



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# KONSTRUKCE A VÝROBA NÁSTAVCE NÁŠLAPNÉHO PEDÁLU JÍZDNÍHO KOLA

CONSTRUCTION AND PRODUCTION THE EXTENSION OF BICYCLE PEDAL

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Jurka

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

BRNO 2016

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Adam Jurka</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2015/16

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:

## **Konstrukce a výroba nástavce nášlapného pedálu jízdního kola**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Bakalářská práce je zaměřena na konstrukci a výrobu nástavce nášlapného pedálu jízdního kola, který bude sloužit při jízdě bez cyklistických treter. Součást bude zkonstruována ve 3D parametrickém software Autodesk Inventor. Model součásti bude vyroben pomocí metody Fused Deposition Modeling s využitím 3D tiskárny uPrint. Součástí práce bude výroba silikonové formy, která bude sloužit pro odlití plastového modelu nástavce nášlapného pedálu. Práce bude ukončena technicko-ekonomickým zhodnocením.

### **Cíle bakalářské práce:**

Úvod

1. Popis součásti
2. Konstrukce modelu součásti
3. Výroba reálné součásti
4. Technicko-ekonomické zhodnocení

Závěr

### **Seznam literatury:**

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.

PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.

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.

HORÁČEK, M - CILEČEK, J.: Capabilities of Investment Casting Technology, Livarski ,Vestnik, Vol.54, 4 / 2006, pp. 175-186.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na konstrukci a výrobu nástavce nášlapného pedálu jízdního kola, který bude sloužit při jízdě bez cyklistických treter. Součást bude zkonstruována ve 3D parametrickém softwaru Autodesk Inventor. Model součásti bude vyroben pomocí metody Fused Deposition Modeling s využitím 3D tiskárny uPrint. Součástí práce je výroba silikonové formy, která bude sloužit pro odlití plastového modelu nástavce nášlapného pedálu. Práce je ukončena technicko-ekonomickým zhodnocením.

### Klíčová slova

Nástavec nášlapného pedálu, 3D tiskárna, Fused Deposition Modeling, Rapid Prototyping, Silikonová forma

## ABSTRACT

Bachelor thesis is focused on the construction and production of extension of bicycle pedal which will be used while cycling without cycling spikes. Component will be constructed in 3D parametrical software Autodesk Inventor. Model will be manufactured using Fused Deposition Modeling technology with utilization of 3D printer uPrint. One part of thesis is about manufacturing of silicon mould which will be used for casting of plastic model. Thesis is finished with technical-economic evaluation.

### Key words

Extension of bicycle pedal, 3D printer, Fused Deposition Modeling, Rapid Prototyping, Silicon mould

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JURKA, A. *Konstrukce a výroba nástavce nášlapného pedálu jízdního kola*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš, Ph.D..

### PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Konstrukce a výroba nástavce nášlapného pedálu jízdního kola** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Adam Jurka

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji svému vedoucímu práce Ing. Aleši Jarošovi, Ph.D. za cenné připomínky, rady a celkové vedení při vypracování bakalářské práce. Také chci poděkovat své rodině za umožnění studia na vysoké škole.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 POPIS SOUČÁSTI.....	10
1.1 Historie jízdních kol.....	10
1.2 Nášlapné pedály a cyklistické tretry .....	10
1.3 Nástavec nášlapného pedálu a jeho význam .....	11
2 KONSTRUKCE MODELU SOUČÁSTI.....	12
2.1 Autodesk Inventor .....	12
2.2 Konstrukce .....	12
2.3 Nový projekt Pedál.....	12
2.4 Konstrukce nástavce.....	12
3 VÝROBA REÁLNÉ SOUČÁSTI .....	19
3.1 Rapid prototyping.....	19
3.2 Fused Deposition Modeling .....	20
3.3 3D tisk modelu .....	20
3.3.1 Formát STL.....	20
3.3.2 Program CatalystEX .....	21
3.3.3 3D Tiskárna uPrint.....	25
3.4 Silikonová forma.....	27
3.4.1 Příprava modelu.....	27
3.4.2 Výroba silikonové formy .....	28
3.5 Odlévání do silikonové formy.....	30
3.6 Finální úpravy .....	33
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	37
4.1 Náklady na výrobu modelu pomocí 3D tiskárny uPrint.....	37
4.2 Náklady na výrobu modelu odléváním do silikonové formy.....	38
4.2.1 Náklady na výrobu silikonové formy .....	38
4.2.2 Náklady na výrobu odlitků .....	39
4.3 Porovnání nákladů metody 3D tisku a odléváním do silikonové formy .....	40
ZÁVĚR .....	42
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	43

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	45
SEZNAM PŘÍLOH.....	47

## ÚVOD

Díky nepřetržitému progresu průmyslu a vývoji nových technologií lze pomocí moderních metod znatelně urychlovat, zjednodušovat a zefektivňovat výrobu a vyrábět i takové výrobky, které nejsou nijak limitovány svým tvarem nebo složitostí, což se nejpříznivěji odráží na výkonnosti a konkurenceschopnosti. U moderních technologií není nutné někdy náročné programování či znalost a schopnost řízení konvenčních obráběcích strojů. Práce s těmito technologiemi je jednoduchá a znatelně šetří čas i finance.

Jednou z velmi významných technologií spadající pod pojem moderní technologie je Rapid Prototyping, která často navazuje na práci v 3D parametrickém systému jako je například Autodesk Inventor nebo na technologii Reverzního (zpětného) inženýrství, což je proces při kterém z již existujícího modelu lze získat model virtuální. U reverzního inženýrství je možné využít například skenování již existující součásti. Takto získaná data lze opět upravovat v různých softwarech.

Úsporou času rozumíme hlavně to, že není nutné číst ve výrobních výkresech a pomocí konvenčních obráběcích strojů získávat požadovaný prototyp z původního polotovaru pomocí postupného obrábění, což se projevuje i na finančních nákladech. Po vytvoření virtuálního 3D modelu je možno jednoduše odeslat data do programu tiskárny, ve které se provedou už jen finální jednoduchá nastavení, a dále probíhá tisk, který není třeba nijak řídit či spravovat, tiskárna práci řídí sama.

Tiskárna využitá při této práci funguje na principu Fused Deposition Modeling (FDM), což je princip postupného nanášení vrstev materiálu až do finálního tvaru. Jako materiál pro vyráběnou součást je v této práci použit materiál ABSplus. Některé součásti vytvořené touto technologií jsou vzhledem ke svým vlastnostem schopné být přímo používány v provozu, to ovšem záleží na finančních nákladech a následné výhodnosti ve srovnání s jinou technologií, například technologií odlévání do silikonové formy, jež je dalším předmětem této práce.

V práci je dále zahrnuta výroba součásti pomocí technologie odlévání do silikonové formy. Práce tedy obsahuje jak postup při výrobě součásti technologií FDM tak i celkový postup při výrobě technologií odléváním do silikonové formy. Obě dvě technologie jsou popsány od úplného počátku jejich práce, či výroby až do finální podoby požadované součásti.

Obě tyto metody jsou zhodnoceny a mezi sebou vzájemně porovnány, což je předmětem technicko-ekonomického zhodnocení.

## 1 POPIS SOUČÁSTI

Tato práce je zaměřená na konstrukci a výrobu nástavce nášlapného pedálu jízdního kola. Jízdní kolo je jednostopé vozidlo, v tomto případě poháněné lidskou silou. Jízdní kolo je známo po celém světě ať už jako dopravní prostředek nebo předmět sportovních zálib a aktivit. Lidská síla je převedena na rotaci kola a jeho pohyb pomocí řetězu, převodů a právě pomocí pedálů či šlapadel.

### 1.1 Historie jízdních kol

Historie jízdního kola a počátky jeho využívání se datují k začátku 19. století. Prvním konstrukčním materiálem bylo dřevo, které však není moc praktické ani pohodlné. Vzhledem k tomu, že první kola, či drezíny, jak se jim dříve říkalo, nebyly prozatím opatřeny pedály, kolo se pohánělo odrážením nohama od země. Později, kolem roku 1861 opatřil významný francouzský vynálezce Pierre Michaux za pomoci svého syna Ernesta kolo jízdními pedály [2,3,4].

Ernest Michaux byl v roce 1868 spoluzakladatelem společnosti Michaux and company, která začala s velkosériovou výrobou. Pedály byly spojeny s osou předního kola a postupem času bylo dřevo nahrazeno kovovými rámy a kovové ráfky nahrazeny gumovými obručkami. Vélocipede, známý díky velikosti předního kola, které bylo takto konstruováno z důvodu maximálního využití síly, měl velkou nevýhodu v jeho špatné ovladatelnosti, stabilitě a riziku pádu z kola tudíž byl vynález dvou řetězových převodů obrovským pokrokem. Vhodně zvolené převody zajišťovaly stejnou rychlost nízkého kola jako kola vysokého. V roce 1885 se tedy poprvé objevilo první jízdní kolo podobné kolu dnešnímu [2,3,4].

Nízká kola postupně nahrazovala ta vysoká a vzhledem k tomu, že kolo prozatím nemělo brzdy ani volnoběh muselo se kolo brzdit za pomoci zadržování a brždění pedálů, jelikož otáčení pedálu bylo svázáno s otáčením kola. Fyzicky náročné brždění nahradila axiální brzda, jež působila svým sevřením na ráfek kola z obou stran. Tento vynález inženýra Bowdena se používá i u dnešních jízdních kol. Řadou dalších úprav na konci 19. století a průběhem 20. století se jízdní kola začala více zdokonalovat, vytlačila vysoká kola a stále více se podobala těm dnešním [2,3,4].

### 1.2 Nášlapné pedály a cyklistické tretry

Použitím těchto speciálních nášlapných pedálů a cyklistických treter je dosaženo maximálního přenosu výkonu při jízdě na jízdním kole. Nášlapné pedály dosahují vyšší efektivity šlapání než u klasických pedálů díky tomu, že záběr při šlapání je v obou směrech, jak dolů tak i směrem (tahem) nahoru. Kromě zvýšení efektivity tyto pedály a tretry také šetří cyklistovy síly [5,6].

Podrážka cyklistických treter je přizpůsobena pro umístění systému, jenž upíná tretru do nášlapného pedálu. Obě dvě komponenty zajišťující správnou funkci mechanismu jsou vzhledem k potřebné pevnosti vyrobeny z pevných a tvrdých kovových materiálů. Tretra se do pedálu vsune našlápnutím na mechanismus pedálu, následné vyjmutí tretry z pedálu je zajištěno pohybem nebo vytočením paty směrem od kola [5,6].

Cyklistických treter i upínacích mechanismů existuje několik různých druhů proto je třeba, při výběru brát zřetel na jejich vzájemnou kompatibilitu. U některých z treter je možnost vyjmutí mechanismu a jeho nahrazení mechanismem jiným [5,6].

Na upínacím mechanismu lze nastavit tuhost pružinek, které ovlivňují vzdálenost upínacích čelistí a tím pádem tuhost a pevnost sevření tretry v pedálu. Pro začátečníky nebo příležitostné cyklisty je výhodnější mít pedál více povolený, to zajistí lehké vypínání a vystupování. Od věci také není nacvičení zapínání a vypínání tretry z pedálu, ne vždy, hlavně u silnějšího utážení je při pádu tretra vypnuta z pedálu a hrozí tak nebezpečí úrazu [5,6].

Tento mechanismus nášlapného pedálu a cyklistických treter je v dnešní době neodmyslitelnou součástí jízdního kola ať už pro cyklistické nadšence nebo vrcholové sportovce [5,6].

### **1.3 Nástavec nášlapného pedálu a jeho význam**

Existuje široká škála nášlapných pedálů v různých provedeních a v různých cenových kategoriích. Předmětem této práce je kovový pedál s upínacími mechanismy na obou stranách, tudíž ani jedna strana není nijak přizpůsobena nebo upravena na jízdu bez cyklistických treter, což nepatří mezi největší problémy jízdního kola, ovšem jsou případy, kdy jízda bez treter není příjemná a může být obtížná nebo nepohodlná.

Jedním z možných případů je jízda na mokré vozovce nebo při deštivém počasí, kdy bota s hladkou podrážkou může sklouzávat z mokrého kovového pedálu, který bývá v těchto případech kluzký. Dalším případem bývá jízda ve volné obuvi, která nedrží pevně na noze a může se smýkat po malé opěrné ploše pedálu. Cílem je tedy vytvořit lehce a jednoduše použitelný nástavec na nášlapný pedál, který zajistí větší opěrnou plochu a bude náležitě upraven na to, aby podrážka necyklistické obuvi neklouzala a nesjížděla z nedostatečné opěrné plochy nášlapného pedálu.

## 2 KONSTRUKCE MODELU SOUČÁSTI

V této kapitole je popsán postup při modelování virtuálního 3D modelu nástavce v 3D parametrickém softwaru Autodesk Inventor.

### 2.1 Autodesk Inventor

Pro tvorbu modelu nástavce byl využíván program Autodesk Inventor Professional ve verzi 2016. Tento program je 3D parametrický software, který patří do skupiny CAD (computer-aided design/počítačem podporované projektování) systémů. CAD systém poskytuje geometrické, matematické či inženýrské nástroje, které zajišťují kreslení i modelování cílových objektů a tím ulehčují i urychlují práci, následně poskytuje potřebnou výkresovou dokumentaci či realistickou vizualizaci. Velkou výhodou je také možnost přiřazení různých fyzikálních vlastností objektům nebo možnost výpočtů rozměrů ploch nebo objemů modelů. Za další výhodu se dají považovat široké možnosti úprav pracovního prostředí, zobrazení či skrytí potřebných či nepotřebných nástrojů a funkcí a další pro uživatele výhodná upravení nebo přizpůsobení programu pro jeho nejjednodušší a zároveň nejméně časově náročnou práci. Jinými použitelnými programy na stejném nebo podobném principu by mohly být SolidWorks, CATIA nebo Solid Edge. [7,8].

### 2.2 Konstrukce

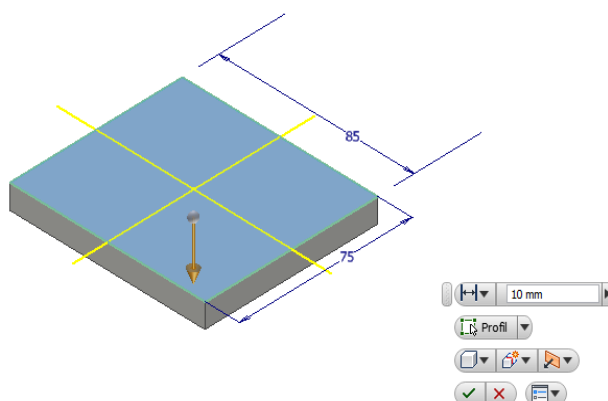
Při konstrukci bylo nutné pamatovat na potřebné rozměry nástavce. Nástavec musí být dostatečně široký a dostatečně dlouhý na to, aby plnil svoji funkci rozšíření opěrné plochy, neměl by však být zbytečně velký. Pro určení šířky nástavce bylo možné se řídit přibližně šířkou obuvi. Nástavec je o pár centimetrů užší a to proto, aby jeho protiskluzové prvky byly vždy v kontaktu s obuví. Délka nástavce je taková aby se špička chodidla opírala o dostatečně velkou plochu.

### 2.3 Nový projekt Pedál

Práci v Inventoru si lze usnadnit několika způsoby, jedním z nich je vytvoření nového projektu, kterým docílíme toho, že všechna naše práce bude ukládána na jedno námi vybrané místo. Takto založený nový projekt a správné pojmenování vytvářených součástí nebo různých verzí nám usnadní jakékoliv dohledávání modelů v počítači a všechna práce je pohromadě.

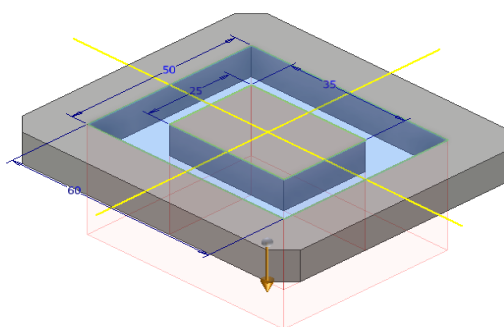
### 2.4 Konstrukce nástavce

Prvním krokem při modelování bylo vytvoření prostého obdélníkového náčrtu, který byl následně funkcí „vysunutí“ vysunut o požadovanou šířku nástavce. Plný obdélník o rozměrech 85x75mm je tedy vysunut do výšky 10mm, která určuje tloušťku budoucího nástavce (viz obrázek 2.1). V tomto případě nezáleží na směru vysunutí, jelikož další náčrt bude ležet na jedné z ploch vytvořeného kvádrů. Nutno podotknout, že při tvorbě náčrtů je víc než vhodné využívat osového systému. Správně umístěný náčrt usnadní práci hned v několika dalších operacích.



Obr. 2.1 Vytvoření kvádrů o potřebných rozměrech.

V další operaci, kterou lze vidět na obrázku 2.2 byly sražené hrany a byly do kvádrů vysunuty otvory. Tyto otvory slouží jako odlehčení nástavce, ušetření materiálu a zároveň jako prostor pro únik vody či nečistot z podrážky obuvi. Odstranění nevhodných ostrých hran bylo provedeno funkcí „sražení hran“. Jednoduchým označením čtyř hran a následného zadání hodnoty sražení.

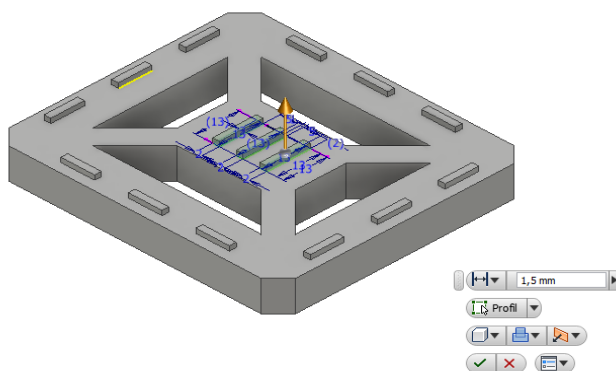


Obr. 2.2 Sražení hran a vysunutí otvoru.

V takto vytvořeném modelu se určil tvar, tloušťka a umístění spojnic. Dále byl na horní ploše vytvořen náčrt protiskluzových prvků. Protiskluzové prvky by měly mít takové rozměry, aby jejich odpor vůči skluzu podrážky byl znatelný, ovšem nesmí být moc vysoké, protože při jejich tloušťce by hrozilo ulomení. Výstupky jsou 10mm dlouhé a 2mm široké. Náčrt byl opět funkcí „vysunutí“ vysunut o 1,5 mm, viz obrázek 2.3.

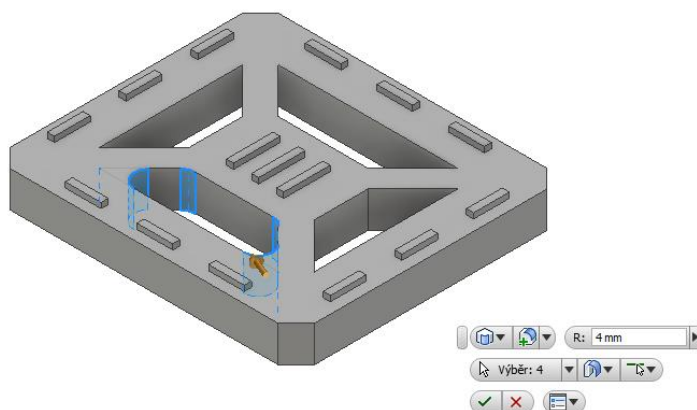


Na obrázku 2.5 lze vidět umístění dalších výstupků na středu pedálu. Mají větší rozměry než výstupky po krajích a to 13mm x 2mm. Vysunuty jsou opět do stejné výšky jako ostatní výstupky, tedy 1,5 mm.



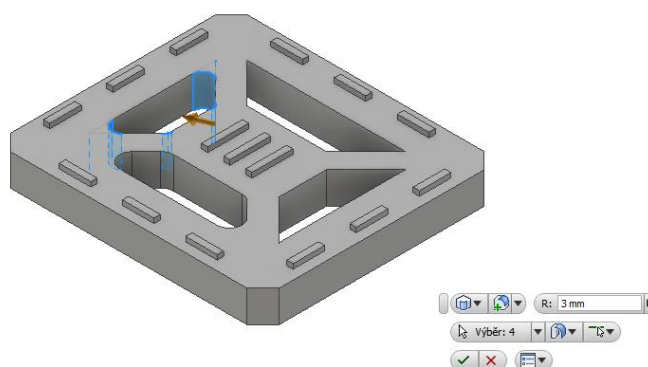
Obr. 2.5 Vysunutí výstupků.

Z důvodu toho, že součástí práce je také odlévání do silikonové formy, byly ostré hrany a rohy odstraněny použitím funkce „zaoblení“. Zaoblení ostrých hran a rohů je zároveň také estetickým vylepšením modelu. Názorné zaoblení vnitřních rohů je viditelné na obrázku 2.6. Poloměr zaoblení je v tomto případě 4mm.



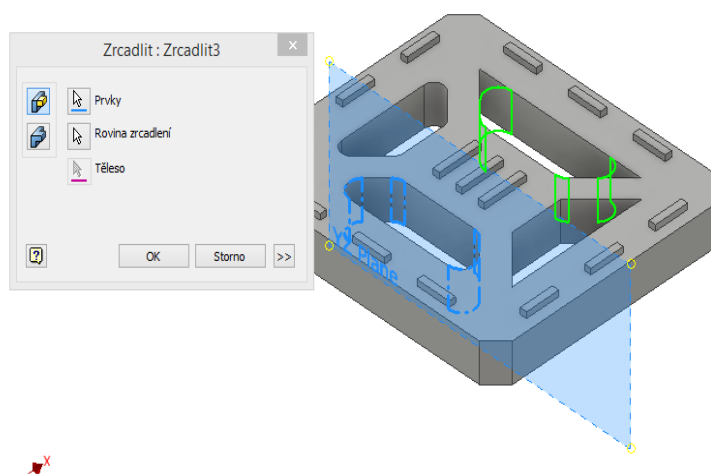
Obr. 2.6 Zaoblení rohů.

Zaoblení druhého, menšího otvoru probíhalo obdobně, ale poloměr zaoblení je nyní jen 3mm. Na obrázku 2.7 je nyní možné vidět obě dvě zaoblení. První i druhé zaoblení je při potřebné úpravě možné jednoduše přepsat rozkliknutím ve stromu, což je panel v programu Inventor, ve kterém lze vidět všechny již vypracované operace a jednoduchým přepisem je možné i zpětně měnit tvary, či rozměry modelu. Úpravy se projeví okamžitě po potvrzení změny. Případné chyby nebo nedostatky, které brání úpravám, Inventor nahlásí a tím určí problém, který je nutné odstranit.



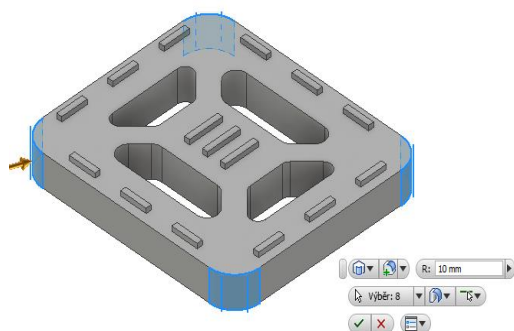
Obr. 2.7 Zaoblení.

Obrázek 2.8 zobrazuje již zmiňované zrcadlení. Nutné je vybrat prvky, které je třeba zrcadlit, v tomto případě jsou to čtyři zaoblení, a následně rovinu, přes kterou zrcadlení proběhne. V tomto případě zrcadlíme zaoblení přes rovinu XZ. Stejným postupem jen výběrem jiných prvků a jiné roviny bylo zrcadleno zaoblení druhého otvoru.

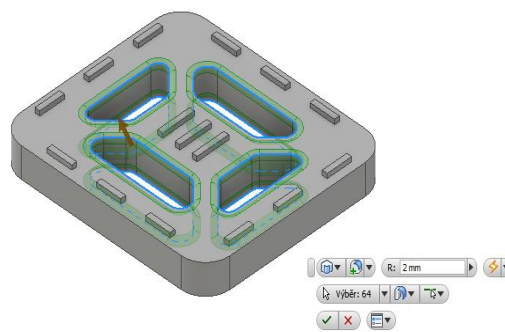


Obr. 2.8 Zrcadlení zaoblení.

Stejnou funkcí „zaoblení“, jsou zaobleny vnější hrany modelu (viz obr. 2.9, 2.10). Po zkosení, které již bylo popsáno dříve, stále na modelu zůstávají ostré hrany, tudíž jsou následně hrany zaoblené tak aby na modelu nebyly ostré hrany, zaoblené jsou také otvory a následně celý obvod modelu.

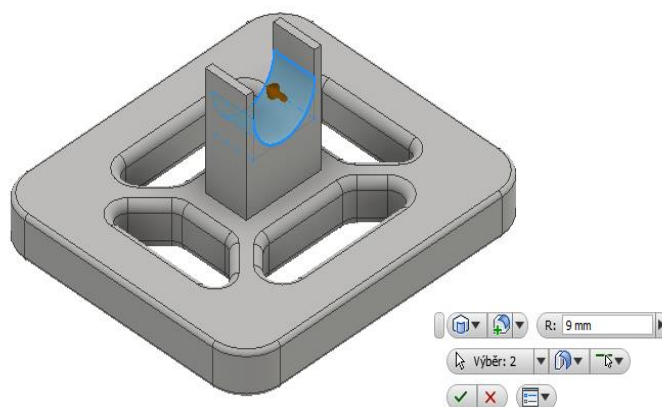


Obr. 2.9 Zaoblení rohů.



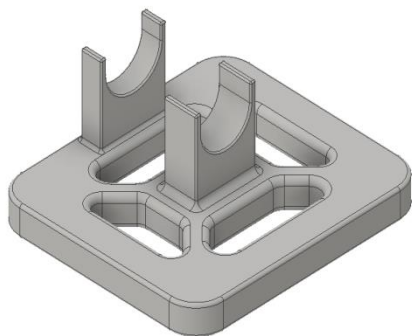
Obr. 2.10 Zaoblení otvorů.

Po vymodelování vrchní části nástavce bylo modelováno upnutí, které bude nástavec držet na nášlapném pedálu. Za pomoci funkce vysunutí byl opět vysunut náčrt obdélníku. Na tomto obdélníku byl vytvořen náčrt dvou nožiček. Na obr. 2.11 lze vidět zaoblení rohů pod nožičkami. Součet obou zaoblení je roven potřebnému průměru, na kterém bude upnutý nástavec s přídavkem pro pryžový pásek, tedy 18mm.

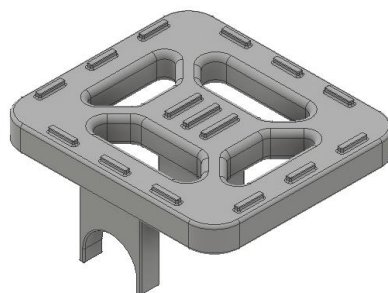


Obr. 2.11 Uchycení.

Pro pevnější uchycení nástavce a také z důvodu lepšího tlumení rázů a rozložení tlaku byla vymodelována ještě jedna část upnutí. Druhá část upnutí je na stejném principu a byla vymodelována stejným postupem jako první část upnutí, má ale jiný průměr, protože bude upnutá na jiné části nášlapného pedálu. Konečná konstrukce modelu je viditelná na obr. 2.12 a 2.13.



Obr. 2.12 Upnutí nástavce.



Obr. 2.13 Finální podoba.

### 3 VÝROBA REÁLNÉ SOUČÁSTI

V této kapitole je popsána výroba nástavce nášlapného pedálu. Prvním krokem je výroba 3D modelu metodou Rapid Prototyping, následně výroba silikonové formy pro odlévání a finální odlévání modelu nástavce.

#### 3.1 Rapid prototyping

Metodou Rapid Prototyping je rozuměná rychlá tvorba či výroba prototypu. Rapid Prototyping je aditivní technologie a principem Rapid Prototyping technologií je opakované vrstvení materiálu až do podoby výsledného tvaru, takto postupně nanášené vrstvy mají stále konstantní tloušťku. Tato technologie je přesným opakem obráběcí metody, kde se požadovaného tvaru docílí postupným odebíráním třísky z původního polotovaru [1,9,10,11].

Rapid Prototyping umožňuje velmi rychlou a pohodlnou tvorbu prototypu. Vstupními daty jsou data z CAD programů. Tato potřebná data mohou být získána buďto CNC řídicím programem, reverzním inženýrstvím, kde je již existující model naskenován a popřípadě cíleně upraven, nebo je vytvořen virtuální 3D model v libovolném CAD systému jako jsou například Autodesk Inventor, CATIA, Pro/Engineer nebo SolidWorks. Konečným výsledkem je požadovaný fyzický model. Tato technologie není nijak limitovaná tvarem či složitostí vyráběných součástí a je schopná zpracovat geometricky nebo tvarově složité prvky i funkční nerozebíratelné sestavy [1,10,12,13].

Mezi použitelné materiály pro tyto technologie patří termoplasty, kovové prášky, pryskyřice nebo vosk. Velkou předností technologie Rapid Prototyping je rychlost, níž je prototyp vytvořen. Tato skutečnost se zřetelně projevuje na snížení času výroby, finální kvalitě prototypu a na výrobních nákladech prototypu, což má za důsledek zvyšování konkurenceschopnosti na trhu [1,10,11,13].

Prototypy se dají touto technologií získat několika různými způsoby, které jsou shodné v tom, že postupně nanášejí vrstvu materiálu až do finální podoby. Mezi tyto způsoby patří spékání prášků materiálu, kterého je využíváno pro kovové a plastové prototypy, dále nanášení stavebních vrstev taveniny (FDM), což jsou většinou plasty a vosky, popřípadě je možné využít technologii spojování speciálních fólií [1,9,11,12].

### 3.2 Fused Deposition Modeling

Technologie Fused Deposition Modeling (FDM) se zakládá na postupném vrstvení použitých materiálů. První materiál je materiál stavební a tedy materiál samotného modelu. Druhý materiál je pro potřeby lešení či podpor, který je po dokončení modelu odejmut mechanicky, případně je rozpuštěn ve speciálním roztoku v ultrazvukové čističce [10,13,15,16].

Stavební materiál je v průběhu tisku odvíjen z cívky, dále je natavován v hlavici a následně nanášen na podložku tiskárny nebo již existující vrstvy stavebního nebo podpůrného materiálu, tvoří tak vrstvy modelu, které jsou i po dokončení 3D tisku zřetelně viditelné. Materiál je vždy nanášen v jedné rovině a až po dokončení celé vrstvy se hlavice posune směrem nahoru a to ve vzdálenosti výšky jedné vrstvy. Proces se takto opakuje až do dokončení tisku [14,15,16].

Jako stavební materiály ve formě drátu se používají ABS nebo ABSplus plasty, elastomery, vosky, polykarbonáty a další. Součásti, které byly vyrobeny touto metodou lze využít pro testování nových nebo upravených výrobků. S ohledem na mechanické vlastnosti mohou být některé modely vyrobené touto metodou prakticky využíváné v provozu [13,15,16].

Výhodou této metody je také možnost výroby jakéhokoliv tvaru i funkčních pohyblivých nerozebíratelných sestav. Pro tuto metodu lze využít širokou škálu materiálů či použít pouze povrchovou úpravu komponentů nebo pokovení povrchu [14,15,16].

Nevýhodou této metody může být nedostatečná přesnost výsledného modelu, která závisí na tvaru použitého materiálu pro výrobu modelu a na průměru trysky, která nanáší natavený materiál [10,13,15,16].

### 3.3 3D tisk modelu

Tato kapitola popisuje postup tvorby prototypu. Popisuje tedy veškeré přípravy, samotná nastavení a chody programu až po hotový fyzický prototyp. Začátkem této kapitoly jsou závěrečné úpravy stále v programu Autodesk Inventor, dále práce a nastavení v programu CatalystEX a na závěr odeslání a tisk v 3D tiskárně uPrint.

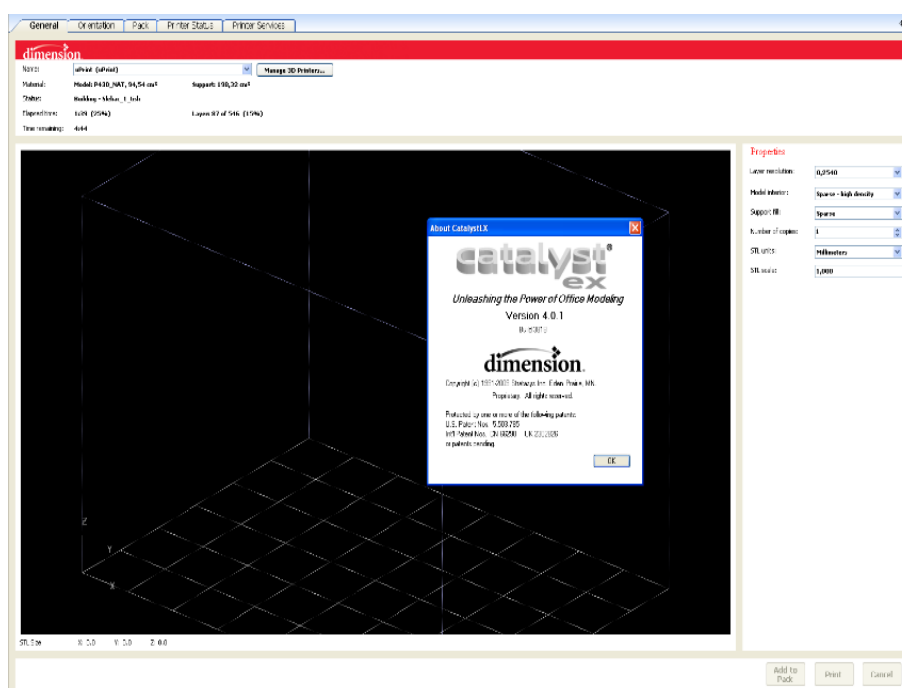
#### 3.3.1 Formát STL

Po vytvoření modelu v programu Autodesk Inventor je nutné model převést na jeden z formátů, který je podporován softwarem tiskárny, na které bude práce pokračovat. Data mohou být ve formátech STL, STEP, SAT a jiné.

V našem případě se jedná o tiskárnu uPrint a pro ni potřebný formát STL. Do formátu STL model převedeme jednoduše v samotném Inventoru. V klasické funkci „Uložit kopii jako“ přímo zvolíme formát STL. Nutné bylo také provést nastavení uložení. Soubor STL byl uložen v binárním formátu ve vysokém rozlišení a jako výchozí jednotka byl nastaven milimetr. Následovalo odeslání do programu CatalystEX.

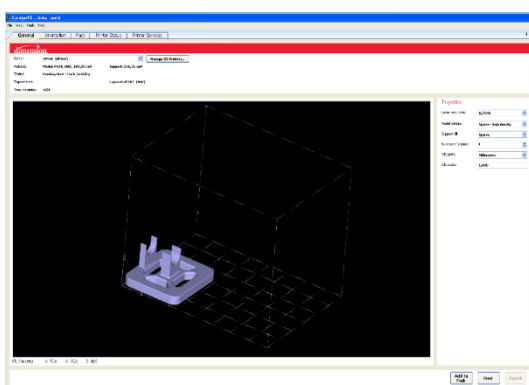
### 3.3.2 Program CatalystEX

CatalystEX je program, který je schopný číst 3D modely uložené ve správném formátu. 3D model je možné nastavit dle potřebných rozměrů a parametrů a umístit jej na libovolné místo podložky, na které bude probíhat samotný tisk. CatalystEX umožňuje komunikaci s 3D tiskárnou Dimension, která byla použita při této práci. Program zobrazuje pracovní prostor dané tiskárny, do kterého je možné model umístit (obr. 3.1) [14].

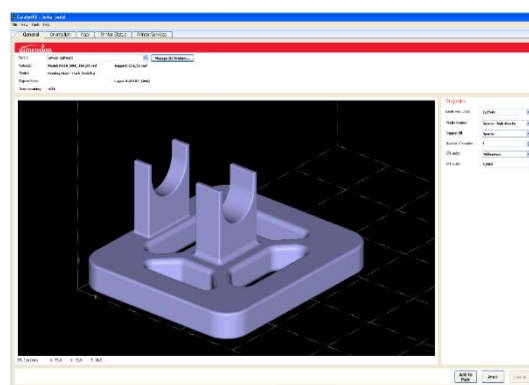


Obr. 3.1 Pracovní prostor.

S ohledem na průběh tisku a na minimální spotřebu podpurného materiálu bylo zvoleno umístění 3D modelu do prostoru tiskárny. Model leží v rohu pracovní podložky. Takto umístěný model lze vidět na obrázcích 3.2 a 3.3. Před samotným tiskem součásti je také nutné provést závěrečné nastavení a určení parametrů tisku. Tloušťka jedné nanášené vrstvy je 0,254 mm. Materiál modelu je na rozdíl od podpurného materiálu plný, materiál podpurný je síťovaný, to zajišťuje minimalizaci spotřebovaného podpurného materiálu a tím pádem i minimalizaci nákladů na výrobu součástí. V programu se také nutné zvolit jednotky, což jsou milimetry a počet kopií, které vypracuje. Nastavení tisku lze vidět na obrázku 3.4 [14].



Obr. 3.2 Umístění v pracovním prostoru.

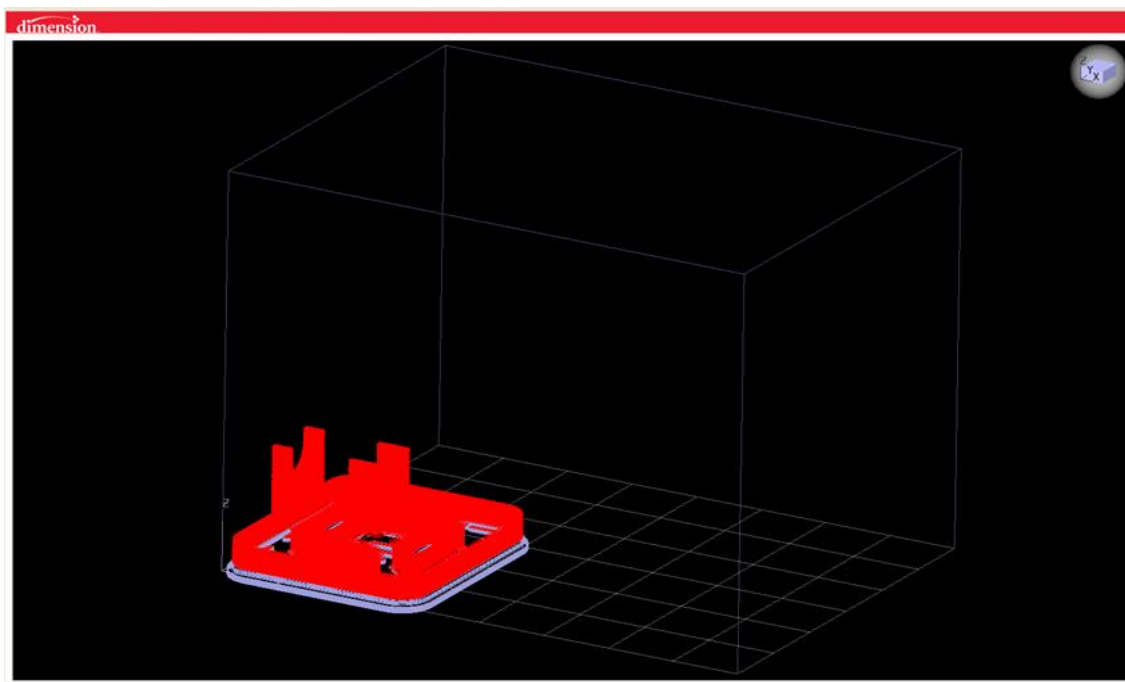


Obr. 3.3 Umístění 3D modelu v pracovním prostoru.

Vlastnosti	
Rozlišení vrstvy	0,2540
Nitro modelu	Pevné
Výplň podpory	Řídký
Počet kopií	1
Jednotky STL	milimetry
Měřítko STL	1,0000

Obr. 3.4 Nastavení vlastností tisku.

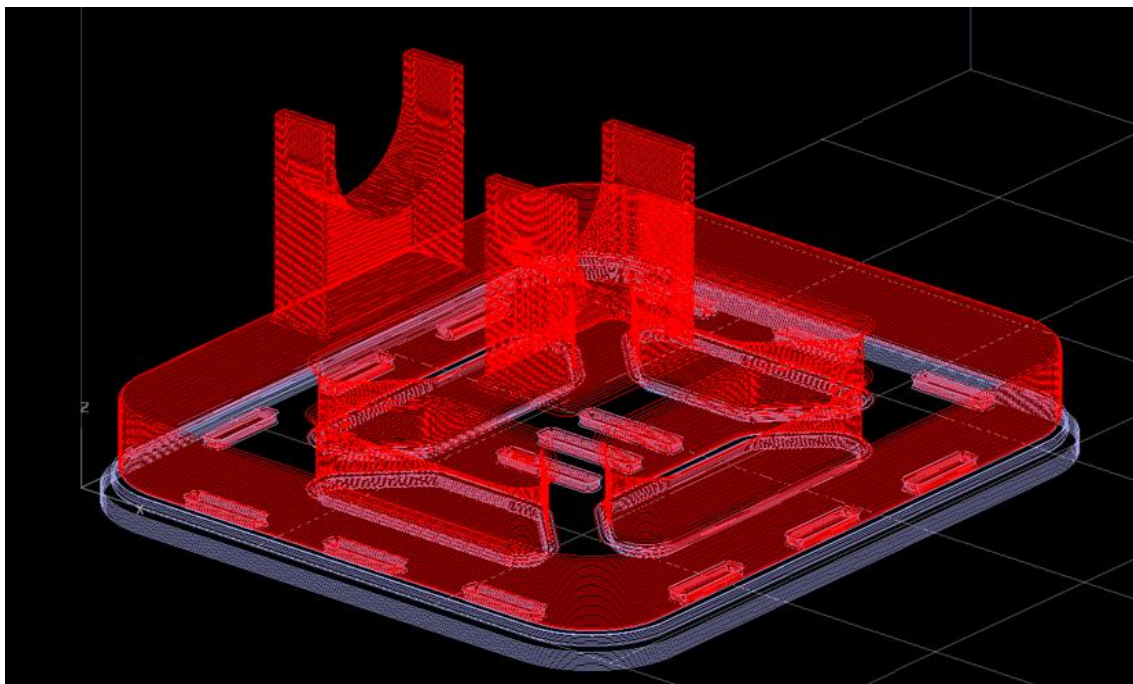
Obrázky 3.5, 3.6 a 3.7 rozlišují rozložení stavebního a podpůrného materiálu. Stavební materiál zobrazuje červená barva, materiál podpůrný je zobrazen barvou šedou. Z obrázku je zřetelné, že podpůrného materiálu je spotřebováno jen minimálně, což je dosaženo právě vhodnou orientací a umístěním modelu v prostoru tiskárny.



Obr. 3.5 Stavební a podpůrný materiál.

Jak již bylo zmíněno tloušťka jedné vrstvy je 0,254mm. Na obrázcích 3.5, 3.6 a 3.7 jsou viditelné jednotlivé vrstvy stavebního i podpůrného materiálu. Podpůrný materiál je použit jen ve spodní části modelu, kde odděluje tištěný model od podložky, na kterou se tiskne a zároveň vyplňuje mezery, které jsou způsobeny tím, že model v tuto chvíli leží na protiskluzových prvcích. Na vrstvy podpůrného materiálu se dále pokračuje nanášením vrstev materiálu stavebního.

Program uvádí přesné spotřeby obou použitých materiálů. Při tisku bylo spotřebováno  $56,257\text{cm}^3$  stavebního materiálu a  $9,504\text{cm}^3$  materiálu podpůrného.



Obr. 3.6 Rozložení materiálu.



Obr. 3.7 Jednotlivé vrstvy materiálu.

### 3.3.3 3D Tiskárna uPrint

3D tiskárna uPrint (viz obr. 3.8) umožňuje 3D tisk modelů, dílů i nerozebíratelných funkčních sestav. Tato tiskárna funguje na principu FDM technologie. Jako stavební materiál je zde využit termoplast ABSplus, který je ve formě drátu namotán na odvíjecí kazetu, a ze kterého je možné získat pevné a netoxické modely. Tloušťka tištěné vrstvy je 0,254mm. Požadovaný předmět je tištěn na vyjímatelné podložky (viz obr. 3.9 a 3.10), od kterých se dá model jednoduše oddělit [15].

Mezi další výhody 3D tiskárny uPrint patří druhá zásobníková komora, která umožňuje případný nepřetržitý provoz zařízení. Zařízení poskytuje vysokou spolehlivost modelování, přijatelné provozní náklady, čistotu a netoxičnost provozu, jednoduchost obsluhy a instalace zařízení [15].

Tiskárna je řízena přes software CatalystEX, který načítá 3D modely ve formátu STL, automaticky model rozdělí na vrstvy stavebního a podpůrného materiálu, generuje data pro tisk a vhodně zobrazuje model v pracovním prostoru tiskárny, který má rozměry 203x152x152mm [15].



Obr. 3.8 3D tiskárna uPrint [15].



Obr. 3.9 Vytisknutý model na vyjímatelné podložce.



Obr. 3.10 Vytisknutý model.

### 3.4 Silikonová forma

Tato podkapitola popisuje přípravu modelu pro výrobu silikonové formy a následně samotnou výrobu silikonové formy.

#### 3.4.1 Příprava modelu

Model je po 3D tisku třeba určitým postupem připravit pro tvorbu silikonové formy. Na modelu jsou po tisku vidět stopy jednotlivých nanášených vrstev tisknutého materiálu a model má tedy velkou drsnost. Po očištění modelu čistým štětcem a stlačeným vzduchem se model tmelil barvou s tmelícím účinkem Prisma Color Spray viz obrázek 3.11.

Po zaschnutí nástřiku, byl v některých místech modelu nahromaděn přebytečný tmel. Nerovnosti a nedokonalosti po zaschnutí tmele byly odstraněny brusným papírem. Proces se celkem třikrát opakoval, dokud plocha neměla požadovanou hladkost.

Po dobroušení modelu se model opět vyčistil čistým štětcem a stlačeným vzduchem. Takto připravený model poskytuje nejpřesnější podobu finální součásti. Díky těmto úpravám se do silikonové formy neobtisknou žádné nerovnosti, nedokonalosti či vměstky z povrchu součásti.

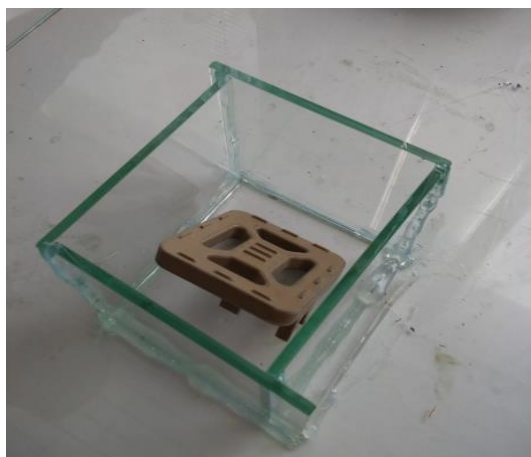


Obr. 3.11 Nástřik modelu.

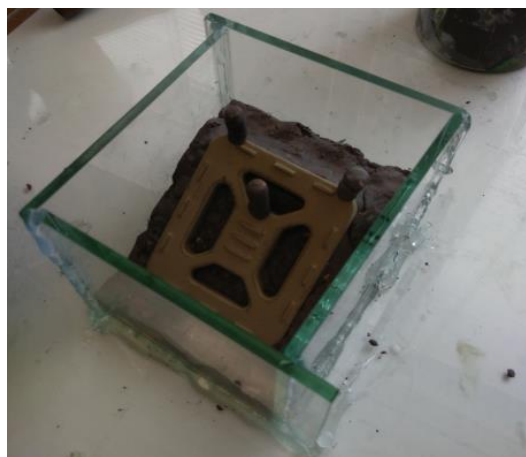
### 3.4.2 Výroba silikonové formy

Vhodným umístěním modelu do rámu, ve kterém byla vytvořena silikonová forma, bylo docíleno toho, že forma bude mít pouze dvě části. Tvorbě obou částí silikonové formy předcházelo zkonstruování skleněného rámu, do kterého byl silikonový kaučuk nalitý (viz obr. 3.12). Dnem rámu je skleněná deska, na kterou jsou stěny rámu připevněny pomocí tavné pistole. Rám musí mít dostatečné rozměry pro umístění modelu i s určitými rezervami na jeho stranách, nesmí však být zbytečně velký, aby spotřeba silikonu nebyla zbytečně velká, což by se znatelně projevilo na jejich výrobních nákladech.

V první fázi výroby silikonové formy byl model umístěn dle potřeb s ohledem na úsporu silikonu, ale také na budoucí odlévání plastu do formy, což je předmětem další podkapitoly. Při umísťování materiálu byl použit formovací materiál (obr. 3.12, 3.13) a na předem určená místa byly umístěny tři vtokové soustavy. Připravený model lze vidět na obrázku 3.13. Povrch okolních stěn, povrch modelu a formovací materiál byly natřeny separátorem, pro snazší oddělování silikonu po jeho ztuhnutí.



Obr. 3.12 Skleněný rám.



Obr. 3.13 Formovací materiál a vtokové soustavy.

Tuto silikonovou formu tvořil dvousložkový silikonový kaučuk SILASTIC T-4, který je nutné pro jeho vytvrzení namíchat v poměru 10:1 s tužidlem. Správný poměr byl zajištěn vážením na digitální váze. Takto namíchaný silikon byl vakuován v zařízení MK Mini (viz obr. 3.14). Vakuování zajistí odstranění nežádoucích bublin v namíchaném silikonu. Tento proces se dal sledovat a šlo jednoduše určit, kdy je silikon připraven. V průběhu vakuování (viz obr. 3.15, 3.16, 3.17) silikon silně probublával a jeho hladina stoupala k vrcholu nádoby. Po spadnutí a ustálení hladiny směsi byl ukončený proces vakuování. Silikon byl nalit do již připraveného rámu neprodleně po vyjmutí nádoby ze zařízení. V klidu a v pokojové teplotě se nechal silikon ztuhnout.



Obr. 3.14 MK Mini.



Obr. 3.15 Silikon před vakuováním.

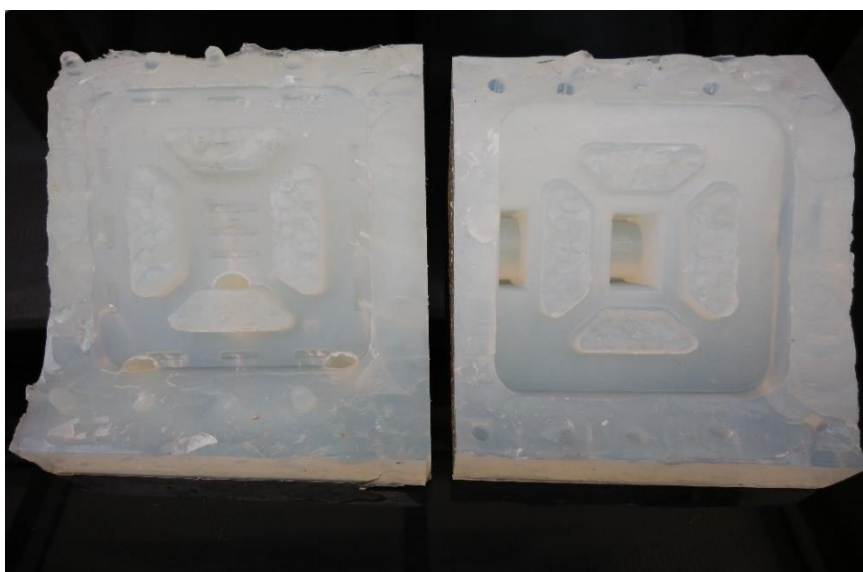


Obr. 3.16 Průběh vakuování.



Obr. 3.17 ustálená hladina po vakuování silikonu.

Ztuhnutí silikonu trvalo přibližně 8 hodin, poté se mohlo přejít na druhou fázi výroby silikonové formy. Ztuhnutý silikon byl po rozebrání rámu vyjmut a očištěn od formovacího materiálu. Následně byl zpátky vsunut model. Takto připravená první půlka formy byla otočena a kolem ní se opět postavil rám. U tvorby druhého dílu formy se postupovalo obdobně jako v prvním případě. Aby byla forma připravena k lití, bylo zapotřebí ji důsledně očistit od veškerých nečistot, které by nepříznivě ovlivnily kvalitu a celkový výsledek budoucího odlévání. Obě části formy byly po očištění sešity k sobě pro lepší doléhavost a těsnění protilehlých stěn. Rozloženou formu lze vidět na obrázku 3.18.



Obr. 3.18 Rozložená silikonová forma.

### 3.5 Odlévání do silikonové formy

Použitý materiál pro odlévání součásti se skládá ze dvou komponent a to z pryskyřice, která má bílou barvu a tužidla, která má nažloutlou barvu, výsledek má pak barvu slonové kosti. Výrobce tohoto materiálu je firma Ebalta, která poskytuje širokou škálu materiálů pro výrobu modelů, modelových zařízení a dalších tvářecích a modelářských potřeb. Pro odlévání byla použita rychleschnoucí licí pryskyřice Ebalta SG 2000/Komp. A+B [18].

Mezi výhody tohoto materiálu patří jeho vysoká viskozita, vysoká možnost plnění, dokonalé celkové vytvrzení a velmi vysoká pevnost a tepelná odolnost s možností přimíchání dalších plniv ovlivňujících vlastnosti materiálu. Tento materiál je dodáván vždy v balení dvou komponent A+B, které se následně míchají v poměru 100:100. Důsledkem smíchání těchto dvou komponent je exotermická reakce [18].

Po smíchání komponent je nutné směs neprodleně odlít do připravené silikonové formy jelikož směs je rychleschnoucí. Výsledek po prvním lití je vidět na obrázcích 3.19 a 3.20 [18].



Obr. 3.19 Nedokonalosti po prvním lití.



Obr. 3.20 Nedostatečné zatečení materiálu.

Po prvním lití jsou viditelné nedokonalosti odlitku. Namíchaná směs v tomto případě špatně zatekla do některých částí modelu. Pro další pokus se tomuto problému předešlo navrtáním formy v kritických místech pomocí úzkého vrtáku. Úzké póry, které po sobě vrták zanechal, slouží pro odvádění přebytečného vzduchu ze silikonové formy. Z forem po tomto ošetření odcházel vzduch, který toto nedokonalé lití zapříčinil, výsledek lze vidět na obrázku 3.21.



Obr. 3.21 Výsledek po úpravě silikonové formy.

Spodní strana nástavce je dokonale odlitá, namíchaný plast vtekl i do nejspodnějších částí upínacích prvků, tudíž je odlitá jejich celková délka a nejsou přítomny ani žádné nedostatky po bublinách vzduchu. V místech protiskluzových prvků na horní straně nástavce byla forma taktéž navrtána. Silikonová forma byla postavena na podstavce, aby vyvrtané otvory byly volné a vzduch měl kudy unikat. Tento průběh odlévání přinesl opět lepší výsledek než při předchozím pokusu (viz obr. 3.22).



Obr. 3.22 Výsledek odlévání.

I přes skutečnost, že odlévání nebylo úplně dokonalé, což je způsobeno malou velikostí a malými rádiusy protiskluzových prvků, je odlévání provedeno v dostatečné kvalitě. Protiskluzové prvky jsou schopny plnit svoji funkci a malé nedostatky budou zaplněny při budoucím nanášení barvy s tmelícím účinkem. Pokud by bylo třeba odlévání dovést až k dokonalosti, bylo by nutné formu více navrtat či provrtat již existující otvory větším vrtákem. Toto počínání by ovšem mělo negativní vliv na životnost formy. Vzhledem k funkčnosti odlitého modelu není další vrtání potřebné.

### 3.6 Finální úpravy

Po odlévání je nejprve nutné celý model obrousit, odstranit nedokonalosti a úzké blány, které vznikly vtečením ještě tekutého plastu mezi dvě protilehlé doléhající plochy silikonové formy. Model byl broušen smirkovými papíry, nejprve hrubším a následně jemnějším papírem a také pomocí sady pilníků. Po tomto ošetření odlitku byla na odlitek poprvé nanесena vrstva laku (viz obr. 3.23). Tento lak má také tmelící účinek, tudíž opět odstraní nebo minimalizuje nedokonalosti či nedostatky. Po zaschnutí této vrstvy byl odlitek ještě jednou obroušen, tentokrát už jen jemným smirkovým papírem. Po tomto broušení byla nanесena další vrstva laku.



Obr. 3.23 Nanesení vrstvy laku.

Po obroušení a nalakování odlitku byl řešen problém s doléháním odlitku na nášlapný pedál. Aby plast nedoléhal přímo na kovové plochy a nehrozilo tak jeho poškození, byla na spodní část nástavce připevněna vložka z pěnového materiálu, která bude tlumit nárazy a tlak vyvíjený při šlapání. Na pásové pile byl tento materiál nařezán na požadovanou šířku 5mm, která přesně vyplní mezeru mezi nástavcem a pedálem. Následně byl vyřezán tvar, který kopíruje tvar nástavce. Nejpřesnějšího vyděrování jsme dosáhly pomocí děrovačů a nože. (viz obr 3.24 a 3.25).



Obr. 3.24 Pěnový materiál.



Obr. 3.25 Vyřezaný tvar.

Pěnová vložka je na celé spodní ploše nástavce protože nášlapný pedál lze nastavovat a utahovat dle vlastní potřeby cyklisty (jak již bylo zmíněno v podkapitole 1.2) a v důsledku toho jsou pak dosedací plochy v jiné poloze a dosedají tak na jinou plochu nástavce. Takto vyřezaný tvar byl následně ještě upraven pomocí malých nůžek a jemného smirkového papíru. Tato pěnová vložka je na spodek nástavce přilepena vteřinovým lepidlem.

Upínacím prvkem nástavce jsou čelisti, které obepínají dva různé průměry na nášlapném pedálu. Pro dosažení co největší těsnosti jsou použity dva pryžové pásky, které jsou nalepeny na vnitřní stranu nožiček. Tyto nalepené pásky jsou viditelné na obrázku 3.26. Uchycení nástavce musí být dostatečně pevné, aby nástavec nepadl při otáčení pedálu, a zároveň musí být uchycení takové, aby byla možnost nástavec kdykoliv odejmout bez použití větší síly.



Obr. 3.26 Nalepené pryžové pásky.

Obrázky 3.27 až 3.31 zobrazují výsledek této práce a to nástavec nášlapného pedálu jízdního kola upnutý na nášlapném pedálu. Na obrázcích je vidět, že upnutí je dostatečně pevné, aby nástavec držel i při opačné poloze a nespadaval z pedálu. Nástavec je také připevněn tak, aby mezi ním a ramenem šlapky byla dostatečná mezera a nedocházelo ke kolizi nebo vzájemnému otírání.



Obr. 3.27 Upnutý nástavec.



Obr. 3.28 Upnutý nástavec.



Obr. 3.29 Upnutý nástavec.



Obr. 3.30. Pedál s nástavcem upnutý na jízdním kole.



Obr. 3.31. Pedál s nástavcem upnutý na jízdním kole.

## 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Předmětem této kapitoly je zhodnocení a porovnání nákladů na výrobu nástavce nášlapného pedálu za pomoci dvou různých výrobních technologií. První technologií je technologie FDM, druhou technologií je metoda odlévání plastu do silikonové formy. Pro obě tyto technologie byly vypočítány náklady na výrobu součásti a následně porovnány.

### 4.1 Náklady na výrobu modelu pomocí 3D tiskárny uPrint

Do nákladů na výrobu modelu metodou FDM spadá pouze spotřebovaný materiál. Cena materiálu stavebního a materiálu pro stavbu podpor a lešení je stejná. Objem, ze kterého lze spočítat konečnou cenu 3D tisku byl uveden v programu CatalystEX. Cena materiálu je 14,4 Kč/cm<sup>3</sup>.

Tab. 4.1 Použitý materiál

Objem stavebního materiálu [cm <sup>3</sup> ]	Objem podpůrného materiálu [cm <sup>3</sup> ]	Celkový objem [cm <sup>3</sup> ]
56,257	9,504	<b>65,761</b>

Finální náklady jsou následně spočítány dle vztahu 4.1.

$$N_{CI} = (V_s \cdot N) + (V_p \cdot N) \quad (4.1)$$

Kde:

$N_{CI}$ [Kč]	-	Celkové náklady na 3D tisk
$N$ [Kč/cm <sup>3</sup> ]	-	Náklady za cm <sup>3</sup> spotřebovaného materiálu
$V_s$ [cm <sup>3</sup> ]	-	Objem stavebního materiálu
$V_p$ [cm <sup>3</sup> ]	-	Objem podpůrného materiálu

$$N_{CI} = (56,257 \cdot 14,4) + (9,504 \cdot 14,4) = 946,96 \text{ Kč} \quad (4.1)$$

## 4.2 Náklady na výrobu modelu odléváním do silikonové formy

Náklady pro tuto výrobní technologii zahrnují jak náklady na výrobu silikonové formy, materiál pro výrobu odlitků tak i cenu vytištěného modelu, bez kterého bychom se neobešli, jelikož byl předmětem při tvorbě silikonové formy

### 4.2.1 Náklady na výrobu silikonové formy

Do nákladů pro výrobu silikonové formy je nutno počítat silikon SILASTIC T-4 a tužidlo. Tyto dvě složky jsou smíchány v poměru 10:1. 5 kg silikonu SILASTIC T-4 stojí 4 140 Kč, což je 828 Kč/kg a v přepočtu na jeden gram je cena 0,828 Kč/g. Cena tužidla je 414 Kč za 0,5 kg tudíž také 0,828 Kč/g. Náklady na výrobu silikonové formy lze spočítat dle vztahu (4.2.1)

$$N_{CIA} = (m_s \cdot N_s) + (m_t \cdot N_t) \quad (4.2.1)$$

Kde:  $N_{CIA}$  [Kč] - Celkové náklady na výrobu silikonové formy

$m_s$  [g] - Hmotnost použitého silikonu

$N_s$  [Kč/g] - Náklady na 1g silikonu

$m_t$  [g] - Hmotnost použitého tužidla

$N_t$  [Kč/g] - Náklady na 1g tužidla

$$N_{CIA} = (900 \cdot 0,828) + (90 \cdot 0,828) = 819,72 \text{ Kč} \quad (4.2.1)$$

Tab. 4.2.1 Náklady na výrobu silikonové formy

	Spotřeba [g]	Cena [Kč/g]	Celková cena [Kč]
Silikon	900	0,828	745,2
Tužidlo	90	0,828	74,5
<b>Celkem</b>			<b>819,72</b>

#### 4.2.2 Náklady na výrobu odlítků

Pro výrobu odlítků byl využit již dříve zmíněný dvousložkový materiál EBALTA SG 2000 A+B. Směs je v poměru 100:100 a cena obou složek je 237 Kč/kg tedy 0,237 Kč/g. Výsledné výrobní náklady jsou vypočítány dle vztahu (4.2.2)

$$N_{CII B} = (m_A \cdot N_A) + (m_B \cdot N_B) \quad (4.2.2)$$

Kde: $N_{CII B}$ [Kč]	-	Celkové náklady na potřebný materiál k odlévání
$m_A$ [g]	-	Hmotnost použité složky A
$N_A$ [Kč/g]	-	Cena složky A
$m_B$ [g]	-	Hmotnost použité složky B
$N_B$ [Kč/g]	-	Cena složky B

$$N_{CII B} = (35 \cdot 0,237) + (35 \cdot 0,237) = 16,59 \text{ Kč} \quad (4.2.2)$$

Do finálních nákladů na výrobu prvního modelu metodou odlévání je nutno započítat náklady na vytisknutí modelu 3D tiskárnou uPrint, výrobu silikonové formy a odlití modelu do silikonové formy. Tento výpočet popisuje vztah 4.2

$$N_{CII} = N_{CI} + N_{CII A} + N_{CII B} \quad (4.2)$$

Kde: $N_{CII}$ [Kč]	-	Celkové náklady na výrobu prvního modelu metodou odlévání
$N_{CI}$ [Kč]	-	Celkové náklady na 3D tisk
$N_{CII A}$ [Kč]	-	Celkové náklady na výrobu silikonové formy
$N_{CII B}$ [Kč]	-	Celkové náklady na potřebný materiál k odlévání

$$N_{CII} = 946,96 + 819,72 + 16,59 = 1\,783,3 \text{ Kč}$$

Celkové náklady na výrobu prvního modelu metodou odlévání jsou 1 783,3 Kč. Vzhledem k tomu, že silikonová forma je nadále použitelná, cena každého dalšího odlévaného kusu je 16,59 Kč.

### 4.3 Porovnání nákladů metody 3D tisku a odléváním do silikonové formy

S ohledem na životnost silikonové formy jsme schopni metodou odlévání vyrobit přibližně 35 kusů. Při výrobě součásti metodou FDM je cena vždy stejná, u metody odlévání do silikonové formy se s počtem odlitých kusů zvyšuje její výhodnost, jelikož celkové náklady klesají. Konkrétní porovnání těchto dvou technologií je propočítáno právě pro počet 35 kusů. Vztah 4.3 určuje celkové náklady na výrobu technologií FDM, vztah 4.4 určuje celkové náklady na výrobu metodou odlévání do silikonové formy.

Jelikož je po výrobě technologií FDM i technologií odlévání do silikonové formy nutné součást brousit a nanášet na ni vrstvy laku s tmelícími účinky, nejsou tyto náklady přičteny k výrobním nákladům, protože by nehrály žádnou významnou roli.

Celkové náklady na výrobu technologií FDM

$$N_{C/FDM} = N_{CI} \cdot n \quad (4.3)$$

Kde:  $N_{C/FDM}$  [Kč] - Celkové náklady na výrobu technologií FDM  
 $N_{CI}$  [Kč] - Náklady na tisk jednoho kusu  
 $n$  [-] - Počet tisknutých kusů

$$N_{C/FDM} = 946,96 \cdot 35 = 33\,143,6 \text{ Kč} \quad (4.3)$$

Celkové náklady na výrobu metodou odlévání do silikonové formy

$$N_{C/SF} = N_{CI} + N_{CIIA} + (N_{CII B} \cdot n) \quad (4.4)$$

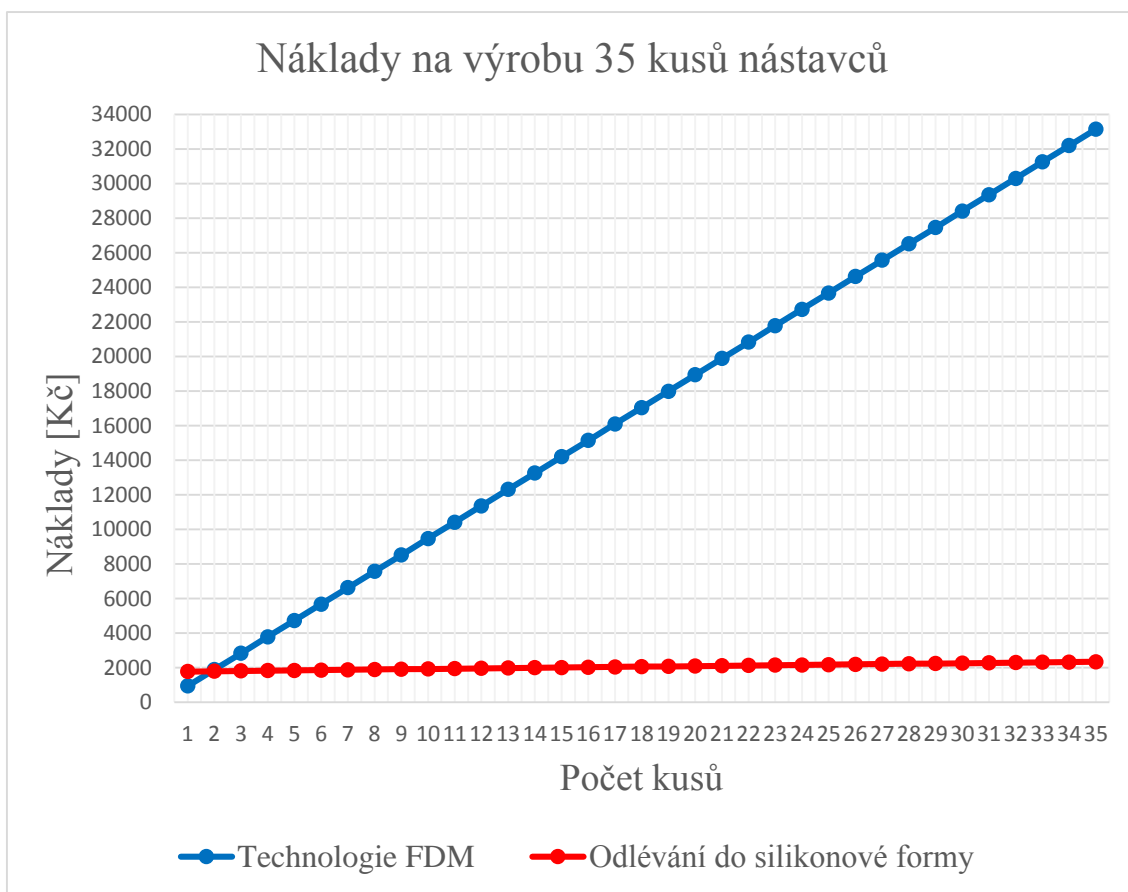
$$N_{FIN} = \frac{N_{C/SF}}{n} \quad (4.5)$$

Kde:  $N_{C/SF}$  [Kč] - Celkové náklady na výrobu metodou odlévání  
 $N_{CI}$  [Kč] - Náklady na výrobu modelu technologií FDM  
 $N_{CIIA}$  [Kč] - Náklady na výrobu silikonové formy  
 $N_{CII B}$  [Kč] - Náklady na materiál k odlévání  
 $n$  [-] - Počet odlévaných kusů  
 $N_{FIN}$  [Kč] - Finální náklady na výrobu jednoho kusu

$$N_{C_{SF}} = 946,96 + 819,72 + (16,59 \cdot 35) = 2\,347,3 \text{ Kč} \quad (4.4)$$

$$N_{FIN} = \frac{2\,347,3}{35} = 67 \text{ Kč} \quad (4.5)$$

Tyto výpočty (výp. 4.4, výp. 4.5) potvrzují, že výroba nástavce je výhodnější metodou odlévání do silikonové formy. Finančně výhodnější se tato metoda stává už při výrobě druhého kusu. Pokud silikonová forma umožní odlít 35 kusů, je pak cena jednoho kusu pouze 67 korun. Porovnání nákladů obou technologií je viditelné na obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Graf nákladů na výrobu 35 kusů nástavců.

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřená na návrh konstrukce a výrobu nástavce nášlapného pedálu jízdního kola využívaného při jízdě bez cyklistické obuvi. První část práce byla věnována krátké historii jízdních kol, nášlapných pedálů s cyklistickými tretrami a osvětlení problému, který je v této práci řešen. Další část práce popisuje využití moderních technologií při výrobě dané součásti, v tomto případě technologie FDM. Práce také popisuje veškeré postupy při výrobě součásti pomocí odlévání do silikonové formy.

V praktické části byla prvním krokem tvorba virtuálního 3D modelu v programu Autodesk Inventor, což je parametrický software od vývojáře Autodesk. Virtuální model byl exportován do souboru, který je možné číst v softwaru CatalystEX. Tento program je schopen nastavovat vlastnosti a veškeré požadavky pro samotný 3D tisk. 3D tisk probíhal v tiskárně Dimension uPrint s využitím ABSplus materiálu. Závěrem této části bylo odstranění podpurného materiálu, očištění modelu a nanesení tmelící vrstvy. Takto vzniklý a ošetřený model byl následně předmětem pro tvorbu silikonové formy.

Pro výrobu silikonové formy byl nejprve zkonstruován skleněný rám, do kterého byl umístěn vytištěný model. Při umístění modelu byl použit formovací materiál a takto připravený model byl natřen separátorem a následně byla nalita první část silikonové formy. Po následném ztuhnutí a otočení formy byla forma dokončena dolitím druhé části formy. Silikonová forma byla vyrobena z materiálu SILASTIC T-4 v kombinaci silikonu a tužidla v poměru 10:1.

Při následném odlévání byla použita dvousložková pryskyřice EBALTA SG 2000 A+B. Tyto složky byly namíchány v poměru 100:100 a důsledkem jejich smíchání byla exotermická reakce a po neprodleném odlití vytvrzení plastu v silikonové formě. Po vyjmutí odlitku ze silikonové formy byly odstraněny úzké blány plastu vzniklé v mezerách formy a odlitek byl upraven pomocí pilníků a smirkových papírů.

Ve výpočtech v technicko-ekonomickém zhodnocení byly srovnány obě dvě technologie pro výrobu součásti. Vzhledem k velikosti vyráběné součásti je zřetelné, že technologie odlévání do silikonové formy je nesrovnatelně levnější než technologie FDM už od třetího vyráběného kusu, druhý vyráběný kus je hraniční, je sice dražší, ale v případě ušetření času potřebného na výrobu silikonové formy by byla stále ještě zvolena metoda FDM.

Využití moderních technologií jako je technologie FDM a následné odlévání do silikonové formy, jak tomu bylo v této práci, nepochybně urychlilo celý vývoj a výrobu součásti. Součásti vyráběné metodou FDM mívají dobré mechanické vlastnosti a často mohou být přímo využívány v provozu. Nástavec nášlapného pedálu vyrobený pomocí technologie FDM by bylo také vzhledem k jeho vlastnostem možné použít avšak projevilo by se to velice nepříznivě na finančních nákladech výroby. Tento vytištěný model tedy sloužil jen jako předmět prototypu a pro výrobu silikonové formy.

Po upnutí a otestování pedálu při jízdě na jízdním kole bylo potvrzeno, že součást je plně funkční a pro svůj účel je spolehlivě použitelná.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. Vydání. Brno: CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

[2] Cyklistika, [www.kolemkola.cz](http://www.kolemkola.cz). [online]. [vid. 15.2.2016]. Dostupné z: <http://www.kolemkola.cz/cyklistika.html>

[3] Historie kola, Kola-Cirkl. [online]. [vid. 15.2.2016]. Dostupné z: <http://www.kola-cirkl.cz/historie-a-pouziti-kola/t-343/>

[4] Počátky jízdního kola, Bicycle History. [online]. [vid. 15.2.2016]. Dostupné z: <http://www.bicyclehistory.net/bicycle-inventor/pierre-michaux/>

[5] Nášlapné pedály, bike-eshop. [online]. [vid. 16.2.2016]. Dostupné z: <http://www.bike-eshop.cz/pedaly-naslapne>

[6] Cyklistické tretry, The National Museum of American History. [online]. [vid. 16.2.2016]. Dostupné z: [http://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah\\_1432812](http://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah_1432812)

[7] Autodesk Inventor, EDULEARN. [online]. [vid. 22.2.2016]. Dostupné z: [http://www.edulearn.com/article/what\\_is\\_autodesk\\_inventor.html](http://www.edulearn.com/article/what_is_autodesk_inventor.html)

[8] Autodesk Inventor, AUTODESK. [online]. [vid.22.2.2016]. Dostupné z: <http://www.autodesk.cz/products/inventor/features/all>

[9] Rapid Prototyping, CAD.cz. [online]. [vid. 5.3.2016]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/component/content/article/4184.html>

[10] Rapid Prototyping, Ústav strojírenské technologie. [online]. [vid.5.3.2016]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto\\_bak/cv\\_STV\\_04\\_Aditivni\\_technologie\\_metody\\_Rapid\\_Prototyping.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf)

[11] FDM, Engatech. [online]. [vid. 15.3.2016]. Dostupné z: <http://engatech.com/difference-fdm-polyjet-3d-printing/>

[12] Rapid Prototyping, FDM, Evektor. [online]. [vid. 15.3.2016]. Dostupné z: <http://www.evektor.cz/cz/rapid-prototyping>

[13] 3D tisk plastů, Ústav konstruování. [online]. [vid. 15.3.2016]. Dostupné z: <http://3dlaboratory.cz/3d-tisk-plastu/>

[14] Program CatalystEX, software.informer. [online]. [vid. 20.3.2016]. Dostupné z: <http://catalystex.software.informer.com/>

[15] 3D tisk, materiály pro 3D tisk, Stratasys. [online]. [vid. 22.3.2016]. Dostupné z:  
<http://www.stratasys.com/3d-printers/idea-series/uprint-se>

[16] Rapid Prototyping, Stratasys. [online]. [vid. 22.3.2016]. Dostupné z:  
<http://www.stratasys.com/solutions/rapid-prototyping>

[17] Rapid prototyping, efunda. [online]. [vid. 22.3.2016] Dostupné z:  
[http://www.efunda.com/processes/rapid\\_prototyping/intro.cfm](http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm)

[18] Materiál pro odlévání, Ebalta. [online]. [vid. 27.3.2016] Dostupné z:  
<http://www.ebalta.cz/cz/katalog-produktu/rychleschnouci-lici-pryskyrice/pryskyrice-neobsahujici-plniva/sg-2000-s%C2%A0-komp-a%C2%A0-b>

[19] Silikonový kaučuk, Ebalta. [online]. [vid. 25.3.2016] Dostupné z:  
<http://www.ebalta.cz/cz/katalog-produktu/silikony//silastic-t-4>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis symbolu
$V$	$[\text{cm}^3]$	Objem
$N_{CI}$	$[\text{Kč}]$	Náklady na tisk jednoho kusu
$N$	$[\text{Kč}/\text{cm}^3]$	Náklady spotřeb. materiálu
$V_s$	$[\text{cm}^3]$	Objem stavebního materiálu
$V_p$	$[\text{cm}^3]$	Objem podpůr. materiálu
$N_{CIIA}$	$[\text{Kč}]$	Náklady na výrobu silikonové formy
$m_s$	$[\text{g}]$	Hmotnost silikonu
$N_s$	$[\text{Kč}/\text{g}]$	Cena silikonu
$m_t$	$[\text{g}]$	Hmotnost tužidla
$N_t$	$[\text{Kč}/\text{g}]$	Cena tužidla
$N_{CII B}$	$[\text{Kč}]$	Náklady na materiál k odlévání
$m_a$	$[\text{g}]$	Hmotnost složky A
$N_a$	$[\text{Kč}/\text{g}]$	Cena složky A
$m_b$	$[\text{g}]$	Hmotnost složky B
$N_b$	$[\text{Kč}/\text{g}]$	Cena složky B
$N_{CII}$	$[\text{Kč}]$	Celk. náklady na výrobu prvního modelu metodou odlévání
$N_{C/FDM}$	$[\text{Kč}]$	Celkové náklady na výrobu technologií FDM
$N_{C/SF}$	$[\text{Kč}]$	Celkové náklady na výrobu metodou odlévání
$N_{FIN}$	$[\text{Kč}]$	Finální náklady na výrobu jednoho kusu
$n$	$[-]$	Počet kusů

Zkratka	Popis zkratky
2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
RP	Rapid Prototyping
FDM	Fused Deposition Modeling
CAD	Computer aided design (počítačem podporované navrhování)
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
STL (.stl)	Stereo Litography
CNC	Computer Numerical Control

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1: Silikonový kaučuk SILASTIC T-4 [19]

Příloha 2: Pyskyřice EBALTA SG 2000 A+B [18]

## 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	-	<b>100</b>	<b>10</b>
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
Protážení	EN ISO 527	%	400
Odolnost proti přetržení	DIN ISO 34-1	kN/m	-
Hustota při 23°C	-	g/cm <sup>3</sup>	-
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 mísicí 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 smrštivosti.

### **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 cinu, 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 omezi na náhradní dodávku nebo vrácení kupní ceny daného produktu. Dow Corning neručí za náhodné nebo následné škody.

## SG 2000 / Komp. A + B

Označení : vysoce jakostní, velmi tekutá rychletvrdnoucí lící hmota

Pryskyřice : SG 2000 Komp. A

Tužidlo : SG 2000 Komp. B

Barva : slonová kost

**Použití** - slévárenské modely

- jaderníky
- formovací desky
- negativy
- prototypy
- vakuové hlubokotažné formy
- kopírovací modely

**Vlastnosti materiálu** - neplněná

- velmi tekutá
- vysoká možnost plnění
- dokonalé celkové vytvrzení
- velmi vysoká pevnost
- vysoká tepelná odolnost

### Informace pro zpracování

Výrobek		Směs SG 2000 / Komp. A + B	Pryskyřice SG 2000 Komp.A	Tužidlo SG 2000 Komp. B
Barva		slonová kost	bílá	žlutavá
Poměr míchání	hm. díly		100	100
Viskozita při 25°C	mPas	50 ± 5	80 ± 10	25 ± 5
Hustota při 20°C	g/cm <sup>3</sup>	1,10 ± 0,02	1,02 ± 0,02	1,14 ± 0,02
Čas zprac. 200g/20°C	minut	4	-	-
Vytvrzení při pokojové tep.	hod.	0,5 - 1	-	-

### Fyzikální informace

Vlastnosti	Typ zkoušky	Jednotka	Hodnota
Pevnost v ohybu	EN ISO 178	MPa	57 ± 5
E-Modul ( v ohybu )	EN ISO 178	MPa	1500 ± 100
Deformace ohybem v okamžiku lomu	EN ISO 178	%	7,5 ± 0,4
Pevnost v tlaku	EN ISO 604	MPa	45 ± 5
Rázová houževnatost ( Charpy )	EN ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	24 ± 4
Tepelná odolnost tvaru dle Martens	DIN 53458	°C	66 ± 3
Tvrdost Shore	DIN 53505	Shore D	72 ± 2
Koeficient délkové roztažnosti	DIN 53752	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	-
Lineární smrštění	interní	%	-

### Forma dodání:

Karton:

Jednotlivé balení: Pryskyřice SG 2000 Komp.A 1 kg; 5 kg; 25 kg  
Tužidlo SG 2000 Komp.B 1 kg; 5 kg; 25 kg

## **Poznámky ke zpracování**

Plniva by se měla do jednotlivých komponent vmíchat tak, aby měli asi stejnou viskozitu. Poté se dají obě komponenty velmi dobře společně promíchat.

Při malém množství a při dostatečných zkušenostech, je také možné nejdříve smíchat nenaplněné komponenty a teprve poté vmíchat plnivo, aniž by byla doba zpracování pro lití příliš krátká.

Odlévat na suchý a čistý povrch, který byl předem ošetřen vhodným separátorem.

## **Všeobecně**

U řady SG 2000 se jedná o vysoce hodnotné, téměř bezzápachové dvoukomponentní polyuretanové licí hmoty bez vmíchaného plniva. Toto plnivo se vmíchá teprve při promíchání obou komponent. K výběru jsou různé pryskyřičné komponenty, které se zpracovávají se stejným tužidlem. Jednotlivé typy se liší v době zpracování a vytvrzení.

Rychlé vytvrzení těchto materiálů způsobuje krátkou dobu doformování. Velmi nízká viskozita nám umožňuje vysoký stupeň plnění. Přidáním různých druhů plniv ovlivníme výsledné vlastnosti a pevnosti.

Nádoby s komponenty by se měly před použitím pečlivě promíchat (protřepat).

Stupeň plnění a způsob dodání plniv jsou uvedeny ve zvláštní tabulce.

Použitím surovin se mohou u výrobku vyskytnout barevné rozdíly, které nemají vliv na kvalitu a vlastnosti pryskyřice.

## **Skladování**

V temperovaných místnostech ( 18 – 25°C ) v neotevřeném originálním balení lze skladovat 6 měsíců.

Rozdělaná balení vždy uzavřít a co nejdříve zpracovat.

## **Ochranná opatření**

Při zpracování tohoto produktu by se mělo dbát ochranných opatření odborového svazu chemického průmyslu.

Řídit se bezpečnostními radami.

## **Likvidace**

Vytvrzené materiály lze po domluvě s příslušným úřadem likvidovat jako domovní odpad.

Nevytvrzené výrobky se musí dle domluvy s příslušným úřadem náležitě zlikvidovat.

## **K upozornění**

Tyto údaje a doporučení byly stanoveny s největší starostlivostí na základě důkladných pokusů a dlouholetých, praktických zkušeností. Protože není možné kontrolovat zpracování přímo u spotřebitele, možnosti použití a pracovní metody jsou velice různorodé, není možné přebírat záruku za jednotlivé případy. Tyto údaje jsou nezávaznými informacemi nejsou zárukou za určité příznaky nebo vlastnosti produktu. Naše informace neosvobozují zákazníka od provedení vlastních průkazných zkoušek ve vztahu k používání a postupům.

V případě nutnosti záruky za údaje je nutná doplňující písemná dohoda.