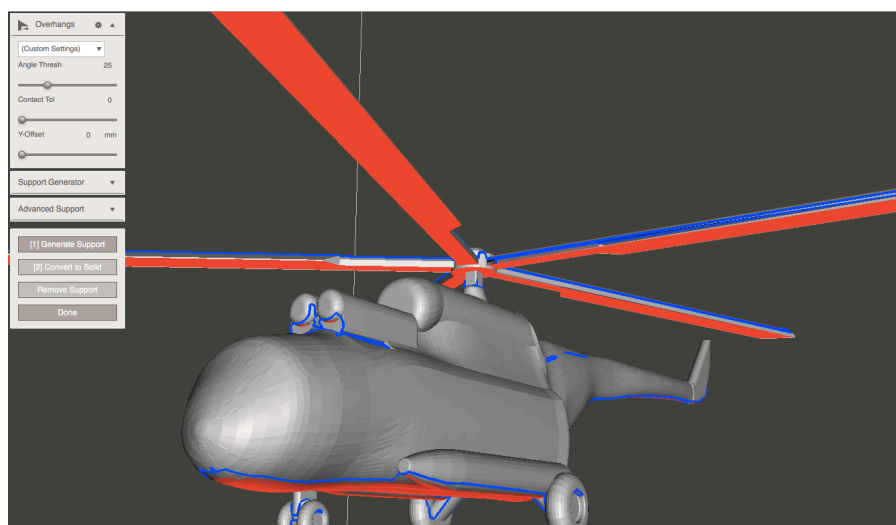
4.6.3 Analýza modelu helikoptéry, optimalizace a nastavení parametrů

Prostředí programu Autodesk Meshmixer umožňuje analyzování struktury modelu. Lze tak snadněji najít slabá místa, ve kterých by mohlo dojít k deformaci jak v průběhu tisku, tak při používání modelu. Materiál ABS je velmi pevný, umožňuje tedy tisk i tenkých vrstev, například „listy“ hlavního rotoru.



Obrázek 4.15: Pevnostní analýza modelu helikoptéry

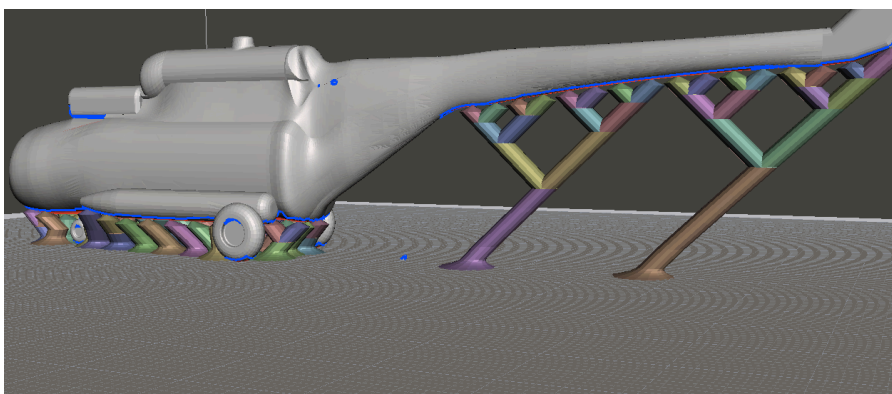
Nástroj Overhangs rozpozná místa, kde je vhodné využít podpůrných prvků. Vliv na úsporu materiálu a možnost redukovat podpěry má také poloha celého modelu na tiskové podložce. Model vrtulníku je nejvýhodnější tisknout v přirozené poloze a využít podpěr k zajištění spodní části trupu a ocasu.



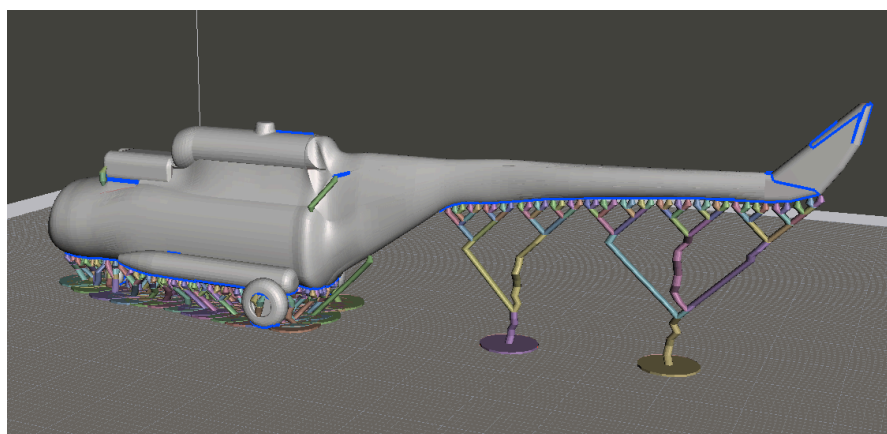
Obrázek 4.16: Oblasti podpěru (zvýrazněny červeně)

Tisk modelu helikoptéry vcelku je nevýhodný, proto se bude tisknout nejdříve trup a poté „listy“ hlavního rotoru. Značně se tak ušetří na materiálu a omezí se výskyt chyb způsobených odpadnutím podpěr od vyhřívané podložky. Části se po výtisku spojí. V případě použití ABS zajistí pevný spoj natavení materiálu roztokem acetonu a následné přiložení druhé součásti.

Model trupu helikoptéry je 170mm dlouhý, 32mm široký a 49mm vysoký. Oblast tisku 3D tiskárny Prusa I3 je 200 x 200 x 200mm.



Obrázek 4.17: Výhodné nastavení parametrů podpěr

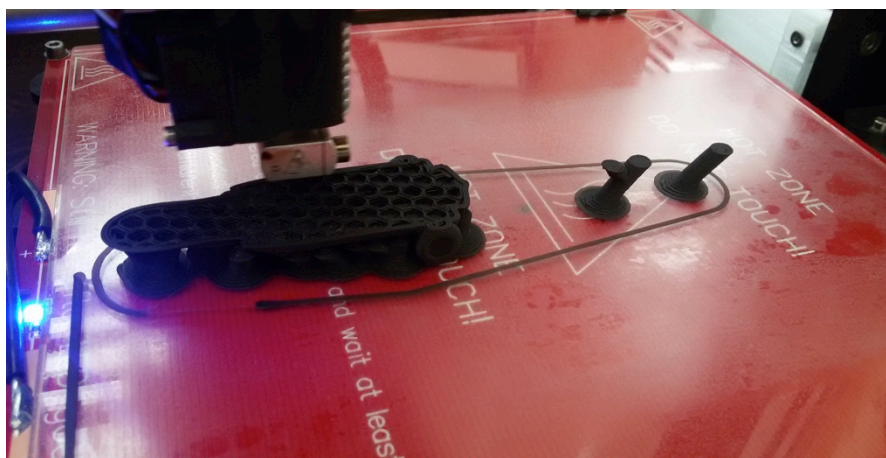


Obrázek 4.18: Nevýhodné nastavení parametrů podpěr

V modelu trupu byly optimalizovány ostré hrany, které jsou častou příčinou narušení vrstvy. Průměr podstavy byl zvýšen na 3,35mm, maximální úhel snížen na 44°, průměr první vrstvy podstavy zvýšen na 13mm a výška vrstvy snížena na 0,15mm. Tím je předejito odtržení podpěr i v nejvyšší bodech celého výtisku a zároveň vhodně nastaveno k úspoře materiálu.

Nastavení tiskových parametrů 3D tiskárny bude stejné jako v prvním případě tisku. Výška vrstvy tisku 0,252mm, výplň „honeycomb“, teplota trysky 285°C, teplota podložky 80°C, materiál ABS a maximální rychlost tisku 60mm/s. Připravený soubor se zašle 3D tiskárně, aby mohl začít tiskový proces.

Vrstvení jednotlivých podpěr probíhá již bez problému, které v případě prvního tisku modelu vedlo k jejich odtržení.



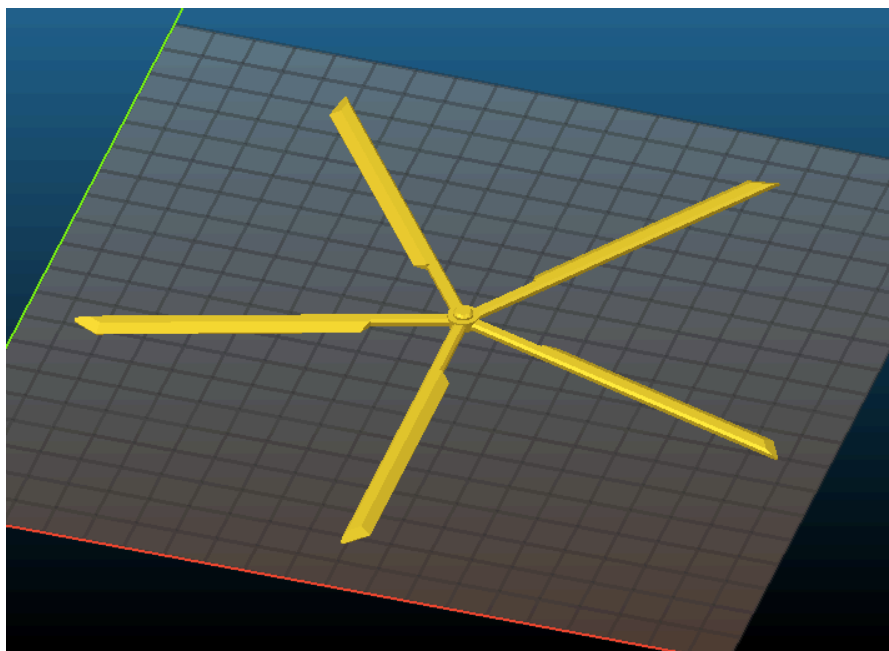
Obrázek 4.19: Průběh tisku vhodně zvolených podpěr

Důležitým parametrem je i doba tisku, která v případě tisku samostatného trupu modelu helikoptéry byla 2 hodiny 5 minut. Došlo k znatelnému snížení oproti původnímu rozvržení, a to hlavně díky oddělení hlavního rotoru.



Obrázek 4.20: Dokončení tisku trupu helikoptéry

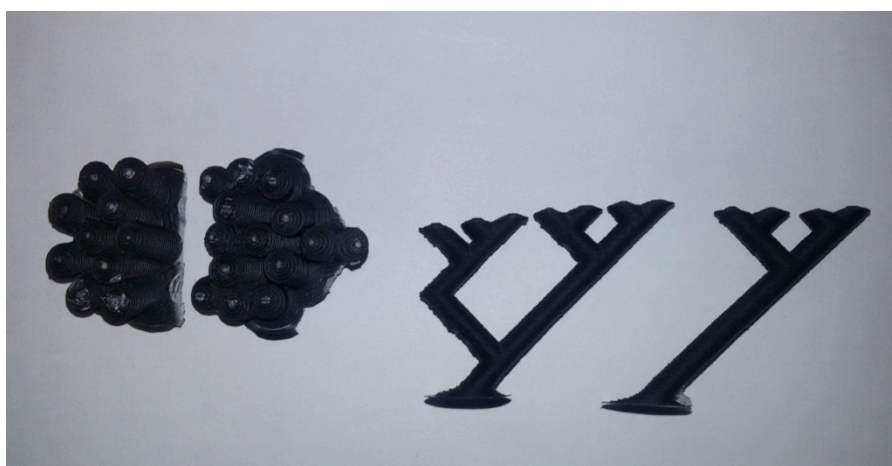
Příprava hlavního rotoru bude mít stejný průběh jako příprava trupu. Generování podpůrného systému není z hlediska tvaru prvku potřebné. Upraveny budou pouze tiskové parametry, protože „listy“ rotoru jsou velmi tenké (jejich výška je 2mm). Zjemněním rozlišení tisku (tedy snížením výšky vrstvy) bude dosaženo lepší soudržnosti jednotlivých vrstev kladeného materiálu a tisk bude přesnější.



Obrázek 4.21: Rozvržení hlavního rotoru před tiskem

Pro tisk druhé části helikoptéry je výška vrstvy snížena na 0,152mm s výplní „honeycomb“ a rychlost tisku ponechána na 60mm/s. Doba trvání tisku hlavního rotoru je s těmito parametry 15 minut.

Díky bodovému styku podpěr s částí trupu je možno tyto přebytky snadno odstranit odloupením.



Obrázek 4.22: Podpěry odloupené z části trupu

Po odloupení všech podpěr lze připevnit hlavní rotor k trupu celého modelu helikoptéry. Na spoj se nanese vrstva acetonu. Obě části je nutno pevně přiložit a po uplynutí krátkého okamžiku dojde k zatuhnutí.



Obrázek 4.23: Finální podoba modelu helikoptéry po kompletaci

5 Zhodnocení a závěr

S využitím optimalizačních programů lze zadaný model efektivně připravit pro danou technologii 3D tisku. Tato problematika byla v práci analyzována s ohledem na dostupnost technologie nízkonákladového tisku. Hardwarové i softwarové nástroje je možné přepracovávat do podoby, která vyhovuje zkušenostem uživatele. Bez znalostí materiálů, možností 3D tiskárny, tiskových parametrů a prostředí jednotlivých programů je efektivita celé optimalizace výrazně omezena.

Pro přiblížení operací týkajících se celého procesu, od rozvržení až po zaslání dat 3D tiskárně, byl vytvořen zkušební model helikoptéry složitějšího tvaru. Cílem bylo vhodné aplikování dostupných prvků v softwarovém prostředí, které v kombinaci s ostatními parametry napomohlo k volbě výhodného způsobu tisku. Pro porovnání byl nejdříve vytvořen návrh tisku, který ukázal nevhodné použití optimalizace.

Závěrem je i efektivní ušetření materiálu. V prvním případě tisku bylo ve finální fázi spotřebováno 24 gramů materiálu. Po pevnostní analýze, vhodném rozvržení podpěr, jejich nadimenzování a vhodném rozložení částí modelu vážil výtisk 18,3 gramů. Výsledkem je rozdíl, který ukazuje pokles celkové hmotnosti o 24% oproti prvotnímu návrhu.

Způsoby a metody v problematice analýzy modelů a jejich optimalizace nabízejí stále nové možnosti snadnějšího docílení bezchybnosti tisku, jak z hlediska funkčnosti, tak i tvaru. Můj pohled do této oblasti zaznamenal snahu vývojářů umožnit i méně zkušeným uživatelům dosáhnout výborných výsledků tisku bez nutnosti nadprůměrné znalosti všech faktorů ovlivňujících tuto problematiku.

Seznam použitých obrázků

<i>Obrázek 1.1:</i>	<i>První replikovaná tiskárna Dr. Adriana Bowyera a Vika Olivera [12].</i>	<i>7</i>
<i>Obrázek 1.2:</i>	<i>3D tiskárna Prusa I3 Plus [11]</i>	<i>8</i>
<i>Obrázek 2.1:</i>	<i>3D tiskárna „SLA 1“ od společnosti 3D Systems [13]</i>	<i>9</i>
<i>Obrázek 3.1:</i>	<i>Princip technologie FDM</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 3.2:</i>	<i>Princip technologie stereolitografie [4]</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 3.3:</i>	<i>Princip technologie SLS (obdobně funguje i technologie DMLS za použití kovového prášku) [4]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3.4:</i>	<i>Tvorba reálné vizualizace v programu Google SketchUp [8]</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 4.1:</i>	<i>Základní zobrazení Slic3eru po importu modelu helikoptéry</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 4.2:</i>	<i>Nastavování tiskových parametrů v programu Slic3r</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 4.3:</i>	<i>3D realizace náhledu vrstvy modelu helikoptéry</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 4.4:</i>	<i>2D náhled struktury vrstvení modelu helikoptéry</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 4.5:</i>	<i>Analýza chyb v prostředí programu Netfabb basic</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 4.6:</i>	<i>Analyzační prostředí softwaru Autodesk Meshmixer</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 4.7:</i>	<i>Stručný příklad topologické optimalizace při návrhu nosníku [10]</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 4.8:</i>	<i>Praktická ukázka 3D topologické optimalizace mechanické součásti dopravního letadla [10]</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 4.9:</i>	<i>Náhled před tiskem bez a s využitím technologie nákladově efektivního 3D tisku (prostředí programu Slic3er)</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 4.10:</i>	<i>3D realizace zvoleného modelu helikoptéry</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 4.11:</i>	<i>Generování podpěr v prostředí softwaru Autodesk Meshmixer</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 4.12:</i>	<i>Průběh tisku modelu helikoptéry</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 4.13:</i>	<i>Podpěra odtržená od vyhřívané podložky</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 4.14:</i>	<i>Následky špatné optimalizace modelu helikoptéry</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 4.15:</i>	<i>Pevnostní analýza modelu helikoptéry</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 4.16:</i>	<i>Oblasti podpěru (zvýrazněny červeně)</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 4.17:</i>	<i>Výhodné nastavení parametrů podpěr</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 4.18:</i>	<i>Nevýhodné nastavení parametrů podpěr</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 4.19:</i>	<i>Průběh tisku vhodně zvolených podpěr</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4.20:</i>	<i>Dokončení tisku trupu helikoptéry</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4.21:</i>	<i>Rozvržení hlavního rotoru před tiskem</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 4.22:</i>	<i>Podpěry odloupenuté z části trupu</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 4.23:</i>	<i>Finální podoba modelu helikoptéry po kompletaci</i>	<i>35</i>

Seznam použité literatury

- [1] BENDSOE, M. P. a O. SIGMUND. *Topology optimization: theory, methods, and applications*. 2. ed., corr. print. Softcover version of original hardcover edition 2003. Berlin [u.a.]: Springer, 2011. ISBN 9783642076985.
- [2] CANESSA, Enrique, Carlo FONDA a Marco ZENNARO. *Low-cost 3D Printing: for Science, Education & Sustainable Development* [online]. ICTP, 2013 [cit. 2015-04-03]. ISBN92-95003-48-9.
Dostupné z: http://sdu.ictp.it/3d/book/Low-cost_3D_printing_screen.pdf
- [3] *Cost-effective Printing of 3D Objects with Skin-Frame Structures* [online]. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: http://staff.ustc.edu.cn/~lgliu/Projects/2013_SigAsia_3DPrinting/default.htm
- [4] Easy CNC. *Informace o technologiích 3D tisku* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku>
- [5] FUTUR 3D: Human and Technology. *Materiály pro 3D tisk* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.futur3d.net/materialy-pro-3d-tisk>
- [6] Kraj Vysočina. *Životopis Josefa Průši* [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.kr-vysocina.cz/josef-prusa/d-4049540>
- [7] NC Computers. *Materiál nylon* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: http://www.nc.cz/3d-tiskova-struna-nylon-1-75mm-metraz-1m-cerna-nylon-filament-black-_d283726.html
- [8] Online SketchUp. *SketchUp info* [online]. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://onlinesketchup.cz>
- [9] O 3D. CHLEBO, Martin. *Časová linie 3D tisku I.* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/št%C3%ADtky/historie-3d-tisku>
- [10] On 3D Printing. *Topology optimization* [online]. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://on3dprinting.com/2013/04/23/3d-printing-conference-5-topology-optimization/>

- [11] Prusa Research s.r.o. *3D tiskárna Prusa I3* [online]. [cit. 2015-04-15].
Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/#i3-printer>
- [12] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. *Základy 3D tisku* [online]. 1. vyd. 2014
[cit. 2015-04-02]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi>
- [13] Spring: Engineering & Prototyping. *SLA Technology* [online]. [cit. 2015-05-18].
Dostupné z: <http://www.springitalia.com/img/azienda/storia-aziendale/1987-1.png>
- [14] 3D tiskárny. *3D tiskové materiály – jak fungují, materiál FLEX* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info/recenze/srovnani-3d-tiskovych-strun/>