



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**APLIKACE RAPID PROTOTYPING PRO VÝROBU
MODELŮ VOJENSKÉ HISTORICKÉ TECHNIKY**
APPLICATION OF RAPID PROTOTYPING FOR PRODUCTION OF HISTORICAL MODELS
OF ASSAULT FORCE VEHICLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ MALÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAN DVOŘÁČEK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ondřej Malý

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Aplikace Rapid Prototyping pro výrobu modelů vojenské historické techniky

v anglickém jazyce:

Application of Rapid prototyping for production of historical models of assault force vehicles

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Posouzení vhodnosti metod RP pro výrobu prototypů
3. Modelování součástí
4. Výroba prototypů
5. Výroba formy pro multiplikaci prototypu
6. Využití formy pro produkci modelů
7. Závěr

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce bude zaměřena na aplikaci technologie RP pro výrobu vojenské historické techniky. V úvodní části práce bude uveden rozbor vhodných metod RP pro danou aplikaci. Navazující část bude zaměřena na modelování jednotlivých součástí sestavy modelu, ze kterých budou vyrobeny prototypy určené pro výrobu silikonové formy. Závěr práce bude obsahovat porovnání prototypů vyrobených dostupnými metodami RP.

Seznam odborné literatury:

1. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1.vyd. 246s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů. In Mezinárodní vědecká konference 2005. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.
3. JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004, pp.112. ISBN 1860584659.
4. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society): Rapid Prototyping of Materials. The Minerals, Metals & Materials Society. 2002, pp. 615. ISBN 0873395301.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Dvořáček

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 3.2.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá procesem výroby a následným zhodnocením vyrobených modelů historické drezíny Steyr K2670 v měřítku 1:120. Pro zhotovení produktu byla použita technologie rapid prototyping, která vytváří objekty na základě virtuálních návrhů. Kvůli srovnání byl prototyp modelu stavěn na různých strojích, využívajících odlišné metody tvorby těles. Na základě výsledného produktu 3D tisku byla zhotovena silikonová forma, do níž se v podtlakové komoře následně odlévala modelářská pryskyřice. Závěrem je, že pro objekty s velmi drobnými detaily je vhodné zvolit stroj s velkou přesností, pracující s tenkými vrstvami materiálu. Prototyp je třeba před zaformováním opracovat, protože silikonová forma přenáší většinu detailů, například texturu povrchu tvořenou skladbou vrstev.

Klíčová slova

Rapid Prototyping, 3D Printing, FDM, Model Maker 3D Plotting, PolyJet, silikonová forma, podtlakové lití, resin

ABSTRACT

The paper deals with the production and subsequent evaluation of produced historical trolleys Steyr K2670 models at a scale of 1:120. For manufacturing of the product was used rapid prototyping technology, which creates objects based on the virtual designs. In order to compare, the prototype model was built on different machines, using different methods of making bodies. Based on the final product was produced 3D printing silicone mould, into which was casted the modeller resin in the vacuum chamber. The conclusion is that for objects with very fine detail, it is suitable to choose a machine with high accuracy, working with thin layers of material. The prototype needs to be shaped before creating mould because silicone mould transmits most of the details, such as the texture of the surface layer structure.

Key words

Rapid Prototyping, 3D Printing, FDM, Model Maker 3D Plotting, PolyJet, silicone mould, vacuum casting, resin

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MALÝ, O. *Aplikace Rapid Prototyping pro výrobu modelů vojenské historické techniky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Dvořáček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Aplikace Rapid Prototyping pro výrobu modelů vojenské historické techniky** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Ondřej Malý

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto ing. Janu Dvořáčkovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce, dále bych chtěl poděkovat panu Janu Sobotkovi a jeho firmě Hauler, která mi povolila využít pro práci jeden z jejich modelů, pomohla mi s výrobou formy a následným litím modelů. Děkuji také firmě MCAE, jmenovitě panu Viktoru Végnerovi a firmě BIBUS, jmenovitě panu Michalu Hlavinovi, kteří mi umožnili tisk prototypů pro účely bakalářské práce a poskytli mi spoustu poznatků k řešenému tématu. Rád bych také poděkoval rodině za podporu během studia.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 Posouzení vhodnosti metod Rapid Prototyping pro výrobu prototypů	9
1.1 Rapid prototyping.....	9
1.2 Volba vhodné metody výroby prototypu.....	9
1.3 Metoda 3D Printing	10
1.4 Metoda Fused Deposition Modeling	11
1.5 Metoda Model Maker 3D Plotting	13
1.6 Metoda PolyJet Matrix	14
2 Modelování součástí	15
2.1 Podklady pro modelování součástí.....	15
2.2 Autodesk Inventor	16
2.3 Modelování součástí v softwaru Inventor	17
3 Výroba prototypů.....	19
3.1 Softwarová podpora tisku	19
3.2 Výroba na stroji ZPrinter 650	21
3.3 Výroba na stroji Fortus 400mc	23
3.4 Výroba na stroji Solidscape T76	25
3.5 Výroba na stroji Objet30 Pro	27
3.6 Porovnání výroby a zhodnocení výsledných prototypů	29
4 Výroba formy pro multiplikaci prototypu.....	34
4.1 Zaformování prototypů.....	34
4.2 Odformování prototypů	36
5 Využití formy pro produkci modelů	38
5.1 Příprava formy na lití	38
5.2 Lití finálního produktu	39
5.3 Zhodnocení finálního produktu.....	40
6 Závěr	43
7 Zdroje.....	44
8 Seznam použitých zkratk	47
9 Seznam Obrázků a tabulek.....	48

ÚVOD

Cílem práce je zkonstruovat a následně pomocí technologie rapid prototyping vyrobit model obrněné drezíny Steyr K2670, kterých bylo v rakouské firmě Steyr-Daimler-Puch AG vyrobeno pouze 40. Drezínu využívala během druhé světové války německá armáda jako průzkumný prostředek nebo, při sestavení do obrněného vlaku, jako nástroj k protipartizánské činnosti, na Balkáně. Vzhledem ke své nepřilíš vysoké váze, neměly tyto stroje problém působit i na zdejších nekvalitních tratích. Drezína měla hmotnost 7,5 tuny (bojová hmotnost 9,5 tuny) při tloušťce pancíře 14,5 mm. Posádku tvořilo 5-8 mužů, kteří mohli využít šesti střílen pro kulomet a dosáhnout s drezínou rychlosti až 60 km/h při dojezdu 400 km. Reálné rozměry drezíny jsou 5690 x 2520 x 2270 mm v poměru délka x šířka x výška. Po druhé světové válce využívala tyto stroje polská Služba Ochrany Kolei (Železniční ochranná služba) v počtu 4 kusů.¹

Maketa bude vyrobena v měřítku 1:120, které je využíváno především pro modely železniční techniky a je označováno písmeny TT, což naznačuje, že se model celé železnice vejde i na desku stolu (table top – deska stolu)². Při tvorbě modelů historické vojenské techniky je někdy obtížné získat dostatečné množství informací, což platí zvláště o strojích vyrobených v menších počtech kusů. Přesto je od sběratelů vyžadována co největší přesnost a věrnost modelu, který by měl představovat součást jejich kolekce. Podmět k tvorbě modelu vojenského vozidla v rámci této práce vznikl na základě spolupráce s firmou Hauler, s níž bylo již dříve dokončeno a uvedeno na trh několik projektů. Hauler je firma sídlící v Brně, která se zabývá tvorbou modelů spojených s válečnou tematikou a zařazuje technologii rapid prototyping do svého výrobního procesu pro zlepšení kvality výsledných produktů.

Po získání prototypu je třeba jej multiplikovat, což bude realizováno pomocí formy vytvořené z gumy, která umožňuje vyobrazení i velmi drobných detailů. Litým materiálem se stane hmota označovaná modeláři jako resin, což je licí pryskyřice. Odlévání bude prováděno v podtlakové komoře, která vysává z formy během lití veškerý vzduch, čímž je zaručeno, že ve výsledném modelu nebudou vzduchové bubliny.

1 POSOUZENÍ VHODNOSTI METOD RAPID PROTOTYPING PRO VÝROBU PROTOTYPŮ

1.1 Rapid prototyping

Pojmem Rapid prototyping vymezuje soubor technologií, jež tvoří součást aditivní metodou, což je opakované nanášení vrstev materiálu konstantní tloušťky. Hlavním cílem jeho využití je zkrácení času mezi virtuálním návrhem a získáním hmotného prototypu, který může být určen jak k vizuální presentaci, tak i k testování funkčnosti³.

Rapid prototyping je od svého uvedení na trh koncem 80. let stále více aplikovanou metodou v oblasti tvorby prototypů a nachází uplatnění i v rozmanitých oborech od šperkařství až po medicínu, kde je využívána například ve stomatologických laboratořích⁴. Brazilský konstruktér Jorge Lopes Dos Santos dokonce využil rapid prototyping ke zkoumání dítěte v prenatálním období, když nechal jeho podobiznu vytisknout pomocí dat z CT, MRI a ultrazvuku⁵. Takto vytvořená podobizna dítěte může pomoci lékařům k vyšetření, ale také umožňuje nevidomým rodičům „dotknout se“ dítěte před porodem a tím získat povědomí o jeho vzhledu. Pole působnosti této technologie se neustále rozrůstá, na což v srpnu 2012 reagovala vláda USA v čele s Barackem Obamou, která založila „National Additive Manufacturing Innovation Institute - NAMII“ (Národní institut pro inovace v aditivní výrobě), jehož součástí je také NASA, a který má svým rozpočtem 70 milionů dolarů podpořit rozvoj aditivních technologií a zpřístupnit jejich využití⁶.

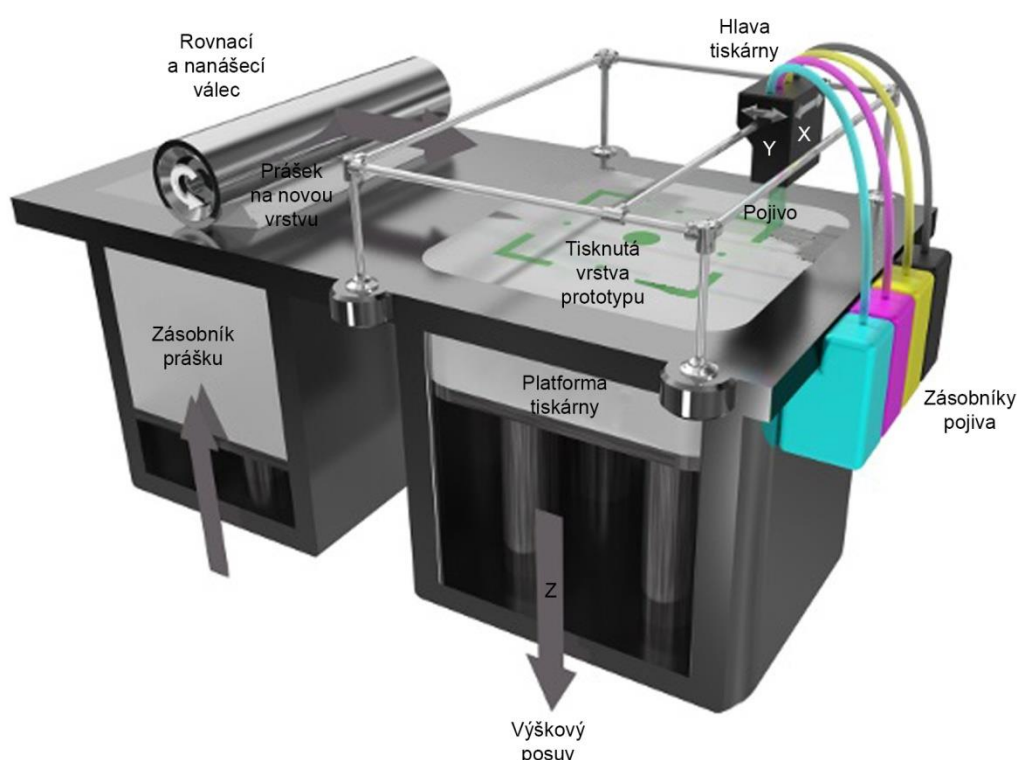
1.2 Volba vhodné metody výroby prototypu

Zvolit vhodnou metodu 3D tisku je pro samotnou výrobu modelu velmi podstatným krokem. Nejdůležitějším faktorem ve volbě je tloušťka tisknuté vrstvy a přesnost s jakou je schopen stroj vrstvu vyrobit, což jsou parametry, které značně ovlivňují kvalitu výsledného 3D modelu. Velmi podstatnou součástí volby je také materiál, ze kterého je prototyp tvořen. Dnešní široké spektrum metod a jimi aplikovaných materiálů nám umožňuje vytvářet křehké komponenty, využívané například pro presentaci, ale i prototypy mající pevnost reálných součástí, díky nimž lze zamýšlený díl velmi brzy po jeho návrhu otestovat⁷. Existují dokonce pružné materiály, pomocí nichž můžeme provádět zkoušky chování pryžových součástí⁸. Dalším podstatným hlediskem je výrobní čas. Některé z dnes dostupných strojů mohou tisknout velmi rychle (stroj ZPrinter 650). Práce tiskárny poté probíhá v řádu hodin. Pokud vyžadujeme, aby náš prototyp byl velmi přesný, je třeba počítat s výrobním časem v řádu desítek hodin až celých dnů. Faktor výrobního času je explicitně závislý také na velikosti tisknutého modelu, která je následně důležitá při volbě stroje, jenž je definován tisknutelnou plochou (souřadnice X, Y) a maximální výškou vyráběného prototypu (Z). Mezi běžně využívanými tiskárnami nalezneme velmi malé, které se upotřebí například k výrobě šperků (stroj Solidscape T76), ale i rozměrné, jež jsou schopny vyrobit prototyp o velikosti bloku motoru osobního automobilu (stroj Fortus 900mc).

Pro výrobu součástí tak detailní a malé jakou se zabývá tato práce, je nutné zvolit metodu velmi přesnou, která bude schopna vyrobit i detaily o velikosti desetin milimetru a zároveň vytvoří co nejkvalitnější povrch, jehož nepřesnosti by se jen velmi málo projevily při závěrečném odlévání. Za účelem finálního srovnání byly pro tisk zvoleny i metody, jež nevyhovují předchozímu požadavku. V případě méně přesných metod byl model vytištěn v měřítku 1:48, které využívají především modeláři letecké techniky a je 2,5 násobkem měřítka TT.

1.3 Metoda 3D Printing

Jedná se o technologii, která je založena na spojování prášku pojivem⁹. Celý proces tisku začíná nanesením a zarovnáním vrstvy stavěcího polotovaru (prášku) o tloušťce asi 1 cm na pracovní platformu tiskárny. Poté je do prášku pomocí tiskových hlav nanášeno pojivo na plochu, která je v objemu budoucího modelu. Po nanesení pojiva na plochu celé jedné vrstvy se posune pracovní platforma stroje v záporném směru osy z. Posuv má hodnotu tloušťky jedné vrstvy. Následuje nanesení prášku, jeho uválcování a zarovnání nožem do stejné úrovně, v jaké se nacházela předchozí hladina. Z toho plyne, že pohyb ve směru osy Z, vykonává pracovní plocha tiskárny, a posuvy v osách X a Y pokrývá tisknoucí hlava, viz Obr. 1. Celý proces se opakuje až do vytvoření vyráběného tělesa nebo těles.

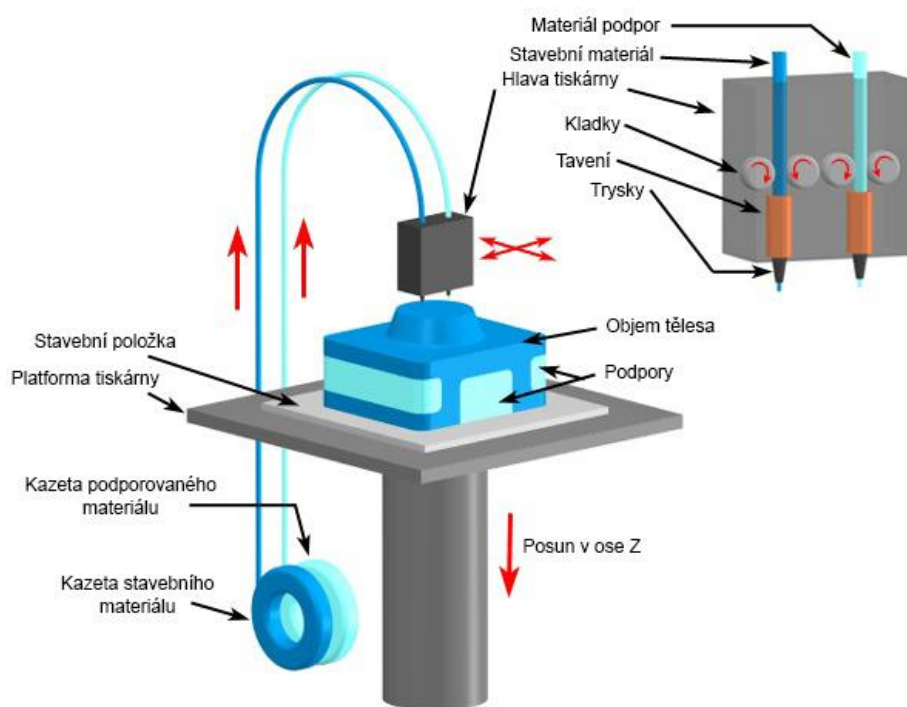


Obr. 1 Schéma metody 3D Printing¹⁰.

Podstatným kladem této technologie je její rychlost a také schopnost tvořit vícebarevné modely za využití barevného pojiva, což upřednostňuje tiskárny využívající metody 3D Printing k tvorbě prototypů určených k presentaci velmi rychle po dokončení návrhů a také k výrobě zmenšených replik 3D exponátů vystavovaných v muzeu⁷. Jako stavební látku i pojivo lze použít více druhů materiálů, což následně umožňuje vytvořit prototypy s velkou odolností v tlaku, tenkostěnné součástky, komponenty s vlastností pryže nebo i formy pro odlévací a vstřikovací technologie¹¹. Pozitivem je také tisk bez podpor, které jsou suplovány okolním, pojivem nesceleným práškem, který je následně recyklován a využíván při dalším tisku, čímž dochází k značným úsporám. Nevýhodou je ovšem nepřilíživý povrch, jehož dokonalost strádá i následným vydrolováním, kterým může dojít i k velmi malým změnám rozměrů. Proto je nutné povrchy ještě naimpregnovat infiltrantem, čímž dojde k jejich finálnímu vytvrzení.⁷

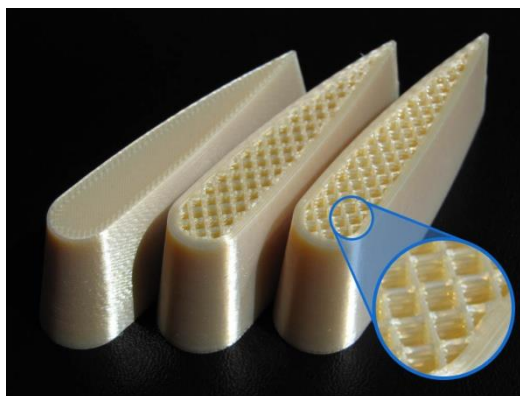
1.4 Metoda Fused Deposition Modeling

Metoda Fused Deposition Modeling (FDM) se zakládá na odvíjení termoplastického materiálu ve formě drátu ze zásobníku, který tvoří cívka. Polotovár je následně veden přes soustavu kladek skrz trysku, kde je nataven (viz Obr. 2).



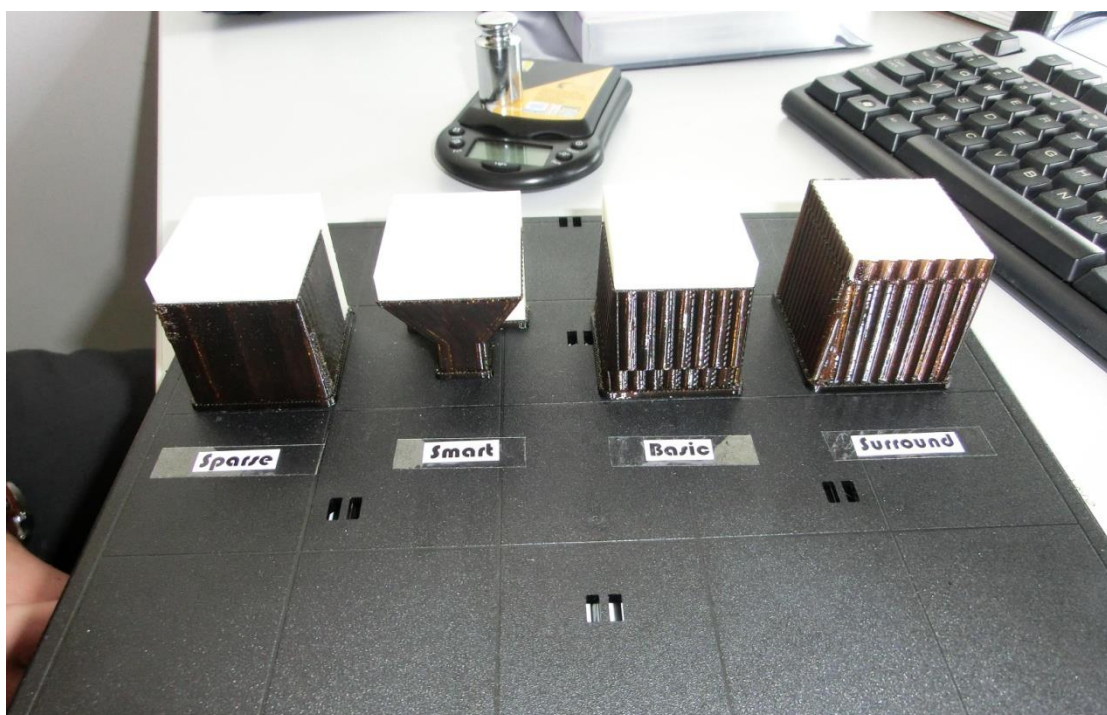
Obr. 2 Schéma metody Fused Deposition Modeling¹².

Existují i stroje využívající polotovaru ve formě kuliček, jež jsou do trysky zaváděny pomocí násypky¹³. Natavený materiál se dále přivádí v polotečném stavu na pracovní plochu tiskárny, kterou představuje vyměnitelná plastová podložka (viz Obr. 4) a v předem určeném sledu operací začne tvořit vrstvy modelu. Nejprve jsou vyhotoveny obvodové křivky definující povrch modelu a následně uzavřené plochy, které tvoří jeho vnitřní objem. Vnitřní objem může být v rámci úspor materiálu zhotoven jako voština, což je síť tenkých stěn, viz Obr. 3. V softwarech je tento prostor označen slovem sparse, v překladu řídký.



Obr. 3 Voština¹⁴.

Prototyp je budován pomocí dvou odlišných materiálů, jež jsou na pracovní platformu stroje dopravovány každý svou vlastní tryskou. Primární materiál tvoří objem součásti a sekundární zastává funkci podpor, jejichž tvar je definován obslužným softwarem stroje. Obsluha tiskárny volí mezi více druhy podpor (viz Obr. 4). Nejvyužívanějším druhem je podpora Smart, která šetří materiál. Surround je podpora určená na vysoké prototypy, protože jejím požitím dochází k obalení téměř celého povrchu, čímž je zamezeno zlomení prototypu. Sparse je podpora v podobě prototypu s voštinou a Basic je základní podpora bez zvláštních specifikací.



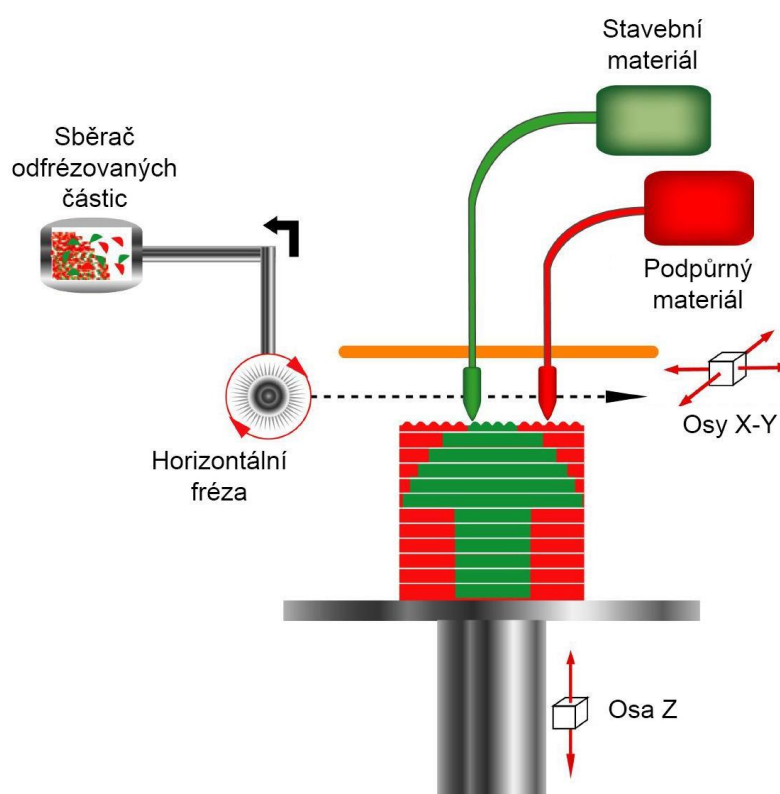
Obr. 4 Druhy podpor u metody Fused Deposition Modeling vytvořené plastové podložce.

Vytlačované hmoty při kontaktu se vzduchem tuhnou. Trysky stavěcího i podporového materiálu jsou umístěny na jedné hlavě, která koná pohyby v rovině XY a tvoří tak jednotlivé vrstvy objemu. Pracovní plocha tiskárny poté koná pohyby ve směru osy Z, vždy po vyhotovení celé vrstvy o její tloušťku a to v záporném směru (viz Obr. 2). Vrstvením je postupně vytvořen celý model, ze kterého je na konci procesu ještě nutno odstranit podpurný materiál. Odstranění se provádí mechanickým způsobem nebo ponořením součásti do speciálního roztoku. Záleží na druhu podpor.

Výhodou technologie FDM je schopnost vyrábět prototypy z kvalitních materiálů, které mají pevnost reálných součástek a lze je využít k testování funkčnosti. Proces tisku lze v jeho průběhu zastavit, vyměnit stavební materiál a tisknout tak prototyp s rozdílnými vlastnostmi v jeho odlišných sférách. Tvorba modelů technologií FDM je levná a poměrně rychlá¹⁵. Nevýhodou je však omezená přesnost daná tvarem kladeného materiálu a průměrem výstupního otvoru trysky. Termoplastický materiál navíc podléhá smrštění při ochlazování (tuhnutí) a tím dochází k dalším rozměrovým nepřesnostem, kterým lze zabránit vhodným nastavením v příslušném softwaru³.

1.5 Metoda Model Maker 3D Plotting

Technologie Model Maker 3D Plotting využívá ke stavbě modelu dva druhy termoplastické hmoty. Tvorba prototypu probíhá podobně jako u inkoustové tiskárny tryskáním drobných kapiček roztaveného materiálu na platformu tiskárny, kde okamžitě tuhne. Primární termoplastická hmota, z níž je tvořen objem budoucího prototypu, má vyšší teplotu tání, než hmota sekundární využívaná ke stavbě podpor. Nanášením dalších kapiček materiálu na již zaschlé je postupně vytvořen objem tělesa. Hlava tiskárny je schopna vytrysknout až 12000 kapiček za sekundu¹⁶. Průměr kapiček se pohybuje kolem 0,076 mm, což umožňuje zhotovení detailů v setinách milimetru¹³. Po vytvoření každé vrstvy dochází k mezioperaci, což je frézování vytvořené plochy frézou s horizontální osou rotace (viz Obr. 5). Třísky jsou odsávány do sběrače částic. Tento postup je důležitý, kvůli zarovnání vrstvy na její předdefinovanou tloušťku. Hlava, již představují dvě trysky, na stavěcí a podpurný materiál, tvoří geometrii každé vrstvy posuvů v rovině XY. Pohyb ve směru osy Z zajišťuje pracovní plocha tiskárny na mikrometrickém šroubu a spolu s horizontální frézou tak určují tloušťku jednotlivých kroků. Po vytvoření celého tělesa jsou odstraněny podpory, které tvoří termoplastický materiál o nižší teplotě tání, jejich odtavením.

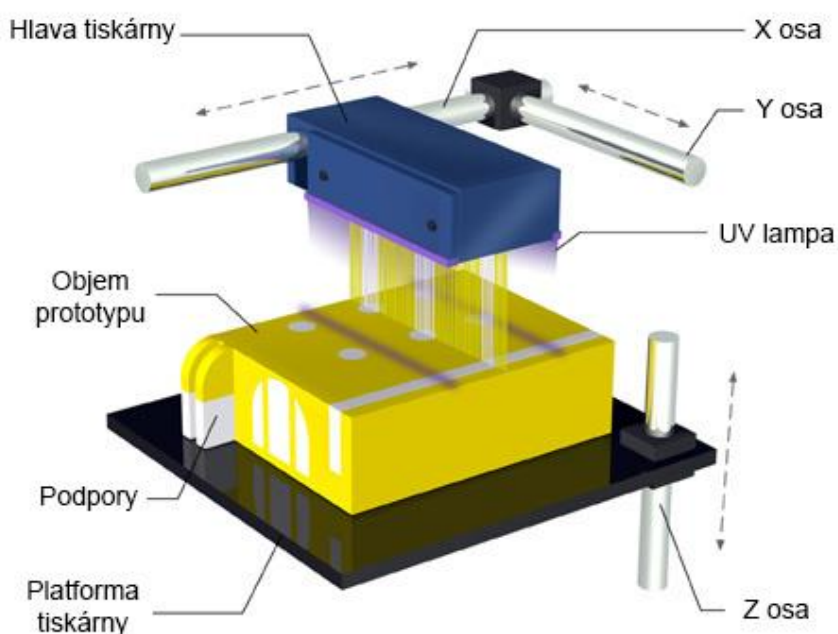


Obr. 5 Schéma metody Model Maker 3D Plotting¹⁷.

Předností této metody je její přesnost, která se pohybuje v setinách milimetru. Předměty vytvořené pomocí tiskáren využívající technologii Model Maker 3D Plotting nacházejí uplatnění ve šperkařství, zubních laboratořích nebo také při slévárenských operacích. Například při tvorbě silikonových forem a při lití na vytavitelný model. V neposlední řadě je velkým kladem kvalita povrchu prototypu. Nevýhodou je značně dlouhá doba tisku, což zapříčiňuje i její vysokou cenu. Touto technologií jsou vyráběny modely spíše menších rozměrů s velkými nároky na detail.

1.6 Metoda PolyJet Matrix

Metodu zavedla na trh izraelská firma Objet a jedná se o technologii tvořící prototyp na základě vytvrzování materiálu s fotorpolymerní složkou pomocí UV záření⁸. Tisk probíhá nanesením drobných kapiček materiálů, které jsou následně vyhlazeny nožem a vytvrzeny UV lampou zabudovanou přímo v tiskárně. Lampa je stejně jako nůž součástí hlavy stroje, která dopravuje do pracovního prostoru materiál, viz Obr. 6. Hlava koná pohyby v rovině XY a za využití všech svých funkcí vytváří vrstvy součástí. Po nanesení a vytvrzení každé vrstvy se pracovní plocha tiskárny posune pomocí mikrometrického šroubu o její tloušťku v záporném směru osy Z. Opakováním těchto operací je postupně zhotoven celý prototyp. Podpory jsou zde tvořeny stejným materiálem jako součást, jen s tím rozdílem, že neobsahují fotorpolymerní složku a mají tedy po dokončení tisku gelovou konzistenci. Odstranění podpor probíhá otryskáváním vodou. Otryskaný materiál už není dále nijak využitelný.



Obr. 6 Schéma metody PolyJet Matrix¹⁸.

Předností metody PolyJet matrix je tisk s využitím více materiálů rozdílných vlastností na jednom prototypu. Například lze vytisknout kalkulačku s pevnou konstrukcí a pryžovými tlačítky nebo model lidské nohy, jejíž svalovina bude průhledná a kosti viditelné. Tiskárny využívající technologii PolyJet Matrix jsou také schopny tvořit tělesa po velmi tenkých vrstvách a v relativně krátkém časovém horizontu. Nevýhodou metody je naopak obtížné odstraňování podpor, při kterém dochází ke značné spotřebě vody. Podpory navíc představují velké množství odpadu a po jejich odstranění by měl být prototyp vystaven UV záření, aby dosáhl požadovaných vlastností. Většina materiálů používaných touto technologií odolává teplotám do 50 °C, po překročení této hodnoty může dojít k distorzi¹⁹.

2 MODELOVÁNÍ SOUČÁSTÍ

2.1 Podklady pro modelování součástí

Podkladem pro tvorbu modelu byla předchozí maketa zhotovena v měřítku 1:87. Model pro tuto maketu byl vytvořen ručně a měl tedy určité chyby a nepřesnosti vůči pravé podobě drezíny. Chyby byly zapříčiněny velmi obtížným vytvářením značně malých detailů manuálně. Z makety byla pomocí posuvného měřítka odměřena většina rozměrů. Pouze hlavní rozměry, které zde byly již udány, byly převedeny přesně do měřítka 1:120. Dalšími podklady se staly dobové i aktuální fotografie získané ze serverů zabývajících vojenskou technikou a také z časopisů se stejnou tematikou, viz Obr. 7. Pomocí fotografií byly do virtuálního modelu přidávány detaily, které předchozí maketa neobsahovala. Přesné rozměry detailů nebyly známy, ale jejich hodnota byla odvozena, na základě fotografií reálných vozidel pomocí poměrování.



Obr. 7 Dobová fotografie drezíny Steyr K2670²⁰.

2.2 Autodesk Inventor

Pro tvorbu virtuálních modelů a jejich sestavy byl zvolen program Autodesk Inventor 2010. Tento software vytvořila firma Autodesk, která produkuje ještě řadu dalších programů, jako je například AutoCAD. Inventor je globálně jedním z nejvyužívanějších softwarů, který nabízí komplexní sadu nástrojů a aplikací pro digitální tvorbu strojírenských součástí a sestav. Pomocí tohoto programu lze provádět různé simulace a analýzy součástí, dynamické presentace, sestavení dílů do funkčních celků a tvorbu výkresové dokumentace. Mezi nejvyužívanější konkurenční softwary patří SolidWorks, Catia a ProEngineer.

V programu Inventor jsou virtuální modely tvořeny pomocí přesně definovaných, takzvaných parametrických 2D a 3D náčrtů. Náčrty slouží k postupnému přidávání a ubírání objemových prvků pomocí funkcí. Téměř každý příkaz potřebuje pro svou realizaci minimálně jeden náčrt a jeden parametr. Jsou ovšem i funkce, jež může tvořit velké množství náčrtů. K takovým nástrojům patří například šablonování. Mezi další nástroje využívající náčrty patří vysunutí, rotace, tažení, reliéf, otvor, skořepina a další. Software Inventor obsahuje ale i příkazy, které již náčrt nepotřebují a využívají objemů a hran již vymodelovaných prvků. Jedná se o funkce jako je zkosení nebo zaoblení hrany, kombinace dvou těles, odvození stávajícího tělesa do jiného měřítka, kruhové a obdélníkové pole a v neposlední řadě zrcadlení. Velmi užitečnou pomůckou při tvorbě součástí jsou roviny, které lze v programu Inventor zadávat v rozmanitých vzdálenostech a úhlech, díky čemuž je umožněno vytvořit potřebný náčrt kdekoliv na povrchu nebo vně tělesa.

Inventor je uzpůsoben nejen k modelování jednotlivých těles, ale i k zhotovení sestav, výkresů a animací. Na začátku každé tvorby je třeba v počítači založit složku se specifickým souborem, která je nazývána projektem. V projektové složce jsou poté ukládány všechny soubory vytvořené k danému projektu. Stavebním souborem projektu jsou modely jednotlivých součástí. Ty lze skládat do sestav. Součástí nabídky při tvorbě sestavy je i takzvané obsahové centrum, jež nabízí tisíce normalizovaných součástí, jako jsou například ložiska a šrouby, které není třeba kreslit, což značně ulehčuje práci. Spojování různých součástek do sestavy se provádí pomocí vázání ploch, os nebo rovin daných těles na sebe. Takovým vázáním lze dosáhnout buď nepohyblivého spoje, nebo spoje, který má určité stupně volnosti, jako v realitě. Na základě sestav a jednotlivých modelů je možné tvořit výkresy.

Po zodpovědném a správném ukládání součástí do projektových složek k tomu určených získává uživatel výhodu v rychlém a v částečném rozsahu bezproblémovém dimenzování součástí, což umožňuje parametrické zadávání rozměrů a hodnot v modelu. Může se například stát, že se po spojení dílů do sestavy objeví kolize, které sám program Inventor jednou z jeho funkcí odhalí. Poté může uživatel kolidující objemy předělat pouze změnou parametrů. Změna se poté projeví ve všech na tuto součást vázaných souborech, myšleno sestavách a výkresech. Dimenzování má ovšem omezené hranice. Změna geometrie některé z částí modelu může vést ke zrušení jiného prvku tvořícího model, který je v pomyslném stromu příkazů umístěn až za měněným prvkem. Strom příkazů je schéma, v němž jsou znázorněny všechny operace, v návaznosti na sebe, které byly provedeny za účelem zhotovení modelu. Schéma usnadňuje změnit jednotlivé parametry virtuálního modelu. U velmi složitých součástí může ovšem nastat problém při změně některých parametrů, protože dochází k automatickému přezkoumání geometrie celého stromu, což značně zatěžuje počítač a může také dojít k narušení geometrie virtuálního 3D modelu.²¹

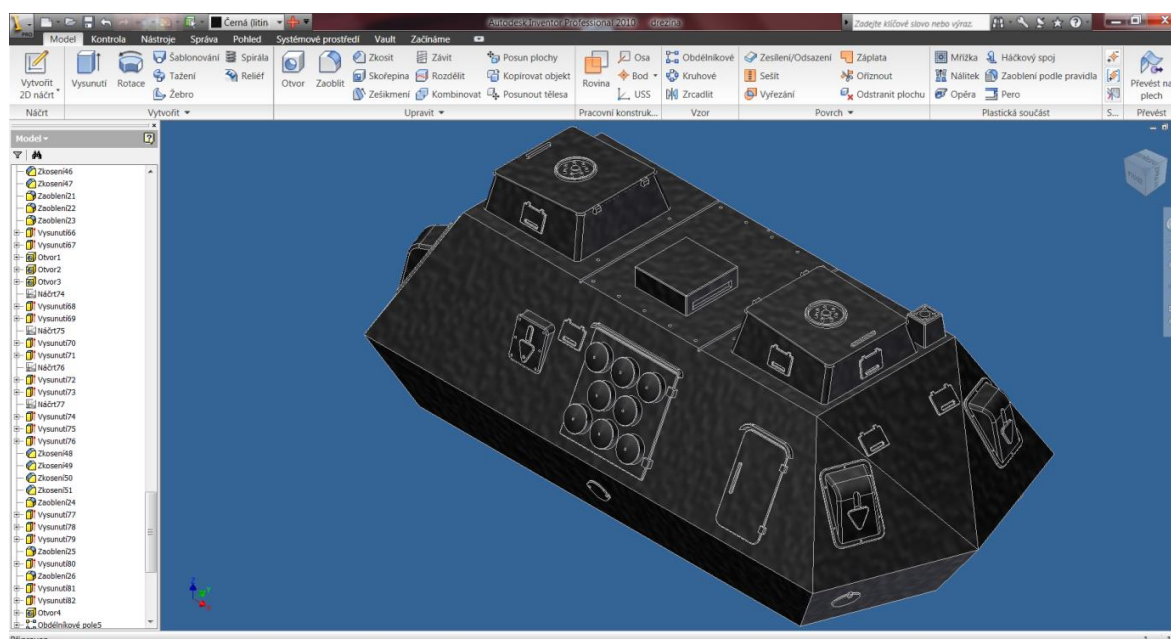
2.3 Modelování součástí v softwaru Inventor

Před zhotovením virtuálního prototypu každé součásti je důležité promyslet systém modelování. Při tvorbě součásti drezína bylo vycházeno z hranolovitého tělesa, které tvoří vysunutí půdorysného obvodového tvaru kabiny drezíny. Následně bylo ještě nutné odstranit čelní plochu, což bylo realizováno pomocí roviny určené třemi body, která po přepnutí do režimu náčrtu vyznačila řez tělesem. Tento řez tělesem reprezentoval uzavřený náčrt, jenž byl použit pro příkaz vysunutí prázdného objemu, který v podstatě umazává objemy těles. Poté byly všechny hrany zkosením přetvořeny do reálného vzhledu pancéřovaného vozidla. Po dokončení hrubého tvaru horní části drezíny byly řešeny větší a následně i drobné detaily celku, jako jsou věže, dveře, větrání, střílny a průzory. Všechny prvky byly tvořeny pomocí vysunutí, zkosování a zaoblování hran. Pokud šlo o párové části, bylo co nejvíce využíváno příkazu zrcadlení, k němuž byly upotřebeny roviny vedoucí středem drezíny.

Dalším prvkem znázorňovaným na daném modelu jsou nýty spojující části pancéřovaného stroje. Z předchozích zkušeností bylo zjištěno, že kvůli úpravám povrchu před litím, je lepší nýty kreslit jako díry, protože výstupky by byly při vyhlazování součástí po tisku odstraněny. Tvorba děr probíhala namodelováním jedné z nich a následným využitím příkazu obdélníkového pole, jenž rozmístí jakékoliv prvky do řad podle konstruktérem definovaných rozměrů.

Všechny drobné, naznačené části drezíny jsou poté vysunuty z povrchu hlavního tělesa pouze o 0,15 mm, aby byly po lití viditelné. Stejnou hodnotu mají i zářezy viditelné v horní části modelu, jež znázorňují oddělené pláty pancíře. Závěrem bylo třeba v součásti drezína vymodelovat dutinu z důvodu úspory materiálu a také kvůli rovnoměrnému tuhnutí po lití.

Finální virtuální model součásti drezína lze vidět na Obr. 8.



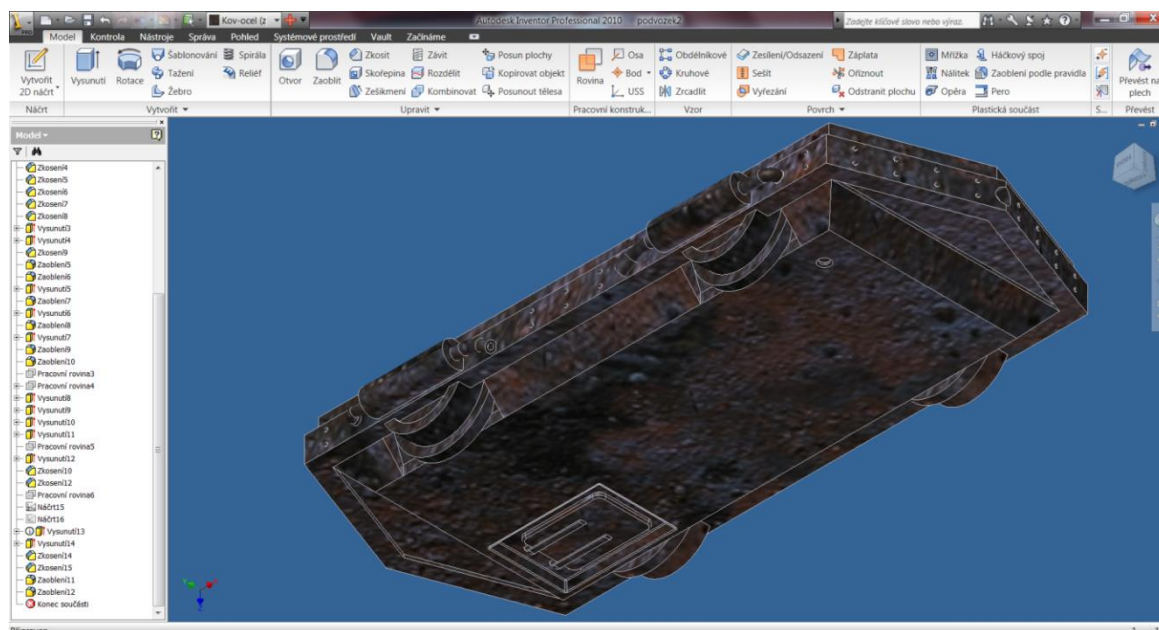
Obr. 8 Model součásti drezína v softwaru Inventor.

Při tvorbě součásti podvozek bylo podstatné vycházet z tvaru připravené dutiny v součásti drezína, pro kterou bylo třeba vytvořit objem tělesa, jenž je jejím negativem. Poté odebráním objemu z krajů základu podvozku, za pomoci funkce náčrtu s názvem odsazení, vzniklo těleso, které při spojení s již vymodelovanou součástí drezína tvoří kolem svého obvodu drobnou spáru o šířce 0,2 mm. Tato mezera je podstatná s ohledem na možné chyby vzniklé při lití, ale také jako prostor pro lepidlo. Obě zmíněné funkce spáry jsou důležité pro bezproblémové a správné sestavení dílů do celku. Stejného principu je třeba dodržet u díry viditelné ve přední části podvozku, určené k umístění zavěšení.

Dále byl vytvořen základní tvar podvozku pomocí příkazů vysunutí, zkosení a zaoblení. Za využití funkce rotace vznikly kola drezíny. Předposlední zhotovovanou částí byly výfuky, jejichž konstrukce vyžadovala dva kroky, a to vysunutí objemu s větším průměrem a navazujícím tažením výfukové trubky. Tažení je funkce, vyžadující ke své realizaci dva náčrt, a sice profil a jeho trajektorii, což v případě součásti podvozek představuje průřez výfuku a jeho osu.

Závěrem bylo nutné zhotovit nýtování. Zde na rozdíl od součásti drezína nýty vystupují z objemu, jelikož plocha, na níž se nachází, je malá a nýtu je mnoho. Povrch, na němž jsou nýty, tedy nebude po stavbě prototypu nijak upravován. Všechny výstupky byly vytvořeny pomocí vysunutí jednoho z nich a následným užitím příkazu obdélníkové pole.

Finální virtuální model podvozku lze vidět na Obr. 9.

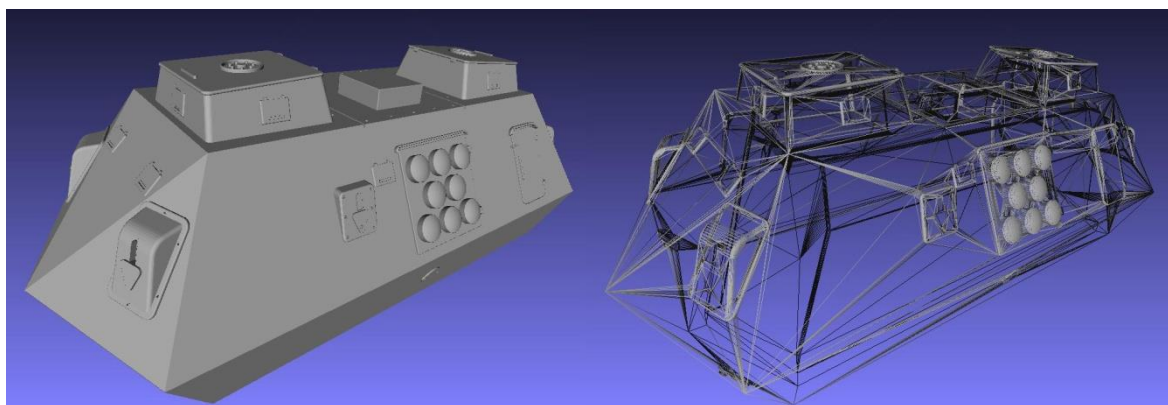


Obr. 9 Model součásti podvozek v softwaru Inventor.

3 VÝROBA PROTOTYPŮ

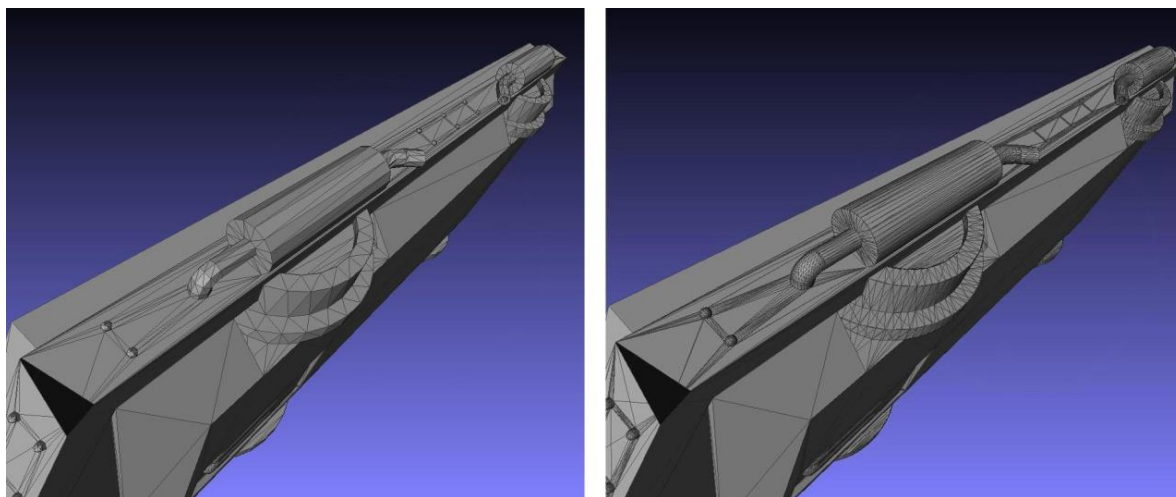
3.1 Softwarová podpora tisku

Cesta od virtuálního modelu vytvořeného v programu Inventor k reálnému prototypu vede nyní přes soubor s příponou STL (Standard Triangulation Language - STereoLithography) a software s ním pracující²². *.stl soubor je tvořen soustavou trojúhelníkových polygonů, jejichž plochy definují povrch modelu (viz obr. 10) a je vygenerován exportováním dat v softwaru Inventor do formátu STL. STL souborový formát je používám především pro technologie rapid prototyping a vznikl zároveň s jejich první metodou, Stereolitografií.



Obr. 10 STL model a jeho trojúhelníkové polygony.

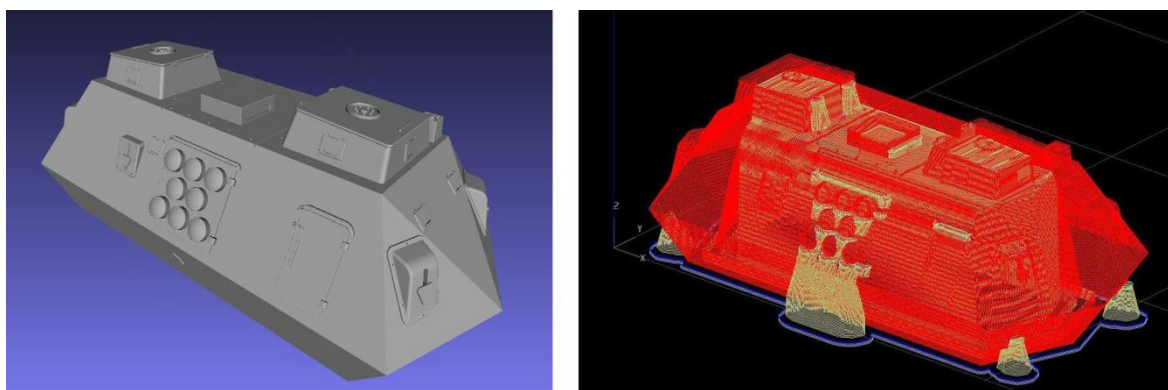
Při tvorbě STL dat je třeba dbát na jejich kvalitu, která je volena při generování. Kvalitu představuje hustota trojúhelníků, jimiž je rozdělena plocha. Lze tedy říci, že model v STL formátu nemá žádný oblý povrch, protože všechny zakřivené plochy jsou rozčleněny na soustavu trojúhelníkových rovin. Konstruktor volí, jak detailní rozčlenění bude (viz Obr. 11) a tím ovlivňuje také kvalitu výsledného prototypu. S velkou hustotou trojúhelníkových polygonů roste také datová velikost souboru, což se může nepříznivě projevit při přípravě tisku, zdlouhavým načítáním a obtížnou prací se souborem.



Obr. 11 STL model s řídkou (vlevo) a hustou (vpravo) sítí polygonů.

Při modelování součástí občas dochází k chybám, které znemožňují správnou výrobu prototypu. Jedná se o neuzavřené plochy, nulové objemy, uzavřené díry a stěny, jejichž tloušťka není pro danou metodu vyrobitelná. Chyby lze detekovat a opravit například v softwaru Magics RP, který je uzpůsoben k práci s STL soubory¹³.

Dalším krokem je nastavení tisku pomocí programu, který řídí stroj, jenž bude prototyp stavět. Software automaticky, nebo dle příkazu uživatele umístí model na pracovní plochu a následně jej rozdělí na vrstvy. Tloušťka vrstvy je volena obsluhou tiskárny v rozmezí hodnot, kterých je stroj schopen vyrobit. Určité metody vyžadují pro realizaci tvorby prototypu podpory, jejichž tvar je generován obslužným softwarem tiskárny (viz obr. 12).

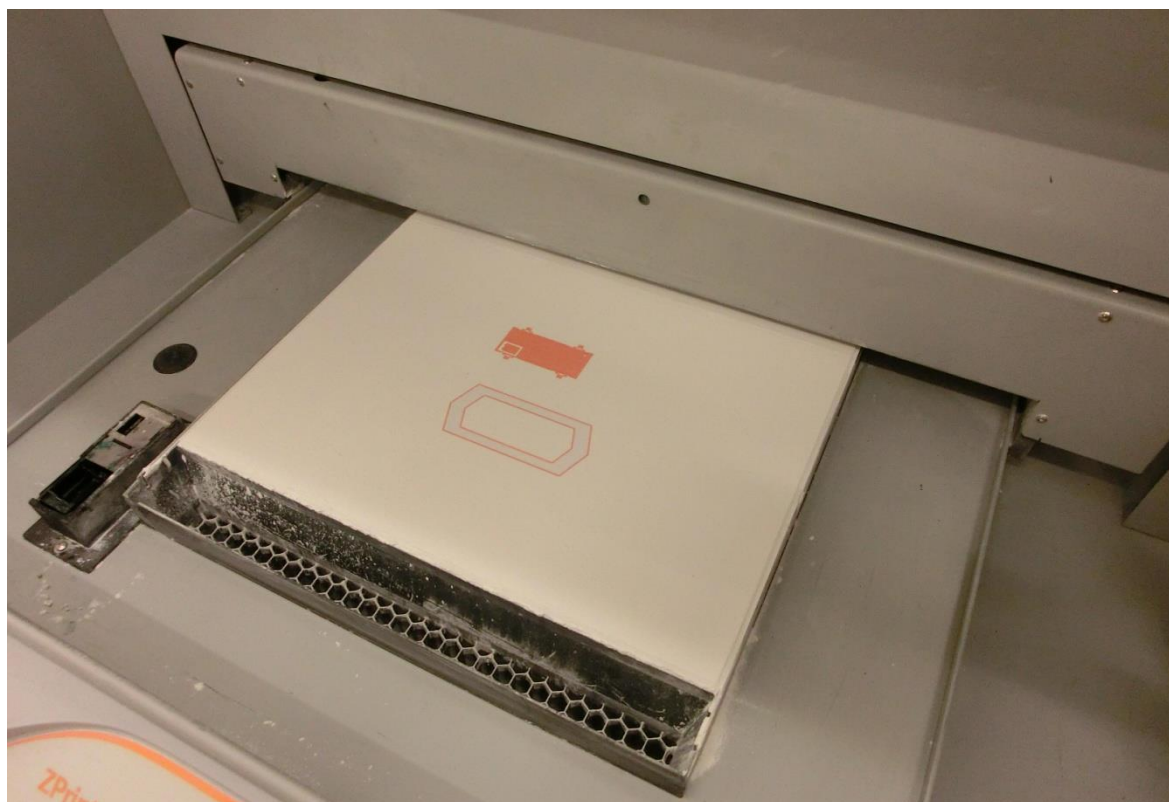


Obr. 12 STL model (vlevo) a jeho rozdělení na vrstvy s podporami (vpravo).

Rozdílné stroje využívající odlišné technologie dále umožňují různé nastavení, jako je například volba materiálů a barvy povrchů. Všechny softwary využité v rámci této práce a jejich aplikace bude více přiblížena v následujících odstavcích.

3.2 Výroba na stroji ZPrinter 650

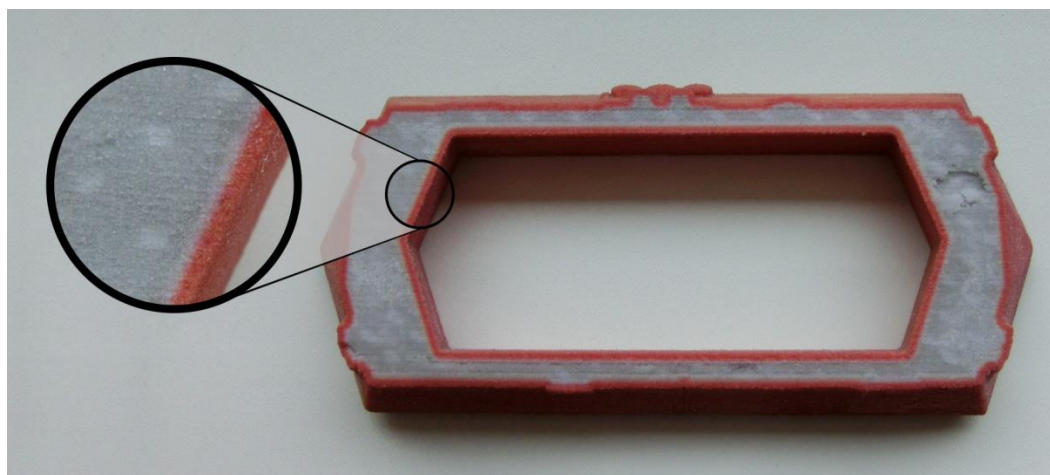
Tisk na stroji ZPrinter 650 řídí software ZPrint, který je schopen pracovat se soubory formátů STL, VRML, PLY, 3DS, ZPR. Program ZPrint umožňuje uživateli nastavit všechny náležitosti tisku, jako tloušťku vrstev, saturaci pojivem, barvu modelu, ale i monitorovat průběh celé tvorby prototypu. Zařízení ZPrinter 650 využívá technologie 3D Printing, jež je založena na scelování speciálního sádrokompozitního materiálu ve formě prášku pojivem. Pojivo je nanášeno na prášek tiskovými hlavami používanými v kancelářských tiskárnách. Hlavy pocházejí z produkce firmy Hewlett-Packard a mají označení HP 11. Po instalaci do tiskárny si je sama tiskárna zbaví inkoustu a připraví k produkci pojiva. Odstranění náplně probíhá v čistící stanici (viz Obr. 13), která má ještě další funkci a to odstranění nečistot z kazety v průběhu tisku. Pojivo je přiváděno z pěti zásobníků, z nichž jeden má bílý obsah a zbylé čtyři obsah v barvách CMYK (azurová, purpurová, žlutá, černá), jejichž mísení umožňuje vytvořit povrch v různých odstínech široké škály barev. Pracovní prostor tiskárny má rozměry 254 x 381 x 203 mm²³. Tloušťka vrstvy je volitelná od 0,089 do 0,102 mm a rychlost její tvorby 15–20 sekund, dle složitosti a velikosti řezu⁹. Celý prototyp je vyráběn v toleranci $\pm 1\%$ rozměru, nebo $\pm 0,13$ mm²⁴. Stroj je vybaven komorou na odstranění přebytečného materiálu z prototypu po tisku. Celé zařízení má rozměry 1880 x 740 x 1450 mm při hmotnosti 340 kg.



Obr. 13 Tiskárna ZPrinter 650 při stavbě prototypu. Vlevo je čistící stanice.

Po očištění prototypu od pojivem nesceleného materiálu probíhá infiltrace povrchu pomocí infiltrátů. Využitím rozdílných infiltrátů získají součásti odlišné vlastnosti. Infiltráty jsou slaná voda, speciální vosk, kianoakrylát a epoxid. Kyanoakrylát například dojde k vytvrzení povrchu a epoxidem získá součást vyšší pevnost v tahu, až 24 MPa⁹.

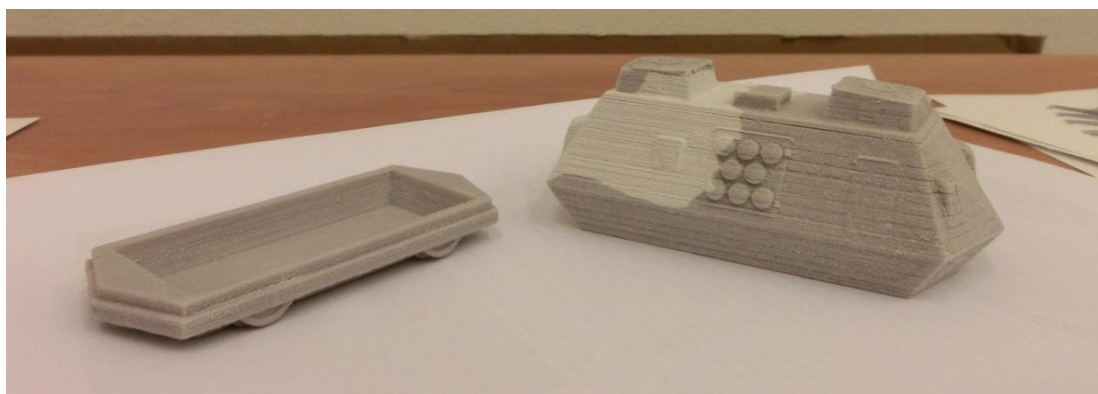
Při tvorbě barevných prototypů je pojivo příslušné barvy použito pouze na tenkou povrchovou slupku, což je možné vidět v průběhu stavby modelu. Zároveň si lze při tisku jednotlivých řezů všimnout drobných čtverečků odlišného odstínu o rozměrech 1,5 x 1,5 mm, v nichž je zvýšená saturace pojiva, za účelem zlepšení pevnostních vlastností prototypu (viz Obr. 14). Oba tyto jevy jsou automaticky řízeny tiskárnou.



Obr. 14 Zvýšená saturace pojiva a hloubka napuštění barevným pojivem.

Virtuální model drezíny Steyr byl v softwaru ZPrint rozdělen na vrstvy o tloušťce 0,102 mm. Doba tisku obou částí sestavy činila 1 h 56 min. Spotřeba materiálu na díly v měřítku 1:48 je přibližně 76 cm³, tento odhad je odvozen z objemu těles. Nepočítá ovšem s pórovitostí výsledného produktu. Po dokončení tisku a očištění od většiny přebytečného prášku, bylo zapotřebí nechat součásti vyschnout a následně jejich povrch napustit vhodným infiltrátem, který zabrání vydrolování materiálu a zlepší pevnostní vlastnosti prototypu (viz Obr. 15). Model byl napuštěn kyanoakrylátem. Výsledné náklady na výrobu činily 1520 Kč.

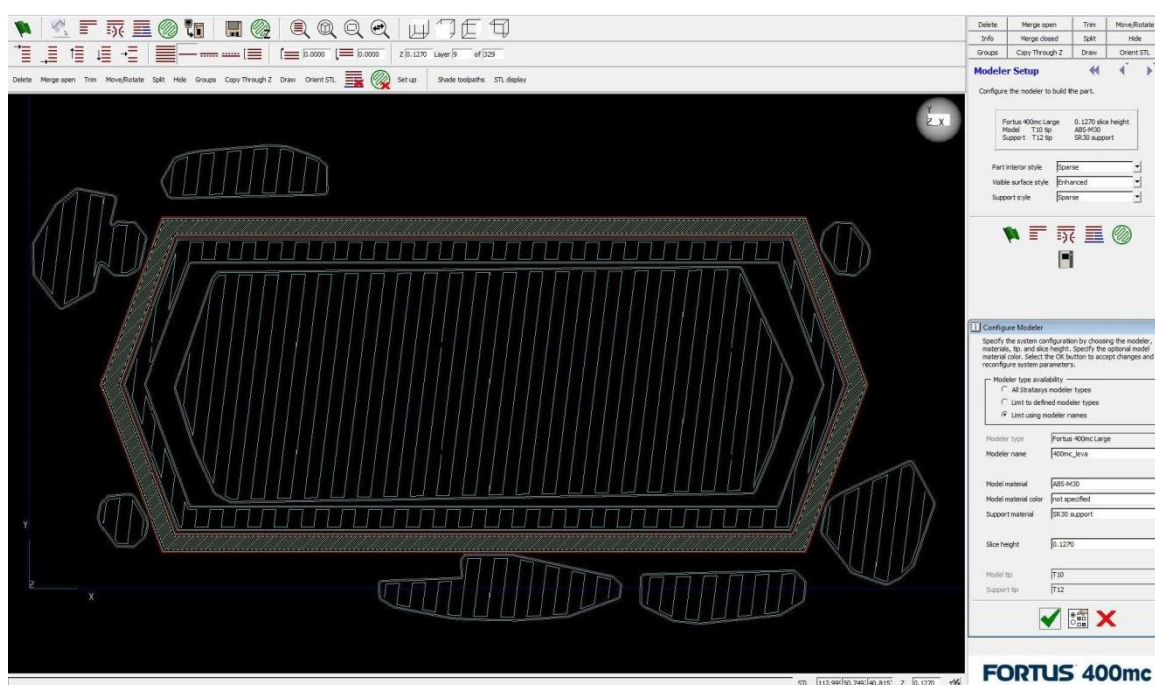
Na produktu jsou rozeznatelné i drobné detaily, ale povrch tělesa, a to především u šikmých stěn, je značně nevyhovující účelu této práce. Lze si všimnout, že partikulárně pojivo zřejmě dostatečně nescelilo okraje vrstev a na povrchu tak vznikají horizontální rýhy. Pokud by přece jen prototyp z tiskárny ZPrinter 650 měl být využit, vyžadoval by značné úpravy a výsledek by i tak byl nedostačující.



Obr. 15 Částečně infiltrovaný prototyp z tiskárny ZPrinter 650.

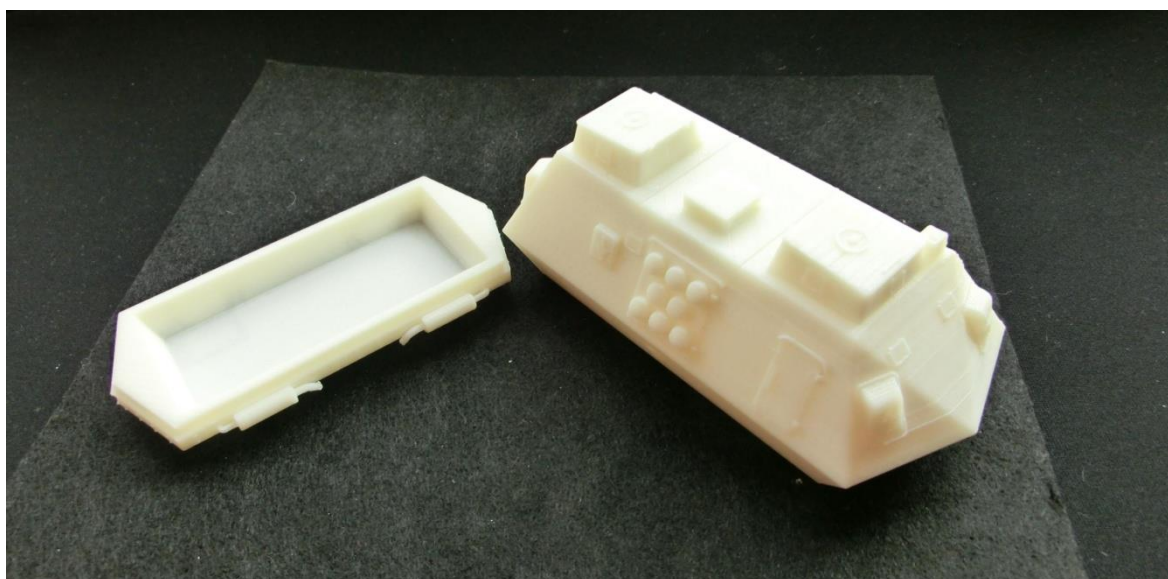
3.3 Výroba na stroji Fortus 400mc

Stroj Fortus 400mc, z produkce firmy Stratasys, využívající technologii fused deposition modeling je řízen pomocí softwaru Insight. Tento program pracuje výhradně se soubory ve formátu STL. Na základě modelu v STL formátu a také uživatelem volených požadavků vygeneruje Insight dráhy, na kterých bude z trysky vytlačen natavený termoplastický materiál (viz Obr. 16). Volenými požadavky se myslí tloušťka vrstev, druh podpor a v neposlední řadě také složení vnitřního objemu těles. Tiskárna pracuje vždy se dvěma materiály a to podporovým a stavebním. Pro tento stroj je k dostání devět rozdílných druhů termoplastického stavečního materiálu. Předností Fortus 400mc je také velký modelovací prostor, který má rozměry 406 x 355 x 406 mm, na němž jsou vyráběny prototypy s přesností $\pm 0,127$ mm s rozměry menšími než 100mm. Pokud má stavěná součást rozměr větší než 100 mm, pak je vyroben s tolerancí $\pm 0,277$ mm. Tloušťka vrstvy se zde pohybuje od 0,127 mm do 0,330 mm. Celkové rozměry stroje jsou 1281 x 896 x 1962 mm při hmotnosti 786 kg.²⁵



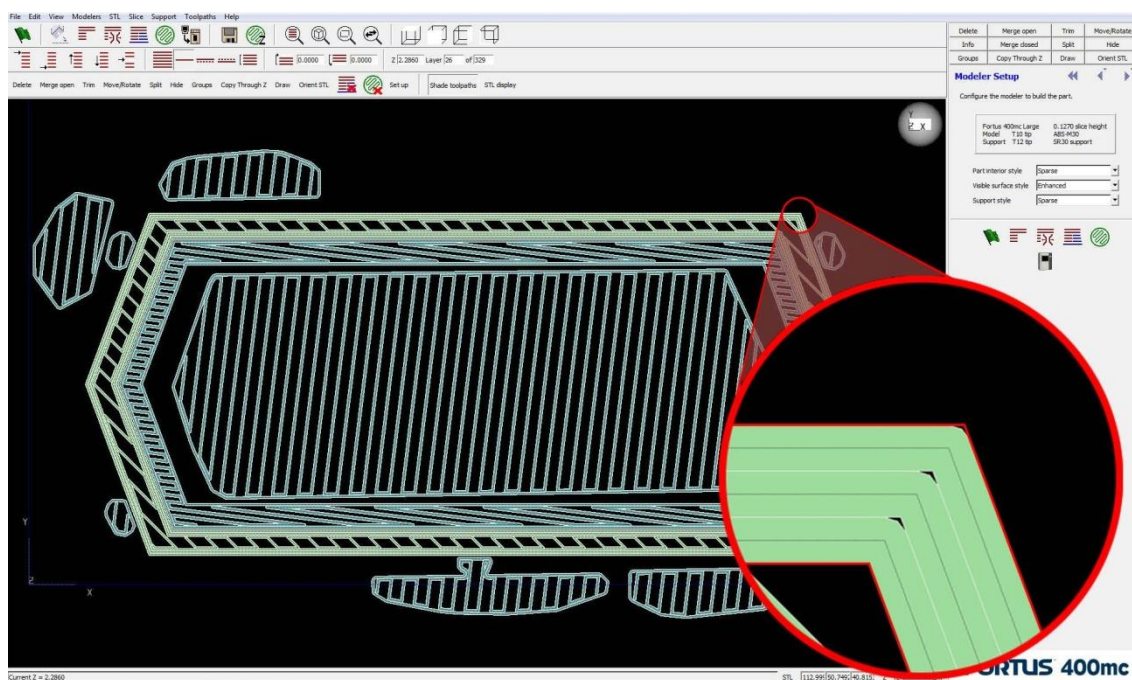
Obr. 16 Dráhy trysek generované softwarem Insight.

Virtuální modely součástí drezíny Steyr byly v softwaru Insight rozděleny na vrstvy o tloušťce 0,127 mm. Jako stavební hmota byl zvolen termoplastický materiál ABS-M30 (Acrylnitril-Butadien-Styrol), jehož vlastností je tuhost, houževnatost a zdravotní nezávadnost²⁵. Podpory byly zvoleny ve stylu Sparse a tvořil je materiál SR30. Doba tisku součástí v měřítku 1:48 byla 10 h 6 min u horní části modelu a 2 h 58 min v případě podvozku. Výsledné náklady na tisk činí 650 Kč, při spotřebě primárního materiálu 41 cm³ a sekundárního 40 cm³ na součást drezína (500 Kč), plus 10,5 cm³ stavečního a 10 cm³ podpurného materiálu na díl podvozek (150 Kč). Při stavění prototypu byla využita voština, což se příznivě projevilo na spotřebě. Díky dutinám uvnitř těles klesla ze 76 cm³ na 51,5 cm³, což znamená úsporu 24,5 cm³ ABS. Závěrečnou operací bylo odstranění podpor, což bylo realizováno namočením součástí v lázni zásaditého roztoku, jenž nijak nepoškozuje primární a rozpouští sekundární materiál.



Obr. 17 Prototyp vyrobený na stroji Fortus 400mc.

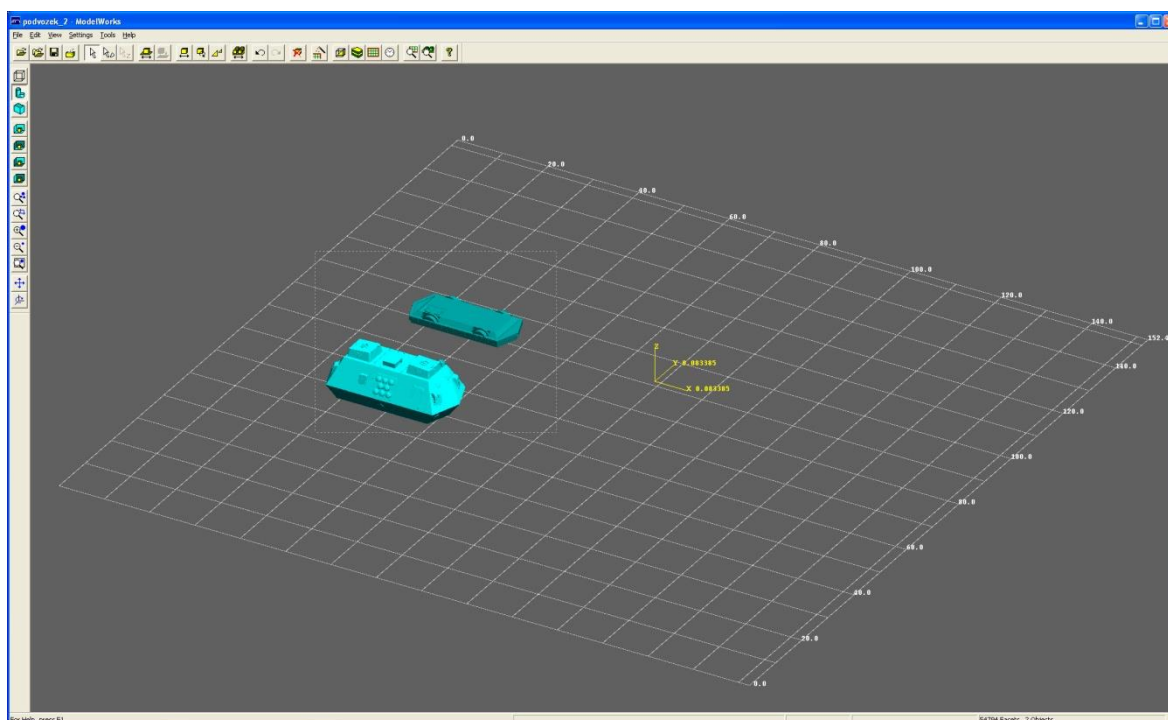
Na prototypu zhotoveném na stroji Fortus 400mc jsou jasně zřetelné i drobné detaily (viz Obr 17). Problémem pro teoretické využití jako modelu silikonové formy je textura povrchu, kterou tvoří skladba vrstev a je viditelná na celé součásti. Nejzřetelněji se tento jev projevuje na plochách svírajících velmi malý úhel s horizontální rovinou (XY). Nepřesnost oproti virtuálnímu modelu vzniká také na hranách součásti, orientovaných kolmo k horizontální rovině. Do těchto míst se natavený materiál kvůli svým rozměrovým a geometrickým dispozicím není schopen dostat (viz obr. 18). Vzniká zde rádius a přesto že je drobný, bylo by jej třeba stejně jako texturu povrchu dodatečně upravit. Kvůli velkým povýrobním úpravám, se jeví technologie FDM pro účel této práce, jako nevyhovující.



Obr. 18 Detail na dráhu kladeného materiálu v hranách kolmých k rovině vrstvy.

3.4 Výroba na stroji Solidscape T76

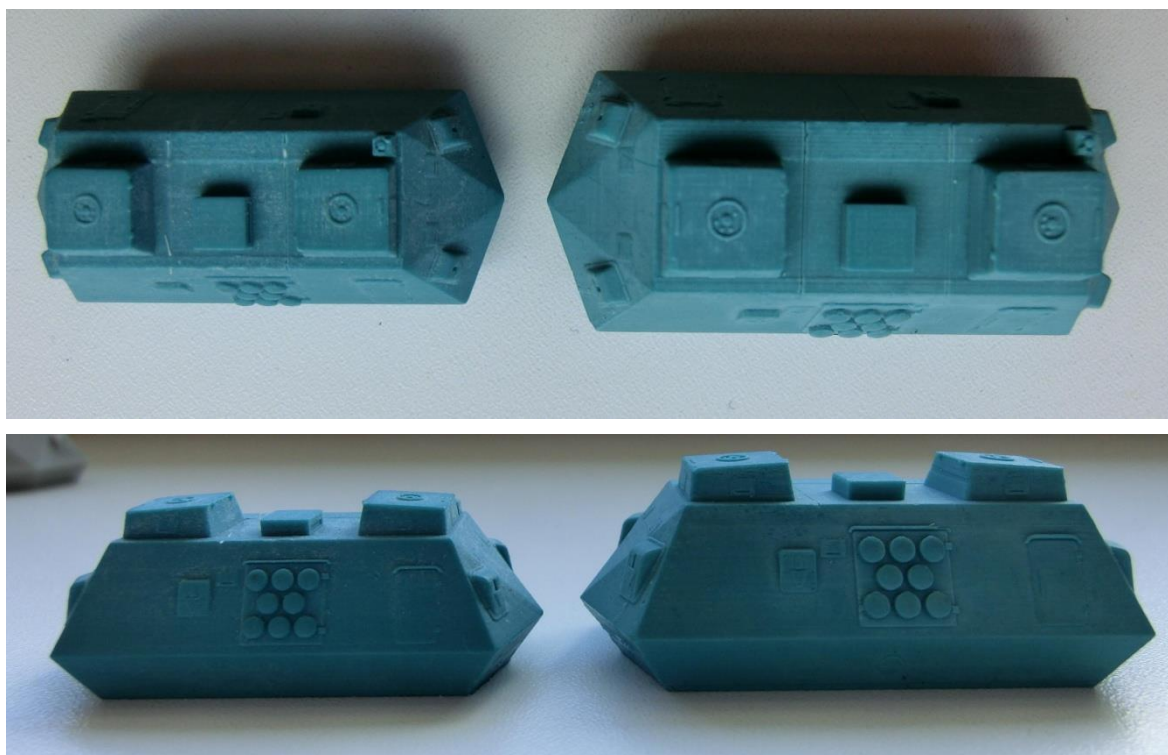
Stroj Solidscape T76 je produktem americké firmy Solidscape, Inc., která je výrobcem vysoce přesných 3D tiskáren, jenž využívají technologie Model Maker 3D Plotting. Tato tiskárna je řízena softwarem Model Works pracujícím se soubory formátů STL a SLC (viz Obr. 19). Virtuální model je v programu rozdělen na vrstvy o tloušťce volené uživatelem, nabývající hodnot od 12,7 do 76 μm . Dále Model Works vygeneruje prostory, v nichž bude vytvořen podpurný materiál, který je představován voskem o teplotě tání v rozmezí 50–72 $^{\circ}\text{C}$. Primární složkou stavby modelu je vosk o teplotě tání 95 - 115 $^{\circ}\text{C}$ ²⁶. Obě hmoty jsou do tiskárny dodávány ve formě granulátu a jsou netoxické. Pracovní prostor tiskárny, ve kterém je Solidscape T76 schopen tvořit prototypy s tolerancí $\pm 0,025$ mm, představuje objem o velikosti 152,4 x 152,4 x 101,6 mm. Celkové rozměry zařízení jsou 549 x 489 x 407 mm při váze 34 kg, což umožňuje jeho využití i při malých nárocích na prostor. Díky své vysoké přesnosti lze stroj využít například pro tisk drobných a detailních prototypů, jako jsou třeba návrhy šperků.^{16, 27}



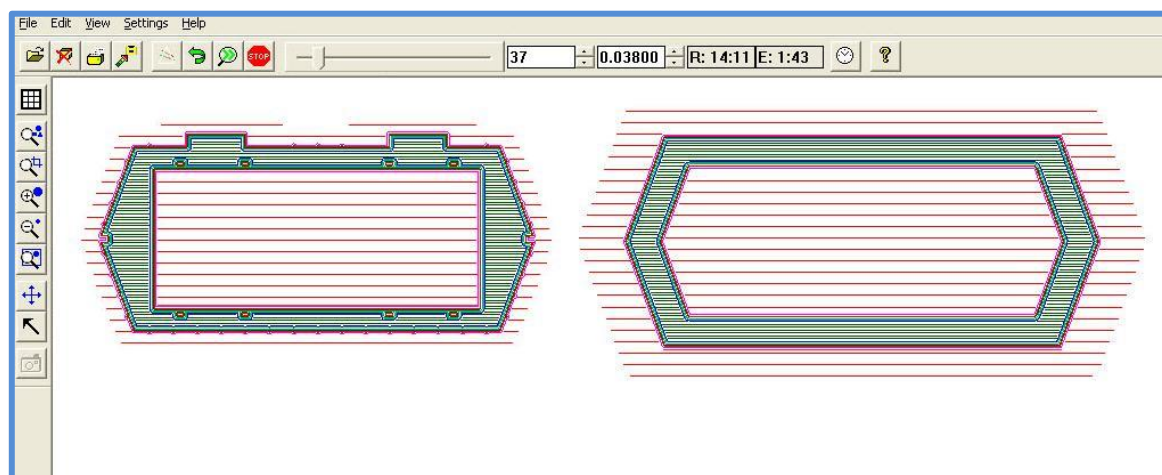
Obr. 19 Systémové prostředí softwaru Model Works.

Virtuální model drezíny Steyr K2670 byl v softwaru Model Maker 3D rozdělen na vrstvy o tloušťce 0,013 mm a byly mu automaticky přiděleny podpory. Celkový tisk součástí v měřítku 1:120 trval 31 h a cena činila 6100 Kč při spotřebě materiálu 37 cm^3 . Spotřeba je vyšší z důvodu odfrézovaného materiálu, který spolu s podporami představuje odpad vzniklý při stavbě prototypu. Podpory, jejichž objem představoval 25 cm^3 , obalovaly kvůli ochraně povrchu téměř celý prototyp (viz Obr. 21), a po dokončení tisku byly bezesbýtku odtaveny ponořením součástí modelu do lázně o teplotě vyšší než je teplota tání podporového vosku.

Na výsledném produktu tiskárny Solidscape T76 jsou naprosto bez problémů rozeznatelné i velmi drobné detaily a to i na součásti v měřítku 1:144 (viz Obr. 20). Povrch prototypu má velmi dobrou kvalitu a téměř na něm není znatelná textura tvořená kladením vrstev. Jedinou odchylkou výtisku od jeho virtuální předlohy je horizontální plocha na vrcholu součásti drezína, která byla pravděpodobně poškozena při frézování. Poškození se nachází za věžemi drezíny a bylo nejspíše způsobeno třískami, které nebyly zachyceny odsávacím zařízením (viz Obr. 20). Chyby bylo nutné dodatečně opravit. Po malé úpravě lze říci, že prototyp vyrobený na stroji Solidscape T76 je naprosto vyhovující účelu této práce. Nevýhodou je ale vysoká cena a dlouhý výrobní čas.



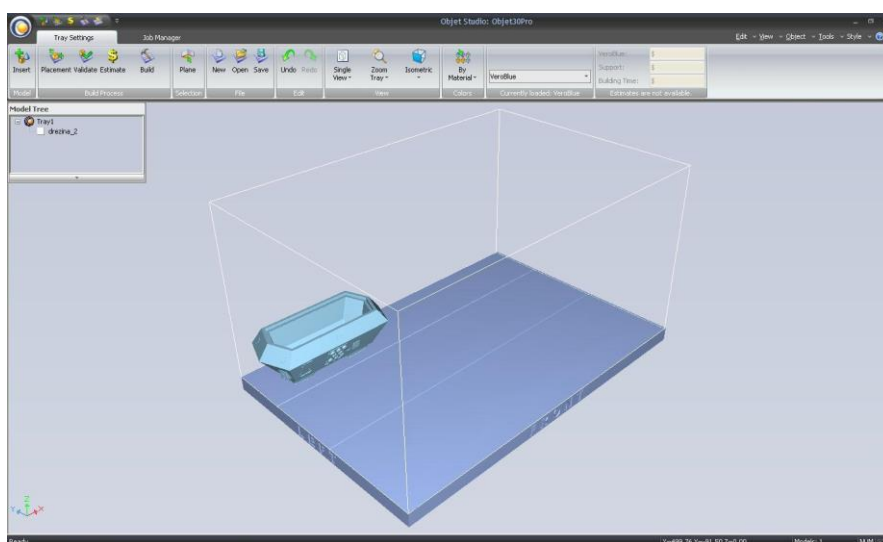
Obr. 20 Prototypy tisknuté strojem solidscape v měřítku 1:144 vpravo a 1:120 vlevo



Obr. 21 Obalení prototypů podporami v softwarovém prostředí kontrolního programu BView.

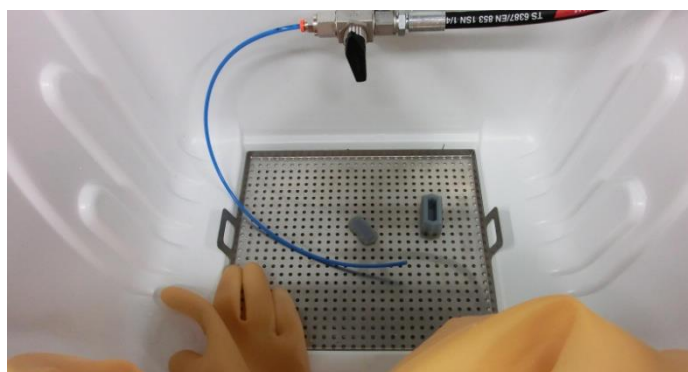
3.5 Výroba na stroji Objet30 Pro

Stroj Objet30 Pro je produktem izraelské firmy Objet, využívá metody PolyJet Matrix a je řízen softwarem Objet Studio, který pracuje se soubory ve formátu STL a SLC (viz Obr. 22). Virtuální model je v softwaru rozdělen na vrstvy o tloušťce volené uživatelem v rozmezí hodnot od 16 μm do 28 μm . V programu Objet Studio lze volit ze sedmi odlišných fotopolymerních materiálů, z nichž bude model tvořen. Dále je nastavitelné zda bude mít prototyp matný, či lesklý povrch a jak budou situovány podpory. Tisk začíná nanesením několika vrstev stavebního materiálu v celé ploše, nad níž bude objekt (podpory + prototyp), čímž je vytvořena základna, na které dále probíhá stavba prototypu. Průběh celé tvorby lze monitorovat v softwarovém prostředí Objet Studia, které udává veškeré potřebné informace o tisku. Stroj Objet30 Pro je schopen ve svém pracovním prostoru o rozměrech 300 x 200 x 150 mm vyrobit prototyp s přesností $\pm 0,1 \text{ mm}$ ²⁸. Hmotnost stroje je 93 kg, při rozměrech 825 x 620 x 590 mm a jako příslušenství má otryskávací komoru (viz Obr. 23).

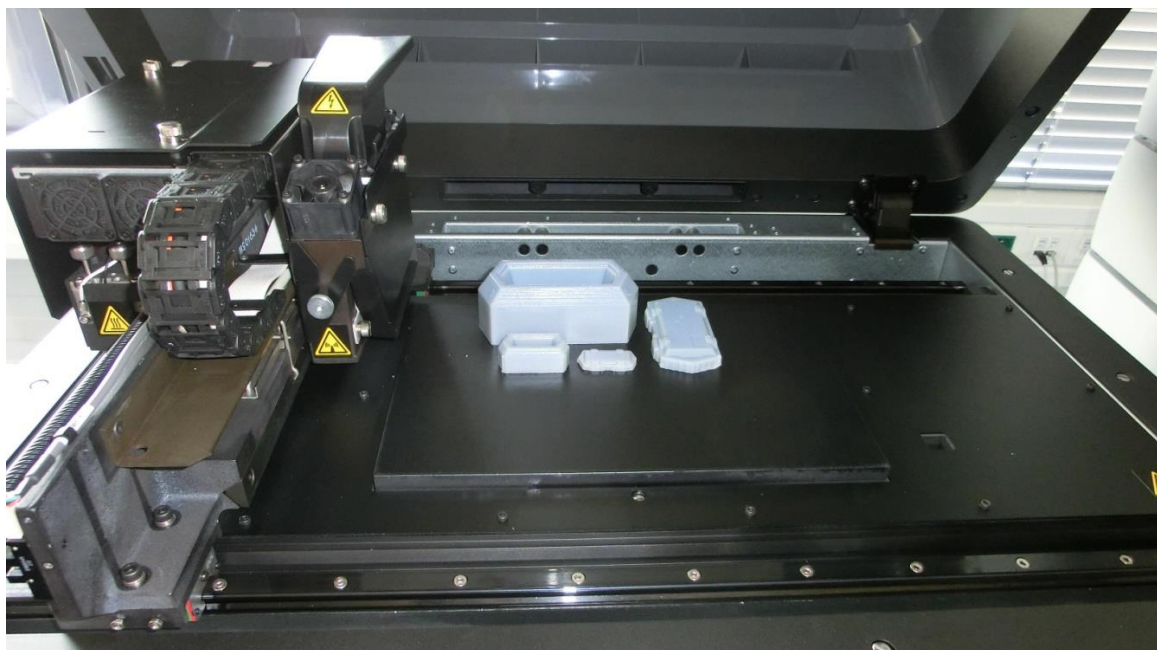


Obr. 22 Systémové prostředí softwaru Objet Studio.

Při tisku drezíny Steyr byla v softwaru Objet Studio zvolena tloušťka vrstvy 0,028 mm a matný povrch součástí. Prototyp je zhotoven z materiálu VeroBlue, který firma Objet prezentuje jako pevný, odolný, neprůhledný fotopolymer, mající ideální vlastnosti pro tvorbu silikonových forem²⁹. Podpory jsou tvořeny netoxickým gelovým materiálem FullCure 705 a obalují celý povrch součástí (viz obr. 24)²⁸.



Obr. 23 Pracovní prostor otryskávací komory.



Obr. 24 Prototypy v měřítcích 1:48 a 1:120 obalené podporovým materiálem na pracovní ploše tiskárny Objet30 Pro.

Tisk součástí v měřítku 1:120 trval 2 h 26 min při spotřebě 32 cm³ stavebního a 31 cm³ podporového materiálu. Po dokončení tisku byly podpory otryskány proudem vody (viz Obr. 25). Celkové náklady na výrobu činily 800 Kč.

Na výsledném produktu tiskárny Objet30 Pro jsou obtížně rozeznatelné detaily. Drobné výstupky a zářezy jsou téměř nezatelné. Na povrchu součástí je viditelná textura, kterou zřejmě tvoří neodstraněné zbytky podpor. Zbavení součástí podpor byla náročná část výroby s nepříliš uspokojivým výsledkem. Celkově lze výsledek tisku na stroji Objet30 Pro zhodnotit jako nevyhovující účelu této práce.

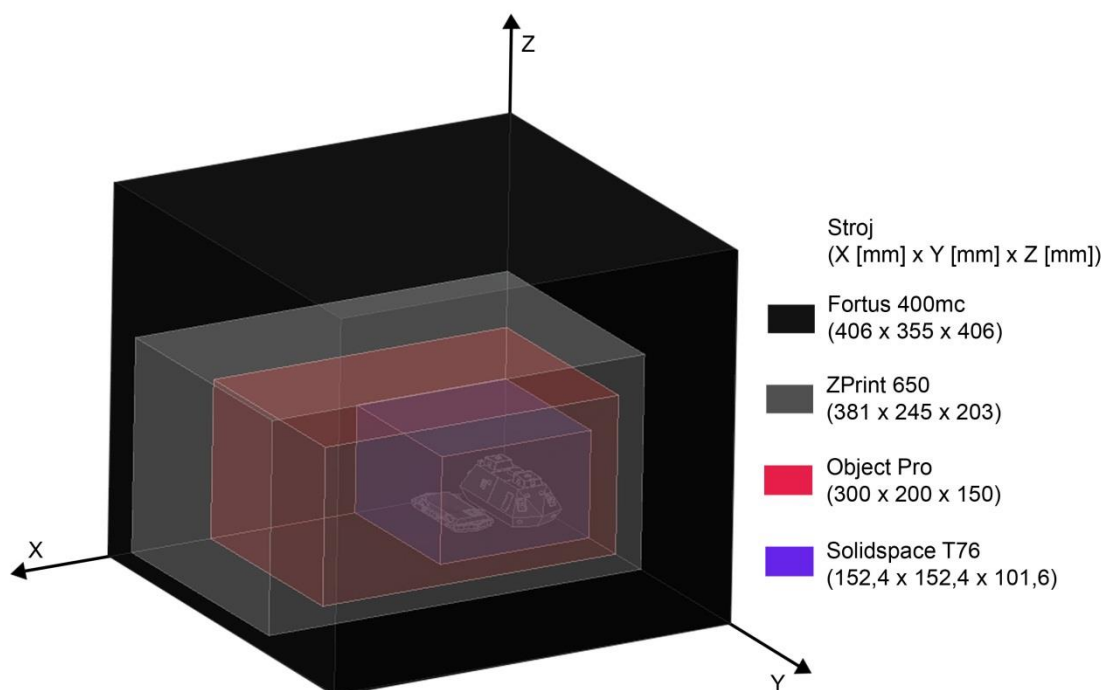
Prototyp drezíny Steyr K2670 byl ve stroji Objet30 Pro postaven jako zkušební model a tisk proběhl před řádným zaškolením obsluhy. Z těchto důvodů nelze považovat výsledek tisku za směrodatný.



Obr. 25 Výsledný prototyp vyrobený strojem Objet30 Pro (k podvozku je připevněn nálietek).

3.6 Porovnání výroby a zhodnocení výsledných prototypů

Všechny zvolené tiskárny měly pracovní prostor dostačující i pro tisk prototypu drezíny Steyr K2670 v měřítku 1:48 (viz Obr. 26).



Obr. 26 Porovnání pracovních prostor tiskáren vzhledem k modelu 1:48.

Hlavní klady a zápory použitých metod, které souvisí s touto prací, jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tab. 1).

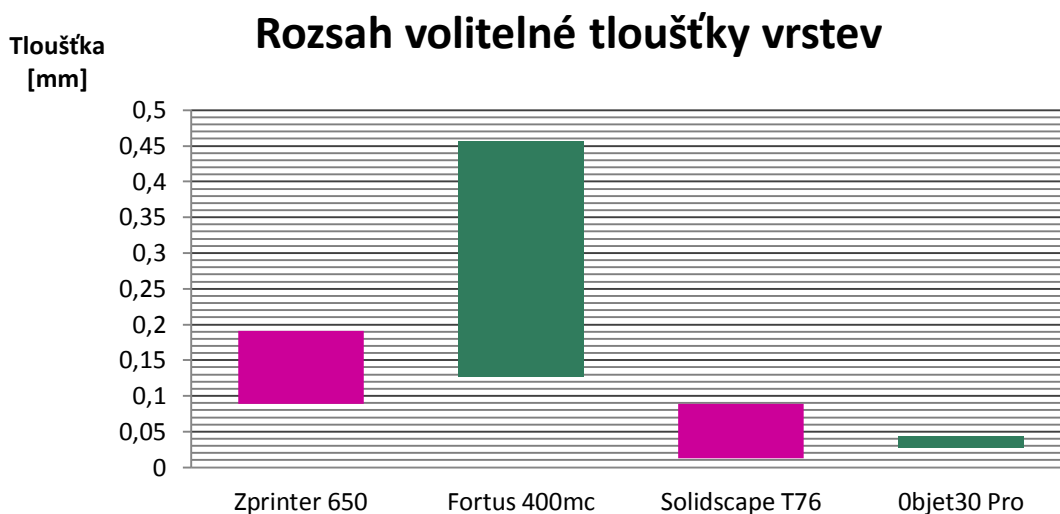
Tab. 1 Porovnání kladů a záporů metod.

Metoda Stroj	Klady	Zápory
3D Printing	Krátký výrobní čas Nízké výrobní náklady Bez podpor	Nevhodný povrch Částečné vydrolování
ZPrinter 650	Nízké výrobní náklady Odolný materiál Zřetelné i drobné detaily	Textura povrchu Delší výrobní čas Rádiusy v hranách
Fortus 400mc	Velká přesnost Velmi kvalitní povrch Minimální úpravy prototypu	Dlouhý výrobní čas Vysoké výrobní náklady
Model Maker 3D Plotting	Krátký výrobní čas Nízké výrobní náklady Široké spektrum materiálů	Nevhodný povrch Obtížné odstranění podpor
SolidSpace T76		
PolyJet Matrix		
Objet30 Pro		

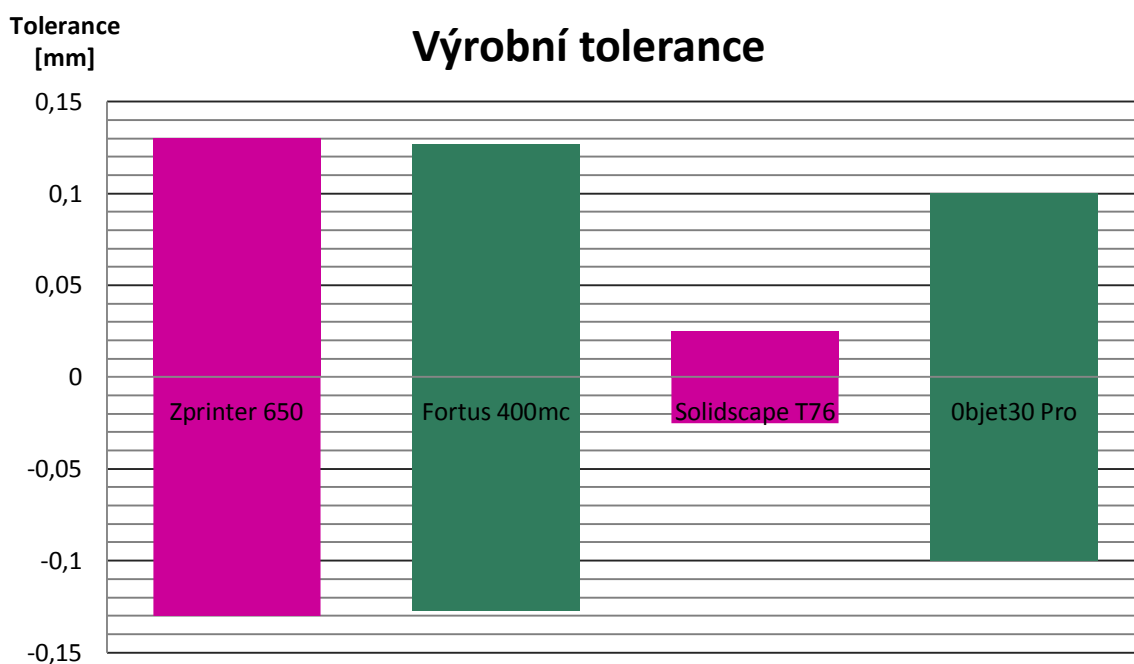
Následující tabulka (Tab. 2) a grafy (Obr. 27 a Obr. 26) srovnávají charakteristické hodnoty strojů použitých k účelu práce, tedy výrobě modelu drezíny Steyr v měřítku 1:120.

Tab. 2 Charakteristické hodnoty strojů.

Výrobní stroj	Rozsah volitelné tloušťky vrstev [mm]	Výrobní tolerance udávaná výrobcem [mm]
ZPrinter 650	0,0890 – 0,1020	$\pm 0,130$
Fortus 400mc	0,1270 – 0,3300	$\pm 0,127$
SolidScape T76	0,0127 – 0,0760	$\pm 0,025$
Objet30 Pro	0,0160 – 0,0280	$\pm 0,100$



Obr. 27 Grafické zhodnocení volitelného rozsahu tloušťky vrstev.

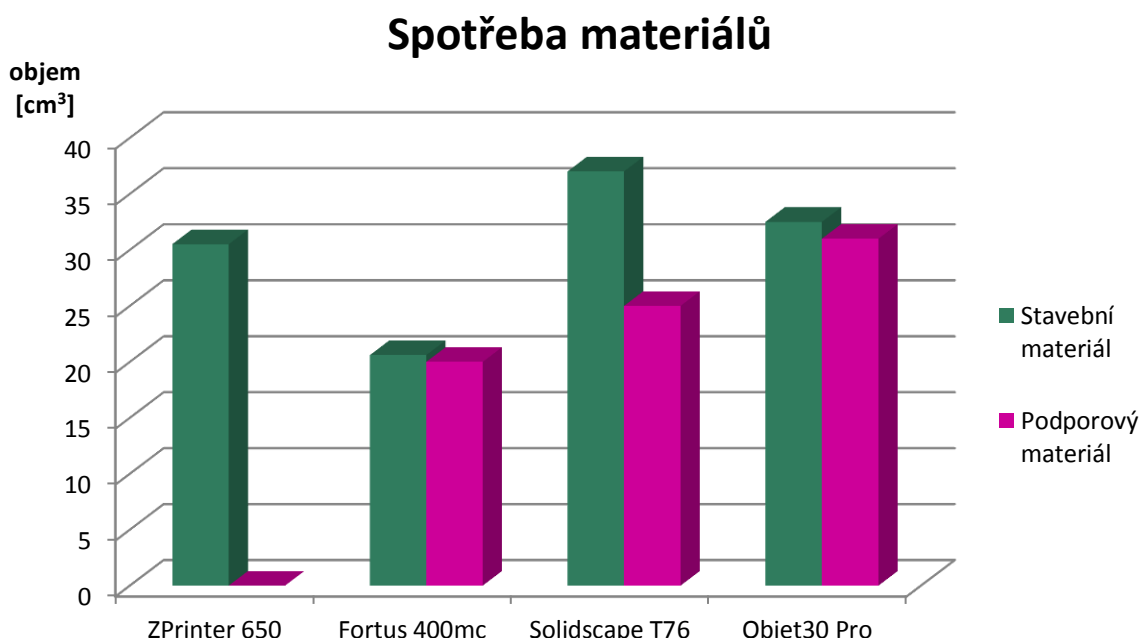


Obr. 28 Grafické zhodnocení výrobní tolerance udávané výrobcem.

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty spojené se stavbou prototypu v měřítku 1:120 (viz Tab. 3), které byly následně graficky porovnány dle materiálů, tloušťky vrstev, výrobního času a výrobních nákladů.

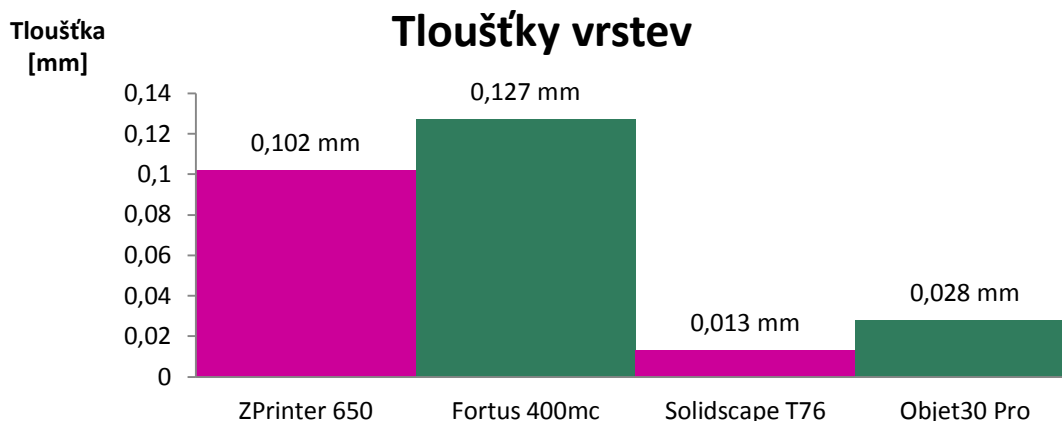
Tab. 3 Hodnoty spojené se stavbou prototypu.

Výrobní stroj	Stavební materiál [cm ³]	Podporový materiál [cm ³]	Tloušťka vrstvy [mm]	Výrobní čas [h]	Výrobní náklady [Kč]
ZPrinter 650	30,5	0	0,102	0,78	610
Fortus 400mc	20,6	20	0,127	5,3	260
Solidscape T76	37	25	0,013	31	6100
Objet30 Pro	32,5	31	0,028	2,4	800



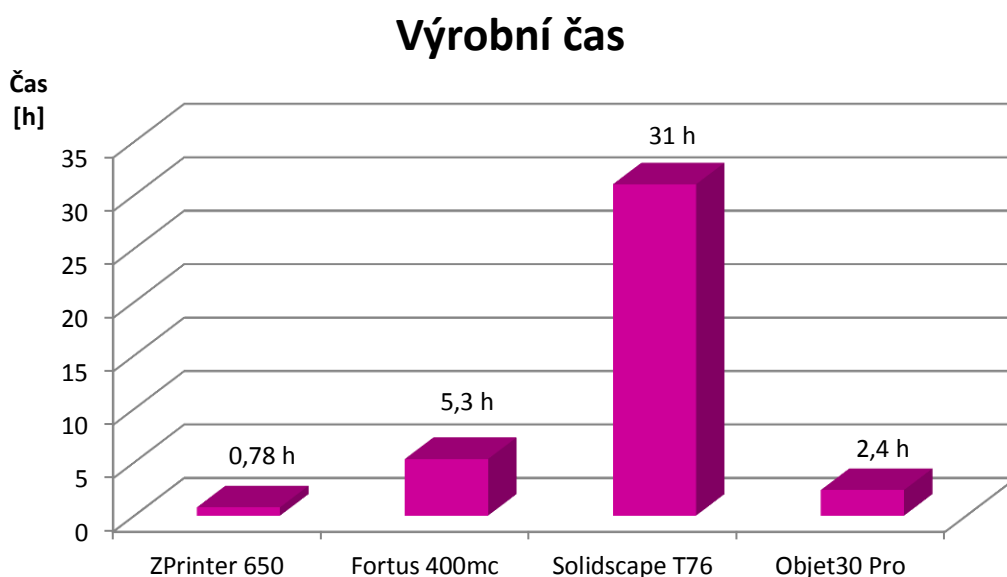
Obr. 29 Grafické zhodnocení spotřeby materiálů.

Nejméně náročná na spotřebu materiálu byla stavba prototypu na stroji ZPrinter 650, protože podpory představuje okolní prášek, který je recyklován, tedy využíván i při další tvorbě prototypu. Nejmenší spotřebu stavebního materiálu měl tisk na stroji Fortus 400mc, kvůli způsobu zhotovení vnitřního objemu jako voštiny, která je ale pro účel této práce značně nevhodná. Uvnitř voštiny jsou dutiny a při zaformování prototypu a jeho vložení do podtlakové komory by byl model zničen, což bude vysvětleno v následující kapitole 4.1. Nejvíce stavebního materiálu bylo spotřebováno strojem Solidscape T76, protože po vytvoření každé vrstvy je její část odfrézována. Absolutně největší spotřebu materiálu měl stoj Objet30 Pro a to především z důvodu velkého množství podporového materiálu, kterým byl celý prototyp obalen. Grafické srovnání viz Obr. 29.



Obr. 30 Grafické zhodnocení tloušťek tisknutých vrstev.

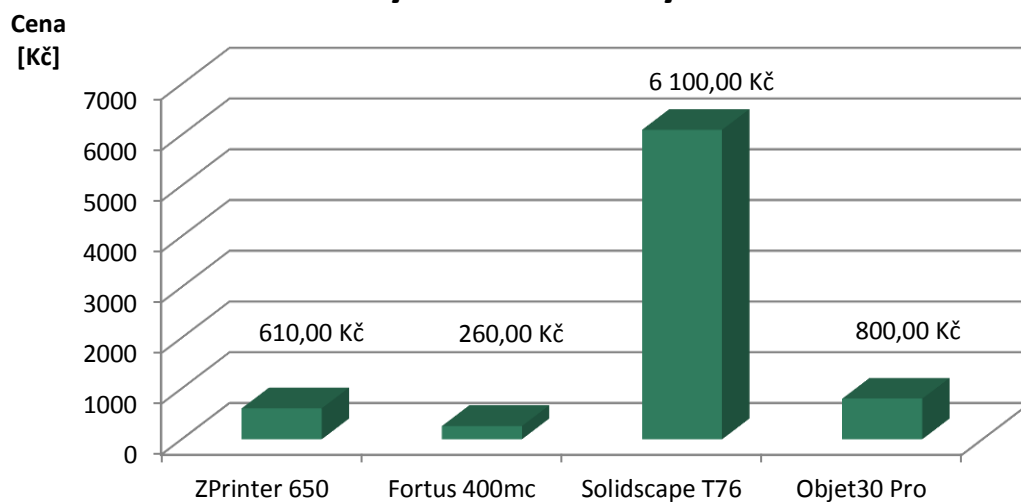
Každá ze čtyř použitých tiskáren má odlišný rozsah tloušťky vrstev, které je schopna tvořit (viz Obr. 30). Na základě výsledných prototypů lze říci, že tloušťka vrstev a výrobní čas se velmi projevil na kvalitě jejich povrchu. Čím tenčí vrstva a delší výrobní čas, tím byl prototyp kvalitněji zpracován.



Obr. 31 Grafické zhodnocení výrobních časů.

Lze říci, že čím je vrstva tenčí, tím je výrobní čas delší, z čehož vybočuje pouze stroj Objet30 Pro, který je schopen tvořit objekt z tenkých vrstev ve velmi krátkém časovém horizontu (viz Obr. 31).

Výrobní náklady



Obr. 32 Grafické zhodnocení výrobních nákladů.

Výrazně nejvyšší náklady na výrobu prototypu byly u stroje Solidscape T76. V porovnání s tiskárnou Fortus 400mc jsou více jak 23 krát větší (viz Obr. 32). I přes tento fakt byl pro svou vysokou kvalitu výsledného prototypu tisk nejnákladnější metodou zvolen jako nejvhodnější. Pro porovnání se následující kapitoly budou zabývat výrobou a využitím formy zhotovené na základě prototypu součásti drezína tiskárnou Solidscape T76 a prototypu součásti podvozek strojem Objet30 Pro.

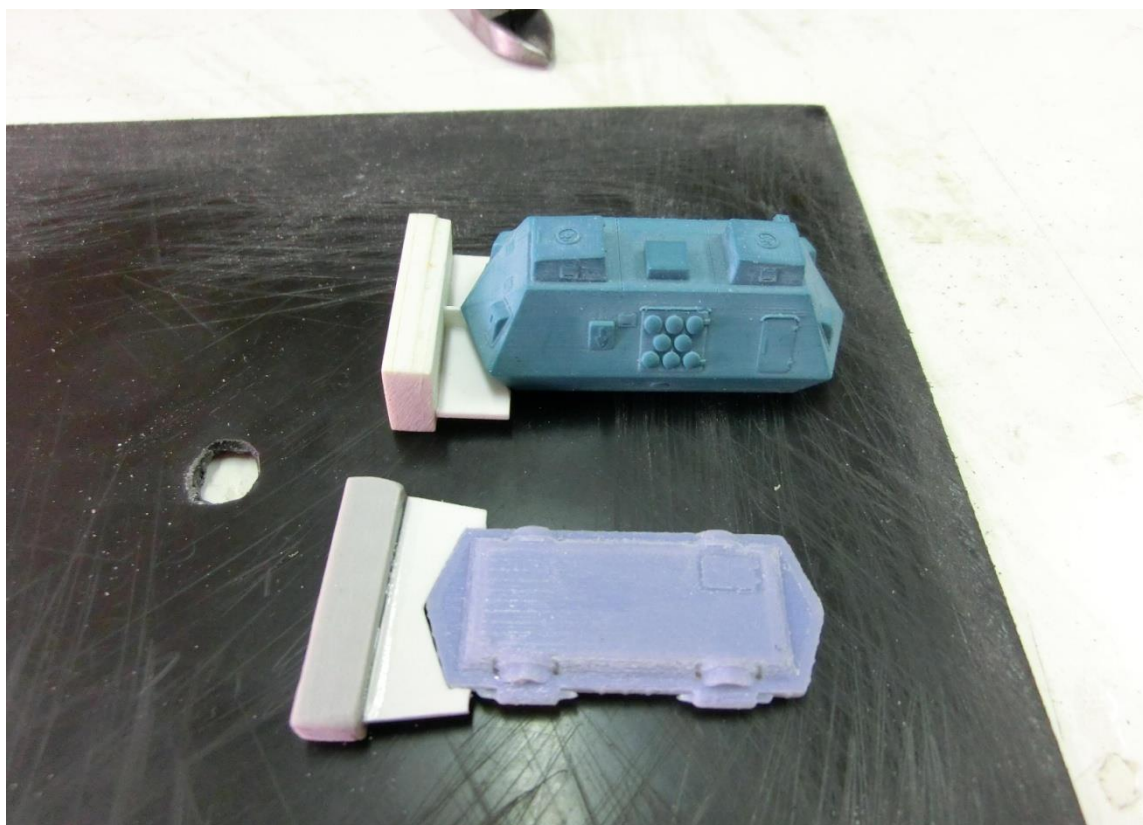
4 VÝROBA FORMY PRO MULTIPLIKACI PROTOTYPU

4.1 Zaformování prototypů

Forma pro multiplikaci prototypu byla vyrobena na základě prototypů vyrobených metodami Model Maker 3D Plotting (díl drezína) a PolyJet Matrix (díl podvozek). Tyto dvě metody s odlišným výsledkem byly zvoleny za účelem zjištění, zda bude mít finální produkt vyroben na základě neuspokojivého prototypu výrazně horší kvalitu, než finální produkt prototypu vyhovujícího účelu této práce.

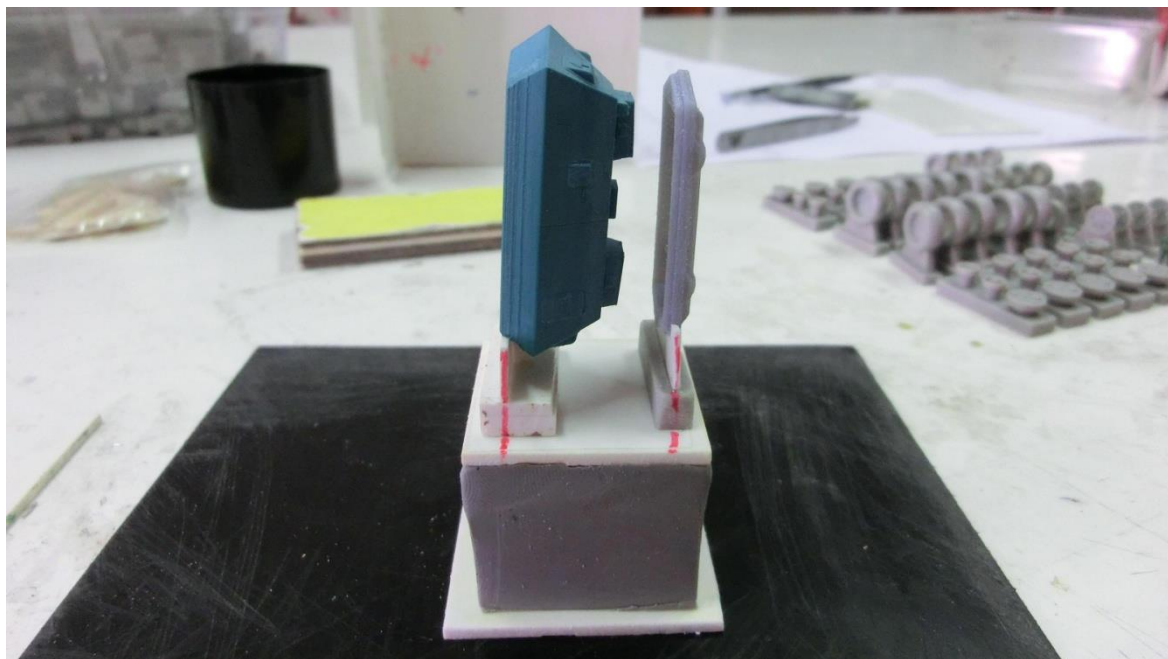
První fází při práci s prototypem je jeho zbavení nečistot a odstranění drobných nepřesností vzniklých při tisku. Prototyp lze dovést do dokonalosti lehkým zbrúšením textury vzniklé kladením vrstev. Pro zhodnocení kvality výsledných prototypů byla ovšem tato část výroby vynechána.

Následnou fází výroby formy je zhotovení a připevnění vtokové soustavy. Pro prototyp je třeba vyrobit vhodnou soustavu s ohledem na jeho tvar, což znamená, že materiál bude vtékat do formy v nejvyšší části dutiny a otvor pro vtok bude dostatečně rozměrný, aby nedošlo k velkému zvýšení viskozity před naplněním dutiny formy. Vtokovou soustavu je také třeba konstruovat tak, aby byla z odlitku dobře odstranitelná a to s co nejmenším dopadem na výslednou kvalitu produktu (viz Obr. 33). Soustava je k prototypu připevněna pomocí lepidla. Celou tuto fází výroby formy si lze usnadnit vytvořením virtuálního modelu i s vtokem pro lití, čímž ovšem dojde k navýšení výrobních nákladů i výrobního času stavby prototypu. Vtokovou soustavu je vhodné tisknout u velmi drobných prototypů, což není případ drezíny Steyr K2670 v měřítku 1:120.



Obr. 33 Prototypy s vtokovými soustavami.

Po připevnění vtokových soustav byly prototypy přilepeny na velký nálietek, který bude při finálním lití představovat dutinu, jež bude zásobárnou materiálu pro formu. Na Obr. 34 si lze všimnout čar, představujících dělicí roviny, které určují, kde bude forma rozříznuta při vyjímání modelů.



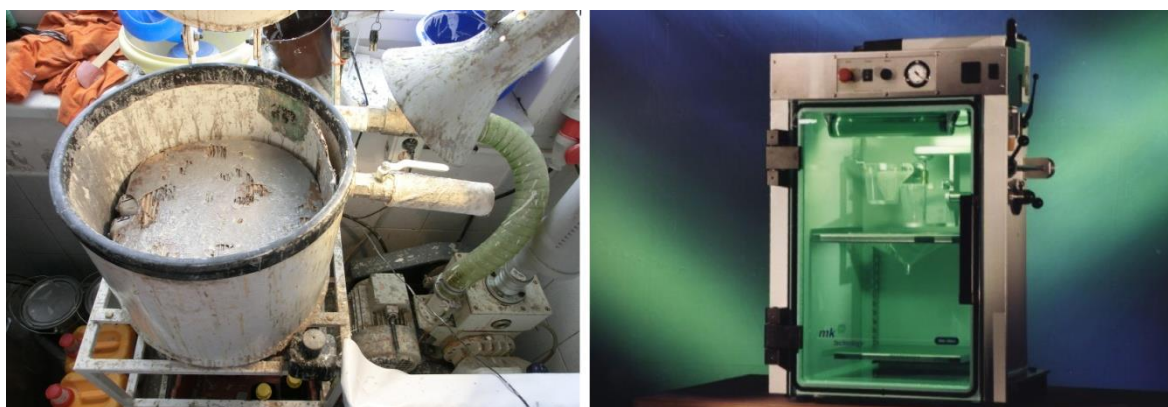
Obr. 34 Prototypy připravené k zaformování.

Modely i s vtokovou soustavou jsou následně orámovány (viz Obr. 35), čímž je vytvořen prostor pro zalití hmotou, jež bude po ztuhnutí představovat pružnou formu.



Obr. 35 Zarámovaná soustava připravená k zalití hmotou formy.

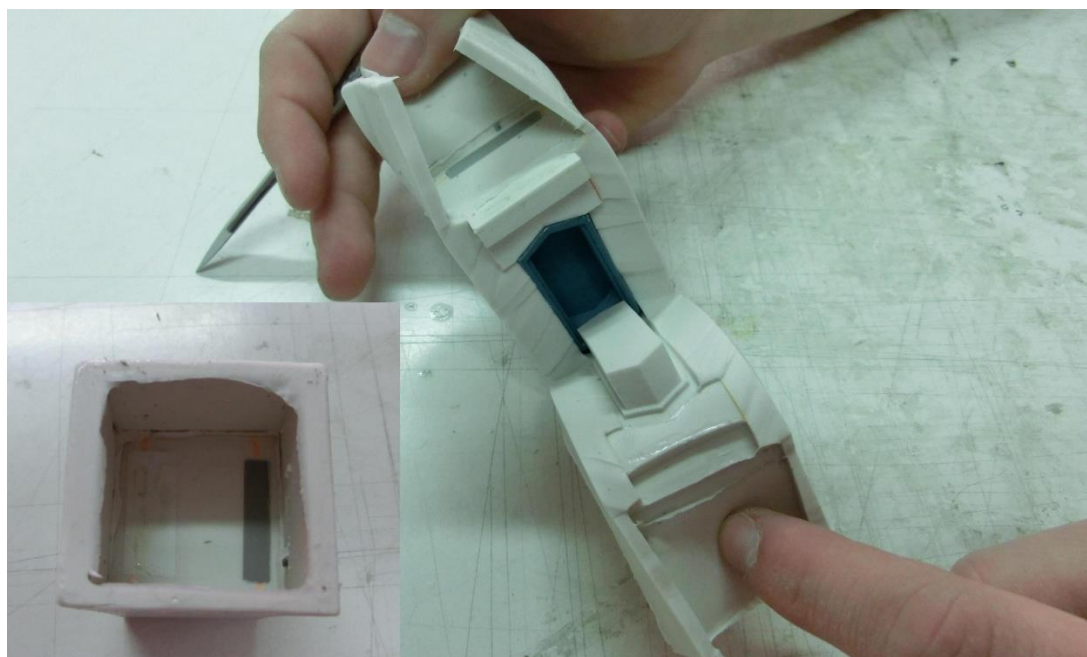
Forma je vyrobena z hmoty Cenusil m 380, která tuhne pomocí tužidla Catalyst T37. Látky jsou míseny v poměru 100:4 (Cenusil:Catalyst). Výsledná směs má poměrně velkou viskozitu, proto je třeba dát modely zalité touto hmotou do podtlakové komory (viz Obr. 36). Z komory je vývěvou odsán vzduch, což zaručí, že ve formě nebudou nežádoucí dutiny. Z tohoto důvodu nemůže být využit sparse model, protože při odsávání vzduchu by na prototyp byl vyvinut velký tlak, který by se snažil o odsátí vzduchu z dutin voštiny, což by vedlo ke zničení modelu. V nových podtlakových komorách je při práci dosahováno absolutního tlaku $\leq 0,5$ mbar³⁰. Po vyjmutí celku z komory je třeba nechat silikonovou gumu Cenusil m 380 tuhnout po dobu 10 h při pokojové teplotě 23 °C³¹.



Obr. 36 Podtlaková komora užitá k účelu této práce vlevo a novější podtlaková komora vpravo³⁰.

4.2 Odformování prototypů

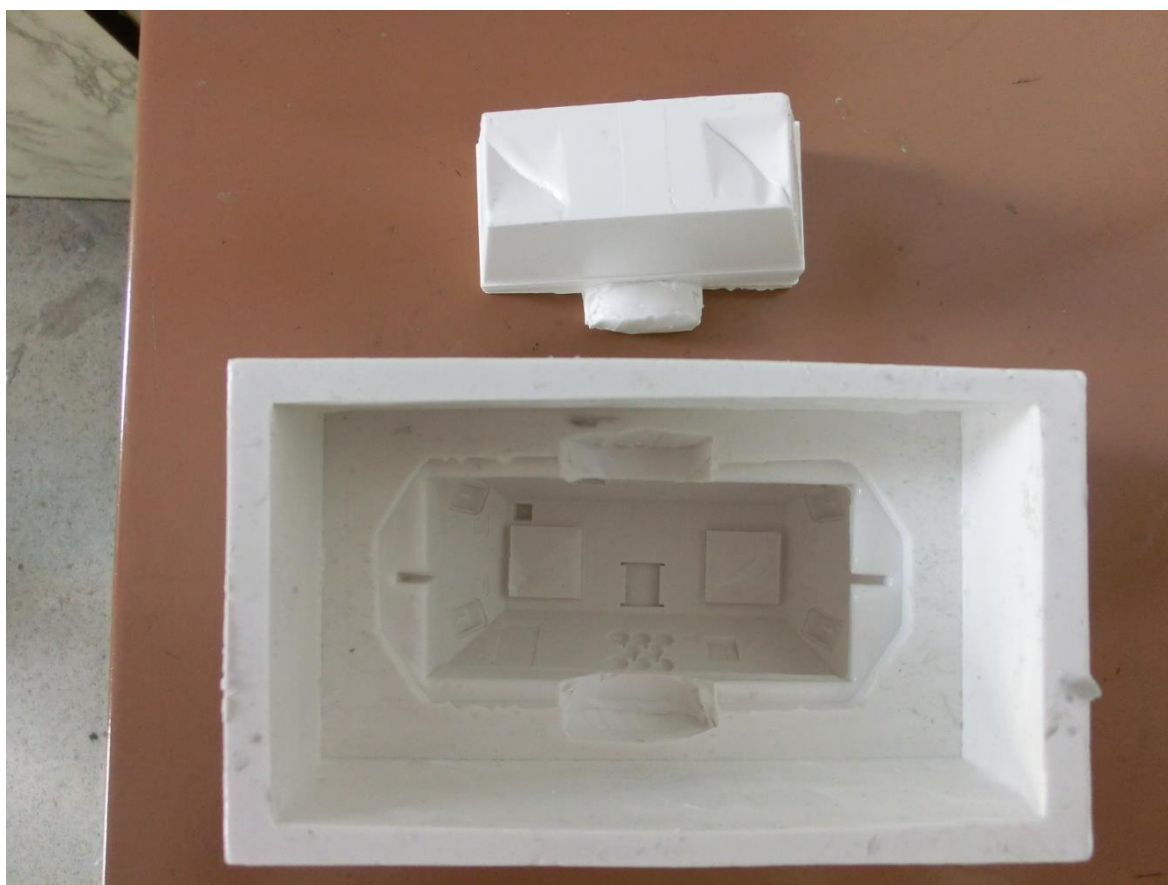
Po ztuhnutí hmoty je třeba z formy odstranit prototypy. Za tímto účelem a také z důvodu umožnění vyjmutí výsledných produktů je forma rozříznuta v místě předem naznačených dělicích rovin (viz Obr. 37). K rozříznutí byl využit skalpel.



Obr. 37 Rozříznutí formy a vlevo naznačení dělicích rovin.

Na výsledné formě je velmi dobře zřetelný každý detail prototypu. Při detailnějším zkoumání je viditelná i skladba vrstev z tisku. Forma je velmi pružná a není vhodné ji při skladování vystavovat déle trvajícím tlakům, jelikož materiál, z něž je vyrobena, má tvarovou paměť. Forma by měla být využívána při pokojových teplotách a z předchozí zkušenosti lze říci, že plní svou funkci přibližně 25 lití.

Pro výrobu forem je využíváno více metod. Výše popisovaná metoda je zřejmě nejrychlejší a nejjednodušší způsob výroby formy. Dalším druhem je běžná dvojdílná forma. K uvedení modelu drezíny Steyr K2670 na trh byla využita metoda jednodílné formy s jádrem (viz Obr. 38). Důvod této volby bude nastíněn v následující kapitole.

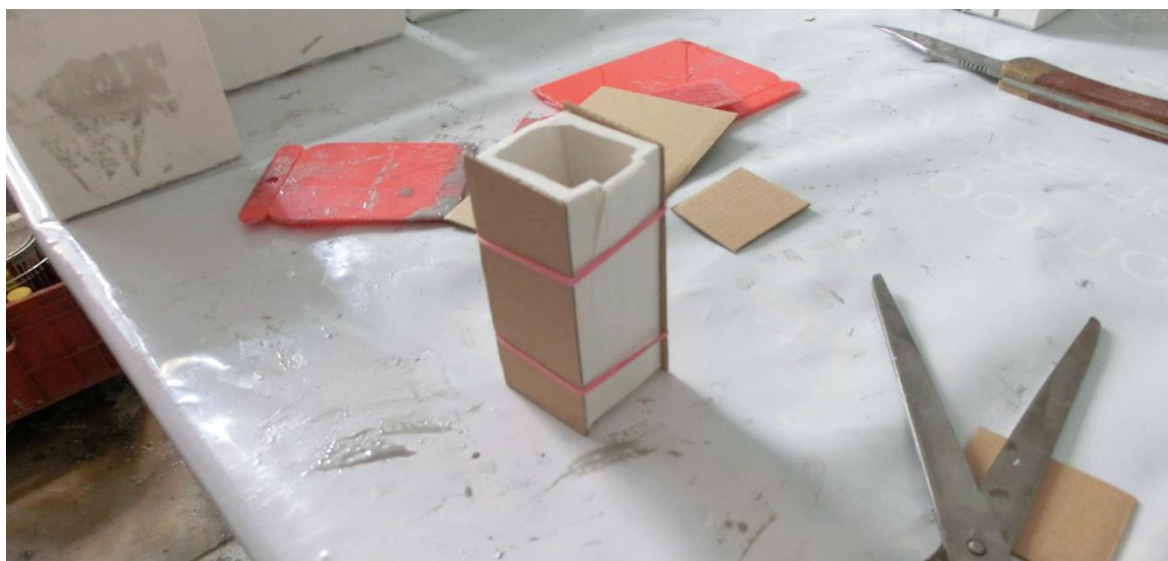


Obr. 38 Jednodílná forma s jádrem.

5 VYUŽITÍ FORMY PRO PRODUKCI MODELŮ

5.1 Příprava formy na lití

Forma, do které se bude lít, je poměrně měkká a sama o sobě není schopna držet tvar takový, aby se v řezech nerozevřela. Je tedy nutné zajistit formu proti otevření. Při prvním lití bylo využito k této aretaci běžných kuchyňských gumiček (viz Obr. 39). Výsledkem byl ovšem vadný kus (viz Obr. 41). Došlo k přílišnému stlačení a deformaci dutiny formy.



Obr. 39 Uzavřená forma.

Při stáhnutí gumičkami mohl být také zúžen průřez vtokového kanálu, což by vedlo k pomalejšímu zatékání hmoty do formy, která by mezi tím tuhnutím zvýšila svou viskozitu a ještě více by ucpala vtok. Ve vakuové komoře je z formy vytažen vzduch, což způsobí podtlak v dutině formy, který nasává do dutiny litý materiál. Pokud dojde k ucpání vtoků, nebo zpomalení vtékání materiálu při lití, tak odsávání vzduchu způsobí, že se dutina formy stáhne a výsledný odlitek je nepřesný. Na obrázku (Obr. 41) si lze všimnout, že v oblasti vtokové soustavy je velmi málo odlévané hmoty, na základě čehož lze usoudit, že došlo k výše popisovanému problému.

Při druhém lití, které již bylo úspěšné, byla forma postavena mezi dva pevné předměty, které nevytvářely žádný tlak, ale bránily formě v rozevření. Jednalo se ale o velmi provizorní a nepraktické řešení, které by nebylo vhodné použít k větší produkci modelu. Pro rozsáhlejší výrobu by bylo dobré vytvořit rám, který by obepínal formu a bránil ji v rozevření. Dalším řešením je také jednodílná forma s jádrem, která má výhodu, že je vcelku a také u ní odpadá problém s úzkým vtokovým kanálkem. Její nevýhodou je obtížnější výroba, zapříčiněná tvorbou jádra.

5.2 Lití finálního produktu

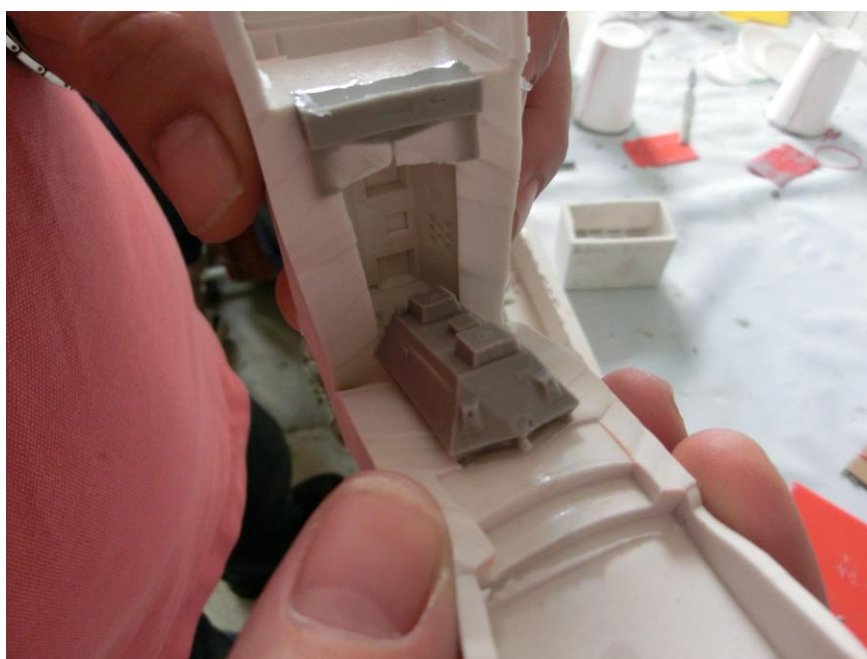
Finální model je odlit z hmoty Biresin G27 LV, která tuhne pomocí tvrdidla Biresin G26. Složky jsou míseny v poměru 1:1. Jedná se o rychle tuhnoucí pryskyřici zaručující vynikající reprodukovatelnost detailů, malé smrštění, dobrou opracovatelnost a schopnost odlít i velmi tenké stěny. Směs tvrdne při pokojové teplotě a po zalití, je možné odlitky vyformovat po uplynutí více jak 15 min. Výsledný produkt má šedoběžovou barvu, pevnost v ohybu 45 MPa, pevnost v tahu 30 MPa, hustotu $1,1 \text{ g/cm}^3$ a tepelnou odolnost $75 \text{ }^\circ\text{C}$.³²

Po nalití tekuté směsi do nálitku byla forma umístěna do podtlakové komory, která odsála z formy vzduch. Následně byla forma z komory vyjmuta a z nálitku byl odstraněn přebytečný materiál (viz Obr. 40).



Obr. 40 Zalitá forma.

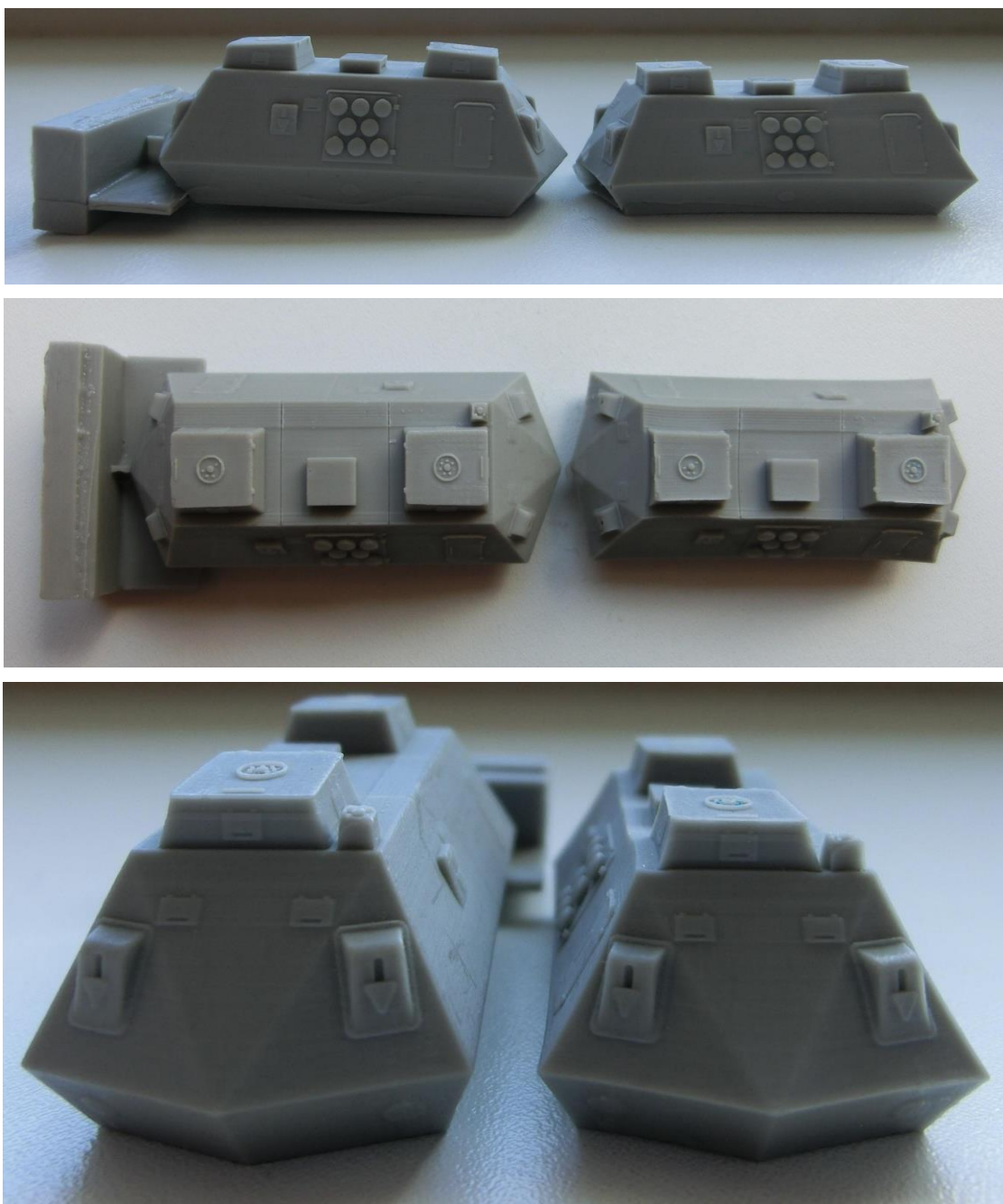
Po dobu 20 min byla forma zanechána v klidu za účelem ztuhnutí licí hmoty a poté byl výsledný produkt vyformován (viz Obr. 41).



Obr. 41 Odlitek ve formě (vadný kus).

5.3 Zhodnocení finálního produktu

Na obrázku (Obr. 42) je srovnání vyhovujícího a vadného kusu. Lze vidět, že u vadného kusu došlo ke značné deformaci dutiny formy, což bylo způsobeno nedostatečným přítokem materiálu při podtlakovém lití. Vtokový kanál byl tak tenký, že se celá vtoková soustava odlomila hned při vyformování (viz Obr. 41). Takový jev je zcela nežádoucí. Naopak u podvozku, který byl lit ve stejné formě jako součást drezína, došlo pouze k drobným nepřesnostem, které jsou nejspíše způsobeny deformací vedlejší dutiny formy. Z tohoto zjištění lze usoudit, že forma, jejíž výroba byla popsána v kapitole 4, je bez větších nároků vhodná pro lití předmětů majících malou tloušťku a nevelkou tvarovou složitost.

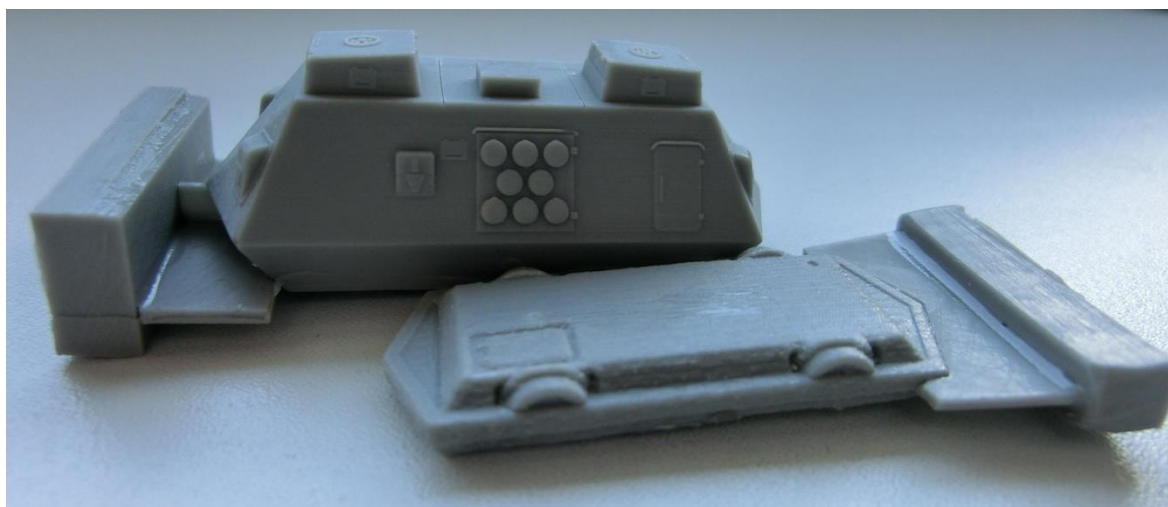


Obr. 42 Porovnání vyhovujícího a vadného kusu.

Při druhém lití, kdy byla forma umístěna mezi dva pevné předměty, aby nedošlo k jejímu rozevření, byl již tvar odlitku bezproblémový. Po pečlivějším ohledání modelu byla ale nalezena na součásti drezína zřetelná dělicí rovina, která by se dala odstranit přebroušením plochy. Lze předpokládat, že forma opět nebyla sevřena správně, což naznačuje, že by bylo vhodnější zvolit pro výrobu jiný druh formy. Na součásti podvozek nebyly nalezeny žádné zásadní vady, pouze jedna vzduchová bublina.

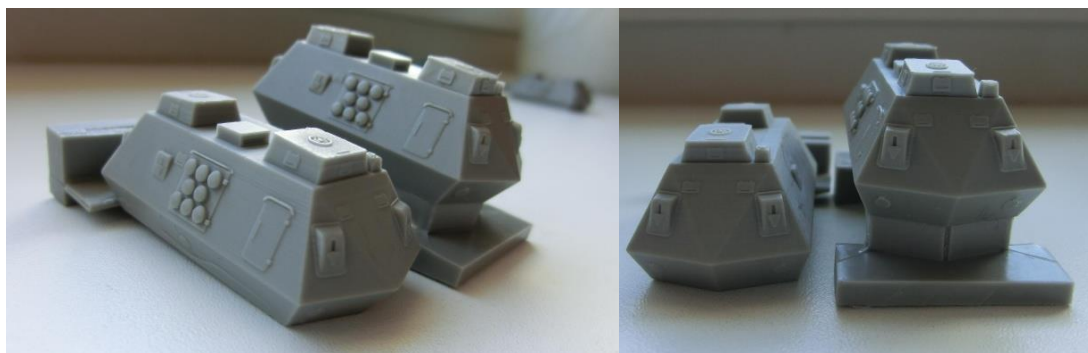
Vzhledem k tomu, že součást drezína byla lita na základě prototypu stavěného metodou Model Maker 3D Plotting a součást podvozek na základě prototypu tvořeného metodou PolyJet Matrix, lze výsledky srovnat (viz Obr. 43). Hodnotu srovnání podporuje také fakt, že prototypy nebyly po tisku na 3D tiskárnách upravovány.

Na součásti drezína je zřetelná textura vrstev a to i přes to, že povrch je relativně hladký. Bylo by vhodné prototyp před tvorbou formy dodatečně upravit. I přes tento fakt je výsledný produkt kvalitní a všechny detaily jsou dokonale viditelné, tak jako na prototypu vytvořeném strojem Solidscape T76. Model podvozku stavěný na stroji Objet30 Pro nedosahuje tak vysoké kvality. Všechny detaily jsou sice zřetelné, nicméně povrch není tak hladký, je na něm viditelná textura vytvořená skládáním vrstev a jsou zde zřetelné také výstupky, které odpovídají zbytkům neodstraněného podporového materiálu. Metoda Model Maker 3D Plotting je tedy na základě zhodnocení, pro produkci, vhodnější. Je třeba ale také přihlédnout k tomu, co bylo napsáno v kapitole 3.6, že výsledek tisku na stroji Objet30 Pro není směrodatný.



Obr. 43 Porovnání produktů vytvořených pomocí metod Model Maker 3D Plotting a PolyJet Matrix.

Jak již bylo zmíněno, pro běžnou produkci modelu drezíny Steyr K2670 je využívána jednoduchá forma s jádrem, která umožňuje dodávání materiálu do její dutiny v kratším čase, protože její vtokový kanál má větší průřez. Další výhodou této formy je, že nemusí být nijak bráněno jejímu rozevření a řeší také problém s dělicí rovinou, jejíž otisk by byl viditelný na výsledném produktu. Nevýhodou je obtížnější výroba a větší spotřeba materiálu, který je nalit v objemnější vtokové soustavě a představuje tak odpad. Pro běžnou produkci byl, stejně jako pro účel této práce, využit prototyp vyrobený na stroji Solidscape T76. Výsledné modely se od sebe liší pouze povrchem, což je způsobeno tím, že forma vyráběná v kapitole 4 byla zhotovena na základě neupravovaného prototypu (viz Obr. 44).



Obr. 44 Porovnání produktů vytvořených v odlišných druzích forem.

Při sestavení modelu Steyr K2670 je drezína doplněna o díly, které jsou tvořeny leptáním tenkého plechu, a které dodávají celku na věrnosti (viz Obr. 45).



Obr. 45 Výsledná maketa drezíny Steyr K2670 distribuovaná firmou Hauler³³.

6 ZÁVĚR

Při volbě metody stavby prototypu je vhodné vybírat na základě jeho následné aplikace. Každá z v rámci práce použitých technologií by si našla své uplatnění. Vizuelní srovnání prototypů je možné sledovat na Obr. 46.

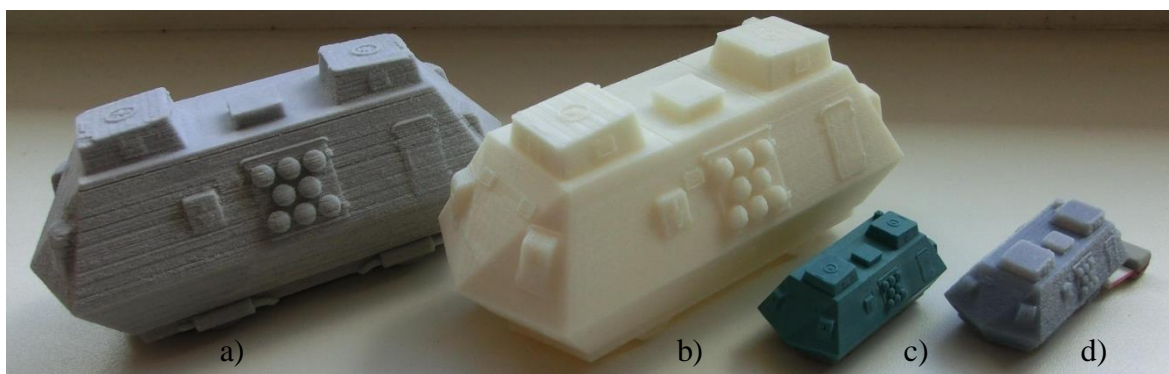
Maketa vytvořená na stroji ZPrinter 650 by mohla plnit svou funkci velmi rychle po jejím virtuálním zpracování. Při aplikaci barvy povrchu, jakou měla reálná drezína, by navíc bylo dosaženo poměrně věrné kopie skutečnosti. Lze tedy říci, že maketu stvořenou tiskárnou ZPrinter 650 je možné využít například v muzeu k vizuelní presentaci, ale určitě není vhodná k tvorbě silikonové formy.

Prototyp vytvořený na stroji Fortus 400mc je oproti produktu tiskárny ZPrinter 650 velmi konzistentní. Teoreticky by jej v rámci úspor výrobního času a nákladů bylo možné použít, za podmínky, že by vnitřní objem netvořila voština. V takovém případě je ale nutné počítat velkými úpravami prototypu před výrobou formy, což náklady bezesporu zvýší. Použití tiskárny Fortus 400mc je díky materiálům, s nimiž pracuje, vhodné spíše k produkci dílů, které slouží k testování funkčnosti.

Stroj Solidscape T76 je prakticky určen k tvorbě prototypů tak detailních, že na základě nich lze tvořit velmi přesné formy. Uplatnění nachází při výrobě šperků, majících drobnější prvky než model drezíny Steyr K2670 v měřítku 1:120. Není tedy překvapením, že výsledný prototyp je zpracován nejkvalitněji ze všech použitých metod. Nevýhodou je dlouhý výrobní čas a vysoké výrobní náklady.

Výsledný produkt stroje Objet30 Pro bohužel nelze příliš směřodatně hodnotit. Metoda by měla být schopna vytvořit prototyp z více materiálů najednou, čímž lze kontrolovat funkci celků, jako je třeba přístroj s pryžovými tlačítky. Odstraňování podpor z prototypu bylo ale příliš náročné a výsledek byl neuspokojivý.

Z testování různých metod 3D tisku tedy vyplývá, že díky přesnosti a kvalitě povrchu je nejvhodnější prototyp, pro multiplikaci pomocí silikonových forem, vytvořen technologií Model Maker 3D Plotting. Tvorba modelu na stroji využívajícím Model Maker 3D Plotting je ale finančně i časově náročná, proto je třeba zvážit, zda se nevyplatí použít levnější metodu a výsledný prototyp před zaformováním upravit. Vyhladit povrch a odstranit nepřesnosti je třeba před případným zaformováním prototypů tvořených technologií PolyJet a FDM. Úpravy by byly ovšem značně ztíženy malými tvary na povrchu součástí a mohlo by také dojít k nežádoucímu přetvoření drobných detailů modelu, proto jsou tyto metody pro multiplikaci méně vhodné. Z testovaných metod je pro odlévání do silikonové formy nejméně vhodná technologie 3D Printing, protože povrch metodou zhotoveného modelu je značně nekonzistentní a vydrolují se z něj částičky stavebního materiálu.



Obr. 46 Srovnání prototypů (a) 3D Printing, (b) FDM, (c) Model Maker 3D Plotting, (d) PolyJet Matrix).

7 ZDROJE

1. PIBWL: *Polish armoured draisine of the SOK (Railway Protection Service)*. [cit 2013-03-31]. Dostupné z World Wide Web: <<http://derela.republika.pl/drsok.htm>>.
2. Modelová železnice: *Pro začátečníky*. [online]. [cit 2013-04-30]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.elektrickevlacky.cz/modelova-zeleznice-zacatecnici.php>>.
3. PÍŠKA, Miroslav aj. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8
4. CAD.cz: *Rapid prototyping ve zdravotnictví*. [online]. [cit 2013-04-30]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.cad.cz/component/content/article/2569.html>>.
5. Dezeen: *The Foetus Project by Jorge Lopes Dos Santos*. [online]. [cit 2013-04-30]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.dezeen.com/2009/07/16/the-fetus-project-by-jorge-lopes-dos-santos/>>.
6. Prototype TODAY: *National Additive Manufacturing Innovation Institute*. [online]. [cit 2013-04-30]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.prototypetoday.com/department-of-energy/new-public-private-partnership-to-support-manufacturing-innovation>>.
7. CAD 4/2007: *Když předměty rostou před očima*. [online]. [cit 2013-03-31]. Dostupné z World Wide Web: <http://ebibus.sk/content/news/n_z450.pdf>.
8. Objet: *PolyJet Matrix™ Technology*. [online]. [cit 2013-04-15]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.dmsf.ust.hk/manuauto/PolyJet%20Matrix.pdf>>.
9. CAD.cz: *Stroj, který mění prach v předměty*. [online]. [cit 2013-03-31]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.cad.cz/hardware/78-hardware/1560-stroj-ktery-meni-prach-v-predmety.html>>.
10. VirginiaTech: *Indirect 3D Printing*. [online]. [cit 2013-04-20]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.dreams.me.vt.edu/Facility/Indirect3DP/>>.
11. ÚST: *Aditivní technologie – metody Rapid Prototyping*. [online]. [cit 2013-03-31]. Dostupné z World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_mety_Rapid_Prototyping.pdf>.

12. Custompart: *Fused deposition modeling*. [online]. [cit 2013-04-20]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling/>>.
13. HÁJEK, P. *Rapid Prototyping (RP)*. [online]. [cit 2013-03-31]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.spszr.cz/projekty/plm/rp2012.pdf>>.
14. FDM: *build styles*. [online]. [cit 2013-04-22]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.flickr.com/photos/rapidpsi/6105982290/lightbox/>>.
15. MAŠÍN, I. *Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping*. [online]. [cit 2013-04-10]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/P%C5%99ehled%20technik%20vyu%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDch%20p%C5%99i%20Rapid%20Prototyping.pdf>.
16. CAD.cz: *Solidscape T76 Benchtop – 3D tiskárna pro puntičkáře*. [online]. [cit 2013-04-11]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.cad.cz/hardware/78-hardware/1532-solidscape-t76-benchtop-3d-tiskarna-pro-puntickare.html>>.
17. 3D Phase Change Printing. [online]. [cit 2013-04-22]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.flickr.com/photos/organ_printer/878475970/sizes/o/in/photostream/>.
18. Stratasys: *PolyJet™ Technologie – dreidimensionales Drucken*. [online]. [cit 2013-04-22]. Dostupné z World Wide Web: <http://de.objet.com/Produkte/PolyJet_Technologie/>.
19. Stratasys: *PolyJet Materials Data Sheet*. [online]. [cit 2013-04-22]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.stratasys.com/materials/polyjet/~/_media/29592222B80C489BAC28803DB08C10E5.ashx>.
20. Le QG 1/72e de Twist Again: draisine blindée Sp. Steyr K2670 [online]. [cit 2013-04-22]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.loutan.net/olivier/archives/2009/12/23/draisine-blindee-sp-steyr/>>.
21. SHIH, Randy. *Introduction to Autodesk Inventor 2010 and Autocad 2010*. Vyd. SDC Publications, 2009, ISBN 978-15-850-3545-8
22. BOBOULOS, Miltiadis A. *CAD-CAM & Rapid prototyping Application Evaluation*. Ventus Publishing ApS. 2010. ISBN: 978-87-7681-676-6

23. 3DSYSTEMS: *ZPrinter® 650*. [online]. [cit 2013-04-20]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.zcorp.com/en/Products/3D-Printers/ZPrinter-650/spage.aspx>>.
24. Z CORPORATION: *ZPrinter Materials and Accuracy*. [online]. [cit 2013-04-22]. Dostupné z World Wide Web: <<http://prototype-nv.ru/Z450-Material-Properties.pdf>>.
25. Stratasys: *Fortus 400mc*. [online]. [cit 2013-05-01]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.stratasys.com/3d-printers/production-series/fortus-400mc>>.
26. Solidspace: *3D Materials*. [online]. [cit 2013-04-28]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.solid-scape.com/products/3d-printer-wax-materials>>.
27. BIBUS: *Solidscape T76 plus*. [online]. [cit 2013-04-28]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.bibus.cz/cs/prehled-produktu/rapid-prototyping/3d-tiskarny/solidscape-t76/>>.
28. Stratasys: *Object30 Pro*. [online]. [cit 2013-04-22]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.stratasys.com/3d-printers/design-series/precision/~media/AECD02CC265143198CD493D1664EEF55.ashx>>.
29. Stratasys: *3D Printing With Rigid Opaque Material*. [online]. [cit 2013-04-28]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.stratasys.com/materials/polyjet/rigid-opaque>>.
30. MCEA: *MK Mini*. [online]. [cit 2013-05-01]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.mcae.cz/mk-mini>>.
31. Wacker: *Cenusil® M 380*. [online]. [cit 2013-05-01]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.wacker.com/cms/en/products-markets/products/product.jsp?product=13308>>.
32. Sika Deutschland GmbH: *Beresin®G27 LV*. [online]. [cit 2013-05-03]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.tooling.cz/download/technicke-listy-sika/g27-lv.pdf>>.
33. Hauler: *Steyer K2670 draisine*. [online]. [cit 2013-05-03]. Dostupné z World Wide Web: <[http://www.hauler.cz/e-shop/1-120-\(tt\)-construction-kits-9/steyer-k2670-draisine-156](http://www.hauler.cz/e-shop/1-120-(tt)-construction-kits-9/steyer-k2670-draisine-156)>.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
2D	[-]	Dvojdímenzionální prostor
3D	[-]	Trojdimenzionální prostor
3DS	[-]	Formát používaný softwarem Autodesk 3ds Max
ABS	[-]	Akrylonitrilbutadienstyren
ABS – M30	[-]	ABS materiál používaný strojem Fortus 400mc
CMYK	[-]	Barevný model užívaný k míchání barev
CT	[-]	Computed Tomography, vyšetřovací metoda
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
HP	[-]	Firma zabývající se výpočetní technikou
MRI	[-]	Magnetic resonance imaging, magnetická resonance
NAMII	[-]	National Additive Manufacturing Innovation Institute (Národní institut pro inovace v aditivní výrobě, USA)
NASA	[-]	National Aeronautics and Space Administration (Národní úřad pro letectví a kosmonautiku, USA)
PLY	[-]	Polygon File Format
RP	[-]	Rapid Prototyping
SLC	[-]	CAD formát
SR30	[-]	Podporový materiál používaný strojem Fortus 400mc
STL	[-]	Standard Triangulation Language - STereoLithography
TT	[-]	Table Top, modelářské měřítko
USA	[-]	United States of America (Spojené Státy Americké)
UV	[-]	Ultraviolet (ultrafialové) záření
VRML	[-]	Virtual Reality Modeling Language, grafický formát
ZPR	[-]	Formát vynalezený firmou Z Corporation využívaný k 3D tisku

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázky:

Obr. 1 Schéma metody 3D Printing ¹⁰	10
Obr. 2 Schéma metody Fused Deposition Modeling ¹²	11
Obr. 3 Voština ¹⁴	11
Obr. 4 Druhy podpor u metody Fused Deposition Modeling vytvořené plastové podložce.	12
Obr. 5 Schéma metody Model Maker 3D Plotting ¹⁷	13
Obr. 6 Schéma metody PolyJet Matrix ¹⁸	14
Obr. 7 Dobová fotografie drezíny Steyr K2670 ²⁰	15
Obr. 8 Model součásti drezína v softwaru Inventor.....	17
Obr. 9 Model součásti podvozek v softwaru Inventor.....	18
Obr. 10 STL model a jeho trojúhelníkové polygony.....	19
Obr. 11 STL model s řídkou (vlevo) a hustou (vpravo) sítí polygonů.....	19
Obr. 12 STL model (vlevo) a jeho rozdělení na vrstvy s podporami (vpravo).....	20
Obr. 13 Tiskárna ZPrinter 650 při stavbě prototypu. Vlevo je čistící stanice.....	21
Obr. 14 Zvýšená saturace pojiva a hloubka napuštění barevným pojivem.....	22
Obr. 15 Částečně infiltrovaný prototyp z tiskárny ZPrinter 650.....	22
Obr. 16 Dráhy trysek generované softwarem Insight.....	23
Obr. 17 Prototyp vyrobený na stroji Fortus 400mc.....	24
Obr. 18 Detail na dráhu kladeného materiálu v hranách kolmých k rovině vrstvy.....	24
Obr. 19 Systémové prostředí softwaru Model Works.....	25
Obr. 20 Prototypy tisknuté strojem solidscape v měřítku 1:144 vpravo a 1:120 vlevo.....	26
Obr. 21 Obalení prototypů podporami v softwarovém prostředí kontrolního programu BView.....	26
Obr. 22 Systémové prostředí softwaru Objet Studio.....	27
Obr. 23 Pracovní prostor otryskávací komory.....	27
Obr. 24 Prototypy v měřítcích 1:48 a 1:120 obalené podporovým materiálem na pracovní ploše tiskárny Objet30 Pro.....	28
Obr. 25 Výsledný prototyp vyrobený strojem Objet30 Pro (k podvozku je připevněn náletek).....	28
Obr. 26 Porovnání pracovních prostor tiskáren vzhledem k modelu 1:48.....	29
Obr. 27 Grafické zhodnocení volitelného rozsahu tloušťky vrstev.....	30
Obr. 28 Grafické zhodnocení výrobní tolerance udávané výrobcem.....	30
Obr. 29 Grafické zhodnocení spotřeby materiálů.....	31
Obr. 30 Grafické zhodnocení tloušťek tisknutých vrstev.....	32
Obr. 31 Grafické zhodnocení výrobních časů.....	32
Obr. 32 Grafické zhodnocení výrobních nákladů.....	33
Obr. 33 Prototypy s vtokovými soustavami.....	34
Obr. 34 Prototypy připravené k zaformování.....	35
Obr. 35 Zarámovaná soustava připravená k zalití hmotou formy.....	35
Obr. 36 Podtlaková komora užitá k účelu této práce vlevo a novější podtlaková komora vpravo ³⁰	36
Obr. 37 Rozříznutí formy a vlevo naznačení dělicích rovin.....	36
Obr. 38 Jednodílná forma s jádrem.....	37
Obr. 39 Uzavřená forma.....	38
Obr. 40 Zalitá forma.....	39
Obr. 41 Odlitek ve formě (vadný kus).....	39

Obr. 42 Porovnání vyhovujícího a vadného kusu.	40
Obr. 43 Porovnání produktů vytvořených pomocí metod Model Maker 3D Plotting a PolyJet Matrix.	41
Obr. 44 Porovnání produktů vytvořených v odlišných druzích forem.	42
Obr. 45 Výsledná maketa drezíny Steyr K2670 distribuovaná firmou Hauler ³³	42
Obr. 46 Srovnání prototypů (a) 3D Printing, b) FDM, c) Model Maker 3D Plotting, d) PolyJet Matrix).	43
Tabulky:	
Tab. 1 Porovnání kladů a záporů metod.	29
Tab. 2 Charakteristické hodnoty strojů.	30
Tab. 3 Hodnoty spojené se stavbou prototypu.	31