



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ PRO VÝROBU SPOJKY KŘÍDEL NA RC LETADLO

USAGE OF MODERN TECHNOLOGIES FOR PRODUCTION COUPLER WINGS FOR RC AIRPLANE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN ONDŘÍŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JOSEF SEDLÁK, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Ondříšek

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:

Využití moderních technologií pro výrobu spojky křídel na RC letadlo

v anglickém jazyce:

Usage of modern technologies for production coupler wings for RC airplane

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Historie a vývoj RC modelářství
3. Konstrukce součástí v parametrickém programu SolidWorks
4. Experimentální část
5. Technicko-ekonomické zhodnocení
6. Závěr

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce bude návrh a výroba 3D modelu spojky křídel pro RC letadlo Krásná Helena. Při modelování bude využit parametrický program SolidWorks. Pro výrobu prototypové součásti bude použita aditivní technologie Rapid Prototyping (metoda Fused Deposition Modeling). Součástí práce bude výroba silikonové formy, která bude sloužit pro odlití potřebného počtu požadovaného dílu z komerčně dostupného materiálu (plast). Práce bude ukončena technicko-ekonomickým zhodnocením s následným rozбором a celkovým zhodnocením aplikované technologie.

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. 30s. ISBN: 80-248-0895-1.
3. VLÁČILOVÁ, H., VILÍMKOVÁ, M., HENCL, L. Základy práce v CAD systému SolidWorks. 1. Vyd. Brno: Computer Press, a.s., 2006. 316 s. ISBN 80-251-1314-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 22.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je návrh a výroba 3D modelu spojky křidel pro RC letadlo Krásná Helena. Při modelování byl využit parametrický CAD program SolidWorks. Pro výrobu prototypové součásti byla použita aditivní technologie Rapid Prototyping a metoda Fused Deposition Modeling. Součástí práce byla výroba silikonové formy, která bude sloužit pro odlití potřebného počtu požadovaného dílu z plastu. Práce je ukončena technicko-ekonomickým zhodnocením s následným rozbohem a celkovým zhodnocením aplikované technologie.

Klíčová slova

RC model, Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, silikonová forma.

ABSTRACT

The objective of the bachelor thesis is the design and manufacture of 3D model coupler for RC plane wings of the plane Krasna Helena. The parametric CAD programme SolidWorks will be used for modelling. For the production of the prototype part will be used additive Rapid Prototyping technology and Method Fused Deposition Modeling. The thesis will also deal with the manufacture of silicone mould that will be used to cast the required number of the required part of plastic. The work will be finished with technical and economic evaluation with the subsequent analysis and overall assessment of applied technology.

Key words

RC model, Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, Silicon mould.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ONDŘÍŠEK, Jan. *Využití moderních technologií pro výrobu spojky křidel na RC letadlo*. Brno 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 49 s. 2 přílohy. Vedoucí práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Využití moderních technologií pro výrobu spojky křídel na RC letadlo* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jan Ondříšek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D., Ing. Jiřímu Kocovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Martinovi Macků za pomoc a rady v praktické části práce. Také bych chtěl poděkovat své přítelkyni a rodině za podporu a možnost studovat na vysoké škole.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 HISTORIE A VÝVOJ RC MODELÁŘSTVÍ	10
1.1 Prvopočátky RC modelářství	10
1.2 Vývoj RC souprav	12
1.3 Rozdělení RC modelářství	15
2 KONSTRUKCE SOUČÁTI V PARAMETRICKÉM PROGRAMU SOLIDWORKS ...	16
2.1 Návrh variant řešení spojky	16
2.2 Tvorba 3D modelů	18
2.2.1 Modelování přední spojky	18
2.2.2 Modelování zadní spojky	19
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
3.1 Technologie Rapid Prototyping	24
3.1.1 Metoda Fused Deposition Modeling.....	24
3.2 Preprocessing.....	25
3.3 Processing.....	30
3.4 Postprocessing	32
3.5 Výroba odlitku s využitím vyrobené silikonové formy	32
3.5.1 Úprava modelu.....	33
3.5.2 Výroba jader	34
3.5.3 Výroba silikonové formy	35
3.6 Výroba odlitku	37
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	40
4.1 Náklady na výrobu modelů technologií RP	40
4.2 Náklady na výrobu silikonové formy	40
4.3 Náklady na výrobu odlitků modelů	41
4.4 Celkové náklady na výrobu jednoho odlitku modelů	41
4.5 Porovnání nákladů metodou FDM a odléváním	42
ZÁVĚR	44
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	47

SEZNAM PŘÍLOH.....	49
--------------------	----

ÚVOD

V dnešní době je stále více možností výroby součástek a doplňků pro modelářství. Objevují se nové technologie a po jejich zavedení do průmyslu se některé technologie uplatňují i v modelářské praxi.

Před pár lety se na našem trhu objevila nová technologie Rapid Prototyping. Tato technologie se využívá v letectví, automobilním průmyslu, ve strojírenství a v dalších odvětvích průmyslu. Metoda vznikla v USA u společnosti 3D Systems Inc. a poprvé byla představena veřejnosti v roce 1987. Hlavním cílem a výhodou této technologie je rychlost výroby prototypového výrobku, využití netoxických materiálů a také vznik velmi malého množství odpadního materiálu. Princip 3D tisku spočívá v nastavení speciálního programu, kde se součást „rozseká“ na velké množství jednotlivých vrstev. Následně se tiskovou hlavicí se nanáší jednotlivé vrstevy plastu nebo kovu o tloušťce řádově desetin milimetru ve 3D tiskárně. Vyrobené modely mohou mít finální tvar, nebo jsou to polotovary, které dalším zpracováním získávají konečný tvar.

Právě tato technologie Rapid Prototyping má velkou budoucnost v modelářské praxi. Konkrétně metoda nanášení nastaveného plastu (ABS - Akrylonitril-Butadien-Styren nabízí mimořádnou zpracovatelnost, vzhled, nízké tečení, vynikající rozměrovou stálost a vysokou pevnost v rázu). Existují součástky, které si většina modelářů vyrábí doma v dílnách, v modelářských klubech, apod. z toho důvodu, že díly jsou buďto drahé, nejsou dostupné na trhu, nebo je jejich výroba v domácích podmínkách snadná.

Na trhu jsou 3D tiskárny běžně dostupné, avšak jejich cenová relace je pro běžného zákazníka prozatím vysoká. Cena tiskárny se totiž pohybuje v desítkách tisíc korun. Proto se některé modelářské kluby na zakoupení této technologie složily a využívají ji pro své členy. V blízké budoucnosti bude tato technologie dostupná všem.

Hlavním tématem bakalářské práce je návrh a výroba spojky křídel na RC letadlo Krásná Helena pomocí technologie Rapid Prototyping – metoda Fused Deposition Modeling. Vyrobená součást poslouží pro výrobu silikonové formy, ze které bude odlito několik kusů součástí.

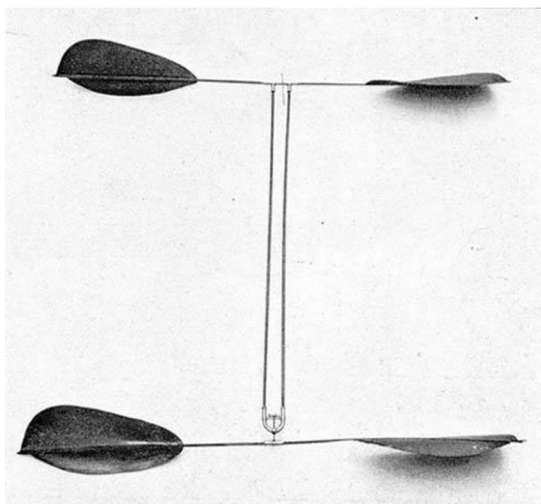
1 HISTORIE A VÝVOJ RC MODELÁŘSTVÍ

Co představuje název RC modelářství? RC je zkratka z anglického slova radio control. V překladu rádiem řízené modely.

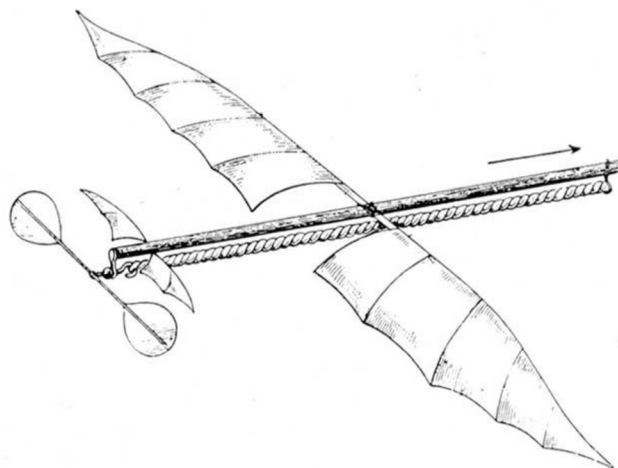
1.1 Prvopočátky RC modelářství

V roce 1870 Alphonse Penaud známý jako “Otec létajících modelů“ vynalezl způsob pohonu, který umožňoval modelu letět. Byl to pohon pomocí gumového svazku, se kterým Penaud experimentoval. První úspěšný pokus provedl s modelem vrtulníku (viz. Obr. 1.1), který se vznesl až ke stropu a udržel let až k návratu na zem [1, 2].

V roce 1871 předvedl v zahradách Tuileries v Paříži model letadla “Planophore“ (viz. Obr. 1.2). Model poháněný tlačným typem vrtule letěl 11 sekund a uletěl 40 metrů. Penaudovi je také připisováno první využití křížovitého ocasu na jeho létajících modelech [1].

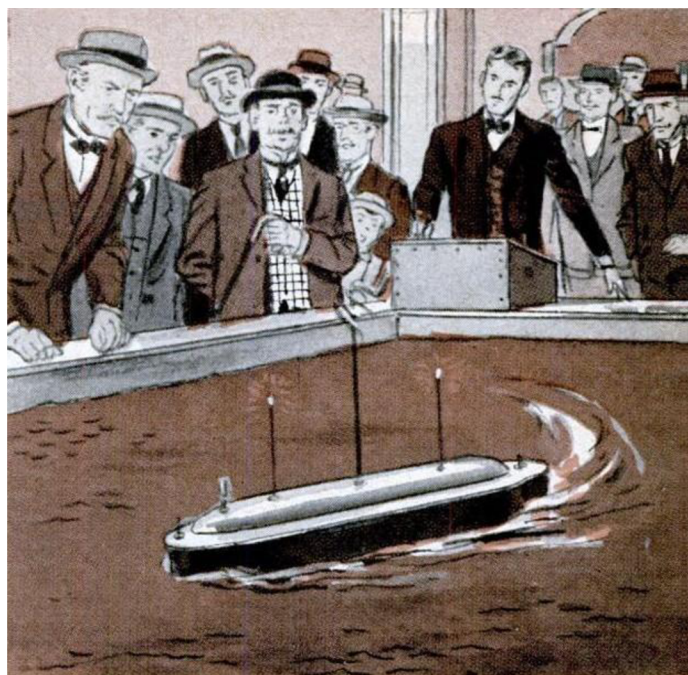


Obr. 1.1 model vrtulníčku [2].

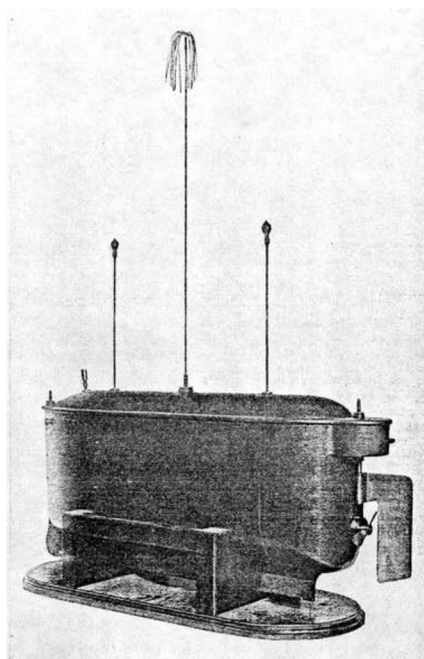


Obr. 1.2 Planophore [2].

Poprvé v historii Nikola Tesla demonstroval v roce 1898 jeden jeho vynález v Madison Square Garden v New Yorku (viz. Obr. 1.3). Byl to prototyp rádiem řízené lodi, která byla především určena pro vojenské použití (viz. Obr. 1.4). Loď byla poháněna elektrickým motorem a jako zdroj energie sloužily olověné baterie. Byla navržena tak, aby mohla pomocí instrukcí obdržných z bezdrátového dálkového ovladače doplout na určený cíl a poté vysláním příkazu mělo dojít k odpálení výbušného zařízení namontovaného uvnitř lodi [3, 5].



Obr. 1.3 Ukázka Teslova vynálezu v Madison Square Garden [4].



Obr. 1.4 Prototyp rádiem řízené lodi [4].

Následovala první a druhá světová válka. Největší pozornosti rádiem řízených strojů se dostalo až za druhé světové války. Během války bylo prováděno mnoho vojenských výzkumů za účelem zdokonalit Teslův vynález a vyvinout řízené zbraně. Nejčastější vývoj se zaměřil na bezpilotní vozidla a řízené střely. Jak se technologie zdokonalovala, stroje byly menší lehčí a levnější. Nejznámější jsou řízené střely Friz X, V-2, Regulus a dálkově řízené tanky TT-26 [5].

1.2 Vývoj RC souprav

Před RC řízenými modely existovaly modely volně puštěné nebo upoutané.

Skutečným průkopníkem v začátcích provozu RC modelů byl Australan Ross Hull, který v roce 1927 létal s RC kluzákem jménem BIG GUFF. Jeho vysílač měl příkon 30 až 100W [6].

První soupravou na dálkové ovládání modelů byl takzvaný "JEDNOKANÁL". U modelu se dala ovládat pouze směrovka. Ovládací mechanismus směrovky fungoval na principu, doraz-doraz, tj. bez signálu byla nastavena plná výchylka směrovky vlevo, se signálem vpravo. Funkci serva zastával elektromagnet a později spolehlivější elektromotor, na jehož hřídel se navíjela chirurgická nit a na druhou stranu jej vracela pružinka nebo gumička. Aby mohlo letadlo letět rovně, muselo se v určitých intervalech spínat tlačítko [7, 9].

V padesátých letech se u nás začalo s amatérským sestavováním RC souprav. V této době bylo obtížné sehnat RC soupravu a tak každý návod na RC zařízení vyvolal značnou pozornost. Problém spočíval v nedostupnosti některých součástí. Proto vznikl nápad připravit stručný návod. Ke spolupráci byl pozván Ing. Jan Hajič, jehož osvědčená konstruktérská činnost měla být zárukou úspěchu. Jako vysílač (viz. Obr. 1.5) i přijímač Alfa (viz. Obr. 1.6) Ing. Hajič navrhl ve světě osvědčené zařízení, upravené pro tuzemské součástky Tesla [8].



Obr. 1.5 Vysílač Alfa [8].



Obr. 1.6 Přijímač Alfa [8].

Následovaly další RC soupravy, některé dokázaly ovládat víc jak jeden kanál, jako např. GAMA (viz. Obr. 1.7), která byla první sériově vyráběnou RC soupravou, Tonox (viz. Obr. 1.8), DELTA (viz. Obr. 1.9), MARS standart, MARS II (viz. Obr. 1.10), Modela Digi TX-3, Modela AM6 (viz. Obr. 1.11) [10].



Obr. 1.7 RC souprava GAMA [11].



Obr. 1.8 Vysílač TONOX [10].



Obr. 1.9 Vysílač a přijímač DELTA [10].



Obr. 1.10 Vysílač a přijímač MARS II [10].



Obr. 1.11 Modela AM6 [10].



Obr. 1.12 Spektrum DX10t [12].

Uplynulo pár let a od doby, kdy bylo možné zakoupit si jednobandovou soupravu, existuje možnost si zakoupit až 18-ti kanálovou soupravu (Obr. 1.12).

Každá RC souprava se skládá ze tří částí: vysílač, přijímač a výkonné prvky (serva, regulátory, spínače) [13].

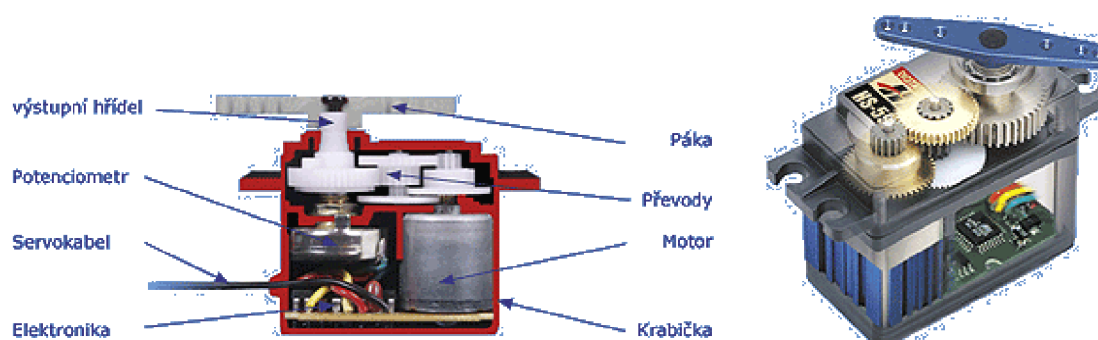
Vysílače se dělí:

Podle způsobu držení: - pákové,
- volantové.

Dle počtu použitých kanálů: - 2CH (dvoukanálové) – ovládání směrovka, výškovka,
- 3CH (tříkanálové) - ovládání směrovka, výškovka, motor,
- 4CH (čtyřkanálové) – ovládání směrovka, výškovka, motor, křidélka,
- 5CH (pětikanálové) – ovládání směrovka, výškovka, motor, křidélka, podvozek nebo vztlaková brzda,
- 6CH (šestikanálové) – ovládání směrovka, výškovka, motor, křidélka, podvozek, vztlaková brzda,
- Více-kanálové (až 18CH).

Výkonné prvky:

Serva – zařízení, které slouží k řízení změny směru modelu (viz. Obr. 1.15). Převádí velikost výchylky páky na RC vysílači na mechanický pohyb. Prodávají se serva různé síly a různých velikostí. Od velkých a silných serv do obřích modelů, až po mikro-serva [13].



Obr 1.15 Popis serva [14].

Regulátory: slouží pro regulaci otáček motoru.

Regulátory se rozdělují na dvě základní skupiny: - pro stejnosměrné motory,
- pro střídavé motory.

Každá skupina se dělí na: - jednosměrné,
- obousměrné.

Jednosměrný regulátor se používá tam, kde není zapotřebí zpětný chod motoru. Obousměrný regulátor se používá hlavně v modelech lodí a automobilů [13].

S RC soupravou úzce souvisí pojem krystal. Krystal je malá elektronická součástka, která naladí vysílač a přijímač na daný kanál, jehož číslo a frekvence je na něm uvedena.

Pro provozování modelářských RC souprav vydal Český telekomunikační úřad frekvenční pásma, která jsou používána pro řízení modelů. V České republice to jsou pásma 27MHz, 35MHz, 40MHz a nově i 2.4GHz.

V pásmu 27MHz je povoleno provozovat jakékoli modely, bez ohledu na to jestli jezdí, plují nebo létají. Toto pásmo v současnosti není příliš používané. V tomto pásmu pracuje většina hraček na dálkové ovládání, přičemž dochází k rušení a následné ztrátě kontroly nad modelem.

V pásmu 35MHz je povoleno provozovat pouze létající modely. Toto pásmo se dále dělí na pásmo A a na pásmo B.

V pásmu 40MHz je povoleno provozovat jakékoli modely. Je o něco málo bezpečnější než pásmo o frekvenci 27MHz.

Pásmo 2.4GHz je volné pásmo, kde pracuje např. WIFI, Bluetooth, a využívá se i pro ovládání modelů. Toto pásmo používá chytrější způsob přenosu řídicích informací, tak je málo pravděpodobné, že dojde k rušení [15,16].

1.3 Rozdělení RC modelářství

Základní rozdělení v RC modelářství:

- letadla,
- auta,
- vrtulníky,
- ponorky,
- vzducholodě.

Vzhledem k tomu, že vlastní výroba součástky se bude týkat letadla, je uvedeno základní rozdělení RC letadel, a to dle:

Typu motoru:

- bezmotorové (větroně, kluzáky),
- s elektromotorem,
- se spalovacím motorem:
 - detonační,
 - pulzační,
 - turbínové,
 - dmychadla,
 - spalovací.

Pozice křídel:

- středoplošník,
- dolnoplošník,
- hornoplošník,
- dvouplošník,
- trojplošník.

Podle zkušeností:

- pro začátečníky - tréninkové,
- pro pokročilé - akrobatické, halové, modely maket a polomaket.

2 KONSTRUKCE SOUČÁSTI V PARAMETRICKÉM PROGRAMU SOLIDWORKS

V této kapitole bude popsán návrh a postup konstrukce spojky křídel. Pro modelování spojky křídel RC hydroplánu Krásná Helena byl využit parametrický program SolidWorks.

2.1 Návrh variant řešení spojky

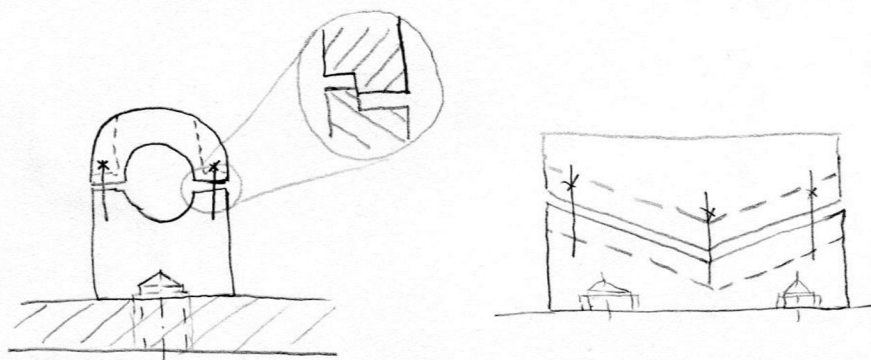
Při navrhování dílů bylo nutno vyjít z původních konstrukčních plánů RC letadla. Při stavbě křídel modelu byly totiž použity pro lepší tuhost a pevnost tenkostěnné uhlíkové trubky 10x9 mm. Kvůli tomuto vylepšení nemohly být použity původní spojky křídel z překližky, proto byl navržen jiný způsob spojení křídel. Pro navrhovanou spojku byly navrženy různé varianty.

Základní rozdělení variant:

- spojka je součástí trupu (varianta č.1, č.2),
- spojka je součástí křídel (varianta č.3, č.4).

Varianta č.1

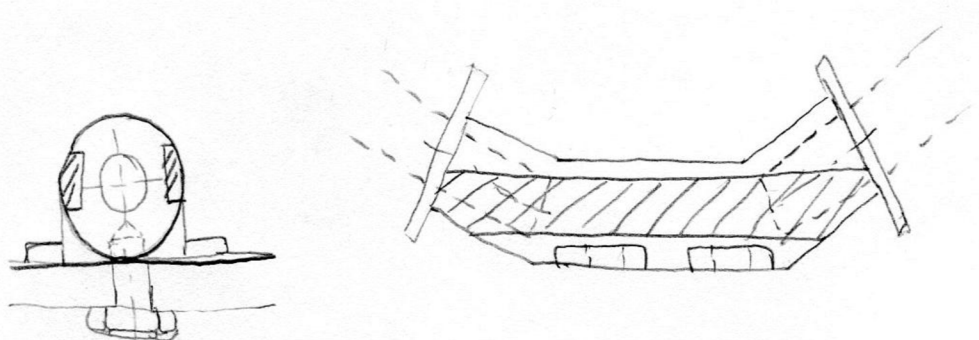
Každá spojka je k trupu připevněna ze spodní strany dvěma šrouby a spojka je v celé půlce vedení rozdělena na dvě části se zámkovým tvarem. Ke spojení slouží 6 menších šroubů (viz. Obr. 2.1).



Obr. 2.1 Varianta č.1.

Varianta č.2

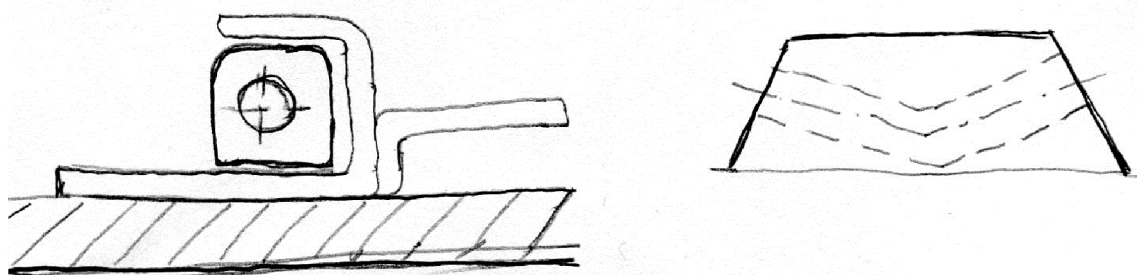
Spojka je k trupu připevněna ze spodní strany šrouby. Na obou bocích spojky jsou přilepena žebra, která slouží jako styčné plochy pro křídlo (viz. Obr. 2.2).



Obr. 2.2 Varianta č.2.

Varianta č.3

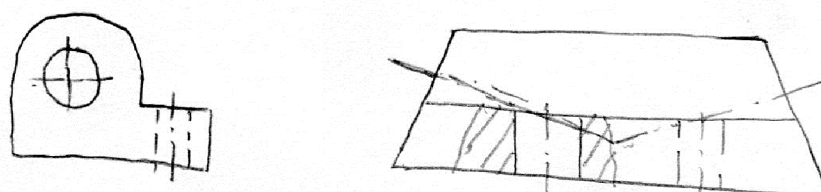
Přední část spojky je uložena v duralovém pouzdru, které slouží zároveň jako lože motoru, zadní část je s trupem spojena dvěma šrouby (viz. Obr. 2.3).



Obr. 2.3 Varianta č.3.

Varianta č.4

Přední i zadní spojka jsou k trupu připevněny z vrchu 4 šrouby (viz. Obr. 2.4).



Obr. 2.4 Varianta č.4.

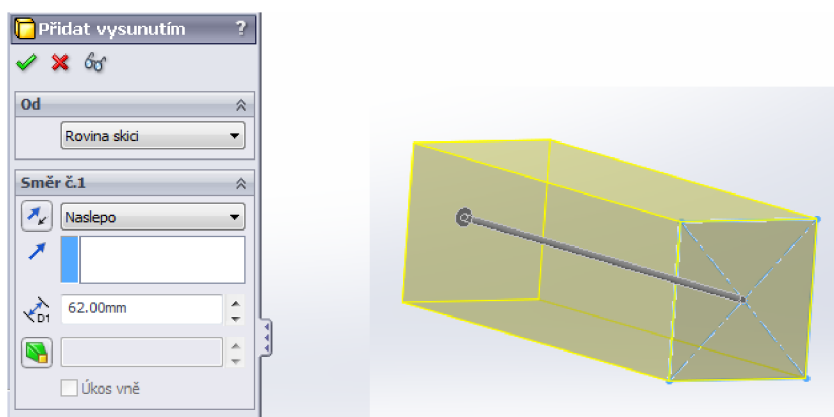
Jako nejlepší a zároveň jednoduché řešení byla vybrána varianta č. 3, u které bude využito duralové lože motoru pro zajištění polohy spojky.

2.2 Tvorba 3D modelů

Díly spojky byly modelovány ve školní verzi programu SolidWorks 2012. Rozměry modelované spojky byly přizpůsobeny velikostí a uzpůsobením původním dílům, které už jsou zkonstruovány a bylo by obtížné je měnit.

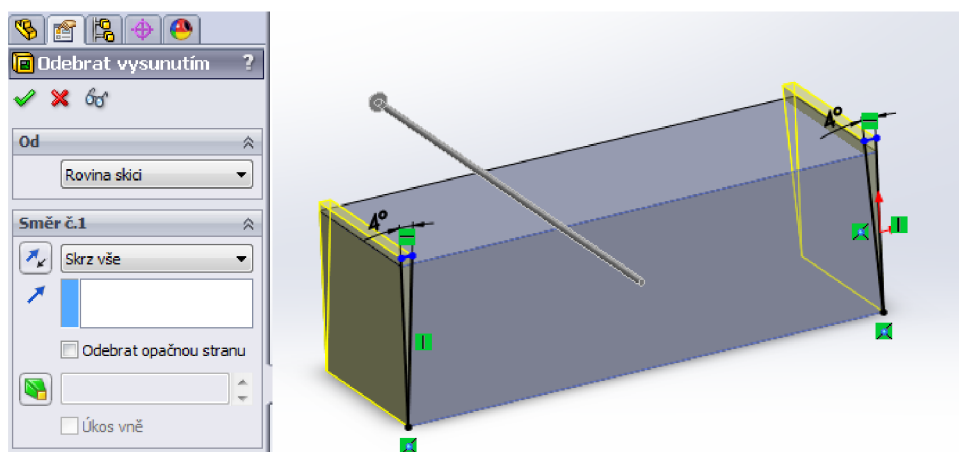
2.2.1 Modelování přední spojky

Jako první byl založen nový projekt s názvem SPOJKA PŘEDNÍ. Základním prvkem spojky je hranol o rozměrech 20x20x62. V náčrtu se vytvořila skica čtverce s délkou stran 20mm. Za pomoci příkazu „Přidání vysunutím“ byl vytvořen základní hranol z připravené skici (viz. Obr. 2.5).



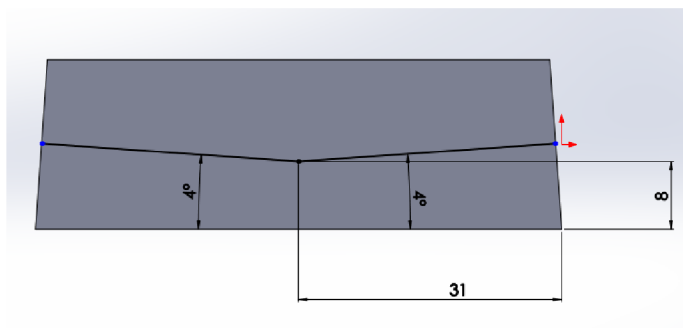
Obr. 2.5 Základní hranol.

Boční stěny hranolu byly sraženy o úhel 4° , který odpovídá vzepětí křídla, za pomoci příkazu „Odebrat vysunutím“ (viz. Obr. 2.6).

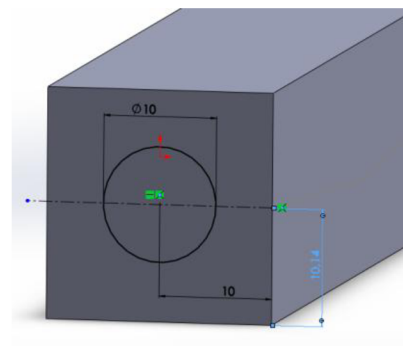


Obr. 2.6 Zkosení bočních stěn.

Při modelování průchozí díry byl využit příkaz „*Odebrání tažení po křivce*“. Pro správné použití tohoto příkazu bylo zapotřebí dvou skic. První skica znázorňuje trasu odebrání (viz. Obr. 2.7). Druhá skica znázorňuje tažený profil (viz. Obr. 2.8).

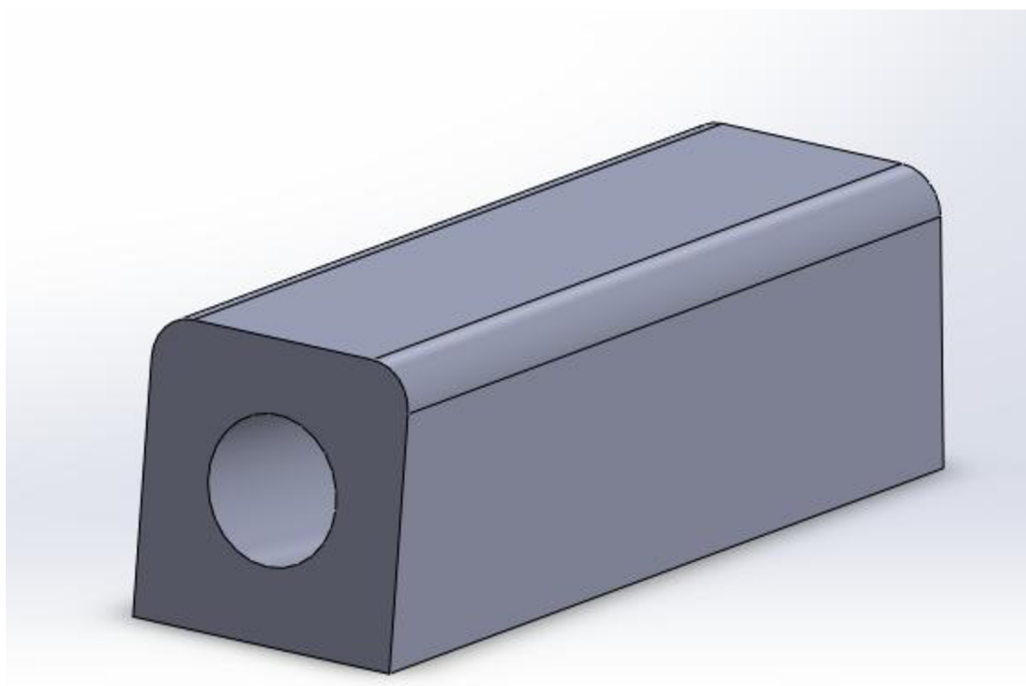


Obr. 2.7 Křivka pro tažení profilu.



Obr. 2.8 Tažený profil.

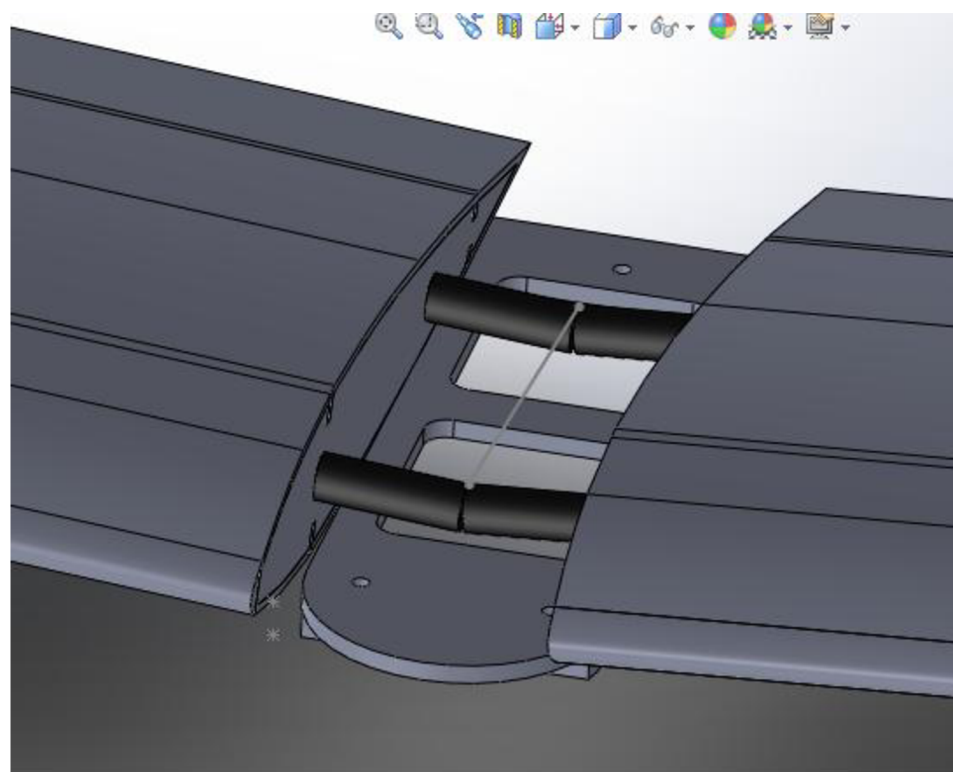
Posledním krokem bylo vytvoření zaoblení horních hran za pomoci příkazu „*Zaoblit*“ (viz. Obr. 2.9).



Obr. 2.9 Zaoblení horních hran.

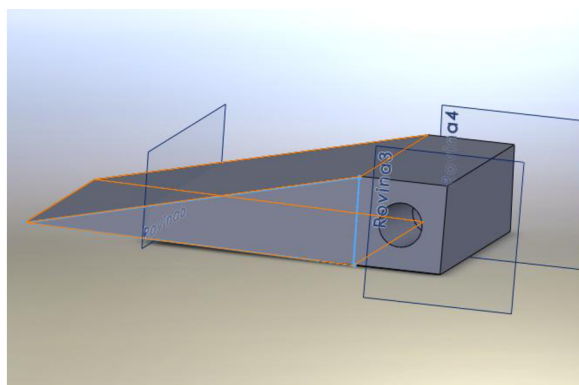
2.2.2 Modelování zadní spojky

Druhý díl spojky byl založen pod názvem SPOJKA ZADNÍ. Základní část spojky byla převzata z dílu SPOJKA PŘEDNÍ bez zaoblení horních hran. Při modelování tohoto dílu byla využita předem vymodelovaná sestava křídel a dosedací plochy pro spojku (viz. Obr. 2.10).

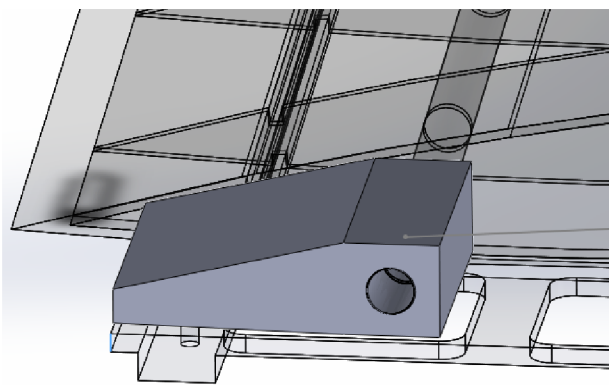


Obr. 2.10 Vymodelovaná sestava.

V této sestavě byla dále modelována daná spojka. Na polotovaru spojky byl příkazem „Přidat vysunutím“ vytvořen základní model (viz. Obr. 2.11), který byl nadále jen konstrukčně a vzhledově upravován. Byl odstraněn přebytečný přesah (viz. Obr. 2.12).

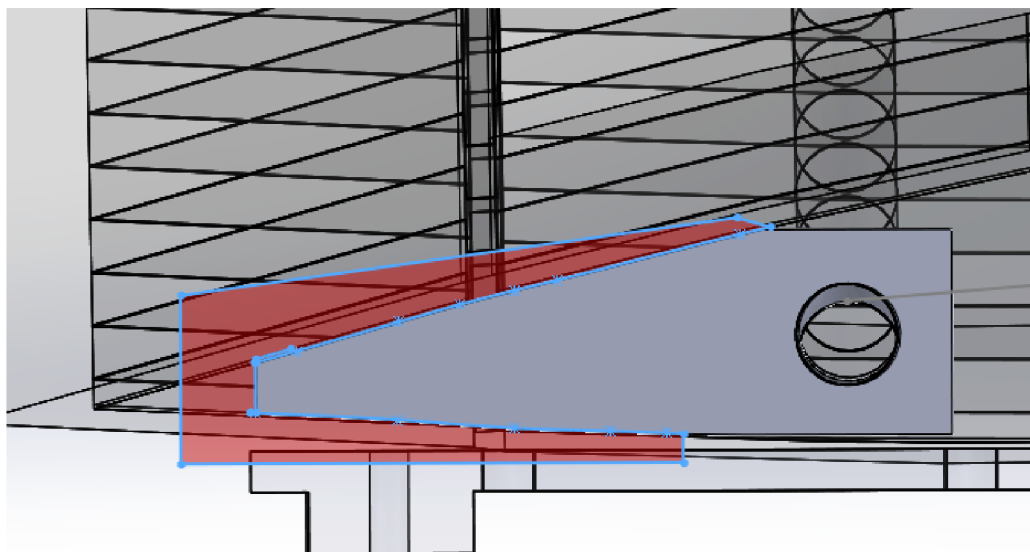


Obr. 2.11 Vytvoření základního modelu.



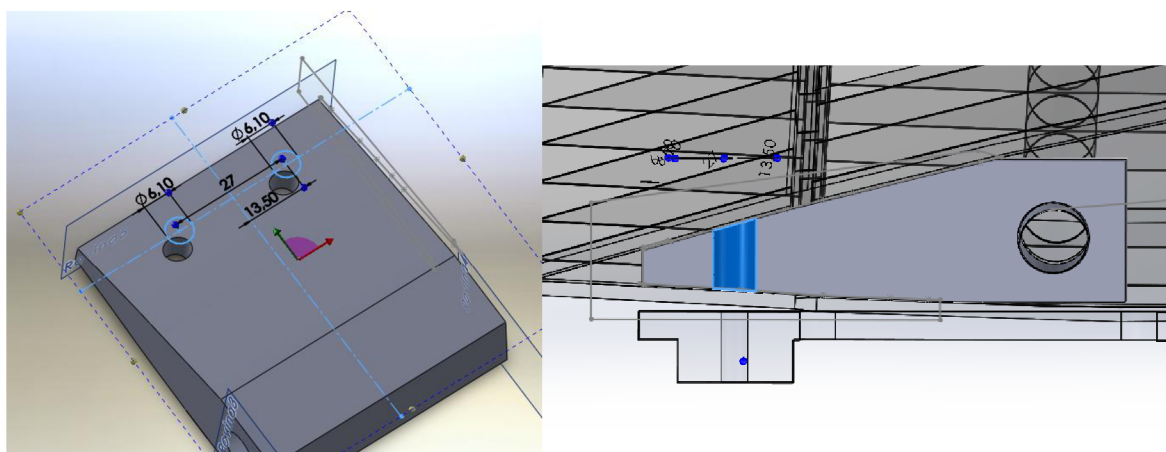
Obr. 2.12 Odstranění přesahu.

Pomocí skice v sestavě byl načrtnut funkcí „Splajn“ tvar žebra (viz. Obr. 2.13), následně příkazem „Odebrat vysunutím“ bylo dosaženo přesnějších tvarů. Tvar žeber byl použit úmyslně, jelikož při konečných úpravách samotného RC modelu bude potažena spojka balzou o tloušťce 2 mm.



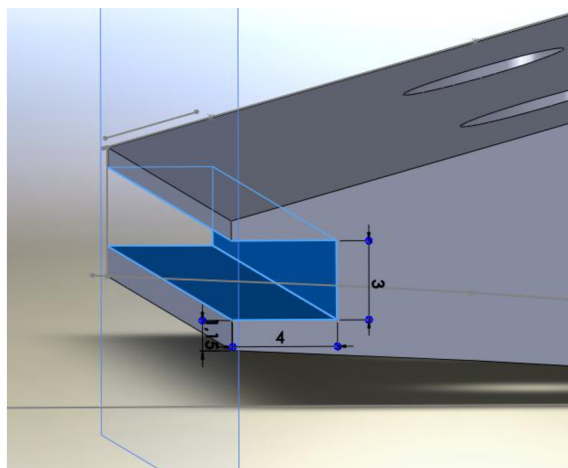
Obr. 2.13 Vytvoření skici pomocí tvaru žebra.

Montáž spojky k trupu modelu bude uskutečněna za pomoci dvou šroubů M6. Na díle byly proto vytvořeny dvě díry (viz. Obr. 2.14), které následně umožní snadnou montáž křídel k trupu letadla.

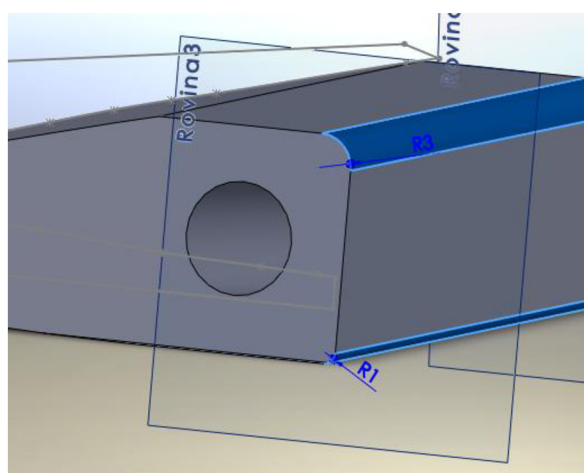


Obr. 2.14 Modelování děr nad vyztuženou částí trupu.

Závěrečnou částí modelování bylo vybrání na konci spojky pro dodatečnou úpravu (viz. Obr. 2.15) a zaoblení hran (viz. Obr. 2.16).

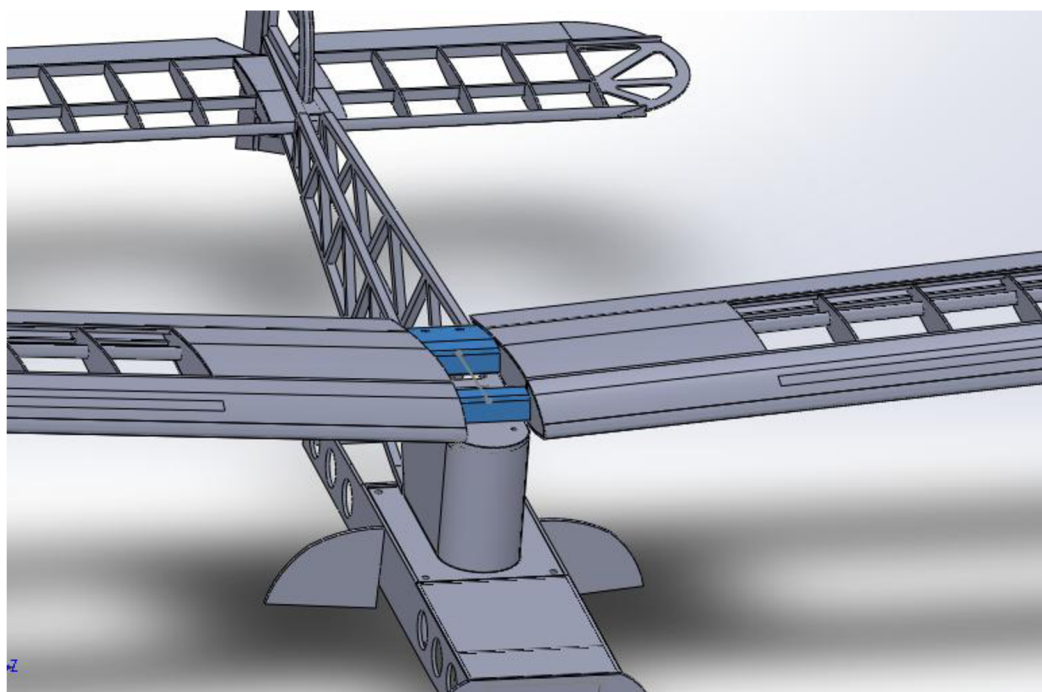


Obr. 2.15 Vybrání pro dodatečnou úpravu.

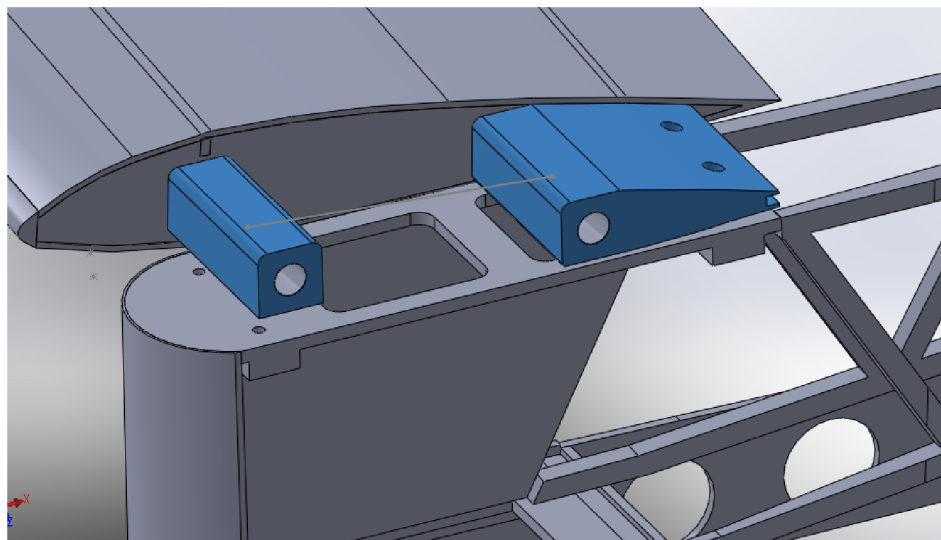


Obr. 2.16 Zaoblení hran spojky.

Pro kontrolu byla založena nová sestava. Do této sestavy byly vloženy oba díly spojky spolu s křídly a trupem modelu (viz. Obr. 2.17) a bylo vyzkoušeno složení modelu kvůli možným chybám a nepřesnostem, které mohly vzniknout při modelování. Po kontrole všech dosedacích ploch mezi spojkou a křídlem (viz. Obr. 2.18) bylo zjištěno, že je vše v pořádku.



Obr. 2.17 Sestava RCmodelu.



Obr. 2.18 Kontrola dosedacích ploch.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této kapitole bude detailně popsána metoda a postup při výrobě prototypu spojky pro RC model aditivní technologií Rapid Prototyping. Pomocí vyrobeného modelu bude vyrobena silikonová forma, která následně poslouží pro odlití několika kusů spojky.

3.1 Technologie Rapid Prototyping

Rapid Prototyping je technologický proces, který má za cíl rychlejší výrobu nově navrženého výrobku než, je tomu u běžných technologií. Tato technologie slouží ke zhotovení finálních výrobků menšího počtu kusů nebo pro výrobu takové součásti, která nejde klasickou metodou vyrobit. V dnešní době existuje několik komerčně dostupných metod (viz Tab. 3.1). Zdrojem dat je jakýkoliv navržený virtuální 3D model. 3D model se dá získat dvěma způsoby. První způsob je naskenování skutečné součásti některou z metod reverzního inženýrství za pomoci prostorového skeneru. Druhý způsob zahrnuje vymodelování virtuálního modelu v libovolném systému CAD [17,18,19].

Tab. 3.1 Základní metody Rapid Prototyping [17].

Základní metody Rapid Prototyping	Zkratka	Materiál modelu
Stereolitografie	SLA, SL	Fotopolymer
Solid Ground Cutting	SGC	Fotopolymer, nylon
Selective Laser Sintering	SLS	Nylon, polyamid, vosk, kovové prášky
Direct Metal Laser Sintering	DMLS	Kovové prášky
Laminated Object Manufacturing	LOM	Papír s jednostranným pojivem
Fused Deposition Modeling	FDM	ABS, ABS+, vosk, polykarbonát
Multi Jet Modeling	MJM	Termopolymer, akrylátový fotopolymer

Princip výroby je u většiny technologií Rapid Prototyping je v opakovaném nanášení konstantních vrstev materiálu s tloušťkou o velikosti desetin až setin milimetru. Opakováním tohoto procesu vzniká 3D model, který může být tisknut z různého materiálu např. z pryskyřice, z termoplastu, z vosku, z keramiky nebo z kovového prášku. Tato technologie umožňuje podstatné zkrácení etap vývoje prototypového výrobku a zvyšování konkurenceschopnosti výrobku na trhu [17,19].

3.1.1 Metoda Fused Deposition Modeling

Metoda byla vynalezena v roce 1988 firmou Stratasys. Princip metody spočívá v postupném nanášení termoplastického materiálu navinutého na cívce. Pomocí kladek je materiál vtačován do vyhřívané trysky. Teplota v trysce je o 1° vyšší, než je teplota

tavení materiálu. Při styku materiálu s povrchem, se vlákna vzájemně spojí a vytváří požadovanou strukturu vrstvy. Hlava s tryskou se pohybuje v ose X a Y. Po dokončení vrstvy se hlava posune v ose Z o tloušťku vrstvy a začíná tisk další vrstvy. Podpůrný materiál, který se nanáší z druhé trysky na tiskové hlavě, zabraňuje zborcení přečnívajících částí modelu. Podpůrný materiál se po dokončení tisku mechanicky nebo chemicky odstraní. Takto vyrobená součást se může dále obrábět a povrchově upravovat [17,24].

Výhody:

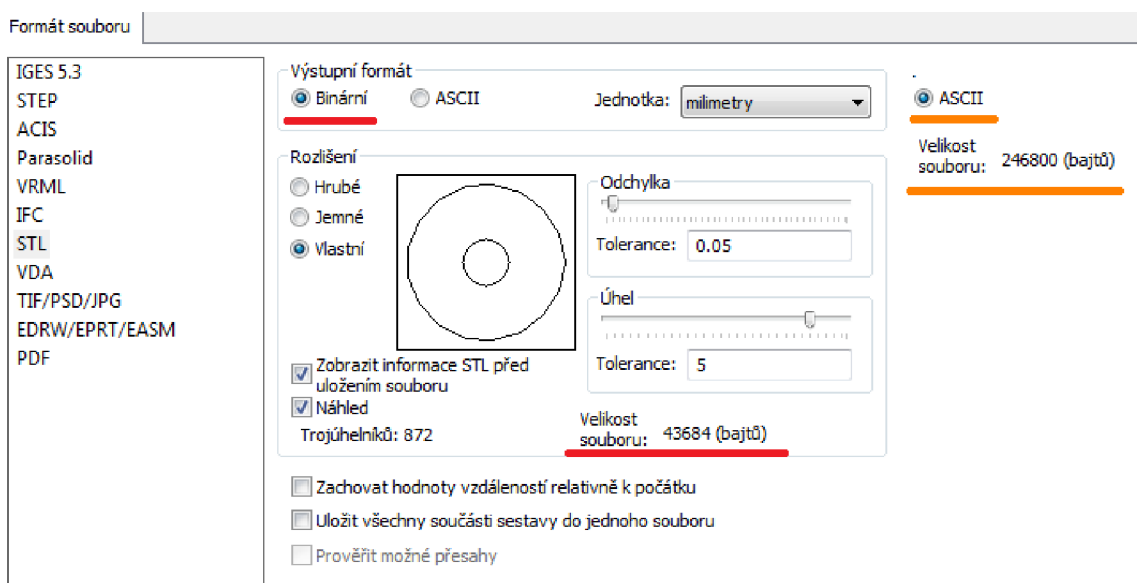
- výroba funkčního prototypu s vlastnostmi blížící se konečným produktům,
- tvorba minimálního odpadu (pouze podpůrný materiál),
- velké množství výběru materiálů pro tisk.

Nevýhody:

- omezená přesnost kvality povrchu,
- výrobu součásti nelze urychlit,
- smrštění materiálu během chladnutí,
- model má v různých směrech různé vlastnosti. [17].

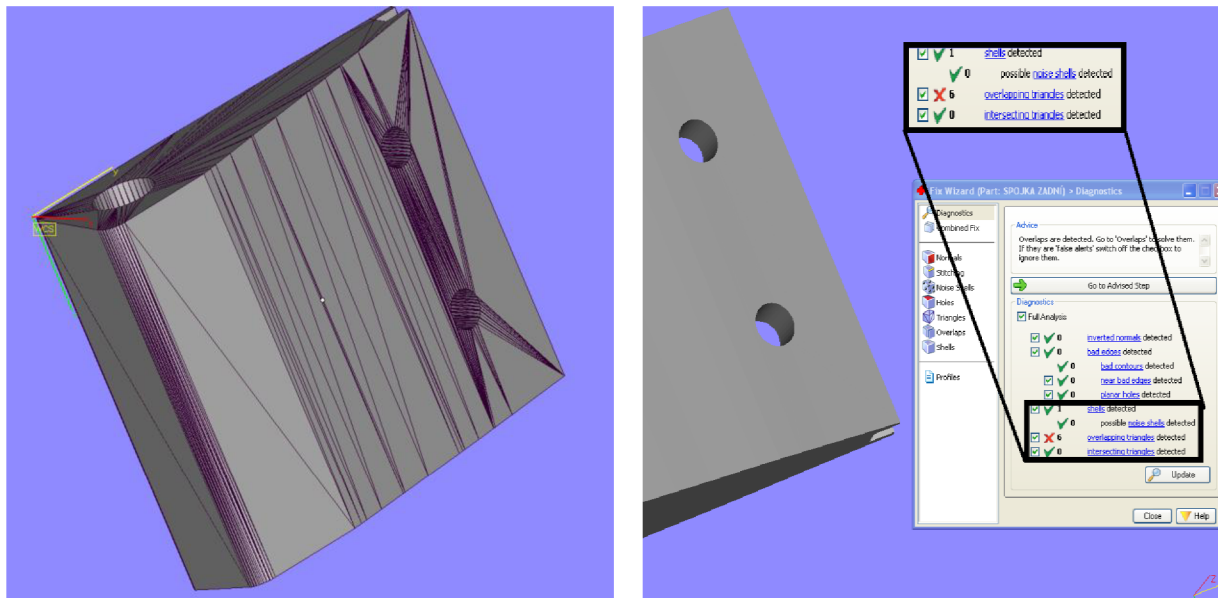
3.2 Preprocessing

Operace předcházející proces tisku, kde se nastaví parametry vlastností modelu. Modely v grafickém softwaru SolidWorks byly převedeny do formátu *.stl. Při převodu bylo na výběr ze dvou výstupních formátů: „Binární“ nebo „ASCII“ (viz Obr. 3.1). Zvolil se binární výstup, který zabírá menší velikost souboru. Dalším krokem bylo nastavení *Rozlišení*. Zvolilo se *Vlastní* s odchylkou 0,05 mm a úhlem 5°. Tímto je model převeden na trojúhelníkovou síť ve formátu *.stl.



Obr. 3.1 Nastavení parametrů pro převod modelu.

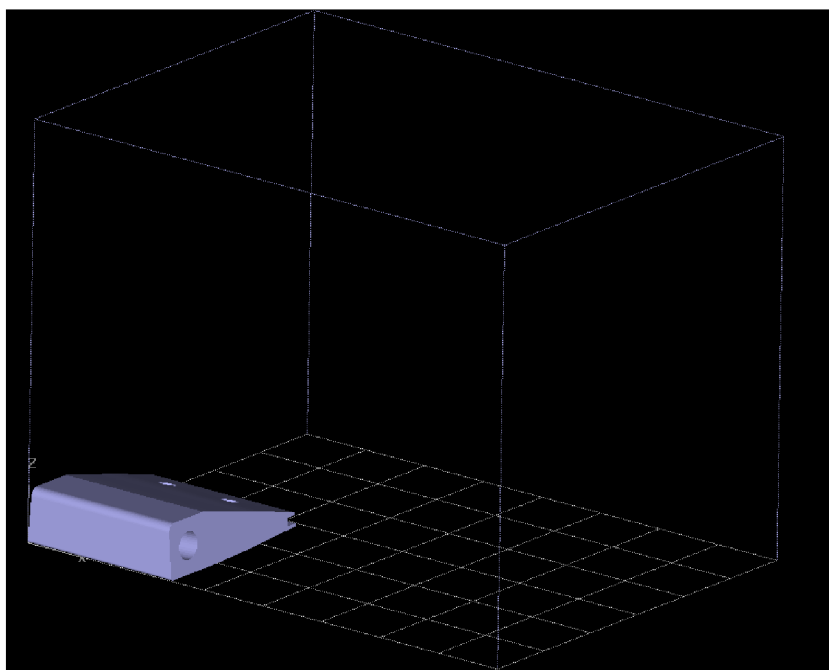
V programu MiniMagics byla zkontrolována polygonová síť převedeného modelu (viz Obr. 3.2). Program detekoval pouze pronikající trojúhelníky mezi sebou (viz Obr.3.3), které nemají žádný vliv na další operace [21].



Obr. 3.2 Polygonová síť modelu.

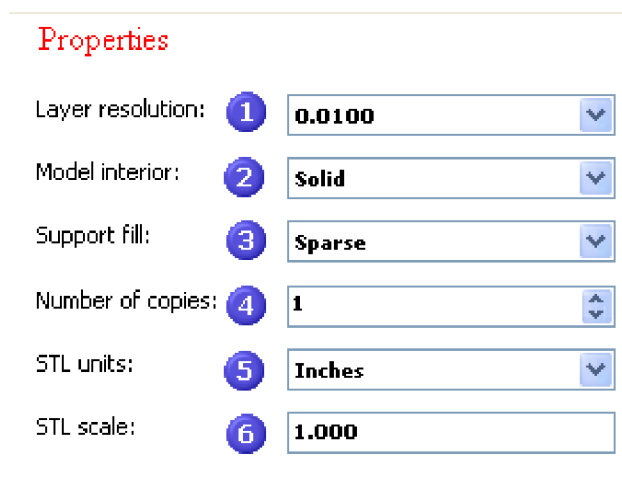
Obr. 3.3 Detekce chyb.

V software CatalystEX, který je dodáváný společně s tiskárnou Dimension uPrint, byly nastaveny vlastnosti tisku. Prvním krokem bylo importování modelu do programu CatalystEX (viz Obr. 3.4).



Obr. 3.4 Import modelu.

V záložce „*General*“ se nastaví vlastnosti modelu (viz Obr. 3.5).



Obr. 3.5 Panel nastavení vlastností modelu [22].

1) Layer resolution (Tloušťka vrstvy)

Tloušťka jedné vrstvy má vliv na vzhled modelu. Čím bude tloušťka vrstvy menší, tím bude povrch modelu hladší, ale časově bude tisk trvat delší dobu. V programu lze vybrat ze tří typů tloušťek [22]:

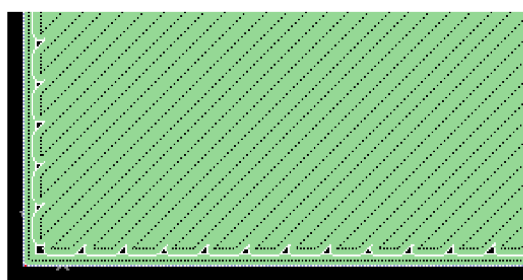
- 0,178 mm (0,007 inch),
- 0,254 mm (0,254 inch),
- 0,330 mm (0,330 inch).

Tiskárna Dimension uPrint podporuje pouze tisk vrstvy o tloušťce 0,254 mm.

2) Model interior (Způsob vyplnění modelu)

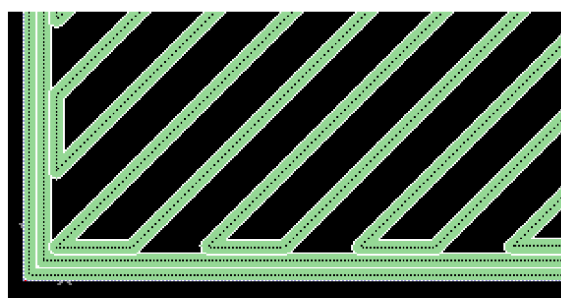
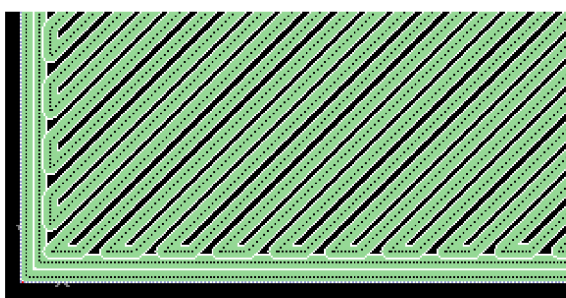
Stanovení typu výplně použitého pro vnitřní objem modelu. Na výběr je ze tří typů:

- *Solid* (viz Obr. 3.6) - používá se, pokud model bude sloužit jako funkční součást nebo se bude dále obrábět. Při použití tohoto typu výplně je spotřebováno největší množství materiálu a doba tisku bude nejdelší [22].



Obr. 3.6 Výplň modelu - *Solid*.

- *Spare - high density* (viz Obr. 3.7) - tento typ doporučuje výrobce a je nastaven jako výchozí způsob výplně. Vyrobený díl může sloužit jako méně namáhaná součást. Při použití tohoto typu dochází k úspoře materiálu a ke zkrácení doby tisku [22].
- *Spare - low density* (viz Obr. 3.8) - tento typ umožňuje vyrobit součást v nejkratším čase a nejmenším vyplněným objemem. Používá se pro součásti sloužící k prezentaci modelu před zákazníkem, kde hraje hlavní roli vzhled. Tento typ není vhodný pro funkční součásti [22].



Obr. 3.7 Výplň modelu - *Spare- high density*. Obr. 3.8 Výplň modelu - *Spare- low density*.

3) Support fill (Způsob stavby podpor)

Podpory zabraňují zborcení vyráběné součásti. Po ukončení tisku se podpory mechanicky nebo chemicky odstraní. Je možno vybírat z různých typů podpor [22]:

- *Basic* – tento typ podpory je možné použít u většiny součástí. Zde je využita konzistentní vzdálenost mezi drahami nástroje. Jedná se o plnou podporu.
- *Sparse* – podpora má větší vzdálenost rastrových drah a minimalizuje množství vytvářených podpor.
- *Minimal* – využití u malých součástí, které potřebují malé množství podpor, aby nedošlo ke zborcení součásti.
- *Break-away* – způsob stavby podpor se podobá *Sparse*. Nedochází zde k uzavření drah nástroje. Podpory se dají snadněji odstranit, ale celá operace je časově náročnější na tisk. (Tiskárna Dimension uPrint tento typ tvorby podpor neumožňuje.)
- *Surround* – celý model je obklopen podporou. Využívá se u vysokých a tenkých součástí.

4) Number of copies (Počet kopií)

Určí počet kopií, které budou vyrobeny. Počet je omezen na rozměry podložky pro tisk modelu [22].

5) STL units (STL jednotky)

Soubor *.stl neurčuje rozměrové jednotky. Musí se nastavit v milimetrech(mm) nebo palcích (inch) [22].

6) STL scale (STL měřítko)

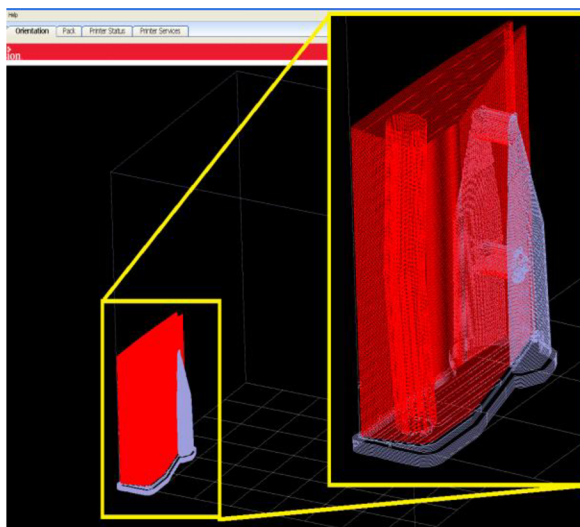
Před začátkem tisku lze změnit měřítko součásti.

Pro model spojky se použila vnitřní výplň *Solid* a typ podpory *Sparse*. Celé nastavení je znázorněno v Tab.3.2

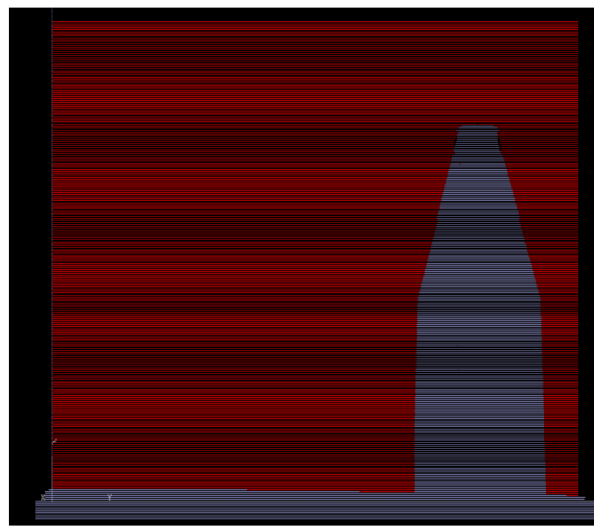
Tab. 3.2 Nastavení tisku

Layer resolution	0,254 mm
Model interior	Solid
Support fill	Sparse
Number of copies	1
STL units	Milimeters
STL scale	1,000

Po nastavení jednotlivých parametrů tisku byla využita záložka „*Orientation*“. Zde byla určena orientace modelu v pracovním prostoru 3D tiskárny (viz Obr. 3.9). Program „rozsekal“ model na jednotlivé vrstvy o tloušťce 0,254 mm (viz Obr. 3.10). Červenou barvou byla vykreslena součást a šedou barvou podpurný materiál.

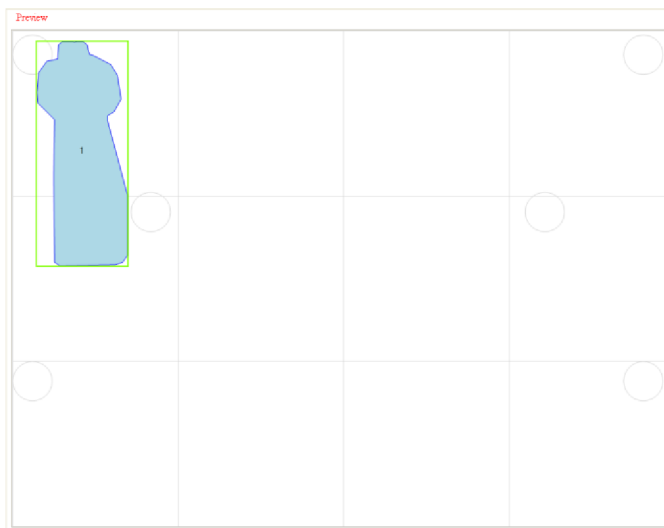


Obr. 3.9 Orientace modelu.



Obr. 3.10 Jednotlivé vrstvy materiálu.

V záložce „Pack“ byl model importován na základní desku a umístěn ke kraji desky (viz Obr. 3.11). Zde se také nachází informace o množství použitého materiálu a předpokládaný čas tisku. Na obě části spojky bylo celkem potřeba $41,66 \text{ cm}^3$ materiálu, z toho $29,11 \text{ cm}^3$ materiálu stavebního a $12,55 \text{ cm}^3$ podpůrného materiálu. Předpokládaný čas tisku byl 4h 43 min. Potvrzením tlačítka *Print* byla data odeslána do tiskárny a Preprocessing byl u konce.



Obr. 3.11 Umístění modelu na podložce.

3.3 Processing

Po odeslání dat do tiskárny uPrint (viz Obr. 3.12), která je určena pro rychlou výrobu pevných a přesných modelů, bylo nutno potvrdit tisk manuálně na panelu tiskárny. Parametry tiskárny Dimension uPrint jsou uvedeny v Tab. 3.3 [23].

Tab. 3.3 Parametry tiskárny Dimension uPrint [23].

Modelovací materiál	ABSplus barva slonová kost
Modelovací prostor	203 x 152 x 152 mm
Tloušťka vrstvy	0,254 mm
Podporované operační systémy	Windows XP/ Windows Vista/ Windows 7
Síťové připojení	Ethernet TCP/IP 10/100 base T
Rozměry	635(š) x 660(h) x 940(v)
Váha	94 kg
Cena	Od 11900 €

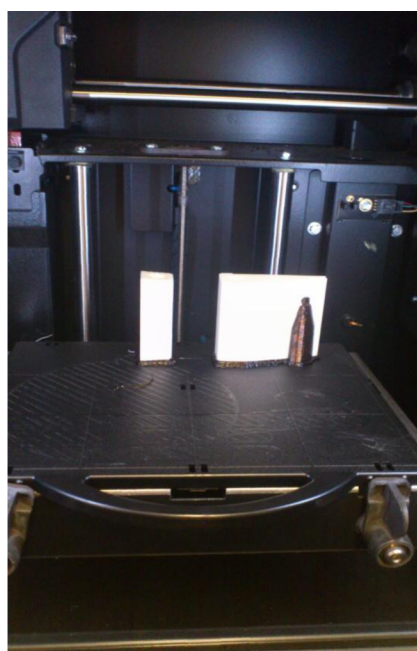
Před spuštěním tiskárny byla do prostoru tiskárny vložena podložka, na kterou následně probíhal tisk. Po spuštění se komora tiskárny zahřála na provozní teplotu. Tisková hlava začala nanášet na podložku podpůrný materiál (viz Obr.3.13), který sloužil jako základ pro samotný tisk součásti. Výška základního podpůrného materiálu byla 2,7 mm. V průběhu samotného tisku lze pozastavit proces a vyměnit prázdné kazety s materiálem za nové aniž by to mělo vliv na vyráběnou součást. Celkový čas tisku modelů (viz Obr.3.14) byl 4h 56 min.



Obr. 3.12 Tiskárna Dimension uPrint.



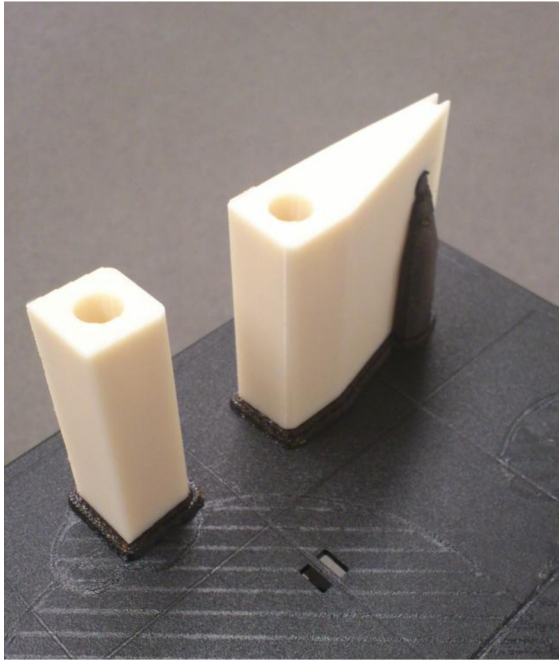
Obr. 3.13 Nanášení podpůrného materiálu.



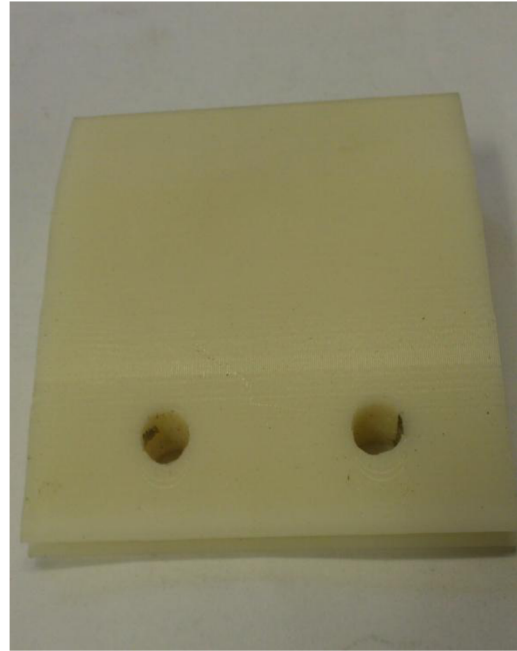
Obr. 3.14 Konečný stav vyrobených součástí.

3.4 Postprocessing

Po dokončení 3D tisku byla vyjmuta z prostoru tiskárny podložka s díly (viz Obr. 3.15). Následovalo odstranění podpůrného materiálu z dílů (viz Obr. 3.16). V tomto případě nehrozilo mechanické poškození dílu a podpůrný materiál se odlomil za pomoci šroubováku a nemuselo proto být použito chemické odstranění v ultrazvukové čističce. Pomocí vrtáku o průměru 10 mm bylo dosaženo lepší kvality povrchu děr pro spojení křídel vzhledem k nerovnostem vzniklých při tisku.



Obr. 3.15 Vytisknuté součásti včetně podpor.



Obr. 3.16 Součást po odstranění podpůrného materiálu.

3.5 Výroba odlitku s využitím vyrobené silikonové formy

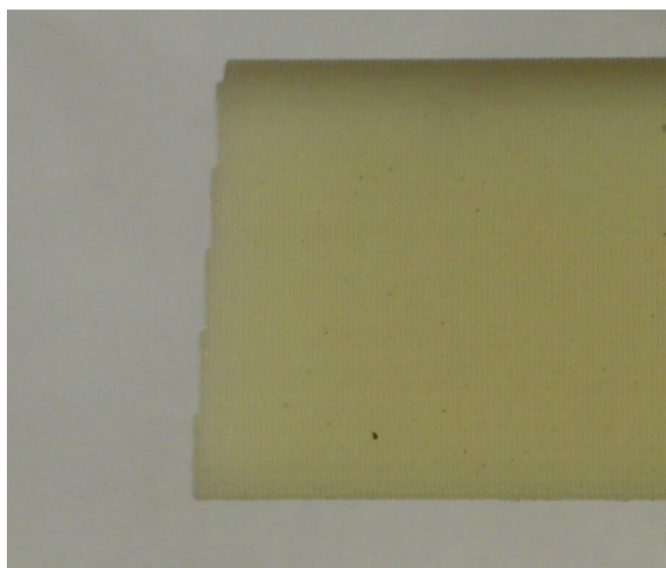
Další součástí práce bylo vyrobít odlité součásti za pomoci silikonové formy. Pro výrobu silikonových forem a jader byl použit silikon Silastic T-4 a tvrdidlo v poměru 100:10. Přesné množství silikonu s tvrdidlem bylo v nádobce důkladně promícháno, aby došlo k jejich smísení. Mícháním se dostává do směsi velké množství vzduchu. Za pomoci vakuové komory MK-Mini (viz Obr. 3.17), došlo k odsátí vzduchu a vytvoření vakua při podtlaku 0,9 bar. Při tomto procesu dochází k nabývání směsi a hladina směsi se musí hlídat. Vakuování trvá přibližně 25 minut. Za tuto dobu byl odstraněn vzduch ze silikonu a bylo možno přejít k samotnému lití silikonu.



Obr. 3.17 Vakuová komora MK-Mini.

3.5.1 Úprava modelu

Model bylo nutno před výrobou silikonové formy upravit na požadovanou kvalitu povrchu. Největší úpravy byly prováděny na bočních stykových plochách spojky. Zde vznikly při samotném tisku odskoky způsobené tloušťkami jednotlivých nanášejících vrstev (viz Obr. 3.18). Tyto odskoky byly za pomoci brusného papíru o zrnitosti P-400 zbrušeny na přípustnou kvalitu. Dokonalého vyhlazení bylo docíleno za pomoci rychleschnoucího univerzálního plniče pro tmelení ve formě spreje Motip Filler (viz Obr. 3.19).

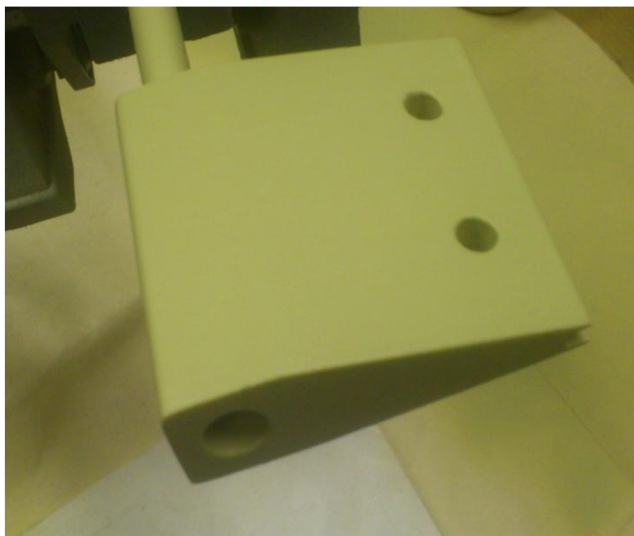


Obr. 3.18 Kvalita bočních ploch před úpravou.



Obr. 3.19 Rychleschnoucí univerzální plnič Motip Filler.

Před použitím spreje byl model očištěn od nečistot. Podle návodu použití byl model nastříkán postupně třemi vrstvami ze vzdálenosti 25 až 30 cm (viz. Obr. 3.20). Mezi jednotlivými vrstvami byl ponechán časový rozsah pro zaschnutí 3 hodiny. Po zaschnutí vrstev byl model broušen pod vodou brusným papírem o zrnitosti P-800. Tímto byl model zbaven hrubších nerovností. Následně byl model opět nastříkán sprejem Motip Filler a pro dokončovací broušení byl použit brusný papír o zrnitosti P-1000. Tímto byl model zbaven nerovností a byl připraven pro výrobu silikonové formy (viz. Obr. 3.21).



Obr. 3.20 Model po nastříkání plničem.



Obr. 3.21 Boční plocha po konečné úpravě.

3.5.2 Výroba jader

Jedna z částí silikonové formy pro odlití modelu jsou jádra. Jelikož není díra pro spojení křídel rovná ale zahnutá pod úhlem vzepětí křídel, každé jádro se skládá ze dvou polovin. Při výrobě první poloviny jádra byla utěsněna průchozí díra v polovině modelu za pomoci plastelíny. Kolem díry byl vymodelován z plastelíny nálietek, který následně bude sloužit k přesnému zafixování polohy jader v silikonové formě. Separátorem T1 byly štětcem potřeny tenkou vrstvičkou plochy, které budou ve styku se silikonem, pro pozdější snazší oddělení silikonu od modelu. Správnou polohu obou polovin jader zajistila vodící tyčinka, která byla vložena do díry (viz. Obr. 3.22).



Obr. 3.22 Vymodelované nálitky a vodící tyčinka v modelu.



Obr. 3.23 Odlité poloviny jader.

Pro odlití první poloviny jader bylo smícháno 30 g silikonu a 3 g tvrdidla. Postup přípravy silikonu byl popsán v kapitole 3.5. Po uplynutí 20 min. ve vakuové komoře byl silikon vlit do připravených nálitků na modelu (viz Obr. 3.23). Po zatvrdnutí silikonu byla jádra vyjmuta z modelu. Přepážka z plastelíny byla odstraněna, povrch modelu byl očištěn a jádra byla vrácena zpět. Součást byla zafixována proti nechtěnému posunutí jader. Postup při výrobě druhé poloviny se analogicky shodoval s první polovinou jader. Konečná úprava jader spočívala v ostřížení otřepů vzniklých při výrobě (viz Obr. 3.24).

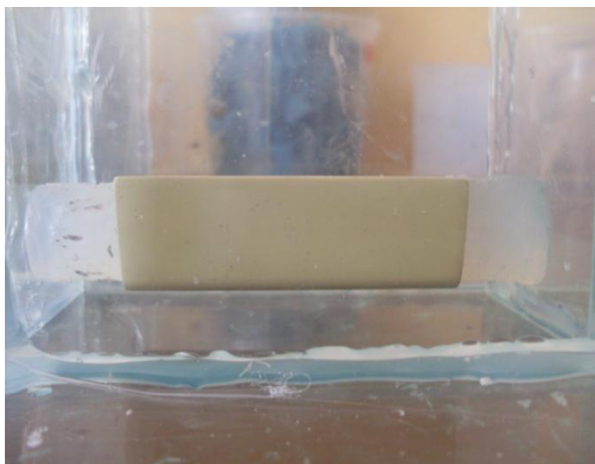


Obr. 3.24 Vzniklé otřepy.

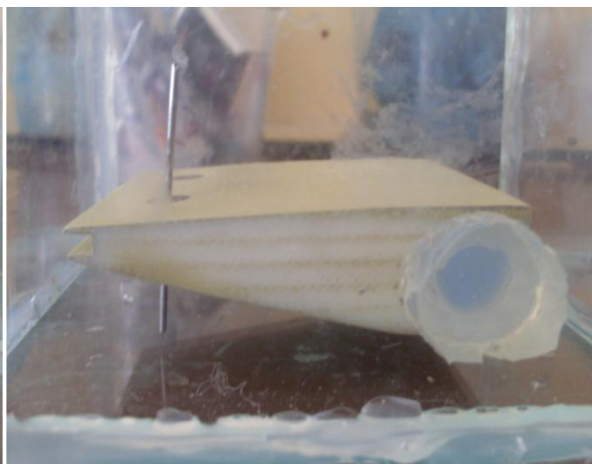
3.5.3 Výroba silikonové formy

Tvorba formy začala zhotovením rámu. Na základní skleněnou desku byl umístěn model s vloženými jádry. Stěny rámu tvořily skleněné tabule, které se k základní desce přilepily

pomocí tavné pistole. Díky délce jader byla přímo daná šířka rámu, která sloužila jako fixační plocha pro model, aby silikon mohl zatéct do všech částí (viz Obr. 3.25). U spojky zadní byly vyplněny díry pro šrouby plastelínou, pro snazší odlévání. Obě spojky spolu s jádry byly předem opatřeny separačním nátěrem T1. Po konečném ustavení modelů v rámu byla k dílu zadní spojky vložena podpora ve formě drátku, který měl zabránit pohybu modelu při lití silikonu (viz Obr. 3.26).

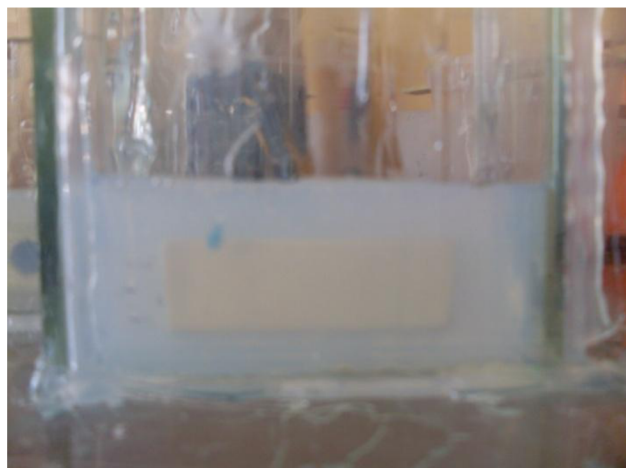


Obr. 3.25 Ustavený model přední spojky.

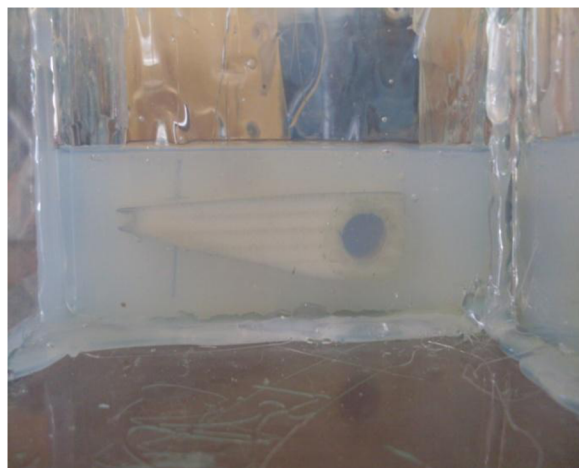


Obr. 3.26 Ustavený model zadní spojky.

Pro odlití dílů byl odhadnut objem a odváženo 340 g silikonu Silastic T-4 a 40 g tvrdidla. Směs se důkladně promíchala a vložila do vakuové komory. Po ukončení vakuování byly silikonem naplněny připravené formy (viz Obr. 3.27, Obr. 3.28), aby byl model kompletně obklopen.



Obr. 3.27 Vyplnění formy přední spojky.

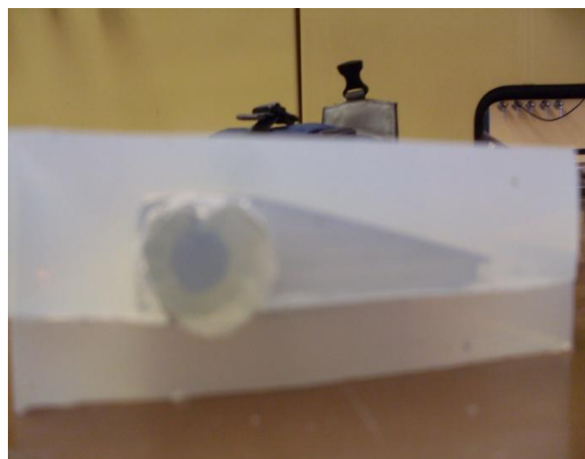


Obr. 3.28 Vyplnění formy zadní spojky.

Silikon se nechal 12 hodin vytvrdit. Po vytvrzení byly demontovány skleněné desky a forma byla uvolněna od základní desky. Pomocí nůžek byly odstraněny otřepy na krajích formy. Následovalo vytvoření dělicí roviny a vyjmutí modelu ze silikonové formy. Dělicí rovina u spojky přední (viz Obr. 3.29) byla zvolena v polovině modelu. Díky pružnosti silikonu byla zvolena dělicí rovina zadní spojky těsně nad vybráním modelu (viz Obr. 3.30).



Obr. 3.29 Dělicí rovina přední spojky.

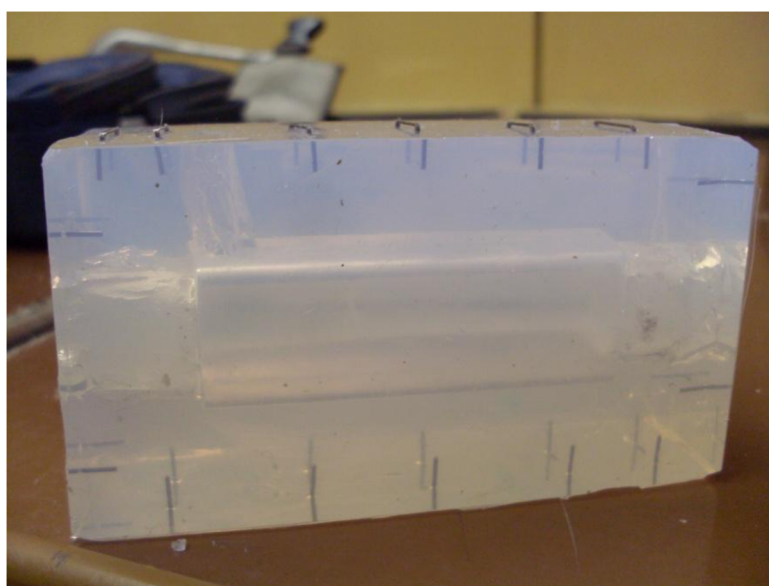


Obr. 3.30 Dělicí rovina zadní spojky.

Po vyjmutí modelu z formy byl vyřezán vtokový otvor a silikonová forma byla připravena pro výrobu odlitku.

3.6 Výroba odlitku

Před samotným litím byly vloženy do forem jádra spolu s vymežovací tyčinkou pro správnou polohu děr. Následně byly spojeny obě poloviny formy pomocí kovových spon (viz Obr. 3.31). Spony zabraňovaly svévolnému posunu forem a zamezovaly vytečení pryskyřice.



Obr. 3.31 Forma připravená k odlévání.

Pro odlití modelů byla použita dvousložková polyuretanová pryskyřice s označením SG 2000 A+B. Pro tento odlitek bylo stanoveno množství směsi 150 g. Důkladným smícháním v poměru 1:1 75 g složky A a 75 g složky B vznikla směs pro odlití součástí. Takto připravená pryskyřice byla nalita do připravené formy. Forma byla nakloněná pod menším úhlem za účelem lepšího vyplnění formy a odvodu vzduchu. Doba zpracování směsi je dle výrobce 5 - 7 minut (pro 200 g). K dokonalému vytvrzení dojde při pokojové teplotě za 1 až 2 hodiny. Při vytvrzování dochází k exotermické reakci, která uvolňuje teplo.

Při prvním odlití se podařilo odlít pouze spojku přední (viz Obr. 3.32). Při nalévání směsi do formy spojky zadní začala směs tuhnout a lití bylo přerušeno (viz Obr. 3.33). Po vytvrzení směsi a vychladnutí formy byly odstraněny kovové sponky a odlitý model byl vyjmut z formy.

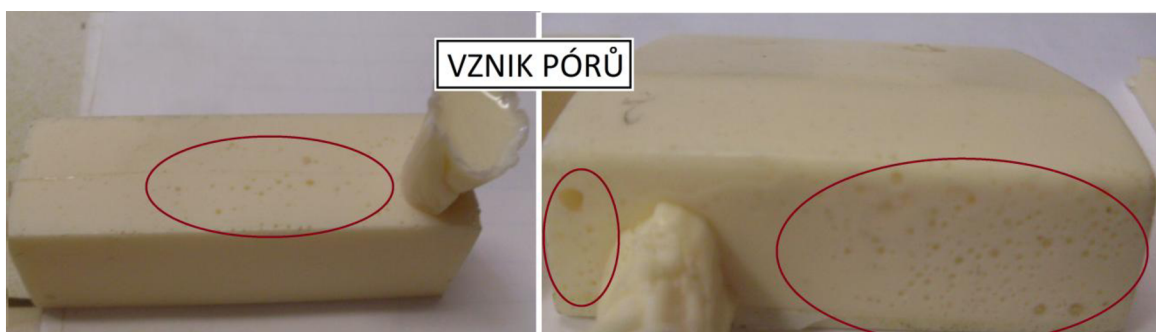


Obr. 3.32 Odlitá přední spojka.



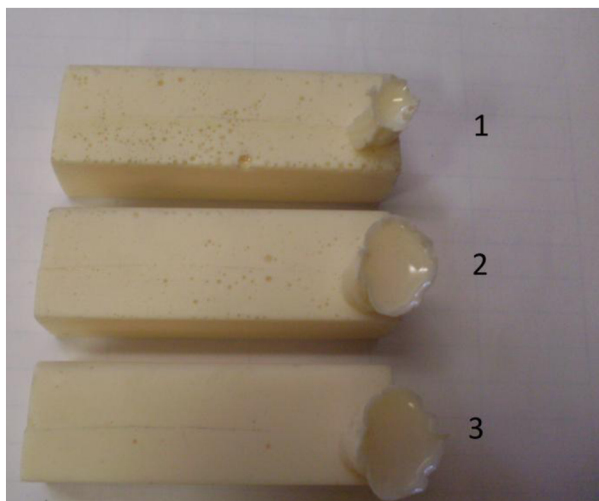
Obr. 3.33 Neúplné odlití zadní spojky.

Pro druhé odlití byl zvětšen vtokový otvor pro snazší odlévání. Forma byla očištěna od zbytku nečistot a připravena stejným způsobem jako při prvním odlévání. Samotné odlévání proběhlo bez problému. Po vytvrzení a zchladnutí formy byly vyjmuty odlité modely. Na modelech bylo na první pohled viditelné velké množství nashromážděného vzduchu, který nestihl z formy uniknout. Tato vada byla způsobená rychlým litím směsi do formy.

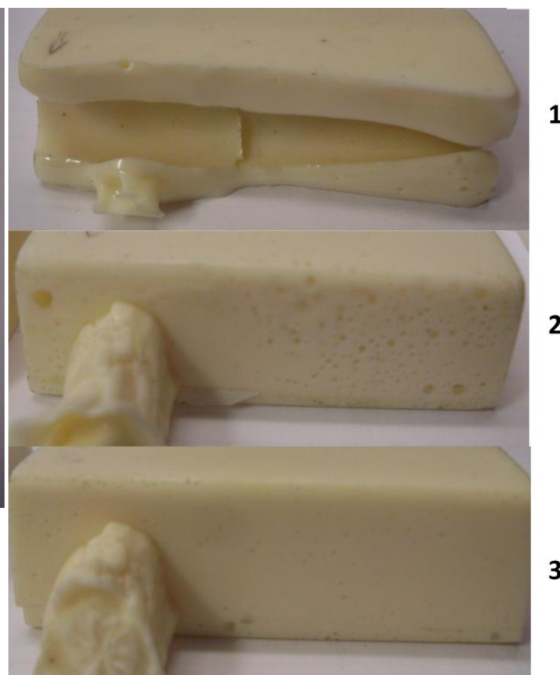


Obr. 3.34 Viditelné vady způsobené při odlévání součástí.

Následovalo poslední odlití součástí. Zde byla patrná maximální snaha o vyvarování se chyb, ke kterým došlo v předchozích odlitcích. Směs do forem, které byly skloněny, byla vlévána pomaleji. Vytvrzené součásti byly vyjmuty ze silikonových forem a následně porovnány s předchozími odlitky (viz Obr. 3.35, Obr. 3.36).



Obr. 3.35 Porovnání odlitých dílů přední spojky.



Obr. 3.36 Porovnání odlitých dílů zadní spojky.

Nejlepší povrch, který vykazoval nejmenší množství pórů, byl u obou součástí při posledním odlévání.

Dokončovací operace u odlitků se skládala z odstranění vtoku, pomocí brusného papíru byly zabroušeny otřepy a pozůstatek vtoku. Vrtákem o průměru 10mm byly zpřesněny funkční díry.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole budou zhodnoceny náklady na výrobu spojky metodou FDM a odlitků za pomoci silikonové formy. Forma ze silikonu Silastic T-4 zaručuje rozměrovou přesnost pro 5 kusů odlitků. Maximální počet, který jde vyrobit z jedné silikonové formy je 20 kusů. Každým odlitkem od pátého kusu se zvyšují nepřesnosti formy. Pro výrobu spojky se zvolila životnost formy 15 kusů.

4.1 Náklady na výrobu modelů technologií RP

$$N_v = V_m \cdot N_m + V_p \cdot N_p \text{ [Kč]} \quad (1)$$

kde	N_v [Kč]	-	náklady na tisk modelu,
	V_m [cm ³]	-	objem materiálu modelu,
	N_m [Kč]	-	náklady na tisk 1cm ³ modelovacího materiálu,
	V_p [cm ³]	-	objem podpůrného materiálu,
	N_p [Kč]	-	náklady na tisk 1cm ³ podpůrného materiálu.

$$N_v = 29,11 \cdot 14,40 + 12,55 \cdot 14,40 = 600 \text{ [Kč]}$$

4.2 Náklady na výrobu silikonové formy

Pro výrobu silikonové formy byla použita směs silikonu Silastic T-4 a tvrdidla. Silikon je dodáván v 5 kg a tvrdidlo v 0,5 kg balení. Cena byla 3809 Kč. V ceně je zahrnuté i tvrdidlo.

$$m_c = m_j + m_f \text{ [g]} \quad (2)$$

kde	m_c [g]	-	hmotnost celkové silikonové formy,
	m_j [g]	-	hmotnost jader,
	m_f [g]	-	hmotnost silikonové formy.

$$m_c = 66 + 380 = 446 \text{ [g]}$$

$$N_s = \frac{m_c}{m_b} \cdot C_b \text{ [Kč]} \quad (3)$$

kde	N_s [Kč]	-	náklady na výrobu formy,
	m_c [g]	-	hmotnost celkové silikonové formy,

m_b [g] - hmotnost balení silikonu,

C_b [Kč] - cena balení silikonu a tvrdidla.

$$N_s = \frac{446}{5500} \cdot 3809 = 308,88 \text{ [Kč]}$$

4.3 Náklady na výrobu odlitků modelů

Spojka byla odlita z dvousložkové polyuretanové pryskyřice s označením SG 2000 A+B. Každá složka polyuretanové pryskyřice se dodává v 1 kg balení. Cena obou složek byla 470 Kč.

$$m_s = m_A + m_B \text{ [g]} \quad (4)$$

kde m_s [g] - celková hmotnost polyuretanové pryskyřice,

m_A [g] - hmotnost složky A,

m_B [g] - hmotnost složky B.

$$m_s = 75 + 75 = 150 \text{ [g]}$$

$$N_o = \frac{m_s}{m_p} \cdot C_p \text{ [Kč]} \quad (5)$$

kde N_o [Kč] - náklady na odlití modelů,

m_s [g] - celková hmotnost polyuretanové pryskyřice,

m_p [g] - hmotnost balení polyuretanové pryskyřice,

C_p [Kč] - cena balení polyuretanové pryskyřice.

$$N_o = \frac{150}{2000} \cdot 470 = 35,25 \text{ [Kč]}$$

4.4 Celkové náklady na výrobu jednoho odlitku modelů

$$N_f = N_v + N_s + N_o \text{ [Kč]} \quad (6)$$

kde N_f [Kč] - celkové náklady na výrobu jednoho odlitku,

N_v [Kč] - náklady na tisk modelu,

N_s [Kč] - náklady na výrobu formy,

N_o [Kč] - náklady na odlití modelů.

$$N_f = 600 + 308,88 + 35,25 = 944,13 \text{ [Kč]}$$

4.5 Porovnání nákladů metodou FDM a odléváním

Porovnání bylo provedeno pro 10 kusů odlitků spojky.

Celkové náklady na výrobu spojky metodou FDM

$$N_{c1} = N_v \cdot n \text{ [Kč]} \quad (7)$$

kde N_{c1} [Kč] - celkové náklady na tisk modelu spojky,
 N_v [Kč] - náklady na tisk modelu,
 n [-] - počet vyráběných kusů.

$$N_{c1} = 600 \cdot 10 = 6000 \text{ [Kč]}$$

Celkové náklady na výrobu spojky odléváním

$$N_{c2} = N_v + N_s \cdot n_2 + N_o \cdot n \text{ [Kč]} \quad (8)$$

kde N_{c2} [Kč] - celkové náklady na odlití modelu spojky,
 N_v [Kč] - náklady na tisk modelu,
 N_s [Kč] - náklady na výrobu formy,
 N_o [Kč] - náklady na odlití modelů,
 n [-] - počet vyráběných kusů,
 n_2 [-] - počet silikonových forem .

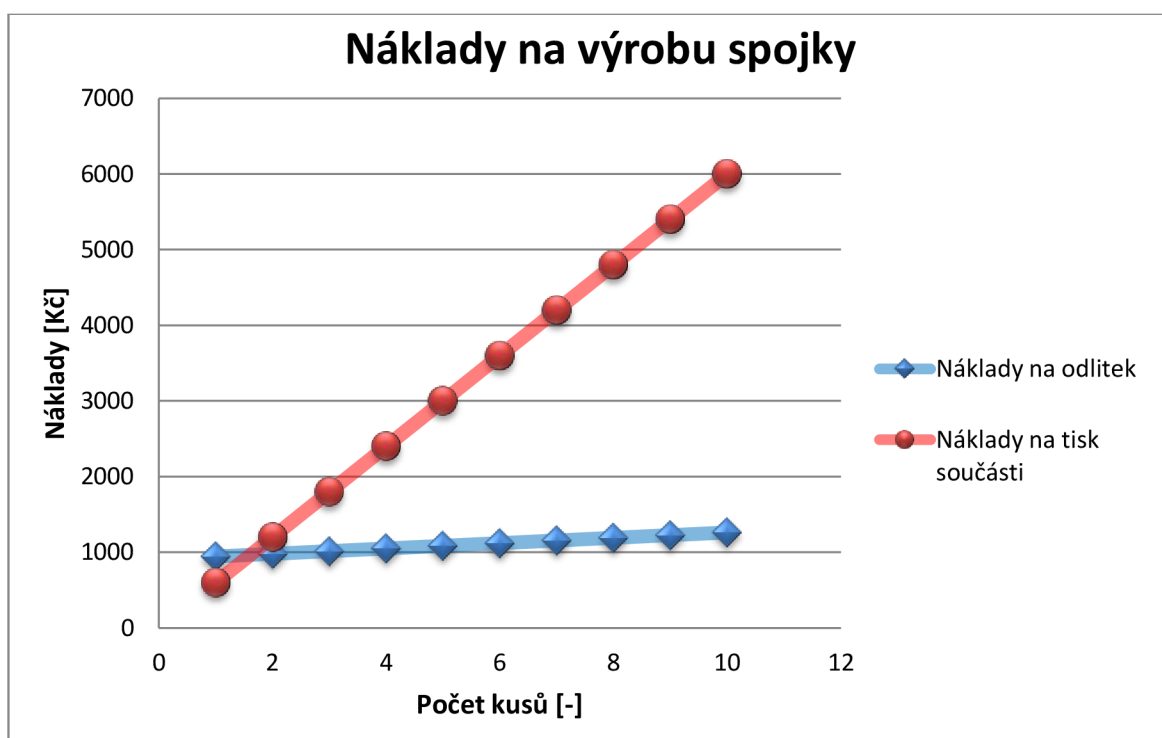
$$N_{c2} = 600 + 308,88 \cdot 1 + 35,25 \cdot 10 = 1261,38 \text{ [Kč]}$$

Porovnání nákladů pro počet 1-10 kusů je znázorněno v Tab. 4.1 a v grafické závislosti (viz Obr. 4.1).

Tab. 4.1 Porovnání celkových nákladů

Počet kusů n [-]	Celkové náklady na tisk N_{c1} [Kč]	Celkové náklady na odlévání N_{c2} [Kč]
1	600	944,13
2	1200	979,38

3	1800	1014,63
4	2400	1049,88
5	3000	1085,13
6	3600	1120,38
7	4200	1155,63
8	4800	1190,88
9	5400	1226,13
10	6000	1261,38



Obr. 4.1 Porovnání celkových nákladů.

Z hodnot v tab.4.1 a grafické závislosti (viz Obr. 4.1). Je zřejmé, že RP je vhodný pro výrobu jednoho kusu součásti. Náklady na výrobu za použití RP strmě rostou oproti odlévané součásti do silikonové formy, kde náklady rostou pozvolna. Pro 2 a více kusů je finančně výhodnější výroba za použití silikonové formy.

ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na výrobu prototypové spojky křídel na RC letadlo Krásná Helena. Z důvodu inovace obou polovin křídel, kde nebylo vhodné použít stávající řešení pro spojení křídel, se využila současná moderní technologie RP. Práce byla rozdělena na teoretickou a praktickou část.

Teoretická část byla zaměřena na historii a vývoj RC modelářství u nás a ve světě.

V praktické části byla řešena problematika při navrhování a následném konstruování spojky v parametrickém program SolidWorks. Z navrhovaných čtyř variant spojky byla zvolena jediná, která nejlépe splňovala předpoklady.

Vymodelovaný 3D model byl převeden do formátu podporující program CatalystEX. Po nastavení jednotlivých tiskových parametrů byl model vytisknut ve 3D tiskárně Dimension uPrint, která pracuje na principu aditivní metody Fused Deposition Modeling. Vytištěný model byl ručně upraven a dokončen pro výrobu silikonové formy na technologii vakuového lití. Vyrobena silikonová forma byla odlita pryskyřicí SG 2000.

Obě výrobní technologie spojky byly porovnány z technicko-ekonomického hlediska. Technologie Rapid Prototyping není z ekonomického hlediska vhodná pro sériovou výrobu. Ukázalo se, že technologie Rapid Prototyping je vhodná pro výrobu jednoho kusu součásti. Pro větší počet součástí vyšly náklady na výrobu podstatně vyšší než při odlévání součástí do silikonové formy.

Z hlediska prototypového řešení spojky není tato spojka vhodná pro sériovou výrobu. Technologie Rapid Prototyping se ukázala jako univerzální řešení pro vyrobení jakékoliv prototypové součásti. Spojka křídel by jinou metodou vyrobit nešla nebo by samotná výroba byla komplikovaná. Použitá technologie se jeví jako rychlejší a pohodlnější cesta.

Do vyrobené spojky byly vsunuty obě poloviny křídel. Spojka konstrukčně vyhovovala skutečnému modelu RC letadla Krásná Helena (viz Obr. 5.1). Objevily se malé nedostatky, které byly způsobeny samotnou konstrukcí křídel, ale ty nemají žádný vliv na funkčnost celku. Cíl bakalářské práce byl tímto splněn.



Obr. 5.1 Sestavení křídel RC letadla Krásná Helena.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Alphonse Pénaud. [online]. ©1998-2003. [vid 2013-02-07]. Dostupné z: <http://www.flyingmachines.org/pend.html>
2. Alphonse Pénaud. [online]. ©2000 [vid 2013-02-07]. Dostupné z: <http://aerostories.free.fr/precurseurs/penaud/page2.html>
3. Nikola Tesla. [online]. [vid 2013-02-09]. Dostupné z: <http://www.teslasociety.com/tribute3.htm>
4. 1898 - Telautomaton – Nikola Tesla. [online]. 17. 12. 2010 [vid 2013-02-20]. Dostupné z: <http://cyberneticzoo.com/?p=4146>
5. A Brief History of Precision Guided Weapons. [online]. ©1998-2011. [vid 2013-02-20]. Dostupné z: <http://www.tfcbooks.com/special/missiles.htm>
6. Historie létání s RC modely letadel. [online]. 07.03.2011. [vid 2013-03-02]. Dostupné z: <http://www.rcbazar.cz/clanky/historie-171/>
7. VONDRA, M., *Historie modelářství u nás*. [online]. [vid 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.modelhb.com/o-nas/historie-modelarstvi-u-nas>
8. MARJÁNEK, P. *Alfa z českého RC pravěku*. RC Revue, 2007, vol. 8, no. 5, p. 9–10. [vid 2013-03-05]., ISSN 1213-1303.
9. LICHTENBERG., P., *Sručná historie našeho modelářství*. [online]. [vid 2013-03-03]. Dostupné z: http://lichtco.cz/rc_modely_2.htm
10. Sbíрка historických RC souprav československé výroby. [online]. [vid 2013-03-29]. Dostupné z: <http://old-rc.sweb.cz/sbirka.html>
11. Historické RC soupravy – 2. díl – české. [online]. únor 2006 až duben 2011. [vid 2013-04-01]. Dostupné z: http://rc-model.rajce.idnes.cz/Historicke_RC_soupravy_-_2.dil_-_ceske/
12. BELFIORE., M., *Horizont Hobby – Spektrum DX10T Radio Digital a 10 canali* [online]. 04.02.2010. [vid 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.hobbymedia.it/21949/horizon-hobby-spektrum-dx10t-radio-digitale-a-10-canali>
13. VAŠKEBA, J., *Jak to dát celé dohromady* [online]. 17.10.2004. [vid 2013-03-07]. Dostupné z: <http://www.mo-na-ko.net/lode-sestava2.htm>
14. Pelikán Daniel, Pardubice, ČR, *Serva* [online]. [vid 2013-03-15]. Dostupné z: <http://www.pelikandaniel.com/?sec=page&id=22>
15. DR. LUCKYLUKE, *Aeroškola: Díl čtvrtý, RC soupravy* [online]. 21.02.2011. [vid 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.rcnoviny.cz/2011/02/aeroskola-dil-ctvrty-rc-soupravy/>
16. RC soupravy. [online]. [vid 2013-03-26]. Dostupné z: <http://www.rccar.cz/radce/8-rc-soupravy>
17. PÍŠKA, M. a kolektiv, *Speciální technologie obrábění*, Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno 2009, [vid. 2013-03-08], 246 s., ISBN 978-80-214-4025-8.

18. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z., *Nekonvenční metody obrábění 9. díl* [online]. [vid. 2013-03-10]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>.
19. Aplikace technologií Rapid Prototyping. [online]. 2001. [vid. 2013-03-10]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-technologie-rapid-prototyping.html>.
20. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z., *Nekonvenční metody obrábění 10. díl* [online]. [vid. 2013-03-10]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>.
21. *Materialise NV*. [online]. ©2012. Software for Additive Manufacturing. [vid. 2013-04-22]. MiniMagics – Software Rapid Prototyping. Dostupné z:
<http://www.materialise.com/MiniMagics>.
22. . CatalystEX 4.0.1[®], ©2010 Stratalys Inc. Eden Prairie, MN. Všechna práva vyhrazena [online]. [vid. 2013-04-23]. Dostupné na z
<http://www.dimensionprinting.com/applications/rapid-prototyping.aspx>.
23. MCAE SYSTEMS, spol. s.r.o., Kuřim, ČR. *Dimension uPrint* [online]. [vid. 2013-04-23]. Dostupné z <http://www.mcae.cz/dimension-uprint>.
24. 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. [vid 2013-04-10], 30s. ,ISBN: 80-248-0895-1.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
RC	[-]	Radio Control, rádiem řízené
3D	[-]	Trojrozměrný, trojdimenzionální
2CH	[-]	dvoukanálové
3CH	[-]	tříkrálové
4CH	[-]	čtyřkanálové
5CH	[-]	pětikanálové
6CH	[-]	šestikanálové
18CH	[-]	osumnáctikanálové
MHz	[-]	megahertz
GHz	[-]	gigahertz
WIFI	[-]	Wireless Fidelity
Obr.	[-]	obrázek
SLA,SL	[-]	Stereolitografie
SGC	[-]	Solid Ground Cutting
SLS	[-]	Selective Laser Sintering
DMLS	[-]	Direct Metal Laser Sintering
LOM	[-]	Laminated Object Manufacturing
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
MJM	[-]	Multi Jet Modeling
CAD	[-]	Computer Aided Design
RP	[-]	Rapid Prototyping
TCP/IP	[-]	Sada protokolů pro komunikaci v počítačové síti
mm	[-]	milimetr
g	[-]	gram
kg		kilogram
cm³	[-]	centimetr krychlový
Kč	[-]	Koruna česká
STL	[-]	datový formát
h	[-]	hodina

min	[-]	minuta
ABS	[-]	Akrylonitril-Butadien-Styren

Symbol	Jednotka	Popis
N_v	[Kč]	náklady na tisk modelu
V_m	[cm ³]	objem materiálu modelu
N_m	[Kč]	náklady na tisk 1cm ³ materiálu z <i>ABSplus</i>
V_p	[cm ³]	objem podpůrného materiálu
N_p	[Kč]	náklady na tisk 1cm ³ podpůrného materiálu
m_c	[g]	hmotnost celkové silikonové formy
m_j	[g]	hmotnost jader
m_f	[g]	hmotnost silikonové formy
N_s	[Kč]	náklady na výrobu formy
m_b	[g]	hmotnost balení silikonu
C_b	[Kč]	cena balení silikonu a tvrdidla
m_s	[g]	celková hmotnost polyuretanové pryskyřice
m_A	[g]	hmotnost složky A
m_B	[g]	hmotnost složky B
N_o	[Kč]	náklady na odlití modelů
m_p	[g]	hmotnost balení polyuretanové pryskyřice
C_p	[Kč]	cena balení polyuretanové pryskyřice
N_f	[Kč]	celkové náklady na výrobu jednoho odlitku
N_{c1}	[Kč]	celkové náklady na tisk modelu spojky
n	[-]	počet vyráběných kusů
N_{c2}	[Kč]	celkové náklady na odlití modelu spojky
n_f	[-]	životnost jedné silikonové formy

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Bezpečnostní list - Jakostní rychletvrdnoucí velmi tekutá lepicí hmota se separátním plnivem EBALTA SG 2000/2000L
- Příloha 2 Bezpečnostní list - Silikonkaoučuková vysokopevnostní tepelně odolná hmota SILASTIK T-4

PŘÍLOHA 1

EBALTA

Kunststoff GmbH
8803 Rothenburg
ob der Tauber

Speciální pryskyřice

pro slévarenské modely, jaderníky, mod. zař.
tmely, plniva pomocné látky, voskové fol.
separátory, bloky PU - umělé dřevo, a jiné

Jakostní rychletvrdnoucí 2000/2000L

velmi tekutá licí hmota
se separátním plnivem

Všeobecně:

Ebalta SG 2000 je jakostní, téměř nepáchnoucí dvousložková polyuretanová licí hmota bez plniva, které lze při smíchání obou složek přidat.

Velká tekutost nám umožňuje vysoký stupeň plnění.
Druh plniva ovlivňuje vlastnosti a pevnost pryskyřice.

Doporučujeme následující plniva:

F - B / opracovatelné /
F - A / otěruvzdorné /
F - Alu
a další

Vlastnosti

- * vysoká pevnost
- * dokonalé celkové vytvrzení
- * velmi tekutá
- * vysoký stupeň plnění
- * tepelná odolnost a stálost

Použití

- * slévarenské modely, jaderníky modelové plotny
- * negativy všeho druhu
- * pomocné formy
- * prototypy, kontrolní odlitky
- * vakuové hlubokotažné formy
- * formy pro umělé hmoty

ebalta SG

Technický návod

-----+
| Vlastnosti a údaje: /bez plniva !!!/ |
| Barva pryskyřice komp.A : bílá |
| tužidlo komp.B : světle žlutá |
| Viskozita směsi mPas : 40 - 60 |
| Hustota směsi kg/dm³ : 1,10 |
| Tvrdost Shore D při 20°C: 70 - 75 |
| Pevnost v tlaku N/mm² : 55 - 60 |
| Pevnost v tahu N/mm² : 40 - 45 |
| Pevnost v ohybu N/mm² : 70 - 75 |
| E - modul /ohyb/ N/mm² : 1300 - 1500 |
| Rázová houžev. KJ/mm² : 24 - 27 |
| Tepelná odolnost bez plniva: 60-70 °C |
| Tepelná odolnost s plnivem : 90-100°C |
-----+

Podmínky pro použití:

-----+
| Poměr: 100 hm.dílů pryskyřice komp.A |
| 100 hm.dílů tužidla komp.B |
-----+
| Doba zprac. 200 g při 20°C: |
| SG 2000S SG 2000 SG 2000 L |
| 3-4 min. 3 min. 7-8 min. |
| Vytvrzení/vyjmutí z formy/: |
| SG 2000S SG 2000 SG 2000 L |
| 15-30 min. 30-60 min. 60-90 min. |
-----+
| Skladovací schopnost |
| v uzavřeném stavu min. : 1/2 roku |
| Pryskyřici před každým použitím dobře |
| zamíchat. |
| Po každém použití hned uzavřít obal. |
-----+

Balení:

-----+
| pryskyřice: 1 kg; 5 kg; 25 kg; 50 kg |
| tužidlo : 1 kg; 5 kg; 25 kg; 50 kg |
-----+

-----+
| plnivo F-A, F-B, F-Alu |
-----+

K upozornění:

Tyto údaje a doporučení byly sestaveny s největší starostlivostí na základě zkoušek a dlouholetých praktických zkušeností. Protože ale nelze kontrolovat zpracování spotřebitelem, nemůže být při různorodosti možnosti užití a pracovních metod převzata žádná záruka.

Zástupce pro ČR

679 07 Kotvrdovice 277 * tel.: 516 443 572, fax: 516 443 573

PŘÍLOHA 2



SILASTIC® T-4

Silikonový kaučuk – základní hmota a tužidlo T-4/T-4

Vysoce pevný silikonový tepelně odolný kaučuk

Použití:

Silastic T-4 je vysoce pevný silikonový kaučuk k výrobě forem pro prototypy a malé série. Byla vyrobena zejména pro rychlou výrobu prototypů.

Silastic T-4 je dvousložkový silikonový kaučuk s možností volby tužidla a to mezi **T-4 S** (standard) nebo **T-4 O** (olejové). Po smíchání s tužidlem v poměru 10 : 1 se vytvrzuje při pokojové teplotě na průhledný (transparentní) kaučuk.

Tužidlo T-4 O vyvolává samomazný efekt, čímž vylepšuje separační vlastnosti materiálu.

Hlavní znaky

Vlastnosti:

- vynikající samoseparační vlastnosti
- vytvrzení je možno urychlit teplem
- velmi nepatrné smrštění a dobrá dimenzní odolnost
- Velmi tvrdý, ale flexibilní a tuhý
- Vhodný zejména pro použití při vyšších teplotách
- Dvě silikonová tužidla:
 - T-4 S (standard) nebo
 - T-4 O (olejové)

Popis:

Silastic T-4 je dvousložkový silikonový kaučuk s možností volby tužidla a to mezi **T-4 S** (standard) nebo **T-4 O** (olejové). Po smíchání s tužidlem v poměru 10 : 1 se vytvrzuje při pokojové teplotě na průhledný (transparentní) kaučuk.

Tužidlo T-4 O vyvolává samomazný efekt, čímž vylepšuje separační vlastnosti materiálu.

Hlavní znaky

Informace pro zpracování

		Směs SILASTIC S	Hmota	Tužidlo
Barva		průsvitná	-	-
Poměr míchání	Hmot. díly	-	100	10
Viskozita	mPas	cca 35 000	cca 70 000	cca 300
Čas zpracování	minut	90	-	-
Vytvrzení při pokoj. teplotě	Hod.	8	-	-

Vlastnosti

	Typ zkoušky	Jednotka	Hodnota
Tvrdost Shore	DIN 53505	Shore A	cca 40
Pevnost v tahu	EN ISO 527	MPa	6,7
Protahení	EN ISO 527	%	400
Odolnost proti přetržení	DIN ISO 34-1	kN/m	-
Hustota při 23°C	-	g/cm ³	-
Lineární smrštění	Interní pokyny	%	<0,1

Zpracování a použití:

Po smíchání s tužidlem v poměru 10:1 se vytvrzuje při pokojové teplotě na transparentní (průhledný) kaučuk. Tužidlo T-4 O vyvolává "samomazný efekt", čímž vylepšuje separační vlastnosti materiálu.

Hlavní znaky:

- rychlé vytvrzení za 6-8 hodin při pokojové teplotě
- nízká viskozita - snadné míchání a odplynění
- dobré separační vlastnosti

Povrch originálu musí být čistý bez zbytků staré hmoty. Při porézním povrchu používáme separátor voskový, anebo PTFE sprej. Mícháme v poměru 100:10 v čisté nádobě, důkladně až k úplnému spojení obou složek. Mícháme ručně nebo pomocí míchadla, plynule v menších dávkách a dbáme, aby teplota během míchání nestoupla nad 35°C. Doporučujeme směs podrobit vakuování pro odstranění vzduchu (1 - 2 min.). Během vakuování nabude směs až 5-ti násobku výchozího stavu, s čímž je třeba počítat při volbě velikosti mísící nádoby. Když vakuování neprovádíme, nanese vlasovým štětcem malou vrstvu (1-2 mm). Po jejím vytvrzení pak pokračujeme dále.

Odléváme co nejdříve, abychom snížili možnost pohlcení vzduchu. Vytvrzení do stavu flexibilní gumy nastane při teplotě 22-24°C za 6-8 hodin, pak můžeme rozebírat. Zkrácení vytvrzovací doby dosáhneme ohřevem, ale jen za cenu větší smrštitivosti.

UPOZORNĚNÍ:

Všechny elastomery vytvrzované tužidly, jsou při styku s určitými materiály náchylné k nedokonalému vytvrzení, to jest do 24 hod. Dojde jen k částečnému vytvrzení, anebo kontaktní plocha s druhým materiálem zůstává lepivá. Materiály, které obsahují aminy, organické sloučeniny cínu, nebo látky složené ze sloučenin kyselin, působí mimořádně silně proti vytvrzování. Proto doporučujeme přezkoušet míchací nádoby, formy, vlastní modely a separátory, zda nebrání vytvrzování.

Použití:

Formy ze SILASTIC T-4 mají i při vysokých teplotách dlouhou životnost. Stálé používání nad 200°C však po delší době způsobuje snížení elasticity. Použití pro teploty nad 250°C se nedoporučuje.

Po úplném vytvrzení je SILASTIC T-4 velmi odolný chemikáliím. Dlouhodobý styk pryskyřicemi a dalšími agresivními hmotami může mít vliv na fyzikální vlastnosti, dělitelnost, eventuálně na přesnost rozměrů formy. Doporučuje se proto pravidelně rozměry forem přezkoušet.

Omezené ručení – prosím čtěte pozorně

Údaje obsažené v tomto návodu byly zhotoveny dle nejlepšího svědomí na základě výzkumů provedených v Dow Corning. Protože D. C. nemůže ovlivnit způsoby použití a podmínky, za kterých se výrobky používají, je nutno provést testy, aby se zjistilo, že výrobky v ohledu na výkon, účinek a spolehlivost jsou vhodné pro určité použití zákazníkem. Návrhy na použití výrobků nejsou chápány jako pokus o porušení patentových práv. Dow Corning dává záruku pouze na to, že výrobky odpovídají v době dodání aktuálnímu popisu výrobku. Nároky na záruku a jím odpovídající povinnosti výrobce Dow Corning v případě uznání záruky se omezí na náhradní dodávku nebo vrácení kupní ceny daného produktu.

Dow Corning neručí za náhodné nebo následné škody.